

И.И. Айнбиндер, О.В. Овчаренко, П.Г. Пацкевич

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГЕОТЕХНОЛОГИИ ДОБЫЧИ ЖЕЛЕЗНЫХ РУД НА ЯКОВЛЕВСКОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ

Рассмотрены основные пути интенсификации добычи железной руды и создания ресурсосберегающих геотехнологий при разработке Яковлевского месторождения за счет увеличения параметров очистных выработок и порядка их выемки, а также снижения расхода дорогостоящего цемента при обеспечении устойчивости горных конструкций в различных горно-технических условиях разработки. Предложен возможный вариант технологии добычи и рекомендуемые параметры горных конструкций, обеспечивающих безопасность ведения горных работ при применении нисходящей слоевой выемки руды на Яковлевском руднике.

Ключевые слова: система разработки, большие глубины, безопасность работ, слоевая выемка, закладка, нисходящий порядок выемки слоев, геомеханическая оценка, напряженно-деформированное состояние (НДС).

В ряде проблем разработки залежей железной руды подземным способом особое место занимает освоение Яковлевского месторождения. Основными особенностями его отработки является высокое содержание металла в рудах, невысокая их прочность, а также наличие вышерасположенных водоносных горизонтов. Все это предопределило применение систем разработки с закладкой выработочного пространства и выемкой руды заходками-слоями в нисходящем порядке.

В то же время низкие показатели производительности работ, высокая стоимость операций по креплению очистных забоев и закладки требуют поиска путей интенсификации добычи и создания ресурсосберегающих геотехнологий. На основе технического перевооружения рудника, включающее разработку новых технологических схем очистной выемки с увеличенными параметрами выработок, снижения расхода дорогостоящего цемента, механизации и автоматизации производственных процессов добычи.

В геологическом строении Яковлевского месторождения выделяются резко различные комплексы пород, образующих два структурных этажа: нижний – сложнодислоцированный докембрийский кристаллический фундамент и верхний, сложенный осадочными породами.

Богатые железные руды, являющиеся латеритной корой выветривания железистых кварцитов, образуют лентообразные залежи, шириной 200–600 м, вертикальной мощностью от 20–50 м у лежачего бока до 350–400 м у висячего бока.

Гидрогеологические условия месторождения сложные. Выделены семь основных водоносных горизонтов, шесть из которых приурочены к отложениям осадочного чехла и один – к отложениям кристаллического фундамента (руднокристаллический). В нижней части осадочной толщи распространена система напорных водоносных горизонтов с напорами 200–480 м (нижнекаменноугольный горизонт). Условно выделены два водоносных комплекса, разделенных между собой надежным

водоупором – толщей верхнеюрских аргиллитовидных глин: нижний (руднокристаллический, нижнекаменноугольный (карбонный) и келловейский горизонты) и верхний (все остальные).

Водопритоки в подземные горные выработки Яковлевского рудника, в основном, определяются нижнекаменноугольным и руднокристаллическим водоносными горизонтами.

Для безопасной отработки первого этажа без предварительного осушения карбонного горизонта между зоной ведения очистных работ и водоносным горизонтом оставлен предохранительный рудный целик мощностью 65 м.

Для отработки запасов богатых железных руд подземным способом принята слевая система разработки с твердеющей закладкой и нисходящим порядком выемки слоев, которая позволяет обеспечить высокую полноту извлечения руды из недр и минимизировать деформации в толще охранного рудного целика под карбонным водоносным горизонтом.

С учетом основных закономерностей деформирования массива и перекрытия рекомендовано ведение очистных работ под защитной потолочной, мощность которой выбрана по условию обеспечения безопасного ведения горных работ, а именно, отсутствия вертикальных водопроявляющих трещин в породах карбонного горизонта.

При отработке нисходящими слоями с твердеющей закладкой и выемкой руды комбайнами шахтное поле разбивается по простиранию на выемочные блоки, в которых производится полный цикл: подготовительные, нарезные работы, очистная выемка, закладочные работы.

