



ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ МОЩНОСТИ РУДНИКА НА ОСНОВЕ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОГО СОСТАВА КОМПЛЕКСА САМОХОДНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Антипин Ю.Г., Никитин И.В.

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

Аннотация. **Актуальность работы.** В условиях пологих месторождений производственная мощность рудника по горным возможностям зависит от величины рабочей горизонтальной рудной площади, применяемой системы разработки, производительности добычного блока, площади блока и их количества в одновременной отработке. Производительность блока определяется эксплуатационной производительностью комплекса самоходного оборудования на очистной выемке и транспортировании руды, состоящего из погрузо-доставочной машины и автосамосвала. Выбор состава комплекса самоходного оборудования обычно осуществляется исходя из практики передовых предприятий в аналогичных условиях или на основе технико-экономического сравнения по производительности машин в зависимости от длины доставки или их стоимости без учета размеров блока и оценки эффективности использования машин в течение года. **Цель работы.** Разработка и апробация методики определения оптимальной производственной мощности рудника на основе оценки эффективности и выбора оптимального состава комплекса самоходного оборудования на очистной выемке и транспортировании руды в зависимости от мощности залежи. **Используемые методы.** Использован комплексный метод исследований, включающий анализ оценочных показателей эффективности комплексов самоходного оборудования, экономико-математическое моделирование и графоаналитический метод. **Результаты.** Разработана методика оценки эффективности и выбора оптимального состава комплекса самоходного оборудования, отличающаяся учетом размеров блока, сечений подготовительно-нарезных и транспортных выработок, фактической грузоподъемности и рабочего количества погрузо-доставочных машин и автосамосвалов, необходимых для обеспечения годового объема добычи. С использованием предложенной методики установлены оптимальный состав комплекса самоходного оборудования и величина годовой производственной мощности рудника, обеспечиваемая данным комплексом, в зависимости от мощности залежи, изменяющейся от 10 до 25 м. **Выводы.** Установлено, что эффективность работы комплекса самоходного оборудования зависит от соответствия параметров машин горно-геологическим и горнотехническим условиям разработки.

Ключевые слова: пологое месторождение, комбинированная система разработки, погрузо-доставочная машина, шахтный автосамосвал, мощность залежи, грузоподъемность, удельные эксплуатационные затраты

Исследования выполнены в рамках Госзадания № 075-00410-25-00. Тема 1 (2025-2027). Методология обоснования перспектив технологического развития комплексного освоения минерально-сырьевых ресурсов твердых полезных ископаемых России (FUWE-2025-0001), № гос. рег. 125070908257-0.

© Антипин Ю.Г., Никитин И.В., 2026

Для цитирования

Антипин Ю.Г., Никитин И.В. Оптимизация производственной мощности рудника на основе оценки эффективности и выбора оптимального состава комплекса самоходного оборудования // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №1. С. 22-31. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-1-22-31>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

OPTIMIZATION OF MINE PRODUCTION CAPACITY BASED ON THE EFFICIENCY EVALUATION AND SELECTION OF THE OPTIMAL COMPOSITION OF A SELF-PROPELLED EQUIPMENT COMPLEX

Antipin Yu.G., Nikitin I.V.

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

Abstract. Relevance. In the case of shallow deposits, the production capacity of a mine, from the perspective of mining potential, depends on the size of the working horizontal ore area, the mining method employed, the productivity of the extraction unit, the unit area, and their number mined simultaneously. The productivity of a unit is determined by the operational performance of the self-propelled equipment complex used for ore stoping and transportation, which typically consists of a load-haul-dump machine and a dump truck. The selection of the composition of the self-propelled equipment complex is usually based on the practices of leading enterprises under similar conditions or on the basis of a technical and economic comparison of machine productivity depending on haul distance or cost, without taking into account the unit dimensions or evaluating the efficiency of machine utilization over the course of a year. **Objectives.** The research is aimed at developing and testing a methodology for determining the optimal mine production capacity based on efficiency assessment and selection of the optimal complex composition of self-propelled equipment for ore stoping and transportation depending on the deposit thickness. **Methods Applied.** Comprehensive research method has been used, including the analysis of estimated performance indicators of self-propelled equipment complexes, economic and mathematical modeling and graphoanalytical method. **Results.** A methodology for evaluating efficiency and selecting the optimal composition of a self-propelled equipment complex has been developed. The proposed methodology differs in that it takes into account the unit dimensions, the cross-sections of development and haulage workings, the actual load capacity and the operating number of load-haul-dump machines and dump trucks required to ensure annual production volume. Using the proposed methodology, the optimal composition of the self-propelled equipment complex and the annual production capacity of the mine provided by this equipment complex have been determined, depending on the deposit thickness, varying from 10 to 25 m. **Conclusions.** It has been established that the efficiency of the self-propelled equipment complex depends on the correspondence between machine parameters and the mining-geological and mining-technical conditions of operation.

Keywords: shallow deposit, combined mining method, load-haul-dump machine, mine dump truck, deposit thickness, load capacity, unit operating costs

The research was carried out within the framework of State Assignment No. 075-00410-25-00. Theme 1 (2025-2027). Methodology for substantiation the prospects of technological development of the integrated development of mineral resources of solid minerals in Russia (FUWE-2025-0001), state registration No. 125070908257-0.

For citation

Antipin Yu.G., Nikitin I.V. Optimization of Mine Production Capacity Based on the Efficiency Evaluation and Selection of the Optimal Composition of a Self-Propelled Equipment Complex. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 1, pp. 22-31. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-1-22-31>

Введение

Методология обоснования геотехнологической стратегии освоения пологих месторождений средней мощности на основе применения комбинированной системы разработки (КСР), обеспечивающей кардинальное повышение полноты и качества извлечения запасов из недр [1-4], включает решение задачи оптимизации величины годовой производственной мощности подземного рудника с учетом комплексной механизации процессов добычи руды с применением самоходного оборудования.

