

УДК 622.272.06:622.341

Антипин Юрий Георгиевич

кандидат технических наук,
заведующий лабораторией
подземной геотехнологии,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: geotech@igduran.ru

Смирнов Алексей Алексеевич

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
лаборатория подземной геотехнологии,
Институт горного дела УрО РАН

Никитин Игорь Владимирович

научный сотрудник,
лаборатория подземной геотехнологии,
Институт горного дела УрО РАН.

**ПРОГНОЗ РАЗВИТИЯ ПОДЗЕМНОЙ
ГЕОТЕХНОЛОГИИ ПРИ ОСВОЕНИИ
ГЛУБОКОЗАЛЕГАЮЩИХ
РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ
НА ПЕРИОД ДО 2030 ГОДА***

Аннотация:

Выполнены исследования по прогнозированию изменения уровня основных технико-экономических показателей подземной разработки мощных глубокозалегающих железорудных месторождений с учетом развития подземной геотехнологии (внедрение автоматизированных (роботизированных) комплексов горных машин и оборудования, оптимизация технологических процессов на основе разработки цифровых двойников) и ужесточения требований по охране окружающей среды (увеличение размера платы за размещение отходов на поверхности) на период до 2030 года. Установлена экономическая целесообразность применения технологии с сухой закладкой, обеспечивающей размещение основного объема отходов производства, включая отходы обогащения, в подземном выработанном пространстве, при отработке залежей богатых и рядовых железных руд; в перспективе ожидается увеличение масштабов ее использования.

Ключевые слова: глубокозалегающее месторождение, подземные горные работы, направления развития, автоматизация, цифровизация, прогнозная оценка, технико-экономические показатели.

DOI: 10.25635/2313-1586.2021.04.074

Antipin Yuriy G.

Candidate of Technical Sciences,
Head of laboratory
of underground geotechnology,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,
620075, Ekaterinburg,
58 Mamina-Sibiryaka Str.
e-mail: geotech@igduran.ru

Smirnov Alexey A.

Candidate of Technical Sciences,
Senior Researcher,
laboratory of underground geotechnology,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS.

Nikitin Igor V.

Researcher,
laboratory of underground geotechnology,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS.

**ESTIMATES OF DEVELOPMENT
OF UNDERGROUND GEOTECHNOLOGY
AT THE MINING DEEP-LYING
ORE DEPOSITS
FOR THE PERIOD UP TO 2030**

Abstract:

Studies have been carried out to forecast changes in the level of the main technical and economic indicators of underground mining on powerful deep-lying iron ore deposits, taking into account the development of underground geotechnology (implementation of automated (robotic) complexes of mining machines and equipment, optimization of technological processes based on the development of digital twins), as well as stricter environmental protection requirements (increase of the amount fees for waste disposal on the surface), for the period up to 2030. The economic feasibility of using dry-laying technology has been established, which ensures the placement of the main volume of production waste, including waste from ore dressing, in the underground space, during the development of deposits of rich and ordinary iron ores; in the future, we expect to increase the rate of its use.

Key words: deep-lying deposit, underground mining operations, development directions, automation, digitalization, forecast assessment, technical and economic indicators.

* Исследования выполнены в рамках Госзадания № 007-00293-18-00, тема № 0405-2019-0005.

Введение

Главным вызовом современного периода развития горнодобывающей промышленности России является обеспечение соответствия содержанию и специфике нового технологического уклада в условиях резкого ухудшения горно-геологических условий эксплуатации рудных месторождений при увеличении глубины разработки с учетом особой важности вопросов охраны окружающей среды, включающих не только ее защиту от воздействия негативных факторов горных работ, но и утилизацию отходов, минимизацию площадей на земной поверхности, изымаемых горным производством. Новый технологический уклад предусматривает применение автоматизированных и роботизированных комплексов и соответствующих геотехнологий, оптимизацию всего цикла добычи и переработки минерального сырья на основе цифровизации горного производства, перенос оборудования и технологических процессов под землю, в том числе по получению товарной продукции [1 – 3].

В этой связи интересной представляется задача выявления направлений и прогнозирования перспектив развития подземной геотехнологии при освоении глубокозалегающих рудных месторождений на период внедрения нового технологического уклада на российских предприятиях – до 2030 года.

Основные направления развития подземной геотехнологии

Перспективы развития подземной геотехнологии для различных отраслей горнорудной промышленности и горных предприятий в частности неодинаковы и определяются финансовым состоянием предприятий, конъюнктурой рынков минерального сырья, совокупностью горно-геологических, горнотехнических и социально-экологических условий эксплуатации конкретных месторождений, особенностями технологического процесса, инфраструктуры, сетей и систем. Однако общие тенденции ее развития просматриваются достаточно четко в следующих направлениях:

а) Автоматизация управления горной техникой

В настоящее время подземная геотехнология базируется на всеобщем применении комплексов высокопроизводительного самоходного оборудования: установок для бурения шпуров диаметром от 32 до 54 мм, станков для бурения скважин диаметром от 60 до 120 мм и глубиной до 60 м, погрузо-доставочных машин (ПДМ) грузоподъемностью от 2 до 20 т, шахтных автосамосвалов грузоподъемностью до 60 т [4].

Совершенствование парка буровой техники связано с повышением ее производительности, точности бурения и автоматизацией самого процесса бурения (оптимизации режимов, замена штанг и др.), погрузо-доставочной техники – с увеличением ее мощности, производительности и надежности, расширением типоразмеров машин, пригодных для различных условий их применения. Важным направлением является расширение области применения автомобильного транспорта на основе аккумуляторных батарей, позволяющего снизить количество ядовитых газов и значительно упростить проветривание подземных рудников, а также более широкое использование универсальных самоходных машин для механизации вспомогательных процессов: крепления выработок, перевозки взрывчатых веществ и заряжания скважин, перевозки людей и грузов, монтажных работ.

