

УДК 622.684

DOI: 10.18799/24131830/2025/8/4829

Шифр специальности ВАК 2.8.7

Научная статья

Рациональная стратегия переходных процессов при формировании транспортной системы карьера для увеличения эффективной глубины его разработки

А.Г. Журавлёв✉

Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, Россия, г. Екатеринбург

✉juravlev@igduran.ru

Аннотация. Актуальность. Необходимость повышения степени освоения георесурсов глубокозалегающих месторождений твердых полезных ископаемых требует поиска методологических подходов к увеличению экономически достижимой глубины открытого способа разработки как более безопасного и производительного в сравнении с подземным. Один из вариантов – снижение расходов на транспортирование горной массы, которые в себестоимости товарной руды для глубоких карьеров достигают 50% и более. Рассматривается влияние моментов и характера осуществления переходных процессов при формировании транспортной системы и соответствующей трансформации схемы вскрытия месторождения на экономически достижимую глубину карьера. **Цель:** разработка методологических принципов выбора моментов осуществления переходных процессов в развитии транспортной системы глубокого карьера (как элемента горнотехнической системы) на основе учета их влияния на итоговые технико-экономические показатели. **Объекты:** карьер на глубокозалегающем месторождении и его транспортная система. **Методы:** горно-геометрический анализ, укрупненные технико-экономические расчеты экономических показателей разработки месторождения, учитывающие вид транспорта и глубину ведения горных работ. **Результаты.** Приведены результаты расчетов разницы доходов и расходов по вариантам глубины теоретического карьера. Показано влияние момента осуществления переходных процессов по развитию транспортной системы карьера (перехода с автомобильного на комбинированный транспорт) на экономически достижимую глубину карьера. Представлена концепция поэтапного осуществления переходных процессов по трансформации транспортной системы. Предложенный подход обеспечивает определение рациональных моментов осуществления переходных процессов по трансформации транспортной системы карьера и, соответственно, схемы вскрытия, обеспечивающих технико-экономические преимущества и достижение максимальной эффективной глубины разработки месторождения.

Ключевые слова: глубина карьера, транспортная система карьера, переходный процесс, оптимизация, моделирование, технико-экономические показатели

Благодарности: Исследование выполнено в рамках Государственного задания № 075-00410-25-00. Г.р. № 1022040200004-9-1.5.1. Тема 1 (2025-2027). Методология обоснования перспектив технологического развития комплексного освоения минерально-сырьевых ресурсов твердых полезных ископаемых России (FUWE-2025-0001).

Для цитирования: Журавлёв А.Г. Рациональная стратегия переходных процессов при формировании транспортной системы карьера для увеличения эффективной глубины его разработки // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 8. – С. 31–43. DOI: 10.18799/24131830/2025/8/4829

UDC 622.684
DOI: 10.18799/24131830/2025/8/4829
Scientific paper

Rational strategy of transition processes in the formation of the quarry transport system to increase the effective depth of its development

A.G. Zhuravlev✉

Institute of Mining of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russian Federation

✉juravlev@igduran.ru

Abstract. Relevance. The need to increase the degree of development of the geo-resources of deep-lying deposits of solid minerals requires the search for methodological approaches to increase the economically achievable depth of the open-pit mining method as safer and more productive in comparison with the underground one. One of the options is to reduce the cost of transporting rock mass, which in the cost of commercial ore for deep quarries reach 50% or more. The article examines the impact of the moments and nature of the implementation of transients in the formation of the transport system and the corresponding transformation of the field opening scheme on the economically achievable depth of the quarry. **Aim.** Development of methodological principles for choosing the moments of transition in the development of the deep pit transport system (as an element of the mining system) based on their impact on the final technical and economic indicators. **Objects.** A quarry at a deep-lying deposit and its transport system. **Methods.** Mining and geometric analysis, enlarged technical and economic calculations of economic indicators of field development, taking into account the type of transport and the depth of mining operations. **Results.** The paper introduces the results of calculations of the difference between income and expenses according to the variants of a theoretical quarry depth. The paper shows the impact of the moment of implementation of transitional processes for the development of the quarry transport system (transition from automobile to combined transport) on the economically achievable depth of the quarry. The author presents the concept of step-by-step implementation of transitional processes for transport system transformation. The proposed approach ensures the search for rational moments in the implementation of transitional processes for the transformation of the quarry transport system and, accordingly, the opening scheme, providing technical and economic advantages and achieving the maximum effective depth of field development.

Keywords: quarry depth, quarry transport system, transition process, optimization, modeling, technical and economic indicators

Acknowledgements: The research was carried out within the framework of the State Task no. 075-00410-25-00. G.r. no. 1022040200004-9-1.5.1. Subject 1 (2025–2027). Methodological foundations of the strategy of integrated development of reserves of solid mineral deposits in the dynamics of development of mining systems (FUWE-2022-0005)

For citation: Zhuravlev A.G. Rational strategy of transition processes in the formation of the quarry transport system to increase the effective depth of its development. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 8, pp. 31–43. DOI: 10.18799/24131830/2025/8/4829

Введение

Открытый способ разработки полезных ископаемых характеризуется высокой производительностью, низкой себестоимостью добычи руды, относительной безопасностью, лучшими (в сравнении с шахтами) условиями труда. Однако при углубочной системе разработки он зачастую имеет ограничения по полноте освоения запасов месторождения, поскольку технико-экономически обусловленный граничный контур карьера не обеспечивает выемку глубинных запасов месторождения. В конечном счете экономически достижимая глубина карьера определяется следующим параметрами: средний угол откоса бортов карьера (более детально – конструкция бортов карьера) и предельная глубина карьера; себестоимость ведения горных работ и транспорта.

При последовательной открыто-подземной разработке месторождений границы карьера должны учитывать эффективность подземных горных работ. В этом плане современные исследования сосредоточены как на совершенствовании известных методик, так и на разработке новых подходов по оптимизации момента перехода [1–6].

В случае применения только открытого способа разработки на месторождении крайне актуален вопрос увеличения экономически эффективной и технологически достижимой глубины карьеров вплоть до границы балансовых запасов. В этом направлении исследования сосредоточены на нескольких аспектах:

- совершенствовании методических принципов определения граничных технико-экономических показателей и критериев [7, 8];

- снижении затрат по отдельным процессам и этапам горных работ [9];
- более точном планировании производительности карьера, в том числе в условиях неопределенности по ряду исходных данных горно-геологического характера [10, 11];
- оптимизации направления углубки, порядка развития горных работ, календарного графика как в теоретическом плане [12–15], так и на основе моделирования и перспективных методов компьютерной оптимизации [15–18];
- оптимизации параметров и элементов системы разработки, конечного контура карьера [19–23] как по конструктивным и технологическим аспектам, так и в увязке с прочностными свойствами и устойчивостью массива.

Значимые результаты может дать методологический подход, основанный на оптимизации переходных процессов в развитии карьера как горнотехнической системы [24]. Он подразумевает рассмотрение изменений в параметрах или структуре элементов горнотехнической системы (карьера) как процессов, влияющих на параметры ее жизненного цикла, характеризующих продолжительностью, целевыми показателями и управляющими воздействиями, а также динамикой осуществления.

Важным элементом горнотехнической системы является карьерный транспорт, также обладающий большим потенциалом оптимизации в парадигме переходных процессов [25]. Широко используемые и активно развивающиеся методы автоматизированного планирования работы карьерного транспорта с применением ЭВМ [26–31] позволяют эффективно решать задачи определения рационального парка машин, состава комплексов механизации выемочно-транспортных работ, прогнозирования производительности машин с учетом большого количества факторов и в условиях неопределенности исходных данных (отсутствие ряда данных горно-геологического характера, уточняемых только в процессе эксплуатации месторождения), однако они не дают комплексный инструментарий для оптимизации стратегии формирования транспортной системы.