В теории проектирования горных предприятий сложились понятия о производственной мощности

рудника по горным возможностям и оптимальной по экономическим соображениям [5]. Первый термин характеризует принципиально достижимый годовой объем добычи, который может быть обеспечен рудником при определенных технологиях, средствах механизации и организации горных работ. Второй термин определяет годовой объем добычи, при котором обеспечиваются наилучшие экономические показатели работы рудника в соответствии с принятым критерием эффективности. Оптимизация производственной мощности осуществляется всегда в пределах горных возможностей.

В условиях пологих месторождений производственная мощность рудника по горным возможно-

стям зависит от величины рабочей горизонтальной рудной площади, применяемой системы разработки, производительности добычного блока, площади блока и их количества в одновременной отработке [6, 7]. В свою очередь, производительность блока при комплексной механизации добычных работ с применением самоходного оборудования определяется сменной эксплуатационной производительностью комплекса самоходного оборудования (КСО) на очистной выемке и транспортировании руды, состоящего из погрузо-доставочной машины (ПДМ) и шахтного автосамосвала (ШАС) [8-12].

Таким образом, при одинаковых рабочей рудной площади и системе разработки основными факторами, влияющими на величину производственной мощности рудника, являются площадь блока и состав КСО, характеризуемый грузоподъемностью ПДМ и ШАС и их количеством. Выбор состава КСО обычно осуществляется исходя из практики передовых предприятий в аналогичных условиях или на основе технико-экономического сравнения по производительности машин в зависимости от длины доставки или их стоимости [13-16] без учета размеров блока и оценки эффективности использования машин в течение года. Необходимость совершенствования методических положений выбора оптимального состава КСО при выемке пологих залежей средней мощности КСР обуславливает актуальность настоящего исследования.

Целью исследования является разработка и апробация методики определения оптимальной производственной мощности рудника на основе оценки эффективности и выбора оптимального состава КСО на очистной выемке и транспортировании руды в зависимости от мощности залежи.

Методика исследования

При оценке эффективности и выборе КСО следует учитывать не только затраты, непосредственно связанные с эксплуатацией ПДМ и ШАС, но и затраты на проведение выработок, необходимых для обеспечения работы и перемещения ПДМ и ШАС. В качестве критерия эффективности КСО принят минимум суммарных удельных эксплуатационных затрат на выпуск и доставку руды из блока до рудоспуска с помощью ПДМ, транспортирование руды от рудоспуска до скипового ствола с помощью ШАС, проходку подготовительно-нарезных выработок (ПНВ) в блоке и транспортных выработок (ТВ) вне блока и амортизацию оборудования.

На основе методических положений по расчету самоходного транспорта [17, 18] разработана методика определения оптимальной производственной мощности рудника на основе оценки эффективности и выбора оптимального состава КСО на очистной выемке и транспортировании руды при КСР пологих залежей средней мощности. Новизна методики состоит в учете размеров блока, зависящих от мощности залежи, сечений ПНВ и ТВ, определяемых габари-

ритами размещаемых в них машин, фактической грузоподъемности, определяемой емкостью ковша ПДМ или вместимостью кузова ШАС, и рабочего количества машин, необходимых для обеспечения годового объема добычи.

Методика состоит в последовательном выполнении 10-ти этапов:

1. Расчет эксплуатационных запасов блока $Q_{\text{экс}}$, тыс. т, исходя из размеров блока с учетом мощности залежи и показателей извлечения руды [19]:

$$Q_{\text{экс}} = \frac{m_{\text{рт}} L_{\text{бл}} (B_{\text{к}} + B_{\text{мкц}}) \gamma_{\text{р}} (1 - \Pi)}{1000 \cos \alpha_{\text{рт}} (1 - P)}, \quad (1)$$

где $m_{\text{рт}}$ – мощность залежи, м; $L_{\text{бл}}$ – длина блока, м; $B_{\text{к}}$, $B_{\text{мкц}}$ – ширина камеры и МКЦ, м; $\gamma_{\text{р}}$ – плотность руды в массиве, т/м³; $\alpha_{\text{рт}}$ – угол падения залежи, град; Π , P – коэффициенты, учитывающие потери и разубоживание руды, доли ед.

2. Расчет сменной эксплуатационной производительности на выпуске и доставке руды ПДМ $P_{\text{см}}^{\text{пдм}}$ и транспортировании руды ШАС $P_{\text{см}}^{\text{шас}}$, т/смену, [9, 17] с учетом их грузоподъемности:

$$P_{\text{см}}^{\text{пдм}} = \frac{60 T_{\text{см}} V_{\text{ков}}^{\text{пдм}} k_{\text{зап}} \gamma_{\text{р}} k_{\text{исп}}}{T_{\text{р}}^{\text{пдм}} k_{\text{р}} k_{\text{нер}}}, \quad (2)$$

$$P_{\text{см}}^{\text{шас}} = \frac{60 T_{\text{см}} V_{\text{куз}}^{\text{шас}} k_{\text{зап}} \gamma_{\text{р}} k_{\text{исп}}}{T_{\text{р}}^{\text{шас}} k_{\text{р}} k_{\text{нер}}}, \quad (3)$$

где $T_{\text{см}}$ – продолжительность смены, ч; $V_{\text{ков}}^{\text{пдм}}$, $V_{\text{куз}}^{\text{шас}}$ – объем ковша ПДМ или емкость кузова ШАС, м³; $k_{\text{зап}}$ – коэффициент заполнения ковша ПДМ или кузова ШАС по объему; $k_{\text{исп}}$ – коэффициент внутрисменного использования машины; $T_{\text{р}}^{\text{пдм}}$, $T_{\text{р}}^{\text{шас}}$ – продолжительность одного рейса ПДМ или ШАС, включая время на погрузку, разгрузку, движение с грузом и порожняком, ожидание на разминовках, мин; $k_{\text{р}}$ – коэффициент разрыхления руды; $k_{\text{нер}}$ – коэффициент неравномерности.