Длина выемочных блоков вкрест простирания определяется полной горизонтальной мощностью рудной залежи. По вертикали блоки делятся на 10 слоев, в которых, для обеспечения

устойчивости, заходки располагаются в шахматном порядке.

Дальнейшее развитие рудника связано с необходимостью существенного наращивания производительности, с нынешнего 1,0 до 4,5 млн т руды в год без существенного увеличения площади, на которой ведут горные работы. В связи с этим на предприятии ведут изыскание возможностей повышения интенсивности горных работ при применении систем разработки с закладкой выработанного пространства.

Наиболее перспективные направления связаны с увеличением параметров очистных выработок и более широким применением взрывной отбойки, которая хотя и заложена в проектные решения, однако до настоящего времени широкого распространения не получила.

Для обоснования параметров горных конструкций, обеспечивающих безопасность отработки рабочих слоев под сформированным защитным перекрытием с применением нисходящей слоевой выемки руды на Яковлевском руднике, выполнена оценка геомеханического состояния горного массива.

Особенностью руд и вмещающих пород Яковлевского месторождения является широкий диапазон вариации их прочностных, деформационных и морфологических характеристик. Однако для целей геомеханической оценки их можно разделить на три группы:

- крайне неустойчивые руды, характеризующиеся прочностью на одноосное сжатие около 1 МПа, не допускающие горизонтальных обнажений. Борты очистных выработок, пройденные в этих рудах под защитой искусственной кровли, при проектной высоте 4 м зачастую теряют устойчивость. В результате отслоения с бортов кусков руды призмобразной и плитообразной формы, с размерами до нескольких метров и толщиной до десятков сантиметров, формируется сечение очист-

ных выработок в форме перевернутой трапеции;

- неустойчивые руды, характеризующиеся прочностью на одноосное сжатие в среднем 5–7 МПа, допускающие краткосрочные горизонтальные обнажения площадью в первые десятки квадратных метров. Вертикальные борта выработок при проектной технологии отработки рабочих слоев под искусственной кровлей сохраняют устойчивость в течение нормативного срока отработки заходок;

- руды средней устойчивости, имеют прочность на сжатие 16–20 МПа. Очистные выработки с проектными параметрами, пройденные в данных рудах, сохраняют устойчивость в течение длительного времени. Более того их, вертикальные и горизонтальные пролеты могут быть существенно увеличены.

Вмещающие породы лежачего блока в интервале ведения горных работ представлены прочными кварцитами. Висячем боку преимущественно распространены хлорит-серицитовые сланцы, которые хотя и имеют прочность на сжатие около 30 МПа, однако пройденные в них выработки имеют низкую устойчивость. Поэтому полевые подготовительные выработки целесообразно размещать только в лежачем боку рудного тела.

Обработку основных слоев ведут в нисходящем порядке под искусственной кровлей, устойчивость которой обеспечивается при обеспечении прочности закладочного массива не ниже нормативной при соответствующем горизонтальном пролете выработки. Устойчивые вертикальные пролеты для каждого типа руд и пород были опре-

Устойчивые вертикальные пролеты руд и пород Яковлевского месторождения

Наименование руд и пород	$s_{сж}$, МПа	j, градус	C, МПа	Высота устойчивого вертикального обнажения, м	
				Kз = 2	Kз = 3
1	2	3	4	5	6
Руда маритовая, рыхлая	1,02	33	0,5	2,2	1,7
Руда маритовая, хлоритизированная, средней плотности	5,7	35	1,5	6,7	5,3
Руда маритовая, карбонатизированная, плотная	20,1	37	5,3	16,5	13,0
Руда железослюдково-маритовая, рыхлая	1,2	34	0,4	2,5	2,0
Руда железослюдково-маритовая, хлоритизированная, средней плотности	5,1	36	1,4	6,5	5,1
Руда железослюдково-маритовая, карбонатизированная, плотная	16,7	38	4,3	10,8	8,5
Руда гидrogематит-маритовая, глиноподобная, рыхлая	2,1	34	0,6	2,6	2,0
Руда гидrogематит-маритовая, хлоритизированная, средней плотности	6,9	35	1,8	7,7	6,0
Руда гидrogематит-маритовая, карбонатизированная, плотная	19,4	38	5,8	14,2	10,4
Сланец хлорит-серицитовый	28,9	40	6,3	19,8	15,3
Кварциты железослюдково-маритовые	67,8	42	15,1	41,0	32,0

делены с учетом размеров структурных блоков, физико-механических свойств и влияние масштабного фактора (таблица).

