

## Обоснование предельных границ карьера месторождения «Павлик»

В.В. Арно<sup>1</sup>✉, Е.П. Колесниченко<sup>2</sup>, И.Ю. Гарифулина<sup>1</sup>, Н.Е. Ломакина<sup>1</sup>, Е.А. Ельников<sup>1</sup>, Е.А. Миккельсен<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Северо-Восточный государственный университет, г. Магадан, Российская Федерация

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация

✉ vvnika@mail.ru

**Резюме:** В статье представлено обоснование предельных границ карьера при открытой отработке на примере месторождения «Павлик». Авторы выполнили анализ и оценку методологии оптимизации границ карьера, учитывающей экономические, экологические и социальные факторы. В качестве основного метода отстройки конечных контуров карьеров используется метод – алгоритм Лерча–Гроссмана. Этот алгоритм обеспечивает гибкость планирования за счет возможности интеграции динамических данных и последующей корректировки границ карьера. В модели рассчитывалась ценность каждого элементарного блока, определяемая как прибыль, полученная от продажи извлеченного полезного ископаемого, за вычетом цеховых затрат на добычу, переработку руды и общезаводских расходов. В итоге оптимизации по выбранному алгоритму сформирован наиболее рациональный вариант набора блоков, который представляет форму оптимального к отработке карьера. Данный метод позволяет более рационально использовать ресурсы, избегая обрушения склонов и других опасных ситуаций, что непосредственно сказывается на безопасности труда. При этом результат оптимизационных вычислений является вспомогательным инструментом для обоснования оптимальных границ, исходя из того, что окончательное решение устанавливается путем сопоставления граничного и контурного коэффициентов вскрыши.

**Ключевые слова:** обоснование предельных границ карьера, оптимизация границ карьера, алгоритм Лерча–Гроссмана, коэффициенты вскрыши

**Для цитирования:** Арно В.В., Колесниченко Е.П., Гарифулина И.Ю., Ломакина Н.Е., Ельников Е.А., Миккельсен Е.А. Обоснование предельных границ карьера месторождения «Павлик». *Горная промышленность*. 2024;(6):120–124. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-6-120-124>

## Justification of the marginal boundaries of the Pavlik open-pit mine

V.V. Arno<sup>1</sup>✉, E.P. Kolesnichenko<sup>2</sup>, I.Yu. Garifulina<sup>1</sup>, N.E. Lomakina<sup>1</sup>, E.A. Elnikova<sup>1</sup>, E.A. Mikkelsen<sup>1</sup>

<sup>1</sup>North-Eastern State University, Magadan, Russian Federation

<sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

✉ vvnika@mail.ru

**Abstract:** The article presents a justification of the marginal boundaries of an open-pit mine using the Pavlik deposit as a case study. The authors performed an analysis and evaluation of the methodology to optimize the open-pit boundaries with account of the economic, environmental and social factors. The Lerchs-Grossmann algorithm is used as the main method to define the final outlines of the open pits. The Lerchs-Grossmann algorithm provides the planning flexibility due to its ability to integrate dynamic data and subsequently adjust the open-pit boundaries. The model is used to calculate the value of each elementary block, defined as the profit earned from selling the extracted mineral, minus the department costs of mining, ore processing and general factory expenses. As a result of the optimization based on the selected algorithm, the optimal set of blocks was formed, which represents the shape of the optimal open-pit for the deposit development. This method makes the use resources more efficient, avoiding the collapse of slopes and other dangerous events, which directly affects the occupational safety. At the same time, the result of optimization calculations is an auxiliary tool for justification of the optimal boundaries, based on the fact that the final solution is established by comparing the boundary and contour stripping ratios.

**Keywords:** justification of the open-pit marginal boundaries, optimization of the open-pit boundaries, the Lerchs-Grossmann algorithm, stripping ratio

**For citation:** Arno V.V., Kolesnichenko E.P., Garifulina I.Yu., Lomakina N.E., Elnikova E.A., Mikkelsen E.A. Justification of the marginal boundaries of the Pavlik open-pit mine. *Russian Mining Industry*. 2024;(6):120–124. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-6-120-124>

**Введение**

Обоснование предельных границ карьера является ключевым аспектом в планировании горных работ, так как от этого зависят эффективность добычи полезных ископаемых, минимизация воздействия на окружающую среду и снижение издержек. Актуальность исследований по обоснованию предельных границ карьеров при отработке месторождений обосновывается тем, что этот процесс оказывает прямое влияние на эффективность горных работ, безопасность и непосредственно на экономические показатели.