3. Расчет стоимости машино-смены эксплуатации ПДМ $C_{\text{маш-см}}^{\text{пдм}}$ и ШАС $C_{\text{маш-см}}^{\text{шас}}$, руб./смену:

$$C_{\text{маш-см}}^{\text{пдм}} = \frac{\Pi_{\text{р}}^{\text{пдм}} N_{\text{а}} + 12 Z_{\text{от}}^{\text{пдм}} + 3 Z_{\text{рем}}^{\text{пдм}} + 3 Z_{\text{гсм}}^{\text{пдм}} + 3 Z_{\text{шин}}^{\text{пдм}} + 3 Z_{\text{вент}}^{\text{пдм}}}{n_{\text{дн}} n_{\text{см}}}, \quad (4)$$

$$C_{\text{маш-см}}^{\text{шас}} = \frac{\Pi_{\text{р}}^{\text{шас}} N_{\text{а}} + 12 Z_{\text{от}}^{\text{шас}} + 3 Z_{\text{рем}}^{\text{шас}} + 3 Z_{\text{гсм}}^{\text{шас}} + 3 Z_{\text{шин}}^{\text{шас}} + 3 Z_{\text{вент}}^{\text{шас}}}{n_{\text{дн}} n_{\text{см}}}, \quad (5)$$

где $\Pi_{\text{р}}^{\text{пдм}}$, $\Pi_{\text{р}}^{\text{шас}}$ – рыночная стоимость ПДМ или ШАС, руб.; $N_{\text{а}}$ – норма амортизации, доли ед.; $Z_{\text{от}}$ – месячный фонд оплаты труда машиниста и обслужи-

вающего персонала, руб.; $Z_{рем}$, $Z_{гсм}$, $Z_{шин}$, $Z_{вент}$ – годовые расходы на ремонт, горюче-смазочные материалы, шины и проветривание выработок, руб.; $n_{дн}$ – количество рабочих дней в году; $n_{см}$ – количество рабочих смен в сутки.

4. Расчет удельных эксплуатационных затрат на выпуск и доставку руды ПДМ $\Delta Z_{вд}$ и транспортирование руды ШАС $\Delta Z_{тр}$, руб./т [18]:

$$\Delta Z_{вд} = C_{маш-см}^{пдм} / P_{см}^{пдм}, \quad (6)$$

$$\Delta Z_{тр} = C_{маш-см}^{шас} / P_{см}^{шас}. \quad (7)$$

5. Расчет минимальной площади поперечного сечения основных ПНВ и ТВ (горизонтальные или слабонаклонные выработки с коробовым сводом) S , м², с учетом регламентируемых зазоров безопасности, крепости пород и габаритов ПДМ и ШАС:

а) выработки с проходом для людей:

– при $f \leq 12$

$$S_{дост}^{орт} = (A_{пдм} + b_1 + b_2 + \beta) \times [h_{пдм} + h_1 + 0,262(A_{пдм} + b_1 + b_2 + \delta)], \quad (8)$$

$$S_{тр}^{орт} = S_{тр}^{штр} = S_{кв} = (A_{пдм} + b_1 + b_2 + \beta) \times [h_{шас} + h_1 + 0,262(A_{пдм} + b_1 + b_2 + \delta)]; \quad (9)$$

– при $f > 12$

$$S_{бур}^{орт} = (A_{пдм} + b_1 + b_2) \times [h_{пдм} + h_1 + 0,175(A_{пдм} + b_1 + b_2)], \quad (10)$$

б) выработки без прохода для людей:

– при $f \leq 12$

$$S_{бд}^{штр} = (A_{пдм} + 2b_1 + \beta) \times [h_{пдм} + h_1 + 0,262(A_{пдм} + 2b_1 + \delta)], \quad (11)$$

– при $f > 12$

$$S_{вент}^{штр} = (A_{пдм} + 2b_1)[h_{пдм} + h_1 + 0,175(A_{пдм} + 2b_1)], \quad (12)$$

где $S_{дост}^{орт}$, $S_{бд}^{штр}$, $S_{бур}^{орт}$, $S_{вент}^{штр}$, $S_{тр}^{орт}$, $S_{тр}^{штр}$, $S_{кв}$ – площадь поперечного сечения доставочного орта, буро-доставочного штрека, бурового орта, вентиляционного штрека, транспортного орта, штрека и квершлага, м²; f – коэффициент крепости пород по шкале М.М. Протождяконова; $A_{пдм}$, $A_{шас}$ – ширина ПДМ или ШАС, м; b_1 – минимальный зазор между стенкой выработки и габаритом машины, м; b_2 – минимальный зазор между стенкой выработки и габаритом машины, учитывающий проход для людей, м; β – толщина крепи выработки, м; $h_{пдм}$, $h_{шас}$ – высота ПДМ или ШАС, м; h_1 – высота от габарита машины до пяты свода выработки, м.

6. Расчет объемов проходки ПНВ в блоке $V_{пнв}$ и ТВ вне блока $V_{тв}$, м³, исходя из размеров блока:

$$V_{пнв} = 2 \left(\frac{B_k + B_{мкц}}{\cos \alpha_{рт}} S_{дост}^{орт} + L_{бл} S_{бд}^{штр} \right) + \frac{B_k + B_{мкц}}{\cos \alpha_{рт}} S_{бур}^{орт} + L_{бл} S_{вент}^{штр}, \quad (13)$$

$$V_{тв} = (B_k + B_{мкц}) S_{тр}^{орт} + \frac{L_{бл}}{N_{бл}} S_{тр}^{штр} + \frac{H}{\text{tg } \delta N_{бл} k_{бл}} S_{кв}, \quad (14)$$

где $N_{бл}$ – число блоков в отработке, шт.; $k_{бл}$ – коэффициент, учитывающий долю запасов блока в общих запасах этажа; H – глубина разработки, м; δ – угол сдвига горных пород, град.

7. Расчет удельных эксплуатационных затрат на проходку выработок $\Delta Z_{пр}$, руб./т:

$$\Delta Z_{пр} = (V_{пнв} C_{пнв}^{1м} + V_{тв} C_{тв}^{1м}) / Q_{эксп}, \quad (15)$$

где $C_{пнв}^{1м}$, $C_{тв}^{1м}$ – стоимость проходки 1 м³ ПНВ и ТВ, руб./м³.