Как видно из представленной таблицы, для наиболее слабых руд, устойчивость вертикальных бортов очистных выработок обеспечивается только при высоте 1,7–2,2 м, в то время как для неустойчивых руд допустимая высота бортов составляет 5–7 м, а для руд средней устойчивости до 10–15 м.

Таким образом, исходя из данных предварительных расчетов, увеличение параметров возможно для руд низкой и средней устойчивости. Для крайне неустойчивых руд напротив, необходимо изыскание вариантов системы разработки, повышающих устойчивость рудных бортов при параметрах, близких к проектным.

Геомеханическая оценка устойчивости рудных и закладочных бортов очистных выработок, а также искусственной кровли очистных выработок проведена на основе математического моделирования методом конечных элементов напряженно-деформированного состояния (НДС) обрабатываемого горного массива.

Размеры выемочного участка: по простиранию 240 м, вкрест простирания 200 м. Угол падения рудного тела 70°. Глубина залегания 600 м.

Отработка запасов производится под защитной потолочиной, мощностью 9 м, ориентированными вкрест простирания рудного тела заходками длиной 200 м.

Для оценки возможности разрушения массива использовался критерий Кулона-Мора, в соответствии с которым определялись распределения предельных значений коэффициента сцепления:

$$C^* = \tau_n - \sigma_n \operatorname{tg} \varphi,$$

сравнение которого с фактическими значениями коэффициента сцепления пород C позволяет выявить зоны воз-

можного разрушения, где $C < C^*$ (здесь τ_n , σ_n – касательные и нормальные напряжения на площадках скольжения, МПа, C – коэффициент сцепления пород, МПа; φ – угол внутреннего трения, град.).

Предварительно задача решалась в объемной постановке для упругих моделей сред, но, как показали расчеты, в сечениях, перпендикулярных оси заходок, НДС практически не изменяется, поэтому достаточно ограничиться решением плоской задачи, одновременно усложнив рассматриваемые модели, а именно, при моделировании поведения закладки использовать нелинейную модель Друккера-Прагера [1], что позволяет выделить зоны перехода закладочного массива в пластическое состояние.

При этом условии пластичности, принятое в форме критерия Мизеса, сводится к условию Кулона-Мора [1]:

$$\sigma_e = 3\alpha\sigma_m + (1 - 3\alpha^2)J_2^{1/2} = \sigma_T$$

где $\{\sigma\}$ – компоненты тензора напряжений, σ_e – эквивалентное напряжение, $J_2(\sigma)$ – второй инвариант девиатора напряжений.

$\sigma_m = 0,5(\sigma_x + \sigma_y)$ – среднее напряжение,

$$\sigma_T = \frac{6C \cos \varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin \varphi)} -$$

предел текучести материала.

$$\alpha = \frac{2 \sin \varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin \varphi)}.$$

Условие перехода закладочного массива в пластическое состояние, что для применяемых закладочных смесей фактически означает начало его разрушения, может быть записано в виде отношения достигнутых и предельных напряжений: $N = \sigma_e / \sigma_T \geq 1$.

Моделирование методом конечных элементов изменения НДС обрабатываемого горного массива выполнено для двух вариантов отработки запасов

и для двух типов руд месторождения – руд низкой устойчивости (железнослюдково-мартитовой, карбонатизированной, хлоритизированной) и руд средней устойчивости (железно-слюдково-мартитовой, карбонатизированной).

Вариант 1 предусматривает разработку запасов заходками прямоугольного сечения размером 6×6 м. Выемка заходок осуществляется в одну стадию по тупиковой схеме с применением буровзрывного технологического комплекса и предполагает применение четырех схем, отличающихся последовательностью выемки запасов.