Однако основной тенденцией развития механизации подземных горных работ является автоматизация работы горной техники при выполнении технологических операций по добыче и транспортированию руды.

Начальным уровнем автоматизации следует считать использование при эксплуатации самоходных машин дистанционного управления (ДУ). Этот уровень предполагает значительное участие человека в технологических операциях и заключается в том, что оператор, находясь на безопасном расстоянии, управляет машиной в пределах прямой видимости с помощью пульта ДУ [5]. Основным достоинством ДУ является повы-

шение безопасности персонала, недостатками – высокий риск повреждения техники, относительно низкий коэффициент использования оборудования.

Технология ДУ нашла широкое распространение при эксплуатации ПДМ в опасных условиях (прежде всего в очистных камерах), то есть там, где работа машин с присутствием человека опасна или запрещена (например, на рудниках ПАО «ППГХО» и ОАО «УГМК» [6, 7]).

К следующему уровню автоматизации следует отнести телематическое управление (ТУ) работой машин. Оператор находится в подземных условиях и управляет машиной с помощью передвижной или полустационарной станции ТУ. Определение текущего местоположения, контроль и управление машиной осуществляется с помощью видеокамер и манипуляторов. Достоинства ТУ: повышение безопасности персонала и коэффициента использования техники (оператору не нужно добираться непосредственно к месту ведения работ), умеренная стоимость дополнительного оборудования. Недостатки: средний риск повреждения техники, обусловленный наличием человеческого фактора. ТУ используется, как правило, при уборке и транспортировании горной массы (например, на руднике «Октябрьский» ПАО «ГМК «Норильский никель» [8]).

Дальнейшее развитие связано с полуавтономным движением ПДМ по установленным маршрутам. В этом случае оператор осуществляет управление машиной при погрузо-разгрузочных операциях и контроль за ее движением по маршруту и может находиться на поверхности. Преимущества заключаются в возможности работы в межсменных перерывах, в загазованной среде и при большей средней скорости движения машин, что позволяет увеличить их производительность до 30 %. Имеется возможность управления одновременно несколькими машинами [9]. По аналогичной схеме возможна автоматизация работы автосамосвалов при транспортировке руды.

При проходке горных выработок автоматизация управления буровыми установками позволяет более точно соблюдать паспорта расположения шпуров в забое и свести к минимуму их отклонения от проектного. Вследствие этого становится возможным применять более эффективные схемы расположения шпуров и порядок их взрывания, за счет чего существенно увеличить длину шпуров и величину уходки за цикл (до 4 - 5 м). То же самое относится и к процессу бурения скважин: точное соблюдение паспортов бурения позволяет значительно улучшить качество дробления при отбойке руды.

Внедрение технологии автоматического бурения взрывных скважин с использованием электронных паспортов бурения осуществлено на рудниках «Кировский» и «Расвумчорр» АО «Апатит» [5, 10], что позволило повысить производительность буровой установки на 24 %, точность бурения на 60 %, увеличить коэффициент использования оборудования. Новые модели буровых установок, предназначенные для бурения вертикальных, наклонных веерных, параллельных и одиночных скважин с использованием электронных паспортов бурения и возможностью дистанционного управления начали применять на рудниках «Удачный» и «Айхал» АК «АЛРОСА» (ПАО) [11].

Высшим уровнем автоматизации является автономное (роботизированное) управление одной или несколькими единицами техники, при котором оператор осуществляет лишь наблюдение за процессом. Роботизированные компоненты управляют всеми важнейшими функциями машины (рулевым управлением, ускорением, торможением, управлением ковша и т.д.) без вмешательства оператора. Достоинства автономной системы: повышение безопасности персонала, значительное увеличение производительности, срока службы и коэффициента использования техники. Недостатки: высокая стоимость инфраструктуры и программного обеспечения, сложность организации работы [12]. Обобщение опыта использования полностью автоматизированных комплексов горных машин и оборудования на зарубежных рудниках позволяет прогнозировать увеличение их производительности до 30 %, повышение срока службы до 45 %,

снижение затрат на техобслуживание до 60 %, сокращение числа рабочего персонала до 70 % [5, 13, 14].

б) Модернизация схем вскрытия и подготовки запасов

При разработке глубокозалегающих рудных месторождений наиболее эффективным остается скиповой подъем руды на поверхность. Существуют хорошо апробированные и достаточно широко применяемые установки для бурения вертикальных выработок высотой до 600 м и диаметром до 3,5 м, то есть фактически стволов малого диаметра. Такие стволы используются как вспомогательные (для вентиляции, спуска материалов, закладочных работ). Способ бурения стволов состоит в проходке передовой скважины диаметром около 300 мм сверху вниз с последующим ее расширением до необходимого сечения снизу вверх.

Проведение наклонных автосъездов с поверхности или из карьера позволяет ускорить строительство горизонтов рудника и упростить доставку самоходной техники в шахту. Сочетание наклонных автосъездов со стволами малого диаметра позволяет сократить сроки ввода рудника в эксплуатацию до 50 % [4, 15], при этом обеспечить требования безопасности: проветривание горных работ и наличие не менее двух выходов из шахты.

в) Модернизация технологии подземной добычи руды

Совершенствование технологии с обрушением предполагает более широкое использование комбинации систем разных классов (например, камерной системы и системы поэтажного обрушения), рационализацию конструкции и оптимизацию параметров для обеспечения приемлемых показателей извлечения запасов из недр. При этом характерным является увеличение масштабов применения ПДМ с ДУ, что позволяет существенно упростить конструкции и снизить потери руды в целиках днища блока [16].