8. Расчет суммарных удельных эксплуатационных затрат на выпуск и доставку, транспортирование руды и проходку выработок $\sum \Delta Z$, руб./т, и определение оптимального состава КСО по грузоподъемности ПДМ и ШАС для отработки блока:

$$\sum \Delta Z = \frac{C_{маш-см}^{пдм} + N_{расч} C_{расч}^{шас}}{P_{см}^{пдм}} + \frac{V_{пнв} C_{пнв}^{1м} + V_{тв} C_{тв}^{1м}}{Q_{эксп}} \rightarrow \min, \quad (16)$$

где $N_{расч}^{шас}$ – расчетное количество ШАС, обеспечивающее производительность ПДМ, шт.

9. Определение области поиска оптимальной производственной мощности рудника $A_{шх}^{орт}$ путем установления верхней границы, соответствующей ее величине, определяемой по горным возможностям, и нижней границы, соответствующей величине, достигнутой на начальном этапе развития мощности рудника.

10. Расчет суммарных удельных эксплуатационных затрат на выпуск и доставку, транспортирование руды, проходку выработок и амортизацию оборудования $\sum \Delta Z'$, руб./т, и определение оптимальной производственной мощности рудника:

$$\sum \Delta Z' = \sum \Delta Z + \frac{n_{см}}{A_{шх}} \left(\frac{\Pi_p^{пдм} H_a}{k_{эф}^{пдм}} + \frac{\Pi_p^{шас} H_a}{k_{эф}^{шас}} \right) \rightarrow \min, \quad (17)$$

где $A_{\text{шх}}$ – годовая производственная мощность рудника, руб./год; $k_{\text{эф}}^{\text{пдм}}$, $k_{\text{эф}}^{\text{шас}}$ – коэффициенты эффективного использования ПДМ и ШАС в течение года, доли ед.;

$$k_{\text{эф}}^{\text{пдм}} = \frac{N_{\text{раб}}^{\text{пдм}}}{N_{\text{расч}}^{\text{пдм}}}, \quad (18)$$

$$k_{\text{эф}}^{\text{шас}} = \frac{N_{\text{раб}}^{\text{шас}}}{N_{\text{расч}}^{\text{шас}}}, \quad (19)$$

где $N_{\text{расч}}^{\text{пдм}}$, $N_{\text{расч}}^{\text{шас}}$, $N_{\text{раб}}^{\text{пдм}}$, $N_{\text{раб}}^{\text{шас}}$ – расчетное и рабочее количество ПДМ и ШАС в смену, шт.;

$$N_{\text{расч}}^{\text{пдм}} = \frac{A_{\text{шх}}}{P_{\text{см}}^{\text{пдм}} n_{\text{дн}} n_{\text{см}}}, \quad (20)$$

$$N_{\text{расч}}^{\text{шас}} = \frac{A_{\text{шх}}}{P_{\text{см}}^{\text{шас}} n_{\text{дн}} n_{\text{см}}}. \quad (21)$$

Результаты исследования и их обсуждение

На основе экономико-математического моделирования по предложенной методике (формулы (1)-(21)) установлены оптимальный состав КСО и оптимальная производственная мощность, обеспечиваемая данным КСО, в зависимости от мощности залежи (от 10 до 25 м) при применении КСР, сочетающей выемку камер с плоским днищем и этажное обрушение междукамерных целиков (МКЦ) на траншейное днище, в условиях рудника «Заполярный» [4, 20]. Оптимальные параметры и показатели КСР в зависимости от мощности залежи приведены в **табл. 1**.

Принятая схема доставки руды: очистной забой – буро-доставочный штрек – доставочный орт – рудоспуск. Длина доставки составляет 150-200 м. Схема транспортирования руды: рудоспуск – транспортный орт – транспортный штрек – квершлаг – ствол. Длина транспортирования – 1 км.

Исследован типоразмерный ряд дизельных ПДМ и ШАС производства фирмы «Yantai Xingye Machinery» (аналог «Еріос»). Технические характеристики ПДМ и ШАС приведены в **табл. 2**.

Результаты расчета сменной эксплуатационной производительности, стоимости машино-смены и удельных затрат на выпуск и доставку руды ПДМ и транспортирование руды ШАС в зависимости от грузоподъемности ПДМ и ШАС приведены на **рис. 1**.

Таблица 1. Параметры и показатели комбинированной системы разработки в зависимости от мощности залежи
Table 1. The parameters and indicators of combined mining method depending on deposit thickness

Параметры и показатели	Мощность залежи, м			
	10	15	20	25
Длина камеры и МКЦ, м	100	100	100	100
Ширина камеры и МКЦ, м	8	12	16	20
Угол откоса траншеи МКЦ, град	65			60
Высота породной выпускной траншеи МКЦ, м	4,8	9,3	13,9	15,1
Балансовые запасы блока, т	48000	108000	192000	300000
Потери, %	13,3	9,1	5,1	3,1
Разубоживание, %	11,5	12,0	13,1	16,1
Эксплуатационные запасы блока, т	47024	111558	209675	346484

Таблица 2. Технические характеристики погрузочно-доставочной машины и шахтного автосамосвала
Table 2. Technical specifications of load-haul-dump machine and mine dump truck

Параметры	Значения				
	Модель ПДМ	XYWJ-3	XYWJ-4	XYWJ-6	XYWJ-7,5
Размеры, мм:					
– длина	9200	9800	10600	11190	
– ширина	2474	2500	2750	3113	
– высота	2320	2500	2558	2745	
Объем ковша, м ³	3,0	4,0	6,0	7,5	
Паспортная грузоподъемность, т	6	10	14	18	
Мощность двигателя, кВт	160	223	260	315	
	Модель ШАС	XYUK-15	XYUK-20	XYUK-30	XYUK-40
Размеры, мм:					
– длина	8300	9010	10135	10412	
– ширина	2000	2280	2800	3073	
– высота	2400	2450	2580	2811	
Емкость кузова, м ³	7,5	10,5	15,0	20,0	
Паспортная грузоподъемность, т	15	20	30	40	
Мощность двигателя, кВт	165	240	315	405	