Вариант 2 предусматривает разработку запасов заходками, которые имеют в сечении форму шестиугольника. Высота выработки равна 8 м, ширина по кровле и почве – 4,5–6 м, угол наклона бортов выработки 65–75°.

На рис. 1 и 2 показаны характерные результаты, полученные для некоторых схем выемки.

Для руд низкой устойчивости во всех рассмотренных случаях отмечаются повышенные вертикальные нагрузки на рудные целики, а также опасность возникновения зон разрушения потолочины, рудных бортов и закладочно-

го массива. Прочные руды обладают достаточной устойчивостью при всех рассматриваемых вариантах технологических схем выемки. При этом результаты моделирования показали явную зависимость предельных значений тангенциальных напряжений и, следовательно, устойчивости бортов заходок от угла их наклона.

Наименее устойчивыми оказываются заходки с углом наклона бортов $\alpha = 90^\circ$, причем разрушение рудных и закладочных бортов отмечается при всех схемах выемки.

При обработке заходками с углом наклона бортов $\alpha = 70\text{--}75^\circ$ уменьшенного слоя мощностью 4 м (первый этап формирования ромбовидных выработок) разрушения рудных бортов нет, кроме бортов двух первых заходок в краевых, наиболее нагруженных, частях участка. Затем, при обработке вторых заходок уменьшенного слоя отмечаются лишь локальные разрушения бортов.

При обработке второго слоя мощностью 8 м первыми заходками разрушения рудных и закладочных бортов не происходит, а при обработке вторыми – наблюдается возможность ло-

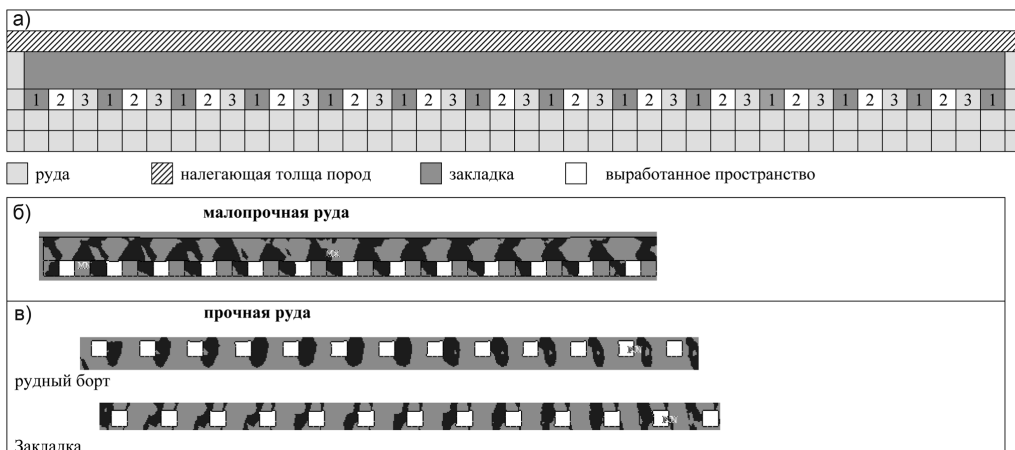


Рис. 1. Моделирование НДС горного массива (вариант 1, угол наклона бортов выработки $\alpha = 90^\circ$): а) последовательность выемки запасов (1, 2, 3); б), в) зоны возможного разрушения рудного и закладочного массивов

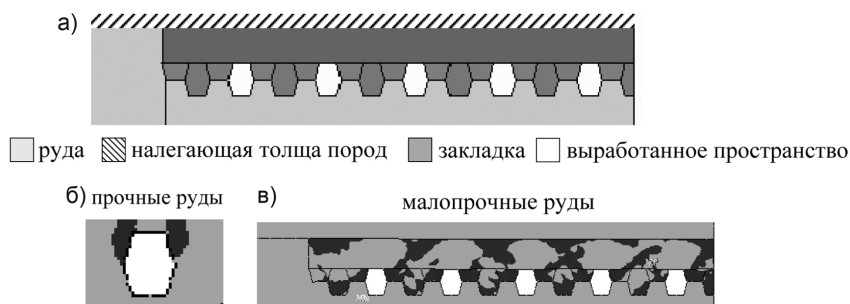


Рис. 2. Моделирование НДС горного массива при отработке вторых заходок второго слоя (угол наклона бортов выработки $\alpha = 75^\circ$): а) последовательность выемки запасов; б), в) зоны возможного разрушения закладочного массива

кальных разрушений бортов в верхней части – в закладке.