Методы совершенствования технологии с закладкой выработанного пространства направлены на оптимизацию процесса закладочных работ. Прогрессивным техническим решением является отказ от строительства закладочных комплексов и трубопроводного транспорта закладочной смеси за счет применения подземных передвижных закладочных установок, а самое главное, использования для закладки отходов обогащения, в том числе шламов, что позволяет существенно сократить объемы и площади хвостохранилищ на поверхности. Наиболее рациональным в этом случае выглядит применение восходящего способа отработки запасов с размещением в выработанном пространстве обезвоженных или пастообразных шламов в смеси с твердыми отходами горно-обогажительного производства. Наряду с традиционными вариантами систем разработки – камерными с комбинированной малопрочной твердеющей закладкой на основе цемента или горизонтальных слоев с сухой закладкой – возможны и другие способы формирования закладочных массивов, например, уплотнение сухой закладки виброкатками [17]. При применении систем разработки с твердеющей закладкой актуальным является вопрос подбора состава закладочной смеси на основе тонкодисперстных хвостов обогащения [18, 19].

г) Подземная переработка руды

Идея переноса процесса переработки руды в подземное пространство обсуждается достаточно давно и даже осуществлена на ряде предприятий по добыче руд цветных металлов и золота [20]. Современные требования по охране окружающей среды делают эти решения все более актуальными.

Наиболее простым является перенос под землю предообогащения руды (или первых стадий обогащения) с выдачей предконцентрата и оставлением сухих хвостов в выработанном пространстве. Для немагнитных руд и руд цветных металлов перспективным является радиометрическое обогащение. Оборудование радиометрического передела небольшое по габаритам и вполне может быть размещено в подземных камерах. Для железных руд под землю может быть перенесен процесс сухой магнитной сепара-

ции. Однако следует учитывать, что для предобогащения руды в подземных условиях должны быть перенесены также процессы среднего и мелкого дробления, что потребует увеличения объемов капитального строительства и соответствующих затрат.

Более кардинальным решением является строительство подземных обогатительных комплексов с полным циклом обогащения, включая процессы обезвоживания концентрата и хвостов обогащения [21, 22].

д) Цифровизация горного производства

Концепция цифровизации управления производственными процессами предприятия как единой горнотехнической системой приобретает более широкое распространение и практически реализуется в две стадии. На первой стадии компьютеризация сводится к получению оперативной информации и возможности своевременного вмешательства для предупреждения и устранения сбоев в работе системы. На второй стадии осуществляется внедрение программ автоматизации управления процессами добычи и переработки руды с целью оптимизации функционирования всей горнотехнической системы предприятия в целом. В дальнейшем на основе этого возможен переход на автономную работу предприятия и безлюдную добычу руды в подземных условиях [23 – 25].

Внедрение цифровых технологий потребует существенных капитальных вложений, прежде всего на приобретение автоматизированного оборудования и соответствующего программного обеспечения, модернизацию систем связи и передачи информации, обучение персонала, но определенно может принести заметный эффект вследствие снижения эксплуатационных затрат на 15 – 20 %, повышения безопасности горных работ и сокращения экологических платежей.

Основные направления и стадии развития подземной геотехнологии при освоении глубокозалегающих рудных месторождений на период до 2030 года представлены в табл. 1.

Таблица 1

Направления и стадии (ступени) развития подземной геотехнологии

Направления и стадии (ступени) развития	Внедряемые мероприятия	Получаемый результат
<i>Автоматизация управления горной техникой</i>		
1. Дистанционное или полуавтоматическое управление горной техникой	Применение ПДМ с ДУ в опасных зонах, автоматизация работы буровой техники, ПДМ, конвейеров, дробильных комплексов, внутришахтного транспорта и подъемных машин	Повышение безопасности персонала и эффективности технологических процессов добычи руды, возможность оперативного контроля и регулирования потоков руды (породы)
2. Автономное (роботизированное) управление горной техникой	Внедрение роботизированных комплексов горных машин и оборудования и контроль за их работой	Управление горной техникой с поверхности, повышение производительности и надежности ее работы вследствие исключения человеческого фактора
<i>Модернизация схем вскрытия и подготовки</i>		
1. Вскрытие моностволами	Замена традиционных многофункциональных вертикальных стволов моностволами (для выполнения одной функции)	Снижение капитальных затрат на строительство стволов и эксплуатационных затрат на основные и вспомогательные процессы добычи руды
2. Вскрытие автоуклонами и министволами	Использование автоуклонов для транспорта руды (породы) в сочетании с министволами (диаметром до 3,5 м)	Снижение капитальных затрат на строительство горизонтов, сокращение сроков ввода рудника в эксплуатацию