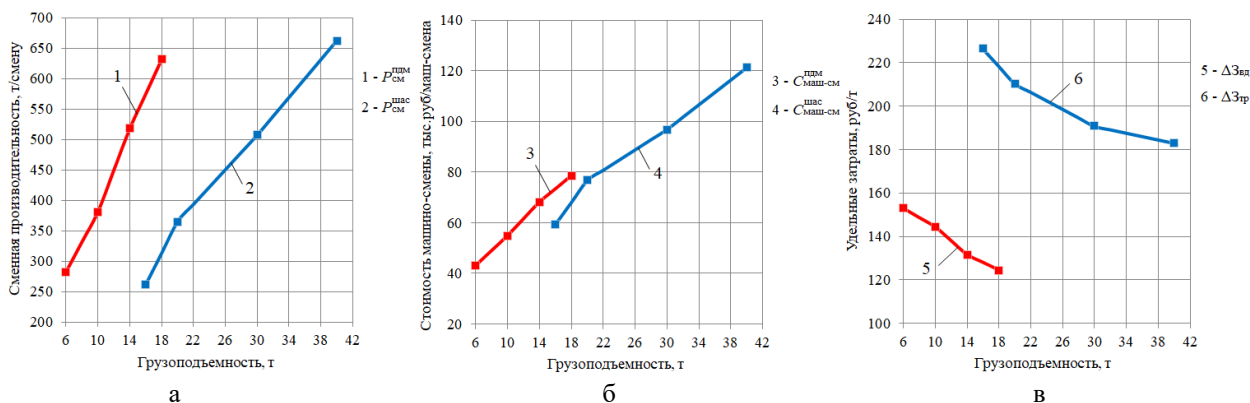


Рис. 1. Зависимости сменной производительности (а), стоимости машино-смены (б) и удельных затрат на выпуск и доставку, транспортирование руды (в) от грузоподъемности ПДМ и ШАС

Fig. 1. Dependences of shift productivity (a), machine shift cost (б) and the specific costs of ore loading, delivery, and transportation (в) on the load capacity of load-haul-dump machine and mine dump truck

Из графиков видно, что с увеличением грузоподъемности машин стоимость машино-смены и производительность растут, а удельные затраты как на выпуске и доставке, так и на транспортировании руды снижаются. Установлено, что с увеличением грузоподъемности машин суммарные удельные затраты на выпуск и доставку, транспортирование руды сни-

жаются на 23% за счет повышения производительности ПДМ в 2,2 раза и ШАС в 2,5 раза.

Результаты расчета удельных затрат на проходку ПНВ и ТВ с учетом их сечений (табл. 3) в зависимости от грузоподъемности ПДМ и ШАС при различной мощности залежи приведены на рис. 2.

Таблица 3. Сечения выработок в зависимости от грузоподъемности погрузочно-доставочной машины и шахтного автосамосвала

Table 3. The cross-sections of mine workings depending on the load capacity of load-haul-dump machine and mine dump truck

Наименование выработки	Площадь поперечного сечения выработки, м ²			
	ХУWJ-3	ХУWJ-4	ХУWJ-6	ХУWJ-7,5
Доставочный орт	15,13	15,59	17,06	19,81
Буро-доставочный штрек	12,00	12,40	13,73	16,22
Вентиляционный штрек				
Модель ШАС	ХУУК-15	ХУУК-20	ХУУК-30	ХУУК-40
Транспортный орт и штрек	12,90	14,36	17,41	19,92
Квершлаг				

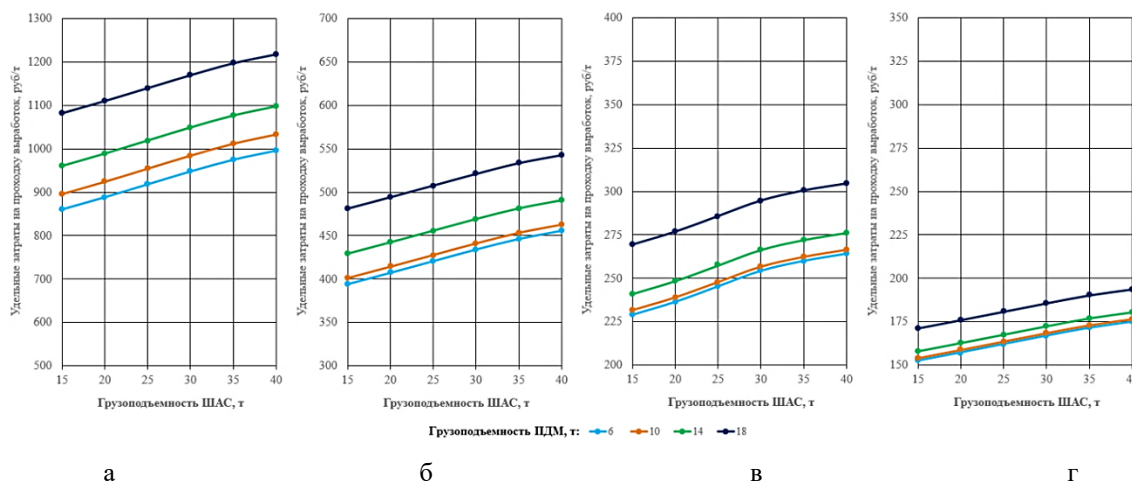


Рис. 2. Зависимости удельных затрат на проходку выработок от грузоподъемности ПДМ и ШАС при различной мощности залежи: а – 10 м; б – 15 м; в – 20 м; г – 25 м

Fig. 2. Dependences of the specific costs for excavation of workings on the load capacity of load-haul-dump machine and mine dump truck with different deposit thickness: a is 10 m; б is 15 m; в is 20 m; г is 25 m

Увеличение грузоподъемности ПДМ с 6 до 18 т ведет к увеличению сечений ПНВ в 1,3 раза и сокращению скорости их проходки на 18% (с 130 до 110 м/мес.). Увеличение грузоподъемности ШАС с 15 до 40 т ведет к увеличению сечений ТВ в 1,5 раза и сокращению скорости их проходки на 30% (с 90 до 70 м/мес.). Общее увеличение сроков строительства при общей протяженности ПНВ, равной 450 м, и ТВ, равной 1 км, составляет 3,5 месяца.

