

О целесообразности применения подземного обогатительного комплекса при освоении Воронецкого железорудного месторождения

Соколов И. В.¹, Соломеин Ю. М.^{1*}, Смирнов А. А.¹, Никитин И. В.¹

¹ Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

*e-mail: geotech@igduran.ru

Реферат

Актуальность темы. При отработке крупных железорудных месторождений Курской магнитной аномалии одной из основных проблем является обеспечение экологической безопасности, в частности максимального сохранения плодородных земель. Подземный способ разработки снижает техногенную нагрузку на природную среду и позволяет разместить большую часть отходов горного производства в отработанном пространстве. Однако главным источником негативного воздействия на окружающую среду является обогатительное производство, занимающее значительные площади и характеризующееся интенсивными вредными выбросами. Размещение обогатительных комплексов под землей существенно уменьшает это воздействие.

Цель исследований – оценка целесообразности подземного размещения обогатительного комплекса при отработке Воронежского железорудного месторождения.

Методы исследований. В работе использован комплексный метод исследований, включающий обоснование рациональной схемы обогащения руды, конструирование подземного обогатительного комплекса и технико-экономическое сравнение.

Результаты. Разработана и представлена схема обогащения руды с получением высококачественного концентрата и выбрана цепь механизмов и аппаратов для всех стадий переработки руды, включая ее дробление, измельчение, магнитное обогащение и обезвоживание полученных продуктов. На основании параметров выбранного оборудования показана его компоновка в подземном пространстве, выполнен расчет объема камер и выработок обогатительного комплекса. Показано, что весь объем хвостов обогащения размещается в выработанном пространстве добычных камер подземного рудника без подъема их на поверхность.

Выводы. Выполнена ориентировочная оценка эффективности расположения обогатительного комплекса под землей и показано, что стоимость строительства подземного комплекса сопоставима со стоимостью строительства аналогичного поверхностного обогатительного комплекса. Размещение процесса обогащения под землей позволяет существенно сократить площадь земельного отвода предприятия, выдавать на поверхность только концентрат и исключить негативное воздействие обогатительного производства на окружающую среду.

Ключевые слова: железорудное месторождение; подземный рудник; подземный обогатительный комплекс; дробление руды; измельчение руды; магнитное обогащение; концентрат; хвосты обогащения.

Введение. Одной из проблем освоения крупных железорудных месторождений Курской магнитной аномалии (КМА) является обеспечение экологической безопасности, в частности максимального сохранения плодородных земель центральной

России [1–8]. Применение подземного способа разработки снижает техногенную нагрузку на природную среду и позволяет разместить большую часть отходов горного производства в отработанном пространстве. Весьма серьезным источником негативного воздействия на окружающую среду является обогатительное производство, занимающее значительные площади и характеризующееся интенсивными вредными выбросами.

Целесообразность использования подземных обогатительных комплексов (ПОК) обосновывается в ряде работ [9–11]. Однако в этих работах рассматриваются общие принципиальные вопросы применения ПОК, без анализа реальных схем обогащения, объемов строительства и увязки с технологией добычи руды на руднике. Рассмотрение этих вопросов и решение о целесообразности использования ПОК возможно применительно к освоению конкретного месторождения. В качестве такого примера принято Воронежское месторождение железных руд, расположенное на хорошо освоенной территории КМА, занятой в основном сельскохозяйственными угодьями.

Характеристика условий эксплуатации Воронежского месторождения и принятой схемы обогащения. Месторождение представляет собой субгоризонтально залегающее рудное тело железистых кварцитов протяженностью около 7 км при средней ширине 2 км и мощности 240 м. Среднее содержание в руде железа общего $Fe_{\text{общ}} = 37\%$ и магнетитового $Fe_{\text{магн}} = 31\%$. Балансовые запасы месторождения по категории C_2 составляют около 1,5 млрд т, прогнозные ресурсы категории P_1 и P_2 – в два раза больше.

Технические решения по вскрытию и технологии добычи руды детально описаны в [12]. Месторождение делится на два шахтных поля, подземную разработку ведут двумя шахтами, объединенными одним рудником производственной мощностью по сырой руде 12 млн т в год. Первая очередь обогатительного комплекса рассчитана на переработку 6 млн сырой руды в год, вторая очередь строится по мере ввода в эксплуатацию второй шахты.

Железистые кварциты месторождения крупнозернистые, технологически среднеизмельчаемы и легкообогащаемы. Эффективной схемой является магнитное обогащение руды с введением на первом этапе сухой магнитной сепарации (СМС), на втором – мокрой магнитной сепарации (ММС) и обезвоживанием концентрата и хвостов [10, 13, 14]. Принципиальная схема ПОК показана на рис. 1.