Ранее исследованиями [32] показано, что момент реализации переходного процесса при формировании транспортной системы карьера, а также порядок его осуществления существенно влияют на технико-экономический эффект от его реализации. Для рационального планирования необходим методический инструментарий, позволяющий определить рациональные моменты осуществления переходных процессов. Данный вопрос может быть решен на двух уровнях:

1. Комплексным моделированием функционирования горнотехнической системы (карьера), при

котором наиболее эффективный вариант по заданным критериям определяется методом вариантов. Это наиболее точный, но трудоемкий подход. Для достижения удовлетворительной точности моделирование должно быть реализовано в виде программы для ЭВМ и воспроизводить по всем основным параметрам и показателям его функционирование за жизненный цикл или этап. Известные программные продукты, например, [33, 34], для применения указанного подхода должны быть преобразованы в гибкие цифровые платформы; и такая работа ведется их разработчиками.

2. Методами, обеспечивающими поиск частных оптимумов для отдельных элементов горнотехнической системы (по отдельным процессам горных работ, участкам горных работ, элементам и параметрам системы разработки и т. п.). Такой подход, несмотря на то, что не дает наиболее точных результатов, позволяет решать задачи локально, укрупненно оптимизировать отдельные процессы, отыскивать наиболее рациональные решения при отборе вариантов для вышеуказанного первого методического подхода. В данном направлении имеется недостаток прикладной методической базы.

Несмотря на все преимущества первого подхода, он позволяет отыскивать рациональные (оптимальные) стратегии только методом вариантов. Возможно, конечно, применение математических методов ускоренного поиска, но только автоматизированный расчет все равно будет связан с ресурсоемким расчетом большого количества вариантов. В связи с этим необходимо применение в комплексе как первого, так и второго подхода, который является инструментом направленного быстрого поиска областей, где рационально искать оптимум моментов осуществления переходных процессов, а также их примерной результативности.

В связи с этим *цель* исследования – разработка методологических принципов выбора моментов осуществления переходных процессов в развитии транспортной системы глубокого карьера (как элемента горнотехнической системы) на основе учета их влияния на итоговые технико-экономические показатели.

Учитывая, что задача решается на методологическом уровне, расчеты выполняются укрупненно.

Методы исследования

Анализ и синтез, математические преобразования при выводе расчетных выражений. В качестве базовых зависимостей использованы фундаментальные закономерности открытой геотехнологии и физики, а также достоверные закономерности функционирования карьерного транспорта [35].

Расчет укрупненных технико-экономических показателей разработки месторождения выполнялся по следующим принципам:

- контуры карьеров отстраивались укрупненно по среднему углу откоса бортов, определяемому расчетно с учетом уклона и ширины транспортных берм [36];
- в карьерном поле выделялось рудное тело постоянной мощности (для упрощения принято допущение, что оно имеет круглое сечение и расположено вертикально), ценность руды принята постоянной по всему объему;
- объем вскрыши в контурах карьера определен как разница полного объема горной массы и объема руды;
- затраты на выемку рассчитаны по средней себестоимости выемочно-погрузочных работ, принятой по данным рудных карьеров;
- расходы на буровзрывные работы и общекарьерные расходы рассчитаны по среднестатистическим данным, принятым по литературным источникам в отнесении на 1 м^3 горной массы;
- учет изменения затрат на транспортирование с глубиной обеспечен погоризонтным расчетом (рис. 1): объем горной массы на каждом рабочем горизонте в пределах высоты уступа разбит на элементарные выемочные объемы, равные ширине экскаваторной заходки; себестоимость

принималась для рассматриваемого вида транспорта за 1 ткм, пересчет объема выполнялся по средней плотности горной массы в целике; учтено расстояние транспортирования по горизонту до начала подъема, расстояние движения на подъем по временным и постоянным съездам (уклон трассы принимался в соответствии с возможностями рассматриваемого транспорта, а дальность считалась от высоты подъема H_p с расчетного горизонта) и расстояние доставки на поверхности (принято 1 км для руды; для вскрыши рассчитано через средневзвешенную высоту подъема на отвалы, принятую 30 м, но не менее 1 км с учетом средневзвешенной дальности доставки в пределах отвала при формировании его в плане).

Для предварительных расчетов объем потребных инвестиций в строительство горнодобывающего предприятия с открытым способом разработки может быть определен по статистическим данным. На рис. 2 представлен укрупненный анализ по открытым источникам информации [37–41] объема вложений в строительство ГОК на территории России в сфере добычи руд металлов (железная руда, цветные металлы, золото, редко-земельные металлы) с учетом их переработки в концентраты, а в случае золоторудных месторождений – их переработки в сплав Доре.

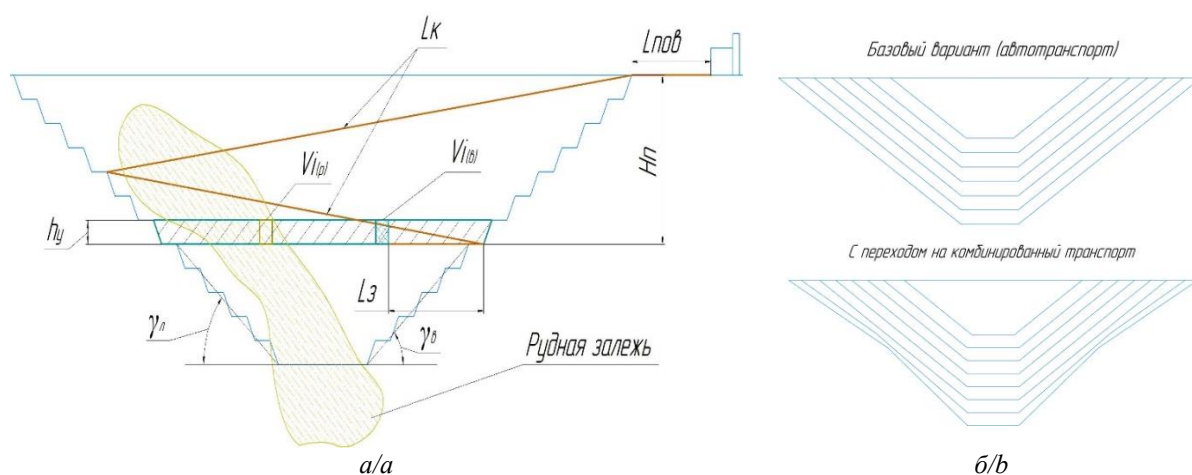


Рис. 1. Расчетная схема к укрупненному определению объемов выемки и транспортной работы: а) к расчету в пределах одного контура карьера; б) для построения контуров карьера при рассмотрении разных глубин (H_p – высота подъема горной массы с расчетного горизонта; L_z , L_k – дальность транспортирования соответственно от забоя по горизонту и на подъем в пределах карьера; $L_{пов}$ – дальность транспортирования за пределами карьера; $V_i(p)$, $V_i(в)$ – элементарный объем горной массы соответственно по руде и вскрыше; h_y – высота уступа; H_k – конечная глубина карьера; γ_l , γ_v – средний угол откоса бортов карьера соответственно по лежащему и висячему боку)

Fig. 1. Calculation scheme for the enlarged determination of the volumes of excavation and transport work: а) for calculation within the same contour of the quarry; б) for constructing the contours of a quarry when considering different depths (H_p – height of lifting the rock mass from the calculated horizon; L_z , L_k – range of transportation, respectively, from the face along the horizon and to the rise within the quarry; $L_{пов}$ – range of transportation outside the quarry; $V_i(p)$, $V_i(в)$ – elementary volume of mining masses, respectively, by ore and overburden; h_y – height of the ledge; H_k – quarry final depth; γ_l , γ_v – average angle of slope of the quarry sides, respectively, on the lying and hanging side)