Целью исследований являлась оптимизация процесса добычи полезных ископаемых из карьера с обеспечением максимальной эффективности на основе анализа алгоритма оптимизации границ карьера.

В работе использовались методы эмпирического и теоретического уровней. Методы эмпирического уровня базируются на экспериментальных данных, полученных непосредственно в реальных производственных условиях при отработке месторождения «Павлик». Теоретические методы включают сравнительный анализ и синтез существующего опыта отработки месторождений полезных ископаемых открытым способом.

**Результаты**

При обосновании предельных границ карьера на месторождении «Павлик» в качестве основного метода отстройки конечных контуров карьеров использовалось программное обеспечение компании CAE Datamine Corporate Limited – система Datamine (Studio 3) и NPV Scheduler 4. В системе NPV Scheduler используется алгоритм Лерча–Гроссмана.

В модели рассчитывалась ценность каждого элементарного блока, определяемая как прибыль, полученная от продажи извлеченного полезного ископаемого, за вычетом цеховых затрат на добычу, переработку руды и общезаводских расходов. В итоге оптимизации по выбранному алгоритму сформирован наиболее рациональный вариант набора блоков, который представляет форму оптимального к отработке карьера [1–3]. При этом определено, что результат оптимизационных вычислений является вспомогательным инструментом для обоснования оптимальных границ, исходя из того, что окончательное решение в выборе оптимальных границ устанавливается в соответствии с требованиями методических рекомендаций путем сопоставления граничного и контурного коэффициентов вскрыши. Проектирование выполнялось по геолого-математической модели месторождения по трем рассматриваемым вариантам бортового содержания Au (0,4; 0,6; 0,8 г/т);

По результатам геолого-математического моделирования были посчитаны запасы руды и металла для каждого из рассматриваемых вариантов бортового содержания (табл. 1).

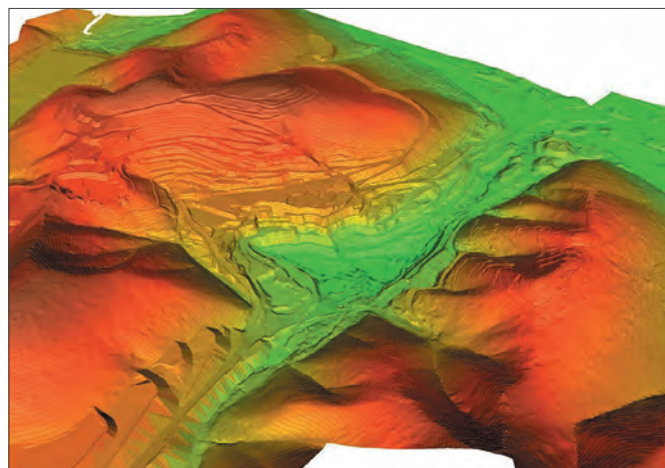
Месторождение является действующим и за время эксплуатации первоначальная поверхность была в значительной степени нарушена горными работами. На рис. 1 представлена построенная модель карьера «Павлик».

При обосновании предельных границ исходные данные включают углы наклона бортов карьера, технико-экономические параметры [4; 5]. Углы наклона бортов карьера в предельном положении приняты в соответствии с рекомендациями отчетов о геотехнических исследованиях устойчивых углов погашения бортов карьера месторожде-

**Таблица 1**  
Запасы руды и металла

**Table 1**  
Ore and metal reserves

Показатели	Единица измерения	Бортовое содержание Au, г/т		
		0,40	0,60	0,80
Руда	тыс. м <sup>3</sup>	63944,7	47784,5	33867,8
	тыс. т	169453,4	126629,0	89749,7
Au	г/т	1,427	1,724	2,110
	кг	241867,4	218253,9	189382,2



**Рис. 1**  
Модель карьера месторождения «Павлик»

**Fig. 1**  
A model of the Pavlik open pit mine

**Таблица 2**  
Выделенные геомеханические зоны для оптимизации

**Table 2**  
Identified geomechanical zones for optimization

Зона карьера	Устойчивый угол наклона борта карьера, град
1	48
2	38
3	60
4	48
5	45
6	38
7	45
8	50
9	50
10	49
11	48
12	46
13	60
14	48

ния «Павлик». По результатам исследований для целей оптимизации поле карьера разделено на геомеханические зоны, которым присвоены предельные значения устойчивых углов погашения. В табл. 2 приведены параметры предельных углов погашения, на рис. 2 представлены геотехнические зоны.