Установлено, что с увеличением грузоподъемности машин удельные затраты на проходку выработок повышаются вследствие увеличения сечений ПНВ в 1,3 раза и ТВ в 1,5 раза, а с увеличением мощности залежи уменьшаются в результате снижения удельного объема выработок на 1000 т добытой руды.

По критерию минимума суммарных удельных затрат на выпуск и доставку, транспортирование руды и проходку выработок установлены оптимальный состав КСО по грузоподъемности ПДМ и ШАС для отработки блока в зависимости от мощности залежи (рис. 3):

– при $m_{рт} = 10$ м – ПДМ 6 т + ШАС 15 т;

- при $m_{рт} = 15$ м – ПДМ 10 т + ШАС 20 т;
- при $m_{рт} = 20$ м – ПДМ 14 т + ШАС 30 т;
- при $m_{рт} = 25$ м – ПДМ 14 т + ШАС 40 т.

Для оптимального состава КСО по критерию минимума суммарных удельных затрат на выпуск и доставку, транспортирование руды, проходку выработок и амортизацию оборудования (с учетом рабочего количества ПДМ и ШАС) определена оптимальная производственная мощность рудника в зависимости от мощности залежи (рис. 4):

– при $m_{рт} = 10$ м и КСО: 4 ПДМ 6 т + 4 ШАС 15 т
– $A_{шх}^{opt} = 0,95$ млн т/год;

– при $m_{рт} = 15$ м и КСО: 4 ПДМ 10 т + 5 ШАС 20 т
– $A_{шх}^{opt} = 1,4$ млн т/год;

– при $m_{рт} = 20$ м и КСО: 4 ПДМ 14 т + 4 ШАС 30 т
– $A_{шх}^{opt} = 1,8$ млн т/год;

– при $m_{рт} = 25$ м и КСО: 5 ПДМ 14 т + 5 ШАС 40 т
– $A_{шх}^{opt} = 2,3$ млн т/год.

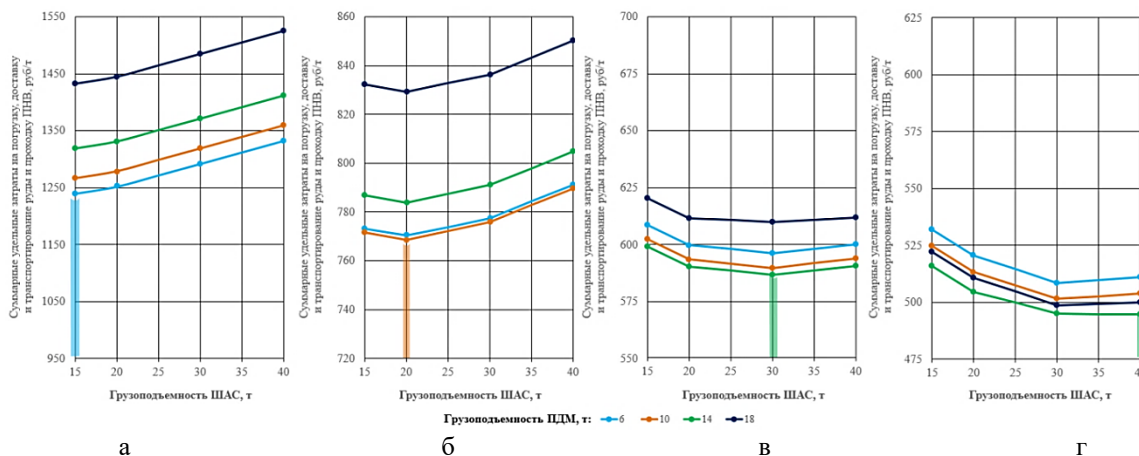


Рис. 3. Зависимости суммарных удельных затрат на выпуск и доставку, транспортирование руды и проходку выработок от грузоподъемности ПДМ и ШАС при мощности залежи: а – 10 м; б – 15 м; в – 20 м; г – 25 м
Fig. 3. Dependences of total specific costs for ore loading, delivery, and transportation and excavation of workings on the load capacity of load-haul-dump machine and mine dump truck with deposit thickness: a is 10 m; б is 15 m; в is 20 m; г is 25 m

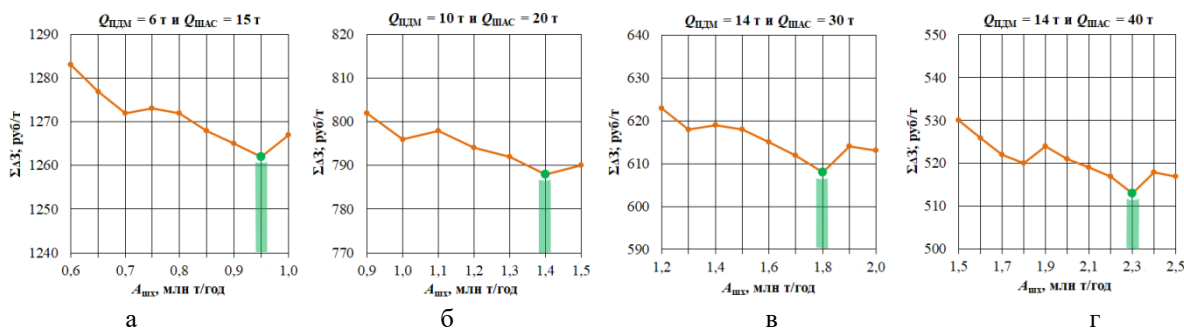


Рис. 4. Зависимости суммарных удельных затрат на выпуск и доставку, транспортирование руды, проходку выработок и амортизацию оборудования от производственной мощности рудника при мощности залежи: а – 10 м; б – 15 м; в – 20 м; г – 25 м
Fig. 4. Dependences of total specific costs for ore loading, delivery, and transportation and excavation of workings and depreciation of equipment on production capacity of mine with deposit thickness: a is 10 m; б is 15 m; в is 20 m; г is 25 m

Результаты исследования доказывают, что эффективность работы КСО зависит от соответствия параметров машин горно-геологическим и горнотехническим условиям разработки. Применение оптимальных КСО способствует сближению величин производственной мощности по горным возможностям и экономическим соображениям.