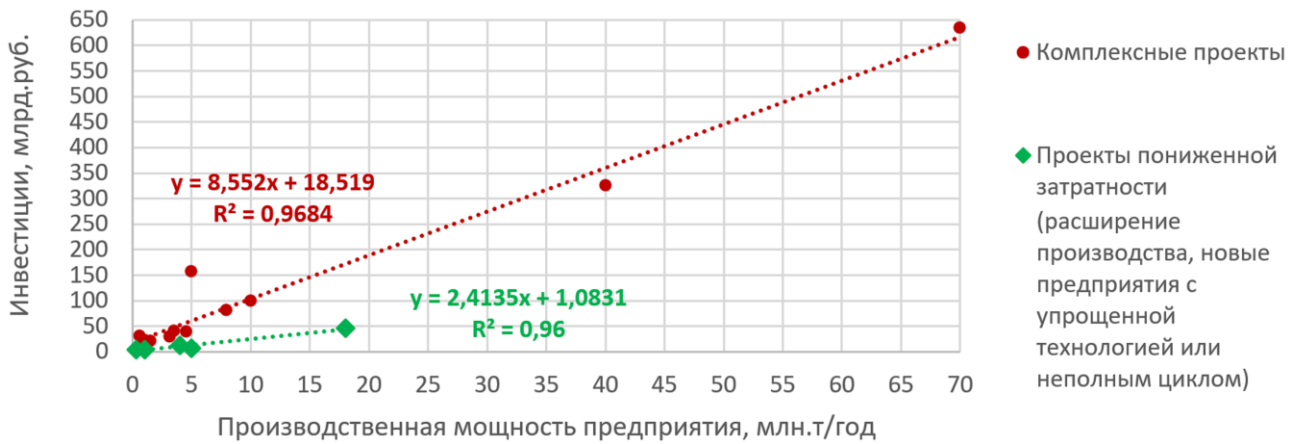


Рис. 2. Закономерности взаимосвязи производственной мощности ГОК с открытым способом разработки месторождений и необходимого объема инвестиций в его строительство (руды черных, цветных и редких металлов) в ценах 2020 г.

Fig. 2. Patterns of interrelation of production capacity of the GOK with the open-pit mining method and the required amount of investment in its construction (ores of ferrous, non-ferrous and rare metals) in 2020 prices

На требуемый объем инвестиций влияет большое количество факторов: наличие транспортной и энергетической инфраструктуры, людских ресурсов, рельеф и сложность инженерно-геологических условий, сезонно-климатические факторы, вид полезного ископаемого и его геологические характеристики, технология и глубина переработки и др. Однако основным фактором является производственная мощность. Также существенное влияние на суммарные экономические показатели освоения месторождения оказывают технология разработки, стратегия освоения месторождения и календарный график.

Экономические расчеты базируются на общепринятой методике постатейной калькуляции затрат, а также дисконтировании денежных потоков. Стоимостные показатели рассчитываются укрупненно по удельным среднестатистическим показателям предприятий-аналогов (при выборе аналогов учитывается вид добываемого сырья, регион и его инфраструктурная освоенность, горно-геологические условия, производственная мощность и масштаб производства).

Использование стандартного подхода к оценке инвестиционных проектов с помощью дисконтирования для выбора стратегии разработки месторождения на всем жизненном цикле не пригодно, т. к. он искусственно обесценивает затраты и доходы на значительных временных расчетных лагах, а описываемый подход требует оценки денежных потоков на всем жизненном цикле. Для примера на рис. 3 приведены результаты расчета дисконтиро-

вания равномерного денежного потока в относительных единицах. Из рис. 3, а видно, что графики существенно выполаживаются при значительном временном интервале оценки, а при больших значениях нормы дисконта это наблюдается также на средних и малых временных интервалах. Ориентировочная оценка границ искажения (рис. 3, б) показывает, что полное обесценивание потока денег за счет метода дисконтирования наблюдается для нормы дисконта 5–10 % после периода оценки 22–40 лет, а при большей норме дисконта снижается вплоть до 7 лет (кривая «Выполаживание»). Область справедливых оценок путем дисконтирования (ниже кривой «Начало искривления») характерна для расчетов с нормой дисконта до 10 % при интервалах оценки до 10–20 лет, причем повышение нормы дисконта до 15 % сокращает этот лаг до 7 лет, а далее до 5 лет и менее.

Следовательно, оценка стратегии разработки месторождений со сроком функционирования горнодобывающего предприятия более 10 лет требует корректировки подхода в определении нормы дисконта либо применения метода прямых расходов денежных потоков (без дисконтирования). В приведенных расчетах применен следующий подход:

- при расчете предельной глубины разработки и выбора момента осуществления переходных процессов дисконтирование не применялось;
- при расчете динамики экономических показателей во времени применен коэффициент дисконтирования 5 %.

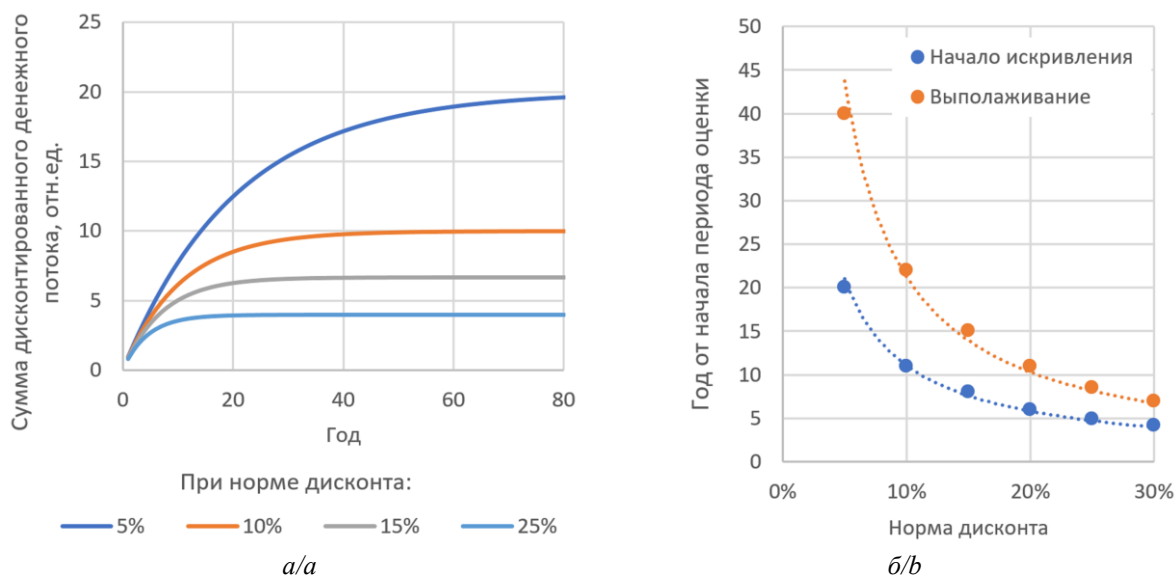


Рис. 3. Динамика изменения стоимостных показателей при дисконтировании: а) изменение накопленного дисконтированного денежного потока во времени; б) ориентировочные границы искажения истинных значений доходов/расходов при дисконтировании

Fig. 3. Dynamics of changes in cost indicators during discounting: а) change in accumulated discounted cash flow over time; б) approximate limits of distortion of the true values of income/expenses during discounting

Результаты и их анализ

Трансформация транспортной системы карьера, осуществляемая при переходном процессе, влияет на результирующие экономические показатели главным образом по следующим показателям:

- сокращению эксплуатационных затрат на транспорт;
- уменьшению затрат за счет сокращения объемов вскрыши в контурах карьера (благодаря оптимизации схемы вскрытия и/или параметров транспортных коммуникаций);
- увеличению выручки благодаря повышению полноты освоения месторождения (за счет прирезки объемов рудной залежи при изменении контуров карьера).

Установлено, что без оптимизации режима горных работ (в том числе без применения приемов управления параметрами бортов карьера на промежуточных контурах, обеспечивающих перераспределение объемов вскрыши во времени [7]) последние 50 % по глубине карьера относительно проектного контура формируют 25–31 % общего объема выемки горной массы и 35–41 % суммарных эксплуатационных затрат на добычу, а последние 25 % по глубине – соответственно 5–6 % от объема горной массы и 9–10 % эксплуатационных затрат. Расхождение доли объема выемки и суммы затрат связано с нарастанием расходов на карьерный транспорт с глубиной.

Таким образом, при поиске предельно достижимой по технико-экономическим критериям глубины карьера необходимо учитывать нелинейные

взаимообусловленные закономерности, содержащие в качестве аргумента саму глубину. Решение задач такого класса в прикладных расчетах выполняется численными методами, наиболее применимым из которых в горном деле является метод вариантов (перебора).