Производственные и экономические параметры для формирования экономической модели месторождения включают в себя следующие показатели:

- цена 1 г золота;
- суммарные затраты на выемку, транспортировку и отвалообразование 1 м³ пустых пород;
- суммарные затраты на выемку и транспортировку рудной массы;
- суммарные затраты на переработку 1 т руды;
- общепроизводственные и общехозяйственные расходы;
- налоги и прочие отчисления;
- извлечение металла в товарную продукцию;
- эксплуатационные потери и разубоживание руды при добыче.



Рис. 2  
Геомеханические зоны в контурах карьеров

Fig. 2  
Geomechanical zones within the open-pit boundaries

Основой для определения расчетной цены 1 г химически чистого золота служит средняя округленная за последний год (2023–2024) стоимость золота на Лондонской бирже металлов (LBMA), 2400,8 долл/унц. Курс доллара в расчетах принят текущий на момент выполнения работы – 89 руб./долл. США. Таким образом, цена 1 г товарного золота в рублях составила – 6869,57 руб/г.

Коэффициент сквозного извлечения золота принят на основании фактических данных – 80,1%. Процесс сравнения предполагает оценку граничного коэффициента вскрыши применительно к прирезаемым объемам руды при выборе оптимальной оболочки. Как уже было отмечено, оптимизация конечных границ карьера производилась с использованием алгоритма Лерча–Гроссмана, который в настоящее время практически повсеместно применяется для этих целей.

После импорта блочной модели в оптимизатор создана экономическая модель месторождения, где для каждой ячейки рассчитывалась прибыль от реализации металлов, содержащихся в ячейке.

Для оценки чувствительности влияния полной себестоимости на параметры карьера в процессе оптимизации использовался коэффициент, влияющий на ценность товарного металла, коэффициент соответствует 5% от базовой величины, диапазон оценки принят от 80 до 120%. В результате оценки был получен набор оболочек, соответствующий изменению цены.

При определении конечной глубины карьеров также выполнен расчет коэффициента вскрыши применительно к запасам руды и металла в прирезаемых частях оптимизированных оболочек. Расчет граничного коэффициента вскрыши произведен по следующей формуле:

$$K_{гр} = \frac{ЦИР - Z_{п}}{Z_{в}} \quad (1)$$

где ЦИР – извлекаемая ценность 1 т руды в прирезке между смежными оболочками;  $Z_{в}$  – себестоимость производства 1 м³ вскрыши;  $Z_{п}$  – полная себестоимость добычи (франко-борт карьера), транспортировки, переработки 1 т руды с учетом удельных административно-хозяйственных затрат, налогов и коммерческих расходов:

$$Z_{п} = Z_{д} + Z_{гр} + Z_{пер} + Z_{ак} + Z_{нал} \quad (2)$$

Также для каждой из оболочек производился расчет контурного коэффициента вскрыши, определяемого как частное от деления прирезаемой вскрыши (разница вскрыши между смежными оболочками) на прирезаемую часть руды (также разница в руде между смежными оболочками). Оптимальной является та оболочка, контурный коэффициент которой приближается по своему значению к граничному коэффициенту вскрыши, но не превышает его значения (табл. 3).

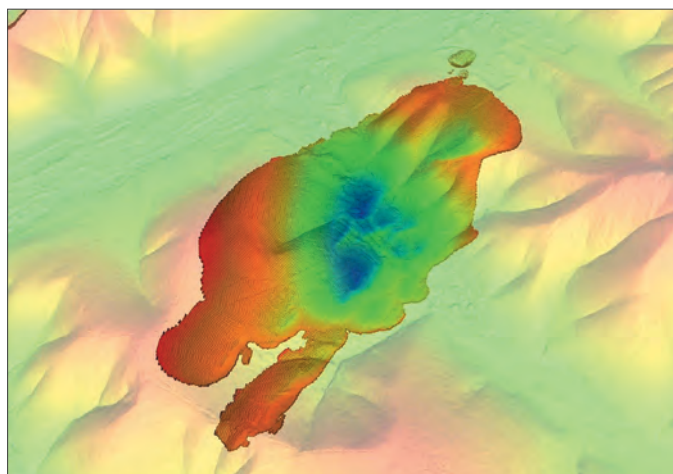
Процесс сравнения включал в себя оценку граничного коэффициента вскрыши применительно к прирезаемым объемам руды при выборе оптимальной оболочки. Анализ и оценка полученных оптимальных оболочек (конусов) показали их незначительное различие между собой. Так, разница в количестве горной массы находится в пределах 1%.