Добытая руда дробится в участковых дробилках, установленных в шахтном поле, и направляется в бункеры дробильного отделения ПОК, откуда через колосниковый грохот поступает в щековые дробилки среднего дробления. Для мелкого дробления принимаются конусные дробилки. Мелкодробленая руда обогащается на СМС с получением промпродукта и сухих хвостов СМС.

Переработка промпродукта включает три стадии измельчения и четыре стадии ММС с выводом хвостов после каждой стадии. Первая стадия измельчения осуществляется в стержневых мельницах, вторая и третья стадии – в шаровых мельницах, работающих в замкнутом цикле с гидроциклонами. Сливы гидроциклонов обесшламливаются в магнитных дешламаторах [15].

Первая стадия ММС-I выполняется на сливе стержневой мельницы; вторая стадия ММС-II – на сливе шаровой мельницы; третья и четвертая стадии (ММС-III и ММС-IV) выполняются на песках дешламаторов второй и третьей стадий. Третья и четвертая стадии ММС-III и ММС-IV осуществляются в два приема (основная и перечистная операции). Всего для мокрого магнитного обогащения используются шесть операций ММС.

Показатели обогащения руды приведены в табл. 1.

На основании схемы мокрого магнитного обогащения, объемов перерабатываемой продукции и производительности аппаратов составлен перечень основного обогатительного оборудования (табл. 2).

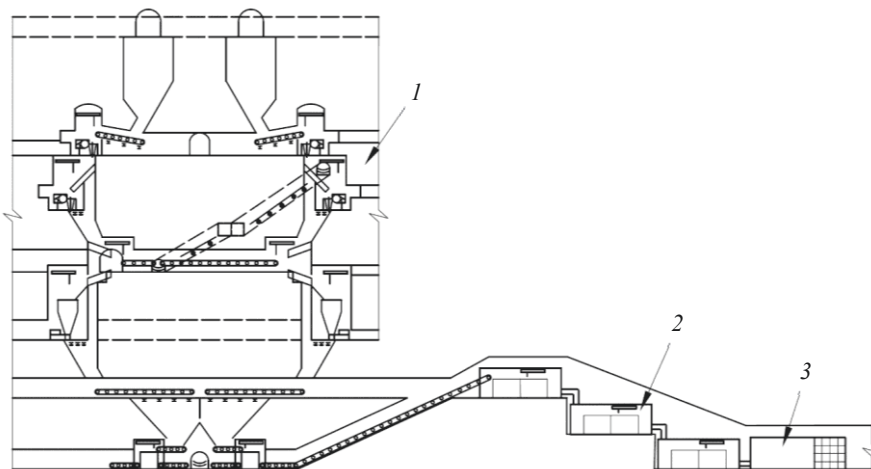


Рисунок 1. Принципиальная схема подземного обогатительного комплекса:
 1 – отделение дробления и СМС; 2 – отделение ММС; 3 – отделение обезвоживания концентрата и хвостов

Figure 1. Schematic diagram of underground processing facility:
 1 – dry magnetic separation and crushing department; 2 – wet magnetic separation department; 3 – concentrate and tailings dehydration department

Полученный концентрат подвергается обезвоживанию до содержания воды 8–10 %. Для сгущения концентрата предусмотрен сгуститель СП 8А, обеспечивающий получение пульпы с содержанием твердого 60–65 %. Пульпа направляется на фильтрование вакуумной дисковой установкой с керамическими фильтрующими элементами типа Керамек или КДФ-150. После фильтрования получается кек с влажностью 7–8 % и фильтрат с содержанием твердого до 0,2 г/л. Кек выдается в виде готового концентрата, фильтрат направляется в систему оборотного водоснабжения.

Таблица 1. Показатели магнитного обогащения руды месторождения
 Table 1. Indicators of ore magnetic separation at the deposit

Продукт	Выход, %	Содержание, %		Извлечение, %		Металл, кг/т	
		Fe _{общ}	Fe _{магн}	Fe _{общ}	Fe _{магн}	Fe _{общ}	Fe _{магн}
Руда	100,0	35,2	29,5	100,0	100,0	352,0	295,0
Промпродукт СМС	84,1	40,2	34,5	96,1	98,4	338,1	290,1
Хвосты СМС	15,9	11,4	3,0	3,9	1,6	13,9	4,9
Концентрат ММС	43,3	69,7	66,0	85,7	96,9	301,8	285,8
Хвосты ММС	41,1	11,3	1,0	10,3	1,5	36,3	4,1
Общие хвосты	57,0	11,3	1,6	14,3	3,1	50,2	9,0

Хвосты ММС полностью используются для закладки отработанных камер [16]. Размещение шламов ММС в камерах связано с рядом технологических трудностей [17], поэтому рекомендуется использовать хвосты в виде сухой закладки (с влажностью до 8–10 %) или в виде пасты (с влажностью 18–20 %). И в том, и в другом

случае необходимо сгущение и фильтрование хвостов по аналогичной ранее приведенной технологии.