По результатам предварительного анализа установлено, что решение рассматриваемой задачи на конкретном примере реального карьера (сложная геометрия залегания рудных тел, осложненная геология, влияющая на устойчивый угол бортов карьера с глубиной и т. п.) вносит значительное количество отклонений из-за влияющих факторов и не дает представления об искомой закономерности, затрудняет выбор критериев для оценки максимальной достижимой глубины карьера. В связи с этим теоретическая часть исследования выполнялась на теоретизированном модельном карьере с вертикально залегающим рудным телом округлой в сечении формы с неограниченной глубиной пространства. Угол откоса бортов принимался исходя только из конструктивных соображений, определяемых параметрами транспортных берм и берм очистки (параметры берм очистки задавались исходя из среднестатистических значений, принятых на реальных объектах-прототипах). В качестве наиболее близкого прототипа исследуемых карьеров приняты алмазородные карьеры Западной Якутии [19].

Если считать прибыль при отработке месторождения открытым способом по вариантам глубины (кривые А на рис. 4), то самыми выгодными из них

окажутся те, которые отражают баланс между выемкой значительного объема руды, обеспечивающего высокий доход, и приемлемым уровнем затрат на транспорт (максимумы кривых на графике). По мере увеличения глубины разработки заметно возрастают объемы вскрыши и затраты на транспорт, что ведет к падению рентабельности. Достижение предельной экономически оправданной глубины, обеспечивающей возможно полное освоение ресурсов месторождения, требует отказа от наибольшей прибыли и балансировки экономической составляющей по нормированной рентабельности. Норма рентабельности устанавливается исходя из условий привлечения инвестиций на разработку месторождения, уровня рисков и срока реа-

лизации проекта с учетом ценности полезного ископаемого (кривые Б на рис. 4). Тогда предельная глубина карьера по технико-экономическим возможностям находится на пересечении кривых А и Б, т. е. при условии, что прибыль равна минимально допустимой, рассчитанной через нормированную рентабельность.

На рис. 5 и далее кривые характеризуются относительными показателями сокращения эксплуатационных затрат на транспорт для унификации при обобщении разных его вариантов (в том числе варианты для кривых рентабельности также отнесены к сокращению затрат на транспорт в %). Практические примеры видов транспорта приведены в таблице.

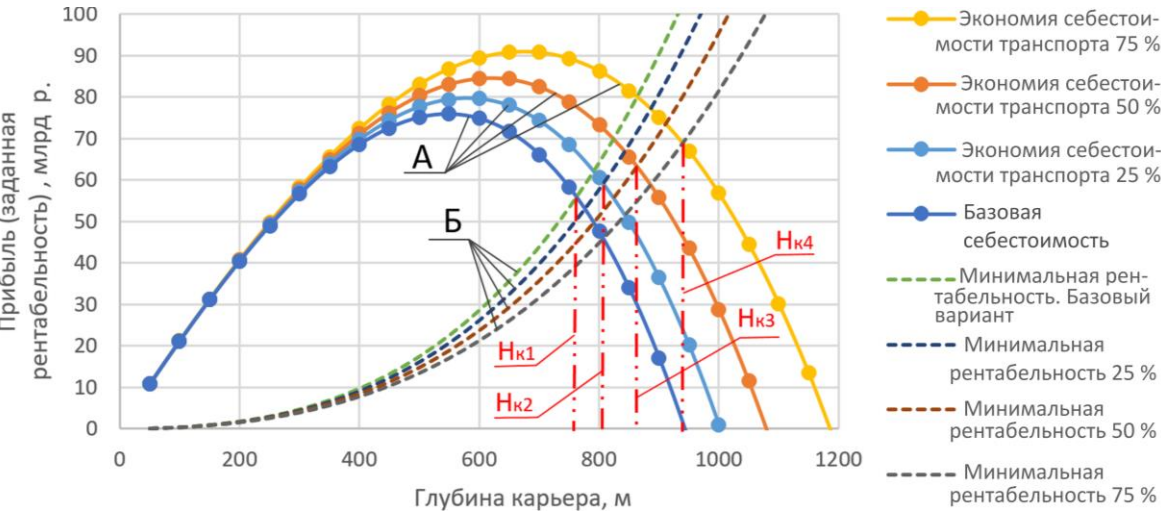


Рис. 4. Зависимости суммарной прибыли и нормированной рентабельности от конечной глубины карьера с диаметром дна 100 м и углами откоса бортов ~37° по вариантам экономичности карьерного транспорта
Fig. 4. Dependence of the total profit and normalized profitability on the final depth of the quarry with a bottom diameter of 100 m and slope angles of the sides ~37° according to the options for the efficiency of quarry transport

Таблица. Примеры видов транспорта в зависимости от уровня сокращения затрат

Table. Examples of modes of transport depending on the level of cost reduction

Сокращение затрат относительно варианта автомобильного транспорта Cost reduction relative to the road transport option, %	Примеры соответствующих видов транспорта Examples of relevant modes of transport
3–7 (до (to) 10)	автотранспорт с оптимизированными параметрами вслед за изменением горнотехнических условий (увеличение грузоподъемности, оптимизация характеристик ЭСУ, оптимизация топливной экономичности и т. п.) vehicles with optimized parameters following changes in mining conditions (increased load capacity, optimization of ESU characteristics, optimization of fuel efficiency, etc.)
15–30	1) специализированный автомобильный транспорт (дизель-троллейбусы и т. п.) specialized motor transport (diesel trolley trucks, etc.); 2) комбинированный Автосамосвалы+КНКП/2) combined Dump trucks+KNKP
50–60	1) автомобильно-железнодорожный/automobile and railway; 2) некоторые разновидности автомобильно-конвейерного транспорта some types of automobile conveyor transport
60–75	автомобильно-конвейерный, автомобильно-железнодорожно-конвейерный automobile-conveyor, automobile-railway-conveyor

ЭСУ – энергосиловая установка; КНКП – карьерная наклонная канатная подъемная установка [42].
ESU – power unit; KNKP – quarry inclined rope lifting unit [42].

Расчеты показали, что разные варианты распределения полезного ископаемого по объему и ценности имеют смещенный максимум кривых прибыли к большей или меньшей глубине, но в целом это не меняет картину принципиально. Поэтому подход, обеспечивающий рациональное по полноте освоение месторождения, должен строиться на кумулятивных экономических показателях аналогично рис. 4.

Для упрощения графического метода решения задачи целесообразно привести кривые А и Б (рис. 4) к единому графику, отражающему разницу прибыли и нормированной рентабельности. Тогда предельной по технико-экономическим возможностям глубиной разработки месторождения будет точка пересечения данной кривой с осью абсцисс.

На рис. 5 приведено семейство таких графиков, построенных для случая перехода по мере углубления карьера с автомобильного на автомобильно-конвейерный транспорт (АКТ). Соответствующий переходный процесс по развитию транспортной системы является структурным [32] и может быть осуществлен в разные моменты времени, что отражено на графике по вариантам I–IV. Чем позже осуществляется указанный процесс, тем с большим периодом и капитальными затратами связан переход на АКТ, что объясняется увеличением длины конвейерной линии и глубиной заложения полутраншеи для него (возрастает объем горно-капитальных работ).

Из рис. 5 видно, что максимальное увеличение эффективной глубины освоения месторождения

открытым способом достигается при раннем вводе в эксплуатацию конвейерного подъемника с глубины 100 м. Также опосредованно по данному графику можно сделать вывод, что за счет экономии на транспортировании такой вариант будет характеризоваться и лучшим финансовым режимом и при достижении глубин 450–600 м обеспечит более высокую прибыль в сравнении с базовым вариантом. Запоздалый переход на АКТ ведет к нивелированию эффекта, ухудшению финансового профиля проекта разработки месторождения и лишь незначительному приросту экономически достижимой глубины разработки.

Сводный график рентабельной глубины разработки месторождения открытым способом для рассматриваемых вариантов приведен на рис. 6. Рассматривались варианты с первоначальным вскрытием месторождения автосъездами с последующим переходом на комбинированный дизель-троллейвозный, автомобильно-железнодорожный или автомобильно-конвейерный транспорт. Установлено, что изменение заданного уровня рентабельности с 10 до 50 % приводит к уменьшению конечной глубины на 19–21 %. Уменьшение затрат на транспортирование на 50 % (вдвое) обеспечивает прирост глубины на 12–13 %, а сокращение затрат на транспорт в 4 раза – прирост глубины 21–23 %. Во всех случаях выявлено, что ранний переход на комбинированный транспорт обеспечивает максимальное увеличение экономически эффективной глубины освоения месторождения открытым способом.