<i>Модернизация технологии добычи руды</i>		
1. Совершенствование технологии добычи руд	Применение комбинированных систем разработки и систем с сухой закладкой. Использование для закладки отходов производства, в том числе хвостов обогащения. Применение подземных закладочных комплексов	Повышение показателей извлечения и эффективности разработки месторождения. Сокращение земельных площадей на поверхности, занятых горным предприятием. Сокращение затрат на закладочные работы
2. Восходящая выемка запасов месторождения	Вскрытие на полную глубину распространения запасов и их отработка снизу вверх	Возможность размещения всех отходов производства в подземном выработанном пространстве
<i>Подземная переработка руды</i>		
1. Предобогащение руды в подземных условиях	Предобогащение с выдачей предконцентрата на поверхность и оставлением хвостов под землей	Снижение затрат на подъем и транспортирование горной массы. Снижение ущерба окружающей среде
2. Строительство подземных обогатительных комплексов	Перенос в подземный рудник всего цикла обогащения, включая процессы обезвоживания концентрата и хвостов обогащения	Сокращение земельных площадей на поверхности для размещения обогатительного комплекса, отвалов и шламохранилищ. Охрана окружающей среды
<i>Цифровизация горного производства</i>		
1. Цифровизация производственных процессов добычи и переработки руды	Компьютерное управление производственными процессами добычи и переработки руды	Получение оперативной информации о производственных процессах. Предупреждение нештатных ситуаций, устранение сбоев и отказов
2. Комплексная цифровизация горного производства	Централизованное компьютерное управление всей системой рудника с автономной работой горных машин и оборудования	Оптимизация технологических процессов с целью повышения их эффективности. Уменьшение персонала рудника, в перспективе переход на безлюдную добычу руды

Все вышеуказанные направления развития подземной геотехнологии предполагают реализацию переходных процессов [26], что неизбежно связано как с финансовыми затратами, так и с определенными изменениями технико-экономических показателей работы предприятия, в том числе в результате совершенствования технологии добычи или переработки руды.

Прогноз изменения технико-экономических показателей предприятия с учетом развития подземной геотехнологии

Выполнен прогноз изменения уровня основных технико-экономических показателей горных предприятий с учетом развития подземной геотехнологии на период до 2030 г. на примере и для условий подземной разработки мощных глубокозалегающих железорудных месторождений.

В качестве исходных данных приняты следующие условия и допущения:

- цена железорудного концентрата с содержанием железа 62 – 64 % для производства окатышей и железосодержащих брикетов на внутреннем рынке составляет 8500 руб/т (по данным Metaltorg на январь 2021 г.);

- капитальные затраты на строительство шахты составляют от 3,5 до 5,8 млрд руб. (в зависимости от размеров шахтного поля и глубины разработки), из них затраты на приобретение и монтаж оборудования – около 20 %, затраты на проведение выработок и камер обогатительного комплекса – примерно 30 % (сопоставимы с затратами по возведению здания на поверхности) [22, 27];

- эксплуатационные затраты на добычу и обогащение железных руд, включая заработную плату, материалы, энергозатраты, амортизацию, цеховые расходы и прочее, составляют от 1800 до 2300 руб/т (в зависимости от применяемой технологии) [27, 28];

- ставка платы при размещении отходов производства V класса опасности (практически неопасных) на поверхности составляет 40,1 руб/т [29].

На основе прогнозной оценки изменения величин основных факторов, определяющих эффективность подземных горных работ (табл. 2), построены зависимости изменения основных технико-экономических показателей – извлекаемой ценности ($C_{изв}$), капитальных затрат ($K_{стр}$), эксплуатационных затрат ($\mathcal{E}_{доб}$) и ЧДД – от содержания железа (C_{Fe}) на период прогноза (рис. 1) и установлена экономическая целесообразность и перспективы применения технологии с сухой закладкой [30] взамен технологии с обрушением при подземной добыче железных руд с учетом их различной ценности: бедные ($C_{Fe} < 32\%$), рядовые ($C_{Fe} = 32 - 47\%$) и богатые ($C_{Fe} > 47\%$):

- при отработке месторождений бедных руд технологией с обрушением наблюдается снижение доходности до 50 % вследствие значительного роста капитальных затрат до 70 %, связанного с приобретением автоматизированных (роботизированных) комплексов преимущественно иностранного производства, и увеличения эксплуатационных затрат до 40 %, обусловленного повышением стоимости потребляемых материальных, энергетических и трудовых ресурсов, а также размера экологических платежей;

Таблица 2

Прогнозная оценка величин определяющих факторов до 2030 года

№ п/п	Фактор	Ед. изм.	Величина		Обоснование прогнозных величин (тенденции → результат)
			2021	2030	
<i>Извлекаемая ценность</i>					
1	Цена концентрата	руб/т	8500	12070	Рост мировых цен на сырье → Увеличение цены железорудного концентрата ежегодно в среднем на 4 %
<i>Капитальные затраты</i>					
2	Затраты на приобретение оборудования	%	20	40	Внедрение автоматизированных комплексов → Увеличение затрат на приобретение оборудования в 2 раза, составляющих в общем объеме инвестиций до 40 %
<i>Эксплуатационные затраты</i>					
3	Плата за размещение отходов на поверхности	руб/т	40,1	120,3	Ужесточение требований со стороны государства к обеспечению экологической безопасности горного производства → Увеличение размера платы за размещение отходов на земной поверхности в 3 раза, составляющей в себестоимости добычи и обогащения руды до 10 %
4	Затраты на оптимизацию горных работ	%	100	80	Оптимизация производственных процессов на основе разработки цифровых двойников → Снижение себестоимости добычи и обогащения руды до 20 %
<i>ЧДД</i>					
5	Норма дисконта	%	10	7,5	Развитие российской экономики и приближение ее показателей к общемировым → Снижение величины нормы дисконта ежегодно в среднем на 0,25 %

- при отработке залежей богатых руд технологией с сухой закладкой наблюдаются схожие темпы и факторы роста капитальных и эксплуатационных затрат (за исключением экологических платежей), которые, в свою очередь нивелируются подъемом извлекаемой ценности до 40 % за счет повышения показателей извлечения запасов из недр в 1,7 – 3,5 раза [30], что обеспечивает рост доходности на 25 – 45 %.