В результате обогащения из добытых 6000 тыс. т руды получается:

- 5046 тыс. т промпродукта СМС;
- 954 тыс. т сухих хвостов СМС;
- 2598 тыс. т концентрата ММС с содержанием железа 69,7 %;
- 2448 тыс. т хвостов ММС в виде шламов.

Полученный концентрат может быть использован непосредственно в металлургическом производстве или подвергнут дальнейшему флотационному обогащению с получением суперконцентратов с содержанием железа около 72 %.

Таблица 2. Основное оборудование для магнитного обогащения руды
Table 2. Main equipment for ore magnetic separation

Наименование операции	Тип оборудования	Производительность, т/ч		Количество, ед.	Размеры (Д×Ш×В), мм
		операции	оборудования		
I ст. измельчения	Мельница МСЦ 3600 × 5500	790	250	3	14 500 × 8400 × 5700
II ст. измельчения	Мельница МШЦ 4500 × 6000	540	300	2	16 000 × 9100 × 6800
III ст. измельчения	Мельница МШЦ 4500 × 6000	450	300	2	16 000 × 9100 × 6800
I–VI ст. ММС	Сепаратор ПБМ-ПП-150 × 200	2700	140	20	3000 × 2700 × 2600
Классификация (две стадии)	Гидроциклон ГЦ-710	840	240	4	1200 × 1400 × 3500
Обесшламливание (две стадии)	Дешламатор МД-9	840	220	4	9440 × 9200 × 8300

Комплекс камер и выработок для размещения ПОК. ПОК располагается в пределах второго этажа месторождения в крепких ненарушенных породах вблизи ствола шахты. На основе принятого перечня оборудования скомпоновано расположение аппаратов и механизмов обогатительного комплекса в подземных камерах [7]. При этом предусмотрена установка электрооборудования, вспомогательного оборудования для монтажа и ремонта (подъемные краны, тали, монтажные лебедки), проходка вспомогательных выработок для доставки оборудования, вентиляции и обслуживания.

Для сокращения затрат на перемещение материала принято каскадное расположение дробилок в пределах высоты одного этажа – 100 м [18]. При компоновке расположения дробилок использовался опыт сооружения подземных дробильных комплексов [19].

Выработки комплекса дробления и стадии СМС показаны в табл. 3.

Для расположения аппаратов магнитного обогащения предусматривается строительство пяти параллельных камер для размещения крупногабаритного оборудования: три для мельниц, две для дешламаторов. Перпендикулярно к ним располагаются камеры для размещения магнитных сепараторов и гидроциклонов.

Длина камеры для установки трех стержневых мельниц определяется их суммарной длиной и расстоянием между ними 12 м, местом для подготовки и транспортировки стержней, местом для установки монтажной лебедки и другого необходимого оборудования и принимается равной 100 м. Ширина камеры принимается

по ширине мельниц с необходимыми зазорами 11 м, высота – с учетом установки мостового крана 12 м.

Камеры для установки двух шаровых мельниц принимаются длиной 75 м, шириной и высотой 12 м. Камеры для установки двух дешламаторов принимаются длиной по 50 м, шириной 11,5 м, высотой 12 м. Объем камер для установки магнитных сепараторов рассчитывался, принимая длину камеры сечением 25 м² на 1 сепаратор – 7 м, на 1 гидроциклон – 5 м.

Таблица 3. Выработки отделения СМС
Table 3. Workings of the dry magnetic separation department

Наименование	Длина, м	Сечение, м ²	Объем, м ³	Количество	Общий объем, м ³
Приемный бункер руды	–	–	1930	2	3860
Камера среднего дробления	15	68,2	1023	2	2046
Прочие выработки горизонта 1	–	–	–	–	1496
Камера грохочения	14,5	64,4	934	2	1868
Прочие выработки горизонта 2	–	–	–	–	1708
Камера конусной дробилки	–	–	1333	2	2666
Прочие выработки горизонта 3	–	–	–	–	1632
Рудоспуск	7	6	42	2	84
Выработки горизонта питателя	–	–	–	–	3723
Усреднительный бункер	–	–	–	1	820
Камеры СМС	14,5	36	522	2	1044
Прочие выработки горизонта 4	–	–	–	–	2956
Бункер хвостов СМС	–	–	720	2	1440
Бункер промпродукта СМС	–	–	1300	1	1300
Вентиляционный восстающий	100	6	600	2	1200
Вспомогательный уклон	690	16	11 040	1	11 040
<i>Всего выработок</i>					39 653
<i>Неучтенные 10 %</i>					3967
<i>Итого</i>					43 620