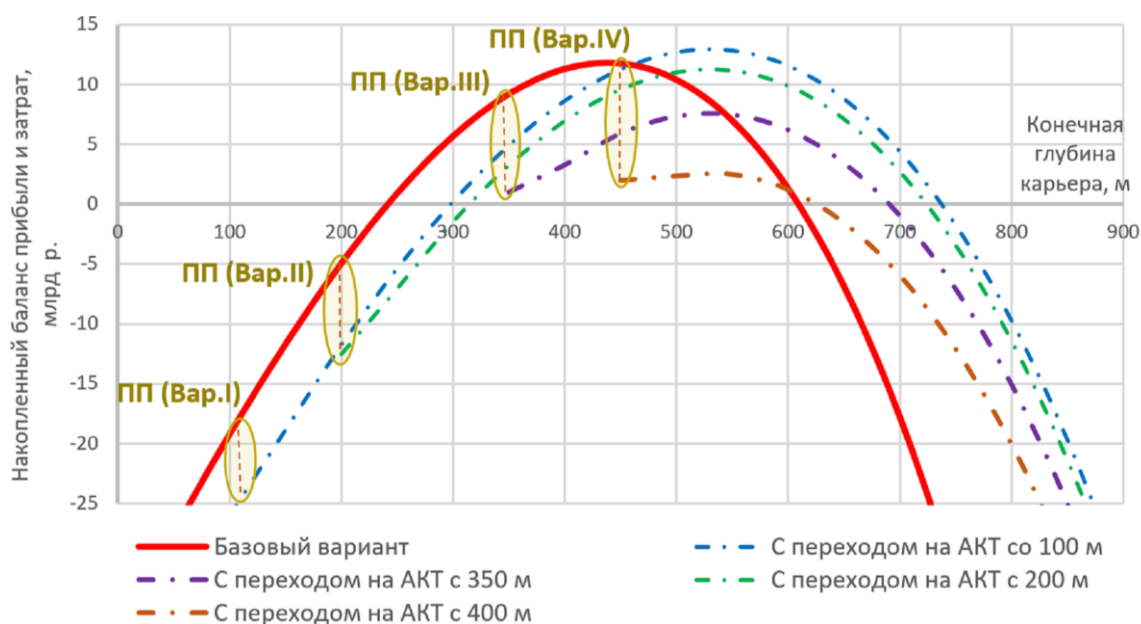


Рис. 5. Влияние момента осуществления переходного процесса (ПП) на рентабельную глубину карьера при переходе с автомобильного на автомобильно-конвейерный транспорт

Fig. 5. Impact of transition process (TP) moment on the quarry cost-effective depth during the transition from automotive to automotive-conveyor transport

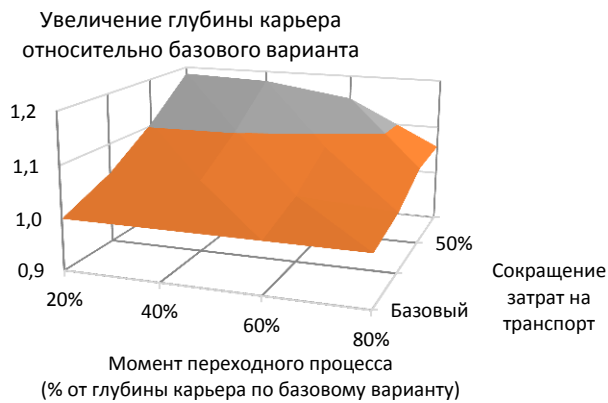


Рис. 6. Достижимая по технико-экономическому критерию глубина разработки месторождения от момента переходного процесса по трансформации транспортной системы с применением основных видов транспорта

Fig. 6. Depth of field development achievable by technical and economic criteria from the moment of the transition process for transport system transformation using the main modes of transport

Необходимо отметить, что график рис. 5 не отражает динамику финансовых показателей во времени, а демонстрирует сопоставление вариантов глубины разработки месторождения с учетом общих параметров переходных процессов. Как показано в [32], на результирующие технико-экономические показатели существенно влияет также динамика осуществления переходных процессов. Поэтому обязательно моменты и порядок осуществления переходных процессов при формировании транспортной системы с учетом динамики развития горнотехнической системы (карьера) должны уточняться расчетами изменения технико-экономических показателей во времени.

На рис. 7 приведены результаты расчета баланса выручки и затрат за вычетом нормированной рентабельности для карьера, разрабатываемого по углубочной системе, характеризуемого рациональным выбором моментов последовательной трансформации транспортной системы, обеспечивающей существенное снижение эксплуатационных затрат и тем самым увеличение экономически достижимой глубины карьера, а значит, и более полное освоение ресурсов месторождения открытым способом. Характерно, что первый переходный процесс связан с большими капиталовложениями в строительство дробильно-конвейерного комплекса, но обеспечивает существенное и долгосрочное сокращение себестоимости транспортирования, а второй переходный процесс при заметно меньших капиталовложениях (в основном на внедрение специальных автосамосвалов для крутонаклонных съездов) обеспечивает экономию на горнокапитальных работах, поскольку позволяет углубить нижнюю часть карьера благодаря увеличению угла откоса бортов без разноса верхних горизонтов.

Таким образом, разработанный методический подход позволяет оценивать влияние моментов, порядка и динамики осуществления переходных процессов в развитии горнотехнических систем карьеров на результирующие технико-экономические показатели за весь жизненный цикл системы. Это дает возможность находить оптимальный вариант и стратегию развития системы путем перебора вариантов. В качестве инструмента для определения эксплуатационных показателей транспорта целесообразно использовать имитационное компьютерное моделирование, причем оно должно обладать гибкостью в зависимости от поставленных задач учета тех или иных факторов [43].

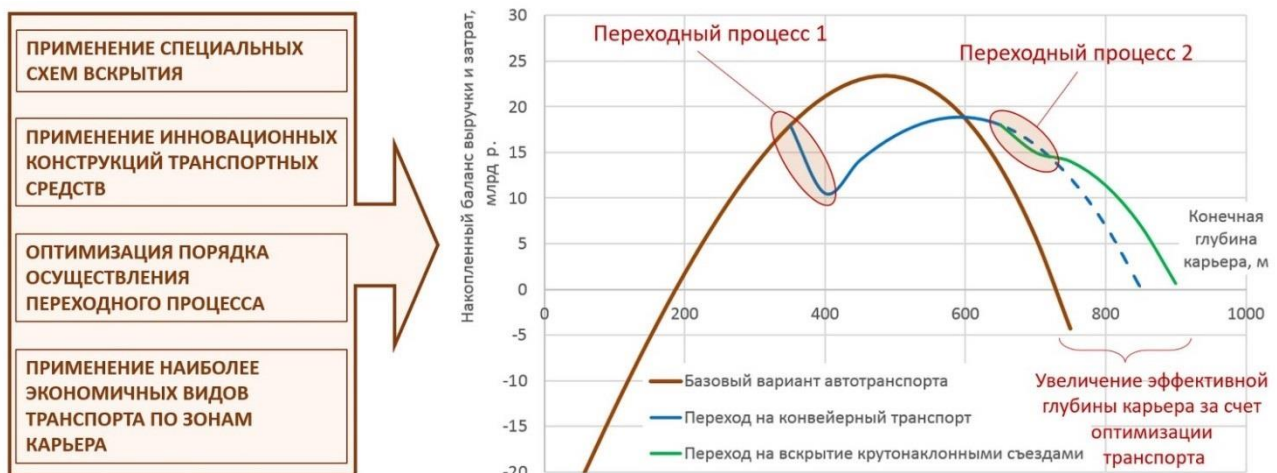


Рис. 7. Вариант рациональной стратегии формирования транспортной системы карьера, обеспечивающей увеличение экономически достижимой глубины карьера

Fig. 7. Variant of a rational strategy for a quarry transport system formation that provides an increase in the economically achievable depth of the quarry

В статье представлены примеры реализации методики, результаты которой заключаются в увеличении глубины карьера относительно базового варианта путем рационального выбора моментов осуществления переходных процессов при развитии транспортной системы карьера. Реальным примером может служить определение рациональной стратегии перехода на вскрытие карьера крутонаклонными съездами с применением полноприводных колесных или гусеничных самосвалов. Переходный процесс 2 на рис. 7 соответствует именно такой технологии, причем его применение на начальных стадиях разработки месторождения нецелесообразно, т. к. не приводит к существенному увеличению конечной глубины карьера. Достичь представленного на рис. 7 эффекта можно на завершающей стадии разработки месторождения за счет реконструкции нижних горизонтов карьера, на которых «нарезаются» крутонаклонные съезды. Это полностью согласуется с результатами разработки данной технологии, полученными специалистами «Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА» [19].