- в настоящее время область эффективного применения технологии с сухой закладкой ограничивается в основном богатыми рудами при $C_{Fe} > 42\%$ (месторождений с высоким C_{Fe} в России осталось не так много), в перспективе ожидается расширение данной области с включением рядовых руд при $C_{Fe} = 32 - 42\%$, что предполагает увеличение масштабов ее использования (например, месторождения «Малый Куйбас», «Воронецкое», «Приоскольское», «Коробковское» и др.).

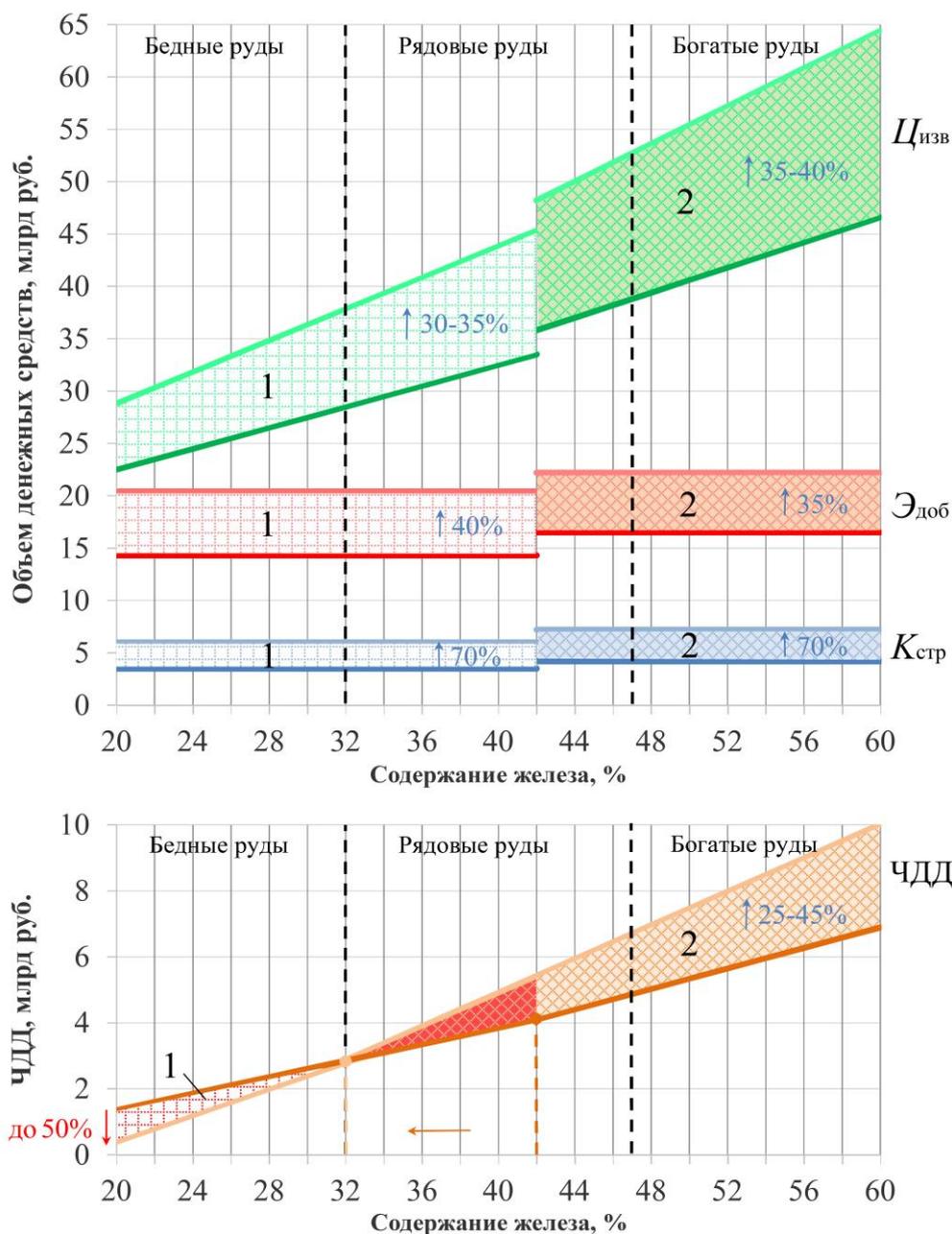


Рис. 1. Изменение $C_{изв}$, $K_{стр}$, $\mathcal{E}_{доб}$ и $\mathcal{ЧДД}$ в зависимости от C_{Fe} на период 2021 – 2030 гг.:

1 – технология с обрушением; 2 – технология с сухой закладкой

Таким образом, на ближайшие годы прогнозируется увеличение масштабов и расширение области эффективного применения технологии с сухой закладкой, обеспечивающей размещение основного объема отходов производства, включая отходы обогащения, в подземном выработанном пространстве.

Заключение

В результате выполненных исследований установлено, что перспективы развития подземной геотехнологии при освоении глубокозалегающих рудных месторождений на ближайшее 10-летие в определяющей степени связаны с переходом к новому технологическому укладу горного производства, включающему модернизацию геотехнологии и геотехники на основе интеграции цифровых систем управления. Внедрение автоматизированных (роботизированных) комплексов горных машин и оборудования позволит увеличить их производительность до 30 %, снизить затраты на техобслуживание до 60 % и сократить количество рабочего персонала в 2 - 3 раза. Внедрение проектов цифровизации производства для централизованного компьютерного управления производственными процессами добычи и переработки руды потребует увеличения капитальных затрат на закупку автоматизированного оборудования и соответствующего программного обеспечения, модернизацию систем связи, обучение персонала. Эффект от внедрения будет получен за счет снижения эксплуатационных затрат на 15 – 20 %, повышения безопасности горных работ и сокращения экологических платежей.