Камеры дробилок и дешламаторов соединяются с вышележащим горизонтом этажа вентиляционными восстающими. Перпендикулярно к ним проходится наклонный съезд для транспортирования оборудования и материалов под углом 10° и сечением 20 м². Камеры размещаются по каскадной схеме для максимального использования самотечной доставки материала. Верхняя камера располагается на 39 м выше горизонта СМС и соединяется с ним конвейерной галереей под углом 12° и конвейерными сбойками к мельницам МСЦ для доставки промпродукта СМС. Сечение галереи 4 м², общая длина этих выработок 315 м.

Камеры для аппаратов обезвоживания предполагается разместить под камерами комплекса ММС. Необходимо строительство трех камер для сгустителей и

сопряженных с ними трех камер для размещения вакуум-фильтров. Комплекс для обезвоживания включает также камеры для размещения насосов оборотного водоснабжения, транспортные, вентиляционные и вспомогательные выработки. Предусмотрена камера управления обогатительным процессом и камера для размещения лаборатории по обработке проб. Перечень и объем выработок отделений ММС, обезвоживания и служебных камер приведен в табл. 4.

Таблица 4. Выработки отделений ММС, обезвоживания и служебных камер
Table 4. Workings of departments of wet magnetic separation, dehydration and service chambers

Наименование	Длина, м	Сечение, м ²	Объем, м ³	Количество	Общий объем, м ³
<i>Отделение ММС</i>					
Камера МСЦ	100	132	13 200	1	13 200
Камеры МШЦ	75	144	14 400	2	28 800
Камеры дешламаторов	50	138	6900	2	13 800
Камеры ММС	7	25	175	20	3500
Камеры гидроциклонов	5	25	125	4	500
Наклонный съезд	200	20,25	4050	1	4050
Сбойки между камерами	22	4	88	8	704
Вентиляционные восстающие	47	4	188	5	940
Конвейерная галерея СМС	190	4	760	1	760
Конвейерные сбойки СМС	125	4	500	1	500
Транспортные выработки	120	20,25	2430	1	2430
<i>Всего</i>					69 184
<i>Неучтенные 10 %</i>					6916
<i>Итого по стадии ММС</i>					76 100
<i>Отделение обезвоживания и служебные камеры</i>					
Камеры сгустителей	10	77	770	3	2310
Камеры фильтрации	45	49	2205	3	6615
Насосная камера	20	25	500	3	1500
Транспортные выработки	300	20,25	6075	1	6075
Вентиляционные выработки	100	4	400	1	400
Вспомогательные выработки	100	10	1000	1	1000
Бункер концентрата	–	–	–	1	3500
Бункер осушенных хвостов	–	–	–	1	3500
Камеры управления	40	20	800	3	2400
Камера лаборатории	50	20	1000	1	1000
Складские помещения	80	20	1600	1	1600
<i>Всего</i>					26 790
<i>Неучтенные 10 %</i>					2679
<i>Итого по комплексу обезвоживания и служебным камерам</i>					29 469

Объем камер и выработок для размещения подземного обогатительного комплекса составляет 149 190 м³, в том числе камер – 95 960 м³, протяженных выработок – 53 230 м³. Кроме того, следует учесть две транспортные выработки большого

сечения (21 м²) для связи с околоствольными дворами на двух горизонтах (ориентировочно по 200 м) и конвейерную галерею для подачи хвостов обогащения на складочный горизонт (ориентировочно 500 м сечением 4 м²), общий объем которых составляет 10 400 м³.

Общий объем горных выработок ПОК составляет 159,6 тыс. м³. Объем горно-капитальных выработок для вскрытия запасов первой очереди строительства рудника составляет 227 тыс. м³ [12]. Общий объем горно-капитальных выработок шахты с учетом ПОК, необходимый для ввода рудника в эксплуатацию, увеличивается на 70 %.

Размещение отходов производства в выработанном пространстве. Основной объем отходов горно-обогажительного производства представляют пустые породы от проходки горных выработок и хвосты обогащения руды (сухие хвосты СМС и шламы ММС). Пустые породы в объеме 387 тыс. м³ образуются в процессе строительства первой очереди рудника и складированы во временный породный отвал. Пустые породы имеют плотность 3,0 т/м³. Сухие хвосты СМС в количестве около 16 % от объема перерабатываемой руды имеют плотность в массиве 3,0 т/м³. Шламы ММС (41 %) после обезвоживания представляют собой сухую или пастообразную массу с содержанием воды 8–18 % и плотностью 3,2 т/м³.