Выводы

1. Расчетами по вариантам установлено, что характер и момент осуществления переходных процессов существенно влияют на результирующие технико-экономические показатели разработки месторождения открытым способом, а правильный их выбор обеспечивает в конечном итоге возможность достижения более полного освоения ресурсов месторождения за счет увеличения глубины разработки открытым способом.
2. Показано, что задачи определения моментов осуществления структурных переходных процессов достаточно надежно решаются укрупненными расчетами по вариантам глубины при учете стратегии формирования транспортной

системы и схемы вскрытия с приведением их к результирующему балансу выручки, затрат и нормированной рентабельности.

3. Для рационального использования совместной оптимизации параметров карьера и его транспортной системы с учетом выбора моментов осуществления структурных и параметрических переходных процессов в отношении технологического транспорта необходимо применять методологический подход, включающий три этапа:
 - поиск рациональных вариантов видов транспорта, моментов (по глубине карьера) осуществления структурных переходных процессов при формировании транспортной системы по мере развития карьера на основе укрупненных расчетов (аналогично подходу на рис. 5). Исходным контуром карьера для данных расчетов может служить определенный на основе граничного коэффициента по классической или модернизированной [7] методике либо полученный по результатам автоматизированных расчетов (например, по методу Коробова [20]);
 - оптимизацию технологических решений по вскрытию и отработке месторождения открытым способом с учетом динамики переходных процессов во времени на всем жизненном цикле карьера (аналогично рис. 7);
 - оптимизацию технических параметров транспорта в расчете на выбранную стратегию и режим горных работ, а также формируемые горнотехнические условия эксплуатации.
4. Требуется продолжение исследований, направленное на разработку методики оптимизации динамики осуществления переходных процессов по развитию транспортной системы во времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исследование переходных процессов при комбинированной разработке рудных месторождений / В.Л. Яковлев, И.В. Соколов, Г.Г. Саканцев, И.Л. Кравчук // Горный журнал. – 2017. – № 7. – С. 46–50.
2. Соколов И.В., Антипин Ю.Г., Никитин И.В. Методология выбора подземной геотехнологии при комбинированной разработке рудных месторождений. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2021. – 340 с.
3. Черчинцева Т.С., Кузнецова Т.С. Оптимизация глубины карьера при открыто-подземной разработке месторождений полезных ископаемых // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2003. – № 12. – С. 18–20.
4. Сенкус В.В., Малофеев Д.В., Абрамкин Н.И. Оптимизация глубины вскрытия разреза при комбинированной разработке угольного месторождения // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – № 6. – С. 45–54. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-6-0-45-54.
5. Ордин А.А., Васильев И.В. Выбор оптимальной глубины перехода от открытых работ к подземным при отработке угольного месторождения // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2014. – № 4. – С. 97–108.
6. Incorporation price uncertainty into open-pit to underground mine transition / H. Dehghani, R. Sakinezhad, Z. Nabavi, N. Babanouri // Mineral Economics. – 2024. – Vol. 37. – P. 89–99. DOI: 10.1007/s13563-023-00408-9.
7. Яковлев В.Л., Саканцев М.Г., Саканцев Г.Г. Границы карьеров при проектировании разработки сложноструктурных месторождений. – Екатеринбург: УрО РАН, 2009. – 302 с.
8. Определение границ алмазородных карьеров с учетом разновременности затрат на вскрышные работы / В.Л. Яковлев, И.В. Зырянов, А.Н. Акишев, Г.Г. Саканцев // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2016. – № 6. – С. 106–113.

9. Фомин С.И., Овсянников М.П. Обоснование оптимальных технико-экономических параметров карьера при этапной разработке рудных крутопадающих месторождений // Записки горного института. – 2022. – Т. 000 – С. 1–10. DOI: 10.31897/PMI.2022.73
10. Predicting open-pit mine production using machine learning techniques / K. Faustin, S. Alex, O. Millicent, A. Clement // Journal of Sustainable Mining. – 2024. – Vol. 23. – P. 118–131. DOI: 10.46873/2300-3960.1411.
11. Robust production scheduling in open-pit mining under uncertainty: a box counterpart approach / Alipour Aref, Khodayari Alia, Jafari Ahmad, Tavakkoli-Moghaddam Reza // Journal of Mining and Environment. – 2017. – Vol. 8. – P. 255–267. DOI: 10.22044/jme.2017.849.
12. Федотов Г.С., Пастихин Д.В. Методика оптимизации положения вскрывающих выработок при проектировании конечных контуров карьера // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № S8. – С. 3–13.
13. Кантор Е.Л. Оптимизация производственной мощности предприятий по добыче полезных ископаемых // Вестник ЛГУ им. А.С. Пушкина. – 2009. – № 2. – С. 36–52.
14. Многокритериальный анализ стратегий устойчивого развития глубоких карьеров / К.В. Бурмистров, Н.А. Осинцев, А.Н. Рахмангулов, М.Э. Юсупов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 12. – С. 76–96. DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4223
15. Nancel-Penard P., Jelvez E. A direct block scheduling model considering operational space requirement for strategic open-pit mine production planning // Optimization and Engineering. – 2023. – P. 1–27. DOI: 10.1007/s11081-023-09875-z.
16. Enumeration optimization of open pit production scheduling based on mobile capacity search domain / X. Xu, X. Gu, Q. Wang, Y. Zhao // Scientific Reports. – 2023. – Vol. 13. – P. 91–100. DOI: 10.1038/s41598-022-27336-y.
17. Research on boundary optimization of adjacent mining areas in open pit coal mine based on calculation of sectional stripping ratio / B. Cao, J. Wang, X. Guo, W. Li, G. Liu // Scientific Reports. – 2023. – Vol. 13. – P. 286–293. DOI: 10.1038/s41598-023-48708-y.
18. A 0–1 knapsack problem-based approach for solving open-pit mining problem with type-2 fuzzy parameters / A. Pramanik, C. Changdar, A. Khan, C. Snehamoy, K.P. Rajat, K.S. Sudip // Innovations in Systems and Software Engineering. – 2022. – Vol. 1. – P. 91–100. DOI: 10.1007/s11334-022-00491-1.
19. Зырянов И.В., Акишев А.Н., Бондаренко И.Ф. Совершенствование добычи и переработки алмазосодержащих руд. – Якутск: ИД СВФУ, 2020. – 720 с.
20. Билин А.Л. Особенности применения алгоритма профессора С.Д. Коробова для определения границ карьеров и обоснования режима горных работ // Записки горного института. – 2012. – Т. 198. – С. 55–60.
21. Выбор стратегии устойчивого развития горнотехнической системы методом МАВАС / К.В. Бурмистров, С.Е. Гавришев, Н.А. Осинцев, И.А. Пыталев // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2021. – № 4. – С. 268–283.
22. Optimal pitwall shapes to increase financial return and decrease carbon footprint of open pit mines / U. Stefano, A. Agosti, V.M.V. Nelson, C. Valderrama, R. Pell, G. Alborno / Mining, Metallurgy & Exploration. – 2022. – Vol. 39. – P. 335–355. DOI: 10.1007/s42461-022-00546-8.
23. Dynamic optimization design of open-pit mine full-boundary slope considering uncertainty of rock mass strength / S. Wang, B. Cao, R. Bai, G. Liu // Scientific Reports. – 2024. – Vol. 14. – № 19710. DOI: 10.1038/s41598-024-70902-9.
24. Яковлев В.Л. Исследование переходных процессов – новое направление в развитии методологии комплексного освоения георесурсов. – Екатеринбург: УрО РАН, 2019. – 284 с. DOI: 10.25635/IM.2020.54.57311
25. Яковлев В.Л., Глебов А.В., Журавлев А.Г. Переходные процессы при формировании транспортных систем карьеров // Рациональное освоение недр. – 2019. – № 1. – С. 54–59. DOI: 10.25635/IM.2019.74.42881.
26. Soleimani Hamed. A new sustainable closed-loop supply chain model for mining industry considering fixed-charged transportation: a case study in a travertine quarry // Resources Policy. – 2021. – Vol. 74. – P. 84–92. DOI: 10.1016/j.resourpol.2018.07.006.
27. Optimization of cycle time for loading and hauling trucks in open-pit mining / Mnzool Mohammed, Almujiab Hamad, Almakki Mudthir, Gaafar Ahmed, Elhassan Adil, Gomaa Ehab // Mining of Mineral Deposits. – 2024. – Vol. 18. – P. 18–26. DOI: 10.33271/mining18.01.018.
28. Baek Jieun, Choi Yosoon. A new method for haul road design in open-pit mines to support efficient truck haulage operations // Applied Sciences. – 2017. – Vol. 7. – P. 747. DOI: 10.3390/app7070747.
29. Findlay L., Dimitrakopoulos R. Stochastic optimization for long-term planning of a mining complex with in-pit crushing and conveying systems // Mining, Metallurgy & Exploration. – 2024. – Vol. 41. – P. 1677–1691. DOI: 10.1007/s42461-024-01005-2.
30. Deep neural network models for improving truck productivity prediction in open-pit mines / O.F. Ugurlu, C. Fan, B. Jiang, W.V. Liu // Mining, Metallurgy & Exploration. – 2024. – Vol. 41. – P. 619–636. DOI: 10.1007/s42461-024-00924-4.
31. Improving productivity in mining operations: a deep reinforcement learning model for effective material supply and equipment management / T. Villegas, S. Segura Altamirano, D.M. Cardenas, A. Sifuentes, L. Cabrera, A. Zegarra, V. Oblitas, L. Carlos, J. Palacios // Neural Computing and Applications. – 2024. – Vol. 36. – P. 1–13. DOI: 10.1007/s00521-023-09396-x.
32. Журавлев А.Г. Вопросы оптимизации параметров транспортных систем карьеров // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 3-1. – С. 583–601. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-584-601.
33. Лукичев С.В., Наговицын О.В. Цифровое моделирование при решении задач открытой и подземной горной технологии // Горный журнал. – 2019. – № 6. – С. 51–55. DOI: 10.17580/gzh.2019.06.06.
34. ГИС ГЕОМИКС для горной промышленности России и Казахстана / Ю.И. Волков, С.С. Серый, В.А. Дунаев, А.В. Герасимов // Горный журнал. – 2015. – № 5. – С. 13–16. DOI: 10.17580/gzh.2015.05.02.
35. Яковлев В.Л. Теория и практика выбора транспорта глубоких карьеров. – Новосибирск: Наука, 1989. – 246 с.
36. Журавлев А.Г., Буднев А.Б. Оценка погрешностей некоторых аналитических методов расчёта объёма карьера // Проблемы недропользования. – 2017. – № 4. – С. 61–70. DOI: 10.18454/2313-1586.2017.04.061.
37. Обзор новых предприятий горной промышленности в современной России // Интернет-портал «Сделано у нас». URL: <https://sdelanounas.ru/blogs/93203/> (дата обращения: 12.01.2024).