Близость полученных оптимальных оболочек карьера позволила с позиции экономических критериев принять любую из них в качестве ориентира для отстройки проектного контура карьера [6; 7]. Поэтому в качестве основы для горнотехнических построений проектных контуров карьеров принята оптимальная оболочка, созданная по варианту бортового содержания Au – 0,6 г/т, как наиболее предпочтительная с позиции утверждения кондиционного варианта бортового содержания. На рис. 3 представлена трехмерная модель оптимальной оболочки (Au – 0,6 г/т).

Таблица 3  
Перечень оптимальных оболочек

Table 3  
A list of the optimal envelopes

№ оптимальной оболочки	Горная масса в контуре карьера	Вскрыша	Руда	Au		Коэффициент вскрыши
	тыс. м³			тыс. м³	тыс. т	
<b>Бортовое содержание Au – 0.4 г/т</b>						
6	383830.1	333958.5	132157.8	200376.5	1.516	2.5
<b>Бортовое содержание Au – 0.6 г/т</b>						
6	386561.8	347699.8	102983.7	184061.1	1.787	3.4
<b>Бортовое содержание Au – 0.8 г/т</b>						
6	383107.8	355119.2	74169.8	160457.5	2.163	4.8



**Рис. 3**  
Результаты оптимизации.  
3D-модель выбранной  
оболочки (Au – 0,6 г/т)

**Fig. 3**  
Optimization results.  
A 3D model of the selected  
envelope (Au - 0.6 g/t)

На следующей стадии построения конечных контуров карьера закреплялись элементы конструкции карьера (уступы, бермы безопасности, минимальные параметры дна карьера и т.д.) и элементы вскрывающих выработок (траншеи, полутраншеи, транспортные бермы с площадками примыкания, обеспечивающие безопасную работу автотранспорта).

Исходными для построения конструктивного контура карьера в окончательных границах использованы следующие данные:

- каркас оболочки оптимального контура отработки месторождения;
- элементы конструкции бортов и уступов карьера;
- места расположения доставки горной массы (ЗИФ, отвалы пустых пород).

Расчетные параметры элементов конструкции бортов приведены в табл. 4.

**Заключение**

При обосновании предельных границ карьера необходимо использовать параметры элементов конструкции бортов карьера, обеспечивающие безопасную и производительную работу открытого рудника на весь период эксплуатации. В этом контексте важную роль играет алгоритм Лерча–Гроссмана. Данный алгоритм позволяет находить наиболее прибыльные границы карьера, учитывая различные ограничения и параметры эксплуатации.

**Вклад авторов**

Арно В.В., Миккельсен Е.А. – идея исследований, формулировка конфликта текущей парадигмы и новых фактов, написание научной работы; Ельникова Е.А., Гарифулина И.Ю. – оценка результатов и коррекция написанной работы; Ломакина Н.Е., Колесниченко Е.П. – оценка результатов исследования, выборка и сбор материала для исследований

**Author’s Contribution**

Veronika V. Arno & Ekaterina A. Mikkelsen – research idea, formulation of the conflict between the current paradigm and the new facts, writing the research paper; Irina Yu. Garifulina & Elena A. Elnikova – evaluation of the results and correction of the written paper; Natalia E. Lomakina & Eva P. Kolesnichenko – evaluation of the research results, selection and collection of the research material

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflict of interests**

The authors declare no conflict of interest.

**Таблица 4**  
Основные параметры  
элементов контуров карьера

**Table 4**  
The main parameters  
of the open pit boundary  
elements

Наименование	Показатель
Угол откоса уступа, град	60
Угол откоса борта, град	35–50
Ширина бермы безопасности, м	10
Ширина транспортной бермы, м	32–39*
Высота вскрывного уступа, м	10–15
Высота добычного уступа (подступа), м	7,5
Высота уступа в предельном положении, м	30

\* Ширина транспортной бермы на верхних горизонтах несколько больше и рассчитана для применения самосвалов г/п 220 т, в углубленной части карьера (ниже горизонта +180 м) ширина транспортной бермы уменьшается до 32 для применения самосвалов г/п 90 т.