В соответствии с принятой технологией добычных работ и требованием сохранения земной поверхности все отходы размещаются в выработанном пространстве. Нижняя часть камер на высоту 15 м заполняется закладкой с нормативной прочностью 5 МПа, оставшаяся – закладкой с прочностью 1,5 МПа, вторичных камер – неупрочненной закладкой (смесью хвостов СМС и ММС) [13, 17]. Требуемое соотношение соответствующих видов закладки по объему 3 : 17 : 17.

Состав высокопрочной закладки: сухие хвосты 1200 кг/м³, хвосты ММС 1900 кг/м³ и цемент 100 кг/м³; состав малопрочной закладки: сухие хвосты 1200 кг/м³, хвосты ММС 1900 кг/м³ и цемент 40 кг/м³; состав неупрочненной закладки: сухие хвосты 600 кг/м³ и хвосты ММС 2600 кг/м³.

При годовом объеме добычи 6 млн т объем образующегося выработанного пространства составляет 1714 тыс. м³ [12]. Объем полученных хвостов достаточен для заполнения 70 % выработанного объема, т. е. все хвосты обогащения будут размещены в выработанном пространстве. Недостающий материал для закладки восполняется заскладированными пустыми породами от проходки, а при необходимости – породами вскрыши близлежащих карьеров.

Изложенные технические решения приняты на основании практического опыта подземной разработки мощных железорудных месторождений.

Оценка эффективности строительства ПОК. На основе справочных данных строительство обогажительной фабрики на поверхности для переработки 6 млн т сырой железной руды составляет 8–12 млрд р. [17], в том числе ориентировочные затраты на капитальное строительство (промплощадка, основные корпуса и вспомогательные сооружения) – 60 %; приобретение основного и вспомогательного оборудования – 35 %; монтаж оборудования – 5 %.

Капитальные затраты на строительство подземного обогажительного комплекса включают затраты на проведение горно-капитальных выработок комплекса, затраты на строительные-монтажные работы, стоимость основного и вспомогательного оборудования и затрат на его монтаж.

Общий объем камер и выработок для размещения ПОК составляет 159 590 м³, из них камер – 95 960 тыс. м³, прочих выработок – 63 630 м³.

Выработки обогатительного комплекса имеют значительный срок службы и должны закрепляться тяжелыми типами крепи. По аналогии с горно-капитальными выработками железорудных шахт стоимость их проведения может быть принята для камерных выработок большого сечения – 15 000 р./м³, для прочих выработок – 8000 р./м³ [13].

Затраты на проведение выработок ПОК составят около 1950 млн р.

Затраты на строительные-монтажные работы включают затраты на устройство фундаментов и металлоконструкций для установки оборудования, прокладку коммуникаций (трубопроводов, электрокабелей и пр.) и могут быть приняты в размере 30 % от стоимости горно-капитальных работ – 585 млн р.

Стоимость основного и вспомогательного оборудования принимается по аналогии с поверхностным обогатительным комплексом и составляет 2800 млн р., а с учетом его удорожания на 10 % за счет увеличения числа аппаратов обезвоживания – 3080 млн р. Затраты на монтаж оборудования в подземных выработках из-за необходимости транспортирования крупногабаритных частей агрегатов по стволу и горным выработкам несколько увеличиваются и принимаются в размере 20 % от стоимости оборудования – 616 млн р. Общие затраты на строительство ПОК составляют 6230 млн р. Из-за общности технологической схемы переработки руды можно принять себестоимость обогащения руды на поверхности и под землей одинаковой.

В целом строительство ПОК оказывается дешевле строительства поверхностного обогатительного комплекса. Такой результат нельзя назвать неожиданным, так как в этом случае исключаются затраты на обустройство шламохранилищ, отвалов, складов сырой руды, промпродуктов и хвостов обогащения на поверхности и связывающих их коммуникаций. При этом следует отметить возможность снижения стоимости строительства ПОК за счет применения более современного, производительного и компактного обогатительного оборудования, а также за счет использования специальных методов проходки камерных выработок и прогрессивных видов крепи.

Заключение. Размещение обогатительного комплекса в подземных выработках рудника позволяет в полной мере реализовать принцип безотходного производства при добыче железных руд подземным способом.