38. Инвестиции в горнодобывающую промышленность за 2 полугодие 2018 года // Интернет-портал «Инвестиционные проекты. Цифровая платформа». URL: <https://investprojects.info/news/investitsii-gornodobyvayushaya-promyshlennost-2018> (дата обращения: 12.01.2024).
39. Крупнейшие инвестиционные проекты // Интернет-портал «Горнорудная промышленность России и СНГ». URL: <https://miningrussiaconference.com/investment-projects/> (дата обращения: 12.01.2024).
40. Инвестиционные проекты горной отрасли // Бизнес-портал NEDRADV. URL: <https://nedradv.ru/nedradv/ru/invest> (дата обращения: 12.01.24).
41. Крупнейшие инвестпроекты – на конференции «Горнорудная промышленность России: Строительство и Модернизация» // Интернет-портал «Бизнес России». URL: <https://glavportal.com/materials/krupnejshie-investicionnye-proekty-v-sfere-gornorudnoj-promyshlennosti-budut-predstavleny-v-ramkah-mezhdunarodnoj-konferencii-i-tehnicheskogo-vizita-gornorudnaya-promyshlennost-rossii-stroitelstvo-i-modernizaciya> (дата обращения: 12.01.2024).
42. Чендырев М.А. Обоснование условий эффективного применения карьерных канатных подъёмных установок // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2024. – № 25. – С. 141–148. DOI 10.26160/2658-3305-2024-25-141-148.
43. Журавлев А.Г., Черных В.В. Компьютерное моделирование при оценке влияния дорожных факторов на производительность карьерного автотранспорта // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 12. – С. 20–31. DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4308.

Информация об авторе

Артём Геннадиевич Журавлев, кандидат технических наук, заведующий лабораторией транспортных систем карьеров и геотехники Института горного дела Уральского отделения Российской академии наук, Россия, 620219, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58; juravlev@igduran.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7643-3994>

Поступила в редакцию: 16.09.2024

Поступила после рецензирования: 19.09.2024

Принята к публикации: 13.05.2025

REFERENCES

1. Yakovlev V.L., Sokolov I.V., Sakantsev G.G., Kravchuk I.L. Investigation of transients in the combined development of ore deposits. *Gornyi zhurnal*, 2017, no. 7, pp. 46–50. (In Russ.)
2. Sokolov I.V., Antipin Yu.G., Nikitin I.V. *Methodology for the selection of underground geotechnology in the combined development of ore deposits*. Ekaterinburg, Ural University Publ., 2021. 340 p. (In Russ.)
3. Cherkintseva T.S., Kuznetsova T.S. Optimization of the pit depth during open-pit mining of mineral deposits. *Mining information and analytical bulletin*, 2003, no. 12, pp. 18–20. (In Russ.)
4. Senkus V.V., Malofeev D.V., Abramkin N.I. Optimization of the depth of opening of the section in the combined development of a coal deposit. *Mining information and analytical bulletin*, 2018, no. 6, pp. 45–54. (In Russ.) DOI: 10.25018/0236-1493-2018-6-0-45-54.
5. Ordin A.A., Vasiliev I.V. Choosing the optimal depth of transition from open-pit to underground operations during mining of a coal deposit. *Physical and technical problems of mining*, 2014, no. 4, pp. 97–108. (In Russ.)
6. Dehghani H., Sakinezhad R., Nabavi Z., Babanouri N. Incorporation price uncertainty into open-pit to underground mine transition. *Mineral Economics*, 2024, vol. 37, pp. 89–99. DOI: 10.1007/s13563-023-00408-9.
7. Yakovlev V.L., Sakantsev M.G., Sakantsev G.G. *Boundaries of quarries in the design of the development of complex-structured deposits*. Ekaterinburg, UB RAS Publ., 2021. 302 p. (In Russ.)
8. Yakovlev V.L., Zyryanov I.V., Akishev A.N., Sakantsev G.G. Determination of the boundaries of diamond ore quarries, taking into account the time difference of costs for stripping. *Physical and technical problems of mining*, 2016, no. 6, pp. 106–113. (In Russ.)
9. Fomin S.I., Ovsyannikov M.P. Substantiation of optimal technical and economic parameters of a quarry during the stage-by-stage development of ore steep-falling deposits. *Journal of Mining Institute*, 2022, vol. 000, pp. 1–10. (In Russ.) DOI: 10.31897/PMI.2022.73.
10. Faustin K., Alex S., Millicent O., Clement A. Predicting open-pit mine production using machine learning techniques. *Journal of Sustainable Mining*, 2024, vol. 23, pp. 118–131. DOI: 10.46873/2300-3960.1411.
11. Alipour Aref, Khodayari Alia, Jafari Ahmad, Tavakkoli-Moghaddam Reza. Robust production scheduling in open-pit mining under uncertainty: a box counterpart approach. *Journal of Mining and Environment*, 2017, vol. 8, pp. 255–267. DOI: 10.22044/jme.2017.849.
12. Fedotov G.S., Pastikhin D.V. Methodology for optimizing the position of the opening workings in the design of the final contours of the quarry. *Mining information and analytical bulletin*, 2020, no. S8, pp. 3–13. (In Russ.) DOI: 10.25018/0236-1493-2020-3-8-3-13.
13. Kantor E. L. Optimization of the production capacity of mining enterprises. *Bulletin of the LSU n.a. A.S. Pushkin*, 2009, no. 2, pp. 36–52. (In Russ.)
14. Burmistrov K.V., Osintsev N.A., Rakhmangulov A.N., Yusupov M.E. Multi-criteria analysis of deep pits sustainable development strategy. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 12, pp. 76–96. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4223.
15. Nancel-Penard P., Jelvez E. A direct block scheduling model considering operational space requirement for strategic open-pit mine production planning. *Optimization and Engineering*, 2023, pp. 1–27. DOI: 10.1007/s11081-023-09875-z.
16. Xu X., Gu X., Wang Q., Zhao Y. Enumeration optimization of open pit production scheduling based on mobile capacity search domain. *Scientific Reports*, 2023, vol. 13, pp. 91–100. DOI: 10.1038/s41598-022-27336-y.