Таким образом, геомеханическая оценка, проведенная на основе математического моделирования напряженно-деформированного состояния горного массива для двух вариантов отработки запасов показала:

- при отработке руд Яковлевского месторождений с низкой устойчивостью существует опасность возникновения зон разрушения потолочины, рудных бортов и закладочного массива, наименее устойчивыми оказываются заходки с углом наклона бортов $\alpha = 90^\circ$;

- прочные руды, несмотря на невысокий коэффициент сцепления, обладают достаточной устойчивостью. При этом наблюдается явная зависимость устойчивости бортов заходок от угла их наклона. Наиболее устойчивы заходки с углом наклона бортов $\alpha = 65-75^\circ$.

На основе данных расчетов, для каждого типа руд и рассматриваемой технологической схемы были составлены сводные таблицы, в которой отражены характеристики устойчивости рудного и закладочного массивов по критерию Кулона-Мора на каждой стадии развития горных работ для наиболее характерных участков выработки: искусственная кровля, рудный борт, закладочный борт, рудный целик, ис-

кусственный целик, комбинированный целик.

Оценка геомеханического состояния рудного и закладочного массивов на различных стадиях ведения горных работ позволила обосновать параметры горных конструкций, обеспечивающих безопасность формирования защитной потолочины и рабочих слоев при применении нисходящей слоевой выемки руды на Яковлевском руднике и сформировать направления исследований по созданию высокоинтенсивных схем выемки руд Яковлевского месторождения, позволяющих достичь необходимых объемов добычи руды.

Для крайне неустойчивых типов руд, помимо проектной схемы, перспективными является выемка заходками, имеющими в сечении форму пчелиных сот с комбинированными рудо-закладочными бортами, что позволит повысить их устойчивость, во-первых за счет уменьшения высоты рудной части борта до 2,5–3 м, а во-вторых – за счет придания рудному борту угла $65-75^\circ$, что увеличит его допустимую высоту по сравнению с вертикальной в 1,3–1,5 раза. Ввиду ограничения технических возможностей применяемых комбайнов по высоте резания, необходимо рассматривать взрывной способ отбойки.

Руды с низкой устойчивостью, при использовании тех же принципов кон-

струирования, что и для руд крайне неустойчивых, позволяют увеличить допустимую высоту очистных выработок до 8 м и более, что позволит применять технологические схемы выемки с совмещением операций бурения и взрывания. Основная сложность при этом возникает в организации эффективных схем подготовительно-нарезных работ вследствие значительных размеров рудного тела вкрест простирания (до 400 м) и нежелательности размещения выработок в породах висячего бока. Решение данной задачи возможно за счет использования рудных нарезных выработок, пройденных в пределах добычных участков с применением искусственных защитных целиков. Применение таких схем ПНР позволяет принимать наиболее целесообразные размеры выемочного участка с учетом параметров рудного тела, свойств руд, технических характеристик оборудования, с целью достижения максимальной интенсивности горных работ.

Для руд средней устойчивости перспективным является применение высокопроизводительных камерных систем разработки с закладкой выработанного пространства. Но так как эти руды имеют существенно более низкое содержание полезного компонента, в настоящее время они не являются основой сырьевой базы рудника и создание технологии их отработки является задачей последующих этапов исследований.

В целом, дифференцированный подход к технологии выемки запасов Яковлевского месторождения, основанный на установленных закономерностях развития напряженно-деформированного состояния природных и искусственных массивов, определенных граничных параметрах очистных выработок и с учетом ценности руды, позволит создать необходимый базис геотехнологий, позволяющий обеспечить безопасную и эффективную добычу с требуемой годовой производительностью.