Преимущества подземного обогатительного комплекса:

– резкое сокращение площади земель (на 90–95 %), занимаемых промплощадкой рудника;

– практически полная ликвидация неблагоприятного экологического воздействия на окружающую среду как самого обогатительного производства, так и сопутствующих ему открытых складов продуктов обогащения, отвалов и шламохранилищ, дорог и коммуникаций;

– сокращение платежей за земельный отвод, складирование хвостов и экологическое воздействие обогатительного производства, отвалов и шламохранилищ.

При мощности первой очереди подземного рудника 6 млн т руды в год может быть получено 2,6 млн т высококачественного концентрата с содержанием железа 69,7 %. Все хвосты обогащения могут быть размещены в выработанном пространстве шахты без подъема их на поверхность.

Стоимость строительства подземного обогатительного комплекса сопоставима со стоимостью строительства поверхностного комплекса, может быть снижена за счет исключения затрат на обустройство шламохранилищ, отвалов, складов сырой руды, промпродуктов и хвостов обогащения на поверхности и связывающих их коммуникаций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Каплунов Д. Р., Радченко Д. Н., Федотенко В. С., Лавенков В. С. Оценка эффективности перехода подземного рудника к новому технологическому укладу с ростом глубины горных работ // ГИАБ. 2020. № 12. С. 5–15.
2. Адушкин В. В., Анисимов В. Н. О путях реализации геодинамической и геоэкологической безопасности в регионе КМА // Охрана труда и техника безопасности на промышленных предприятиях. 2018. № 4. С. 52–62.
3. Галченко Ю. П., Якушева Е. Д. Мониторинг и оценка состояния среды обитания человека в горнопромышленном регионе Курской магнитной аномалии // Экологические системы и приборы. 2017. № 7. С. 16–22.
4. Pimentel B. S., Gonzalez E. S., Barbosa G. N. O. Decision-support models for sustainable mining networks: fundamentals and challenges // Journal of Cleaner Production. 2016. Vol. 112. P. 2145–2157.
5. Sitorous F., Cilliers J. J., Brito-Parada P. R. Multi-criteria decision making for the choice problem in mining and mineral processing: Applications and trends // Expert Systems with Applications. 2019. Vol. 121. P. 393–417.
6. Rosa J. C. S., Sanchez L. E. Advances and challenges of incorporating ecosystem services into impact assessment // Journal of Environmental Management. 2016. Vol. 180. P. 485–492.
7. Смирнов А. А., Никитин И. В. Об организации экологически чистого производства при освоении крупных железорудных месторождений подземным способом // Экологическая и техносферная безопасность горнопромышленных регионов: Тр. VIII Междунар. конф. Екатеринбург, 2020. С. 280–285.
8. Zhang X., Zhang S., Liu H., Zhao Y. Disposal of mine tailings via geopolymerization // Journal of Cleaner Production. 2021. Vol. 284. 15 p.
9. Пирогов Г. Г. Перспективные технологии подземной добычи руд // Вестник Забайкальского государственного университета. 2017. № 2. С. 28–33.
10. Соколов И. В., Гобов Н. В., Антипин Ю. Г. Систематизация и методика оценки вариантов стратегии освоения железорудных месторождений с применением подземных обогатительных комплексов // ГИАБ. 2015. № 7. С. 101–109.
11. Способ разработки крутопадающих рудных месторождений с подземным обогащением: пат. 2652223 Рос. Федерация. № 2016126357; заявл. 30.06.2016; опубл. 25.04.2018. Бюл. № 12. 5 с.
12. Смирнов А. А., Барановский К. В., Рожков А. А., Соломеин Ю. М. Отработка железорудного месторождения технологией с комбинированной закладкой // ГИАБ. 2021. № 5-1. С. 62–76. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_51_0_62
13. Соколов И. В., Гобов Н. В., Антипин Ю. Г., Соломеин Ю. М. Стратегия освоения железорудных месторождений эколого-ориентированной подземной геотехнологией // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2018. Вып. 2. С. 282–295.
14. Прокопьев С. А., Пелевин А. Е., Прокопьев Е. С., Иванова К. К. Повышение комплексности использования железорудного сырья с помощью винтовой сепарации // Известия вузов. Горный журнал. 2019. № 6. С. 70–80. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-6-70-80
15. Пелевин А. Е., Мушкетов А. А. Выбор и оптимизация оборудования замкнутого цикла измельчения на основе моделей преобразования гранулометрического состава и сепарационных характеристик разделительных аппаратов // Известия вузов. Горный журнал. 2014. № 5. С. 120–128.
16. Ляшенко В. И., Хоменко О. Е., Голик В. И., Мицик М. Ф. Обоснование параметров подземной разработки рудных месторождений с закладкой выработанных пространств // Известия вузов. Горный журнал. 2022. № 1. С. 58–71. DOI: 10.21440/0536-1028-2022-1-58-71
17. Ресурсовоспроизводящая безотходная геотехнология комплексного освоения месторождений Курской магнитной аномалии / С. Г. Лейзерович [и др.]. М.: Горная книга, 2012. 547 с.
18. Подземная обогатительная фабрика: пат. 2565300 Рос. Федерация. № 2014124330; заявл. 11.06.2014; опубл. 20.10.2015. Бюл. № 29. 7 с.
19. Болкисев В. С., Колибаба В. Л., Шереметьев Н. Т. Сооружение подземных дробильных комплексов на горнорудных предприятиях. М.: Недра, 1985. 243 с.