17. Cao B., Wang J., Guo X., Li W., Liu G. Research on boundary optimization of adjacent mining areas in open pit coal mine based on calculation of sectional stripping ratio. *Scientific Reports*, 2023, vol. 13, pp. 286–293. DOI: 10.1038/s41598-023-48708-y.
18. Pramanik A., Changdar C., Khan A., Snehamoy C., Rajat K.P., Sudip K.S. A 0–1 knapsack problem-based approach for solving open-pit mining problem with type-2 fuzzy parameters. *Innovations in Systems and Software Engineering*, 2022, vol. 1, pp. 91–100. DOI: 10.1007/s11334-022-00491-1.
19. Zyryanov I.V., Akishev A.N., Bondarenko I.F. *Improving the extraction and processing of diamond-bearing ores*. Yakutsk, SVFU Publ., 2020. 720 p. (In Russ.)
20. Bilin A.L. Features of the application of Professor S. D. Korobov's algorithm for determining the boundaries of quarries and justifying the mining regime. *Journal of Mining Institute*, 2012, vol. 198, pp. 55–60. (In Russ.)
21. Burmistrov K.V., Gavrishev S.E., Osintsev N.A., Pytalev I.A. Choosing a strategy for the sustainable development of a mining system by the MABAC method. *Izvestiya Tula State University. Mining science*, 2021, no. 4, pp. 268–283. (In Russ.)
22. Stefano U., Agosti A., Nelson V.M.V., Valderrama C., Pell R., Alborno G. Optimal pitwall shapes to increase financial return and decrease carbon footprint of open pit mines. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 2022, vol. 39, pp. 335–355. DOI: 10.1007/s42461-022-00546-8.
23. Wang S., Cao B., Bai R., Liu G. Dynamic optimization design of open-pit mine full-boundary slope considering uncertainty of rock mass strength. *Scientific Reports*, 2024, vol. 14, article 19710. DOI: 10.1038/s41598-024-70902-9.
24. Yakovlev V.L. *The study of transients is a new direction in the development of the methodology of integrated exploration of georesources*. Ekaterinburg, UB RAS, 2019. 284 p. (In Russ.) DOI: 10.25635/IM.2020.54.57311.
25. Yakovlev V.L., Glebov A.V., Zhuravlev A.G. Transitional processes in the formation of quarry transport systems. *Mineral mining & conservation*, 2019, no. 1, pp. 54–59. (In Russ.) DOI: 10.25635/IM.2019.74.42881.
26. Soleimani H. A new sustainable closed-loop supply chain model for mining industry considering fixed-charged transportation: a case study in a travertine quarry. *Resources Policy*, 2021, vol. 74, pp. 84–92. DOI: 10.1016/j.resourpol.2018.07.006.
27. Mnzool M., Almujiab H., Almakki M. Optimization of cycle time for loading and hauling trucks in open-pit mining. *Mining of Mineral Deposits*, 2024, vol. 18, pp. 18–26. DOI: 10.33271/mining18.01.018.
28. Baek J., Choi Y. A new method for haul road design in open-pit mines to support efficient truck haulage operations. *Applied Sciences*, 2017, vol. 7, p. 747. DOI: 10.3390/app7070747.
29. Findlay L., Dimitrakopoulos R. Stochastic optimization for long-term planning of a mining complex with in-pit crushing and conveying systems. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 2024, vol. 41, pp. 1677–1691. DOI: 10.1007/s42461-024-01005-2.
30. Ugurlu O.F., Fan C., Jiang B. Deep neural network models for improving truck productivity prediction in open-pit mines. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 2024, vol. 41, pp. 619–636. DOI: 10.1007/s42461-024-00924-4.
31. Chiarot Villegas T.V., Segura Altamirano S.F., Castro Cardenas D.M., Liu W.V. Improving productivity in mining operations: a deep reinforcement learning model for effective material supply and equipment management. *Neural Computing and Applications*, 2024, vol. 36, pp. 1–13. DOI: 10.1007/s00521-023-09396-x.
32. Zhuravlev A.G. Issues of optimization of parameters of quarry transport systems. *Mining information and analytical bulletin*, 2020, no. 3-1, pp. 583–601. (In Russ.) DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-584-601.
33. Lukichev S.V., Nagovitsyn O.V. Digital modeling in solving problems of open and underground mining technology. *Gornyi zhurnal*, 2019, no. 6, pp. 51–55. (In Russ.) DOI: 10.17580/gzh.2019.06.06.
34. Volkov Yu.I., Seriy S.S., Dunaev V.A., Gerasimov A.V. GIS GEOMICS for the mining industry of Russia and Kazakhstan. *Gornyi zhurnal*, 2015, no. 5, pp. 13–16. (In Russ.) DOI: 10.17580/gzh.2015.05.02
35. Yakovlev V.L. *Theory and practice of choosing the transport of deep quarries*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1989. 246 p. (In Russ.)
36. Zhuravlev A.G., Budnev A.B. Estimation of errors of some analytical methods for calculating the volume of a quarry. *Problems of subsoil use*, 2017, no. 4, pp. 61–70. (In Russ.) DOI: 10.18454/2313-1586.2017.04.061.
37. Overview of new mining enterprises in modern Russia. *Made with us*. (In Russ.) Available at: <https://sdelanounas.ru/blogs/93203/> (accessed 12 January 2024).
38. Investments in the mining industry for the 2nd half of 2018. *Investment projects. Digital platform*. (In Russ.) Available at: <https://investprojects.info/news/investitsii-gornodobyvayushaya-promyshlennost-2018> (accessed 12 January 2024).
39. The largest investment projects. *Mining industry of Russia and the CIS*. (In Russ.) Available at: <https://miningrussiaconference.com/investment-projects/> (accessed 12 January 2024).
40. Mining investment projects. *NEDRADV Business Portal*. (In Russ.) Available at: <https://nedradv.ru/nedradv/ru/invest> (accessed 12 January 2024).
41. The largest investment projects – at the conference "Mining industry of Russia: Construction and Modernization". *Business of Russia Internet Portal*. (In Russ.) Available at: <https://nedradv.ru/nedradv/ru/invest> (accessed 12 January 2024).
42. Chendyrev M.A. Substantiation of the conditions for the effective use of quarry rope lifting installations. *Transport, mining and construction engineering: science and production*, 2024, no. 25, pp. 141–148. (In Russ.) DOI: 10.26160/2658-3305-2024-25-141-148.
43. Zhuravlev A.G., Chernykh V.V. Computer modeling when assessing the impact of road factors on performance of quarry vehicles. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 12, pp. 20–31. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4308.

Information about the author

Artem G. Zhuravlev, Cand. Sc., Laboratory Chief, Institute of Mining of Ural branch of RAS, 58, Mamin-Sibiryak street, Yekaterinburg, 620219, Russian Federation; juravlev@igduran.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7643-3994>

Received: 16.09.2024

Revised: 19.09.2024

Accepted: 13.05.2025