На основе прогноза изменения уровня доходности железорудных предприятий с учетом развития подземной геотехнологии и ужесточения требований по охране окружающей среды установлена экономическая целесообразность применения технологии с сухой закладкой при отработке залежей как богатых, так и рядовых руд. Прогнозируется рост доходности железорудных предприятий до 25 – 45 % при отработке залежей богатых и рядовых руд технологией с сухой закладкой, и наоборот, ожидается снижение доходности до 50 % при отработке бедных руд технологией с обрушением. Таким образом, бедные руды наиболее эффективно обрабатывать по технологии с обрушением именно сейчас, а богатые руды – по технологии с сухой закладкой в будущем.

Список литературы

1. Каплунов Д.Р., Рыльникова М.В., 2020. Развитие научно-методических основ устойчивого функционирования горнотехнических систем в условиях внедрения нового технологического уклада. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*, № 4, С. 24 - 39.
2. Рыльникова М.В., Пыталев И.А., 2020. Цифровая трансформация горнодобывающей отрасли: технические решения и технологические вызовы. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*, № 1, С. 470 - 481.
3. Kornilov S.V., Antoninova N.Yu., Panzhin A.A., Shubina L.A., Isakov S.V., 2020. Specifying the approaches to geoinformation monitoring to assess the development dynamics of mining enterprises as natural-technological systems. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*, No. 8, P. 41 - 51. DOI:10.21440/0536-1028-2020-8-41-51.
4. Соколов И.В., Антипин Ю.Г., Никитин И.В., 2021. *Методология выбора подземной геотехнологии при комбинированной разработке рудных месторождений*. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 340 с.
5. Громов Е.В., 2020. Цифровая трансформация технологических процессов подземных горных работ: ретроспективный анализ и мировой опыт. *Известия вузов. Горный журнал*, № 8, С. 90 - 106.
6. Исьянов О.А., Марчев А.С., Рабольт А.Н., Мерескин И.В., 2019. Опыт применения низкопрофильной роботизированной погрузо-доставочной машины XLPD при отработке маломощных пластообразных рудных тел рудника №8 ПАО «ППГХО»

им. Е.П. Славского». *Горная промышленность*, №6 (148), С. 44 - 48. DOI: <http://dx.doi.org/10.30686/1609-9192-2019-6-148-44-48>.

7. Дик Ю.А., Котенков А.В., Танков М.С., 2014. *Практика опытно-промышленных испытаний технологий разработки рудных месторождений*. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 480 с.

8. Дарбинян Т.П., Фендер С.Н., Гузанов П.С., 2017. Опыт внедрения камерных систем разработки при отработке медистых руд рудника «Октябрьский». *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*, № 4 (3), С.121-125.

9. Роботизированная и дистанционно управляемая подземная техника: внедрение, эксплуатация, перспективы. URL: <https://mining-media.ru> (дата обращения: 23.09.2021).

10. Хрищенко А.Б. 2018. Автоматизация производственных процессов КФ АО «Апатит». МГПК БЕАР. URL: <http://conference.ncsi.ru> (дата обращения: 26.07.2021).

11. АЛРОСА автоматизирует буровые работы на подземных рудниках. URL: <http://www.alrosa.ru> (дата обращения: 21.07.2021).

12. Кузьмин Е.В., Баранов А.В., 2010. Освоение автоматически управляемых комплексов при добыче кимберлитовых руд. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № S1, С. 355 - 361.

13. Casteel K., 2008. Underground haulage equipment trends. *Engineering and Mining Journal*, april, pp. 773-775.

14. Kapde S., 2009. Automation and Robotics in Mining and Mineral Processing. *Springer Handbook of Automation*, part F, no. 57, pp. 1001-1012.

15. Никитин И.В., 2017. Оптимизация параметров вскрытия при подземной разработке подкарьерных запасов кимберлитового месторождения. *Проблемы недропользования*, №1, С.21-28. DOI: 10.18454/2313-1586.2017.01.029

16. Соколов И.В., Антипин Ю.Г., Никитин И.В., Криницын Р.В., 2021. Обоснование конструкции и параметров комбинированной системы разработки пологой залежи бедных комплексных руд. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 5 - 1, С. 88 - 104. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_51_0_88.

17. Желябовский Ю.Г., 2007. Система подземной разработки полезных ископаемых с сыпучей закладкой для отработки кимберлитовых трубок. *Горный журнал*, № 3, С. 37 - 39.

18. Голик В.И., Лукьянов В.Г., Хашева З.М., 2015. Обоснование возможности и целесообразности использования хвостов обогащения руд для изготовления твердеющих смесей. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*, № 5, С. 6 - 14.

19. Sheshpari M., 2015. Review of underground mine backfilling methods with emphasis on cemented paste backfill. *The Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 20, no. 13, pp. 5183 - 5208.

20. Шварц Ю.Д., 2000. Подземные комплексы по добыче и переработке минерального сырья – предприятия XXI века. *Горная промышленность*, №1, С. 34 - 36.

21. Пирогов Г.Г., 2005. Структура и состав технологической схемы разработки рудных месторождений на базе подземных горно-обогачительных комплексов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 5, С. 202 - 205.

22. Соколов И.В., Смирнов А.А., Гобов Н.В., Антипин Ю.Г., 2014. Целесообразность применения подземных обогачительных комплексов на железорудных шахтах. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 6, С. 197 - 206.

23. Сонг Г., 2016. Опыт внедрения автоматизации процессов подземной добычи угля на примере китайской угольной промышленности. *Уголь*, № 2, С. 25 - 29.