Поступила в редакцию 31 августа 2022 года

Сведения об авторах:

Соколов Игорь Владимирович – доктор технических наук, действительный член Академии горных наук, главный научный сотрудник лаборатории подземной геотехнологии, директор Института горного дела УрО РАН. E-mail: geotech@igduran.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7841-5319>

Соломеин Юрий Михайлович – научный сотрудник лаборатории подземной геотехнологии Института горного дела УрО РАН. E-mail: geotech@igduran.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8226-6894>

Смирнов Алексей Алексеевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории подземной геотехнологии Института горного дела УрО РАН. E-mail: geotech@igduran.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8949-1525>

Никитин Игорь Владимирович – научный сотрудник лаборатории подземной геотехнологии Института горного дела УрО РАН. E-mail: geotech@igduran.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3593-4319>

The advisability of an underground processing facility at the Voronets iron ore deposit

Igor V. Sokolov¹, Iurii M. Solomein¹, Aleksei A. Smirnov¹, Igor V. Nikitin¹

¹ Institute of Mining UB RAS, Ekaterinburg, Russia.

Abstract

Relevance. When mining large iron ore deposits of the Kursk Magnetic Anomaly, one of the main problems is environmental safety, in particular, the maximum preservation of fertile soil. The underground mining method reduces the technogenic load on the natural environment and allows most of the mining waste to be placed in the mined-out space. However, main source of negative environmental impact is the processing production, which occupies large areas and is characterized by intense harmful emissions. Processing facilities placed underground significantly reduce this impact.

Research objective is to assess the advisability of building an underground processing facility at the Voronets iron ore deposit.

Methods of research. The work uses a comprehensive research method, including rational ore processing scheme justification, underground processing facility design, and a technical and economic comparison.

Results. A scheme of ore processing with the production of a high-quality concentrate is presented, and a chain of mechanisms and apparatus for all stages of ore processing is selected, including its crushing, grinding, magnetic separation and dehydration of the resulting products. Based on the parameters of the selected equipment, its underground layout is shown, the volume the processing facility chambers is calculated. It is shown that the entire volume of tailings is located in the chamber goafs of the underground mine and are not lifted to the surface.

Conclusions. An approximate assessment of the effectiveness of the processing facility underground location has been made. It has been shown that the cost of building that facility is comparable to the cost of building a similar processing facility on surface. Placing the processing in underground makes it possible to significantly reduce the area of land allotment of the enterprise, to lift only concentrate on the surface, and to eliminate the negative environmental impact of processing production.

Keywords: iron ore deposit; underground mine; underground processing facility; ore crushing; ore grinding; magnetic separation; concentrate; processing tailings.

REFERENCES

1. Kaplunov D. R., Radchenko D. N., Fedotenko V. S., Lavenkov V. S. Assessment of efficiency of transition to a new wave of technological innovation in underground mining during its continuous progression to deeper levels. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy biulleten (nauchno-tehnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2020; 12: 5–15. (In Russ.)
2. Adushkin V. V., Anisimov V. N. Geodynamic and geo-environmental safety and ways of its implementation in the KMA region. *Okhrana truda i tekhnika bezopasnosti na promyshlennyykh predpriyatiyakh = Occupational Safety and Health at Industrial Enterprises*. 2018; 4: 52–62. (In Russ.)
3. Galchenko Iu. P., Iakusheva E. D. Monitoring and assessment of the human environment in the mining region of the Kursk magnetic anomaly. *Ekologicheskies sistemy i pribory = Ecological Systems and Devices*. 2017; 7: 16–22. (In Russ.)
4. Pimentel B. S., Gonzalez E. S., Barbosa G. N. O. Decision-support models for sustainable mining networks: fundamentals and challenges. *Journal of Cleaner Production*. 2016; 112: 2145–2157.
5. Sitorous F., Cilliers J. J., Brito-Parada P. R. Multi-criteria decision making for the choice problem in mining and mineral processing: Applications and trends. *Expert Systems with Applications*. 2019; 121: 393–417.
6. Rosa J. C. S., Sanchez L. E. Advances and challenges of incorporating ecosystem services into impact assessment. *Journal of Environmental Management*. 2016; 180: 485–492.
7. Smirnov A. A., Nikitin I. V. About the organization of environmentally production at the mining large iron ore deposits by underground method. In: *Ecological and Technosphere Safety of Mining Regions: Proceedings of the 8th Internat. conf.* Ekaterinburg: 2020. P. 280–285. (In Russ.)
8. Zhang X., Zhang S., Liu H., Zhao Y. Disposal of mine tailings via geopolymerization. *Journal of Cleaner Production*. 2021; 284: 15 p.