Данная работа выполнена в соответствии с Программой фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 годы (научное направление 74 «Комплексное освоение и сохранение недр Земли, инновационные процессы разработки месторождений полезных ископаемых и глубокой переработки минерального сырья»), Программой № 27 Президиума РАН «Фундаментальный базис инновационных технологий оценки, добычи и глубокой переработки стратегического минерального сырья, необходимого для модернизации экономики России», Программой ОНЗ-3 «Фундаментальные проблемы и перспективы использования потенциала комплексного освоения недр на основе развития ресурсосберегающих и ресурсовоспроизводящих геотехнологий».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Друккер Д., Прагер В. Механика грунтов и пластический анализ или предельное проектирование / Определяющие законы

механики грунтов. Под ред. В.Н. Николаевского. Серия Механика. Новое в зарубежной науке. – М.: Мир, 1975. – С. 166–177. **ПЛАЭ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Айнбиндер Игорь Израилевич – доктор технических наук, профессор, зав.отделом,
Овчаренко Оксана Васильевна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник,
Пашкевич Петр Геннадиевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник,
Институт проблем комплексного освоения недр РАН,
e-mail: geoxpert@yandex.ru.

JUSTIFICATION OF GEOTECHNOLOGY PARAMETERS FOR IRON ORE MINING AT YAKOVLEVSKOE DEPOSIT

Aynbinder I.I.¹, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department,
Ovcharenko O.V.¹, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher,
Patskevich P.G.¹, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher,
¹ Institute of Problems of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources
of Russian Academy of Sciences, 111020, Moscow, Russia,
e-mail: geoexpert@yandex.ru.

The basic ways of intensifying the iron ore mining and resource creation in the development of geotechnology Yakovlevskogo deposit due to uveleniya treatment workings parameters and the order of their recesses, as well as reducing the consumption of expensive cement, while ensuring the sustainability of mining structures in different mining conditions develop. A possible variant of mining technology and recommended settings mountain structures to ensure the safety of mining operations in the application of a downward layered excavation of ore at the mine Yakovlevskiy.

Key words: system design, great depths, work safety, strata excavation, backfilling, dredging descending order of layers, geomechanical assessment, stress-strain state (SSS).

REFERENCES

1. Drukker D., Prager V. *Opredelyayushchie zakony mekhaniki gruntov*. Pod red. V.N. Nikolaevskogo. Seriya Mekhanika. Novoe v zarubezhnoy nauke (Determinant laws of mechanics of soils. Nikolaevskiy V.N. (Ed.). Series on Mechanics. New in Foreign Science), Moscow, Mir, 1975, pp. 166–177.



ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ

Черняховский О.И. – аспирант,

Антипов О.А. – аспирант,

Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова.

Рассмотрены вопросы решения научной и социально-экономической проблемы рационального планирования, использования и мониторинга территорий горнодобывающих предприятий в России и обоснование глобальной научно-географической и социально – экономической проблемы рационального, комплексного освоения городского подземного пространства. Эти важнейшие для экономики страны вопросы взаимосвязаны и должны рассматриваться комплексно.

Ключевые слова: горнопромышленное производство, горнодобывающее предприятие, организация территории, долгосрочное развитие, post-mining, synchro-mining, подземное пространство, городская территория, комплексное развитие.

ECONOMIC ASPECTS OF NATURAL RESOURCE MANAGEMENT

Chernyakhovsky O.I.¹, Graduate Student,

Antipov O.A.¹, Graduate Student,

¹ Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russia.

Discussed issues of scientific and socio-economic problems of rational planning, use and monitoring of the territories of mining enterprises in Russia and the justification of global scientific, geographical and socio-economic problems of rational, comprehensive development of urban underground space. Those critical to the economy issues are interconnected and must be considered together.

Key words: mining production, mining enterprise, the organisation, the long-term development, post-mining, synchro-mining, underground space, urban area, comprehensive development.