Заключение

Предложен новый подход к определению оптимальной величины производственной мощности рудника, основанный на оценке эффективности и выборе оптимального состава КСО на очистной выемке и транспортировании руды, и разработана соответствующая методика, отличающаяся учетом размеров блока, зависящих от мощности залежи, сечений подготовительно-нарезных и транспортных выработок, определяемых габаритами размещаемых в них машин, фактической грузоподъемности и рабочего количества ПДМ и ШАС, необходимых для обеспечения годового объема добычи.

Получены зависимости сменной производительности, стоимости машино-смены и удельных эксплуатационных затрат на выпуск и доставку, транспортирование руды и проходку подготовительно-нарезных и транспортных выработок от мощности залежи и грузоподъемности ПДМ и ШАС.

Установлены оптимальный состав КСО для отработки блока и оптимальная годовая производственная мощность рудника, обеспечиваемая данным КСО, в зависимости от мощности залежи, изменяющейся от 10 до 25 м.

Список источников

1. Яковлев В.Л. О методологии комплексного освоения запасов месторождений твердых полезных ископаемых для разработки стратегии развития минерально-сырьевой базы России // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2020. № 7. С. 5-20. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-7-5-20
2. Обоснование конструкции и параметров комбинированной системы разработки пологой залежи бедных комплексных руд / И.В. Соколов, Ю.Г. Антипин, И.В. Никитин, Р.В. Криницын // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2021. № 5-1. С. 88-104. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-51-0-88
3. Обоснование рациональной конструкции днища блока при комбинированной системе разработки пологих залежей средней мощности / И.В. Соколов, Ю.Г. Антипин, И.В. Никитин, Ю.М. Соломеин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. № 3. С. 5-12. DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-3-5-12
4. Исследование параметров и показателей комбинированной системы разработки пологих месторождений в зависимости от мощности залежи / И.В. Соколов, Ю.Г. Антипин, И.В. Никитин, Ю.М. Соломеин // Проблемы недропользования. 2024. № 3 (42). С. 6-15.
5. Каплунов Д.Р. Развитие производственной мощности подземных рудников при техническом перевооружении. М.: Наука, 1989. 263 с.
6. Справочник по горнорудному делу / под ред. В.А. Гребенюка, Я.С. Пыжьянова, И.Е. Ерофеева. М.: Недра, 1983. 816 с.
7. Шестаков В.А. Проектирование рудников. М.: Недра, 1987. 234 с.
8. Гибадуллин З.Р., Калмыков В.Н., Петрова О.В. Технологические схемы транспортирования рудной массы при подземной отработке приконтурных запасов карьеров. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2016. 159 с.
9. Смирнов А.А., Чернецов В.А., Чернецов Д.В. Методика расчета производительности самоходного горного оборудования (на примере норильских подземных рудников) // Горный журнал. 2010. № 6. С. 88-90.
10. Greberg J., Salama A. Analysis of the current challenges for deep underground mines: Labour productivity improvement // Tanzania Journal of Engineering and Technology. 2020, vol. 39, no. 1, pp. 32-46.
11. Jakkula B., Mandela G.R., Chivukula S.M. Reliability, availability and maintainability (RAM) investigation of load haul dumpers (LHDs): a case study // International Journal of System Assurance Engineering and Management. 2021. DOI: 10.1007/s13198-021-01154-3
12. Nieto A., Schatz R.S., Dogruoz C. Performance analysis of electric and diesel equipment for battery replacement of tethered LHD vehicles in underground mining // Mining Technology. 2020, vol. 129, no. 1, pp. 22-29. DOI: 10.1080/25726668.2020.1720371
13. Шестаков В.А., Крушнов В.М., Славиковский О.В. Метод сравнительной оценки комплексов горных машин для рудных шахт в современных экономических условиях // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2006. № 1. С. 3-8.
14. Македонский О.М. Обоснование эффективного применения погрузо-доставочных и транспортных машин при подземной разработке гипсовых месторождений: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 25.00.22 / Македонский Олег Михайлович. Москва, 2005. 18 с.
15. Акашев З.Т., Данияров Н.А., Тоғизбаева Б.Б. Методика сравнительной оценки комплексов самоходного горного оборудования // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. 2008. № 1 (35). С. 7-106.
16. Выбор и обоснование комплекса механизации для систем разработки с обрушением руды и вмещающих пород / А.В. Красавин, В.А. Иванов, Н.Е. Пудовкин, Р.А. Каримов // Актуальные проблемы горного дела. 2020. № 1. С. 17-20.
17. Скорняков Ю.Г. Подземная добыча руд комплексами самоходных машин. М.: Недра, 1986. 204 с.
18. Пухов Ю.С. Рудничный транспорт. М.: Недра, 1991. 238 с.
19. Методика определения оптимальных параметров породной выпускной траншеи при комбинированной системе разработки пологопадающих месторождений / Ю.Г. Антипин, А.А. Смирнов, И.В. Никитин, Ю.М. Соломеин // Горная промышленность. 2024. № 5. С. 116-121.
20. Антипин Ю.Г., Смирнов А.А., Никитин И.В. Обоснование безопасности комбинированной системы разработки в условиях рудника «Заполярный» // Горный

информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2023. № 8. С. 138-151. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_8_0_138