9. Pirogov G. G. Advanced technologies of Underground Ore Mining. *Vestnik Zabaikalskogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of ZabGU*. 2017; 2: 28–33. (In Russ.)
10. Sokolov I. V., Gobov N. V., Antipin Iu. G. Systematization and assessment procedure for alternative strategies of iron ore mining with underground processing plants. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tehnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2015; 7: 101–109. (In Russ.)
11. Sokolov I. V., Solomein Iu. M., Smirnov A. A., Gobov N. V. *A mining method for steeply pitching metalliferous deposits with underground ore dressing*. Patent RF no. 2652223; 2018. (In Russ.)
12. Smirnov A. A., Baranovskii K. V., Rozhkov A. A., Solomein Iu. M. Cut-and-fill stoping using mixed backfill. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tehnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2021; 5-1: 62–76. (In Russ.) Available from: doi: 10.25018/0236_1493_2021_51_0_62
13. Sokolov I. V., Gobov N. V., Antipin Iu. G., Solomein Iu. M. Strategy of developing iron ore deposits by environmental underground geotechnology. *Izvestiia Tul'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle = Proceedings of the Tula State University. Earth Sciences*. 2018; 2: 282–295. (In Russ.)
14. Prokopiev S. A., Pelevin A. E., Prokopiev E. S., Ivanova K. K. Increasing the integrity of iron-ore raw material use with the help of screw separation. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2019; 6: 70–80. (In Russ.) Available from: doi: 10.21440/0536-1028-2019-6-70-80
15. Pelevin A. E., Mushketov A. A. Election and optimization of the closed cycle grinding equipment based on transformation models of size distribution and separation characteristics of separation devices. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2014; 5: 120–128. (In Russ.)
16. Liashenko V. I., Khomenko O. E., Golik V. I., Mitsik M. F. Justifying the parameters of ore fields underground mining with goaf backfilling. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2022; 1: 58–71. (In Russ.) Available from: doi: 10.21440/0536-1028-2022-1-58-71
17. Leizerovich S. G. et al. *Resource-reproducing nonwaste geotechnology for the full-field development of the Kursk Magnetic Anomaly*. Moscow: Gornaia kniga Publishing; 2012. (In Russ.)
18. Sokolov I. V., Smirnov A. A., Antipin Iu. G. *Underground dressing mill*. Patent RF no. 2565300; 2015. (In Russ.)
19. Bolkisev V. S., Kolibaba V. L., Sheremetiev N. T. *Building underground crushing facilities at ore mining enterprises*. Moscow: Nedra Publishing; 1985. (In Russ.)

Received 31 August 2022

Information about the authors:

Igor V. Sokolov – DSc (Engineering), full member of the Academy of Mining Sciences, chief researcher, Laboratory of Underground Geotechnology, Director of the Institute of Mining UB RAS. E-mail: geotech@igduran.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7841-5319>

Iurii M. Solomein – researcher, Laboratory of Underground Geotechnology, Institute of Mining UB RAS. E-mail: geotech@igduran.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8226-6894>

Aleksei A. Smirnov – PhD (Engineering), senior researcher, Laboratory of Underground Geotechnology, Institute of Mining UB RAS. E-mail: geotech@igduran.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8949-1525>

Igor V. Nikitin – researcher, Laboratory of Underground Geotechnology, Institute of Mining UB RAS. E-mail: geotech@igduran.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3593-4319>

Для цитирования: Соколов И. В., Соломеин Ю. М., Смирнов А. А., Никитин И. В. Оцелесообразности применения подземного обогатительного комплекса при освоении Воронежского железорудного месторождения // Известия вузов. Горный журнал. 2023. № 1. С. 78–88. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-1-78-88

For citation: Sokolov I. V., Solomein Iu. M., Smirnov A. A., Nikitin I. V. The advisability of an underground processing facility at the Voronets iron ore deposit. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2023; 1: 78–88 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2023-1-78-88