24. Li J., Zhan K., 2018. Intelligent mining technology for an underground metal mine based on unmanned equipment. *Engineering*, no. 4, pp. 381 - 391.
25. *Mine of the Future*. URL: <http://www.riotinto.com/australia/pilbara/mine-of-the-future-9603.aspx> (дата обращения: 25.06.2021).
26. Яковлев В.Л., 2019. *Исследование переходных процессов – новое направление в развитии методологии комплексного освоения георесурсов*. Екатеринбург: УрО РАН, 284 с.
27. Яковлев В.Л., Корнилков С.В., Соколов И.В., 2018. *Инновационный базис стратегии комплексного освоения ресурсов минерального сырья*. Под ред. член-корр. РАН В.Л. Яковлева. Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 360 с.
28. Трушко В.Л., Трушко О.В., 2021. Комплексное освоение железорудных месторождений на основе конкурентоспособных подземных геотехнологий. *Записки Горного института*. Т. 250, С. 569 - 577. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.10
29. Постановление Правительства РФ от 13.09.2016 № 913 «О ставках платы за негативное воздействие на окружающую среду и дополнительных коэффициентах». URL: <https://base.garant.ru/71489914/> (дата обращения: 16.12.2021)
30. Соколов И.В., Смирнов А.А., Никитин И.В., Соломеин Ю.М., 2020. Комплексная оценка стратегии освоения железорудных месторождений экологически-сбалансированной подземной геотехнологией. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 3–1, С. 313 - 325.

References

1. Kaplunov D.R., Ryl'nikova M.V., 2020. *Razvitie nauchno-metodicheskikh osnov ustoichivogo funktsionirovaniya gornotekhnicheskikh sistem v usloviyakh vnedreniya no-vogo tekhnologicheskogo uklada* [Development of scientific and methodological foundations for the sustainable functioning of mining systems in the context of the introduction of a new technological order]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*, № 4, P. 24 - 39.
2. Ryl'nikova M.V., Pytalev I.A., 2020. *Tsifrovaya transformatsiya gornodobyvayushchei otrasli: tekhnicheskie resheniya i tekhnologicheskie vyzovy* [Digital transformation of the mining industry: technical solutions and technological challenges]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*, № 1, P. 470 - 481.
3. Kornilkov S.V., Antoninova N.Yu., Panzhin A.A., Shubina L.A., Isakov S.V., 2020. Specifying the approaches to geoinformation monitoring to assess the development dynamics of mining enterprises as natural-technological systems. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*, No. 8, P. 41 - 51. DOI:10.21440/0536-1028-2020-8-41-51.
4. Sokolov I.V., Antipin Yu.G., Nikitin I.V., 2021. *Metodologiya vybora podzemnoi geotekhnologii pri kombinirovannoi razrabotke rudnykh mestorozhdenii* [Methodology of selection the underground geotechnology by the combined development of ore deposits]. *Ekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta*, 340 p.
5. Gromov E.V., 2020. *Tsifrovaya transformatsiya tekhnologicheskikh protsessov podzemnykh gornykh rabot: retrospektivnyi analiz i mirovoi opyt. Izvestiya vuzov* [Digital transformation of technological processes of underground mining: a retrospective analysis and worldwide experience]. *Gornyi zhurnal*, № 8, P. 90 - 106.
6. Is'yanov O.A., Marchev A.S., Rabol't A.N., Mereskin I.V., 2019. *Opyt primeneniya nizkoprofil'noi robotizirovannoi pogrupo-dostavochnoi mashiny XLPD pri otrabotke malomoshchnykh plastoobraznykh rudnykh tel rudnika №8 PAO "PPGKhO" im. E.P. Slavskogo'* [Experience in the use of a low-profile robotic XLPD loading and delivery machine in the development of low-power embedded ore bodies of the mine No. 8 of PAO PPGHO named after E.P. Slavsky]. *Gornaya promyshlennost'*, №6 (148), P. 44 - 48. DOI: <http://dx.doi.org/10.30686/1609-9192-2019-6-148-44-48>.