References

1. Yakovlev V.L. Solid mineral deposits integrated development methodology for Russian mineral resource base development strategy. *Izvestiya vuzov. Gorniy zhurnal* [Minerals and Mining Engineering]. 2020;(7):5-20. (In Russ.) DOI: 10.21440/0536-1028-2020-7-5-20.
2. Sokolov I.V., Antipin Yu.G., Nikitin I.V., Krinitsyn R.V. Substantiation of the design and parameters of the combined system for the development of a shallow deposit of poor complex ores. *Gorniy informatsionno-analiticheskiy bulletin* [Mining Information and Analytical Bulletin]. 2021;(5-1):88-104. (In Russ.) DOI: 10.25018/0236-1493-2021-51-0-88.
3. Sokolov I.V., Antipin Yu.G., Nikitin I.V., Solomein Yu.M. Substantiation of a rational block bottom structure at a combined mining system of shallow deposits of medium capacity. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024;22(3):5-12. (In Russ.) DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-3-5-12.
4. Sokolov I.V., Antipin Yu.G., Nikitin I.V., Solomein Yu.M. Research of parameters and indicators of a combined mining system for shallow deposits depending on the capacity of the deposit. *Problemy nedropolzovaniya* [Problems of Subsoil Use]. 2024;(3(42)):6-15. (In Russ.)
5. Kaplunov D.R. *Razvitiye proizvodstvennoy moshchnosti podzemnykh rudnikov pri tekhnicheskoy perevooruzhenii* [Development of the production capacity of underground mines during technical re-equipment]. Moscow: Nauka, 1989, 263 p. (In Russ.)
6. Grebenyuk V.A., Pyzhyanov Ya.S., Yerofeyev I.E. *Spravochnik po gornorudnomu delu* [Mining Handbook]. Moscow: Nedra, 1983, 816 p. (In Russ.)
7. Shestakov V.A. *Proektirovaniye rudnikov* [Mine design]. Moscow: Nedra, 1987, 234 p. (In Russ.)
8. Gibadullin Z.R., Kalmykov V.N., Petrova O.V. *Tekhnologicheskie skhemy transportirovaniya rudnoi massy pri podzemnoy otrabotke prikonturnykh zapasov karerov* [Technological schemes for the transportation of ore mass during underground mining of pits short-range reserves]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University Publishing House, 2016, 159 p. (In Russ.)
9. Smirnov A.A., Chernetsov V.A., Chernetsov D.V. Methodology for calculating the productivity of self-propelled mining equipment (using the example of the Norilsk underground mines). *Gorniy zhurnal* [Mining Journal]. 2010;(6):88-90. (In Russ.)
10. Greberg J., Salama A. Analysis of the current challenges for deep underground mines: Labour productivity improvement. *Tanzania Journal of Engineering and Technology*. 2020;39(1):32-46.
11. Jakkula B., Mandela G.R., Chivukula S.M. Reliability, availability and maintainability (RAM) investigation of load haul dumpers (LHDs): a case study. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*. 2021. DOI: 10.1007/s13198-021-01154-3
12. Nieto A., Schatz R.S., Dogruoz C. Performance analysis of electric and diesel equipment for battery replacement of tethered LHD vehicles in underground mining. *Mining Technology*. 2020;129(1):22-29. DOI: 10.1080/25726668.2020.1720371
13. Shestakov V.A., Krupnov V.M., Slavikovskiy O.V. The method of comparative evaluation of mining machinery complexes for ore mines in modern economic conditions. *Izvestiya vuzov. Gorniy zhurnal* [Minerals and Mining Engineering]. 2006;(1):3-8. (In Russ.)
14. Makedonskiy O.M. *Obosnovaniye effektivnogo primeneniya pogruzo-dostavochnykh i transportnykh mashin pri podzemnoy razrabotke gipsovykh mestorozhdeniy: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Justification of the effective use of LHD machines in the underground mining of gypsum deposits. Extended abstract of Ph.D. dissertation]. Moscow, 2005, 18 p.
15. Akashev Z.T., Daniyarov N.A., Togizbayeva B.B. Method of comparative evaluation of self-propelled mining equipment complexes. *Progressivnyye tekhnologii i sistemy mashinostroeniya* [Advanced technologies and systems of mechanical engineering]. 2008;(1(35)):7-016. (In Russ.)
16. Krasavin A.V., Ivanov V.A., Pudovkin N.E., Karimov R.A. Selection and justification of a complex of mechanization for mining systems with caving of ore and host rocks. *Aktualnye problemy gornogo dela* [Current issues of mining]. 2020;(1):17-20. (In Russ.)
17. Skornyakov Yu.G. *Podzemnaya dobycha rud kompleksami samokhodnykh mashin* [Underground mining of ores by complexes of self-propelled machines]. Moscow: Nedra, 1986, 204 p. (In Russ.)
18. Pukhov Yu.S. *Rudnichniy transport* [Mining transport]. Moscow: Nedra, 1991, 238 p. (In Russ.)
19. Antipin Yu.G., Smirnov A.A., Nikitin I.V., Solomein Yu.M. Methodology for determining the optimal parameters of a rock release trench in the combined mining system for shallow dipping deposits. *Gornaya promyshlennost* [Russian Mining Industry]. 2024;(5S):116-121. (In Russ.)
20. Antipin Yu.G., Smirnov A.A., Nikitin I.V. Validation of safety in mixed-type mining: A case-study of Zapolyarny Mine. *Gorniy informatsionno-analiticheskiy bulletin* [Mining Information and Analytical Bulletin]. 2023;(8):138-151. (In Russ.) DOI: 10.25018/0236_1493_2023_8_0_138

Поступила 12.08.2025; принята к публикации 05.11.2025; опубликована 31.03.2026
Submitted 12/08/2025; revised 05/11/2025; published 31/03/2026

Антипин Юрий Георгиевич – кандидат технических наук, заведующий лабораторией подземной геотехнологии, Институт горного дела УрО РАН, Екатеринбург, Россия.
Email: geotech@igduran.ru. ORCID 0000-0002-3564-0310

Никитин Игорь Владимирович – кандидат технических наук,
научный сотрудник лаборатории подземной геотехнологии,
Институт горного дела УрО РАН, Екатеринбург, Россия.
Email: opening-kp@yandex.ru. ORCID 0000-0002-3593-4319

Yuri G. Antipin – PhD (Eng.), Head of the Laboratory of Underground Geotechnology,
Institute of Mining Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia.
E-mail: geotech910@yandex.ru. ORCID 0000-0002-3564-0310

Igor V. Nikitin – PhD (Eng.), Researcher, Laboratory of Underground Geotechnology,
Institute of Mining Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia.
E-mail: opening-kp@yandex.ru. ORCID 0000-0002-3593-4319