7. Dik Yu.A., Kotenkov A.V., Tankov M.S., 2014. *Praktika opytно-promyshlennykh ispytaniy tekhnologii razrabotki rudnykh mestorozhdeniy* [Practice of pilot testing of technologies for the development of ore deposits]. Ekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta, 480 p.
8. Darbinyan T.P., Fender S.N., Guzanov P.S., 2017. *Opyt vnedreniya kamernykh sistem razrabotki pri otrabotke medistykh rud rudnika "Oktyabr'skii"*. [Experience of implementation of chamber development systems during the mining of copper ores of the Oktyabrsky mine]. *Fundamental'nye i prikladnye voprosy gornykh nauk*, № 4 (3), P.121-125.
9. *Robotizirovannaya i distantsionno upravlyаемaya podzemnaya tekhnika: vnedrenie, ekspluatatsiya, perspektivy* [Robotic and remotely controlled underground equipment: implementation, operation, prospects]. URL: <https://mining-media.ru> (data obrashcheniia: 23.09.2021).
10. Khrishchenyuk A.B. 2018. *Avtomatizatsiya proizvodstvennykh protsessov KF AO "Apatit". MGPK BEAR* [Automation of production processes of KF AO "Apatit". MGPC BEA]. URL: <http://conference.ncci.ru> (data obrashcheniya: 26.07.2021).
11. *ALROSA avtomatiziruet burovye raboty na podzemnykh rudnikakh* [ALROSA automates drilling operations at underground mines]. URL: <http://www.alrosa.ru> (data obrashcheniya: 21.07.2021).
12. Kuz'min E.V., Baranov A.V., 2010. *Osvoenie avtomaticheskii upravlyаемykh kompleksov pri dobyche kimberlitovykh rud* [Development of automatically controlled complexes during extraction of kimberlite ores]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № S1, P. 355 - 361.
13. Casteel K., 2008. Underground haulage equipment trends. *Engineering and Mining Journal*, april, pp. 773-775.
14. Kapde S., 2009. Automation and Robotics in Mining and Mineral Processing. *Springer Handbook of Automation*, part F, no. 57, pp. 1001-1012.
15. Nikitin I.V., 2017. *Optimizatsiya parametrov vskrytiya pri podzemnoi razrabotke podkar'ernykh zapasov kimberlitovogo mestorozhdeniya* [Optimization of parameters of the opening during the underground development of pit reserves of a kimberlite deposit]. *Problemy nedropol'-zovaniya*, №1, P.21-28. DOI: 10.18454/2313-1586.2017.01.029
16. Sokolov I.V., Antipin Yu.G., Nikitin I.V., Krinitsyn R.V., 2021. *Obosnovanie konstruktssii i parametrov kombinirovannoi sistemy razrabotki pologoi zalezhi bednykh kompleksnykh rud*. [Substantiation of design and parameters of the combined system for the development of a flat deposit of poor complex ores]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 5 - 1, P. 88 - 104. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_51_0_88.
17. Zhelyabovskii Yu.G., 2007. *Sistema podzemnoi razrabotki poleznykh iskopаемykh s sypuchei zakladkoi dlya otrabotki kimberlitovykh trubok* [A system of underground mining of minerals with friable attel for mining kimberlite pipes]. *Gornyi zhurnal*, № 3, P. 37 - 39.
18. Golik V.I., Luk'yanov V.G., Khasheva Z.M., 2015. *Obosnovanie vozmozhnosti i tselesoobraznosti ispol'zovaniya khvostov obogashcheniya rud dlya izgotovleniya tverdeyushchikh smesei* [Substantiation of possibility and expediency of using ore beneficiation tailings for the manufacturing of hardening mixtures]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov*, № 5, P. 6 - 14.
19. Sheshpari M., 2015. Review of underground mine backfilling methods with emphasis on cemented paste backfill. *The Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 20, no. 13, pp. 5183 - 5208.
20. Shvarts Yu.D., 2000. *Podzemnye komplekсы po dobyche i pererabotke mineral'nogo syr'ya – predpriyatiya XXI veka* [Underground complexes for the extraction and processing of mineral raw materials are enterprises of the XXI century]. *Gornaya promyshlennost'*, №1, P. 34 - 36.
21. Pirogov G.G., 2005. *Struktura i sostav tekhnologicheskoi skhemy razrabotki rudnykh mestorozhdeniy na baze podzemnykh gorno-obogatitel'nykh kompleksov* [Structure and

composition of the technological scheme for the development of ore deposits on the basis of underground mining and processing complexes]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 5, P. 202 - 205.

22. Sokolov I.V., Smirnov A.A., Gobov N.V., Antipin Yu.G., 2014. *Tselesoobraznost' primeneniya podzemnykh obogatitel'nykh kompleksov na zhelezorudnykh shakhtakh* [Purpose of the use of underground processing complexes at iron-ore mines]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 6, P. 197 - 206.

23. Song G., 2016. *Opyt vnedreniya avtomatizatsii protsessov podzemnoi dobychi uglya na primere kitaiskoi ugol'noi promyshlennosti* [Experience in implementing automation of underground coal mining processes on the example of the Chinese coal industry]. *Ugol'*, № 2, P. 25 - 29.

24. Li J., Zhan K., 2018. Intelligent mining technology for an underground metal mine based on unmanned equipment. *Engineering*, no. 4, pp. 381 - 391.

25. Mine of the Future. URL: <http://www.riotinto.com/australya/pilbara/mine-of-the-future-9603.aspx> (data obrashcheniya: 25.06.2021).

26. Yakovlev V.L., 2019. *Issledovanie perekhodnykh protsessov – novoe napravlenie v razvitiy metodologii kompleksnogo osvoeniya georesursov* [Study of transients is a new direction in the development of the methodology of integrated development of geo-resources]. Ekaterinburg: UrO RAN, 284 p.

27. Yakovlev V.L., Kornilkov S.V., Sokolov I.V., 2018. *Innovatsionnyi bazis strategii kompleksnogo osvoeniya resursov mineral'nogo syr'ya* [Innovative basis of the strategy of integrated development of mineral resources]. Pod red. chlen-korr. RAN V.L. Yakovleva. Ekaterinburg: IGD UrO RAN, 360 p.

28. Trushko V.L., Trushko O.V., 2021. *Kompleksnoe osvoenie zhelezorudnykh mestorozhdenii na osnove konkurentosposobnykh podzemnykh geotekhnologii* [Complex development of iron-ore deposits based on competitive underground geotechnologies]. *Zapiski Gornogo instituta*. T. 250, P. 569 - 577. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.10

29. *Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 13.09.2016 № 913 "O stavkakh platy za negativnoe vozdeistvie na okruzhayushchuyu sredu i dopolnitel'nykh koeffitsientakh' »*. [Decree of the Government of the Russian Federation No. 913 dated 13.09.2016 "On the rates of payment for negative environmental impact and additional coefficients"]. URL: <https://base.garant.ru/71489914/> (data obrashcheniya: 16.12.2021)

30. Sokolov I.V., Smirnov A.A., Nikitin I.V., Solomein Yu.M., 2020. *Kompleksnaya otsenka strategii osvoeniya zhelezorudnykh mestorozhdenii ekologicheskii-sbalansirovannoi podzemnoi geotekhnologii* [Comprehensive assessment of the strategy for the development of iron ore deposits by ecologically balanced underground geotechnology]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 3– 1, P. 313 - 325.