Первый основной принцип оптимизации границ карьера с помощью алгоритма Лерча–Гроссмана заключается в максимизации чистой текущей стоимости (NPV). Это достигается путем определения того, какие блоки земли стоит добывать, а какие нет, на основе их экономической ценности и затрат на добычу. Алгоритм применяет подход динамического программирования для оценки всех возможных комбинаций блоков, что позволяет рассчитать максимально возможный NPV.

Второй принцип заключается в соблюдении технических и экологических ограничений. Карьерная добыча не может вестись вне определенных пределов, которые устанавливаются на основе геологических, технических и экологических факторов. Алгоритм Лерча–Гроссмана способен учитывать различные ограничения, например, максимальные и минимальные углы откосов для обеспечения безопасности, ограничения на глубину карьера, а также зоны исключения, связанные с защитой окружающей среды.

Третьим важным аспектом является адаптируемость алгоритма к изменениям в экономических условиях и рыночных ценах на полезные ископаемые. В условиях меняющегося рынка способность быстро пересматривать планы и границы карьера в соответствии с текущими экономическими показателями является неотъемлемой частью устойчивой эксплуатации месторождений.

## Список литературы / References

- Капутин Ю.Е. *Обоснование бортового содержания и оптимизация стратегии развития открытых горных работ*. СПб.: Недра; 2017. 280 с.
- Матрохина К.В., Трофимец В.Я., Мазакон Е.Б., Маховиков А.Б., Хайкин М.М. Развитие методологии сценарного анализа инвестиционных проектов предприятий минерально-сырьевого комплекса. *Записки горного института*. 2023;259:112–124. <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.3>  
Matrokhina K.V., Trofimets V.Y., Mazakov E.B., Makhovikov A.B., Khaykin M.M. Development of methodology for scenario analysis of investment projects of enterprises of the mineral resource complex. *Journal of Mining Institute*. 2023;259:112–124. <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.3>
- Lerchs H., Grossmann I.F. Optimum design of open-pit mines. *Transaction CIM*. 58 1965;58(633):47–54.
- Gilani S.-O., Sattarvand J., Hajihassani M., Abdullah S.S. A stochastic particle swarm based model for long term production planning of open pit mines considering the geological uncertainty. *Resources Policy*. 2020;68: 101738. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101738>
- Dagdelen K., Kawahata K. Value creation through strategic mine planning and cutoff-grade optimization. *Mining Engineering*. 2008;60(1):39–45.
- Шпанский О.В., Лигоцкий Д.Н., Борисов Д.В. *Проектирование границ открытых горных работ*. СПб.; 2003. 90 с.
- Кантемиров В.Д., Яковлев А.М., Титов Р.С. Применение геоинформационных технологий блочного моделирования для совершенствования методов оценки качественных показателей полезных ископаемых. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2021;(1):63–73. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2021-1-63-73>  
Kantemirov V. D., Iakovlev A. M., Titov R. S. Applying geoinformation technologies of block modelling to improve the methods of assessing quality indicators of minerals. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Gornyi Zhurnal*. 2021;(1):63–73. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2021-1-63-73>

**Информация об авторах**

**Арно Вероника Владимировна** – кандидат технических наук, доцент Политехнического института, Северо-Восточный государственный университет, г. Магадан, Российская Федерация; e-mail: vvnika@mail.ru

**Колесниченко Ева Павловна** – студент направления подготовки «Государственный и муниципальный аудит» Высшей школы государственного аудита, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация; e-mail: kolesnicheva@gmail.com

**Гарифулина Ирина Юрьевна** – старший преподаватель кафедры геологии и горного дела Политехнического института, Северо-Восточный государственный университет, г. Магадан, Российская Федерация; e-mail: irina-kajtukova@yandex.ru

**Ломакина Наталья Евгеньевна** – старший преподаватель кафедры горного дела Политехнического института, Северо-Восточный государственный университет, г. Магадан, Российская Федерация; e-mail: lom\_a\_n@mail.ru

**Ельникова Елена Александровна** – старший преподаватель кафедры энергетики, транспорта и строительства Политехнического института, Северо-Восточный государственный университет, г. Магадан, Российская Федерация; e-mail: lenaemail@mail.ru

**Миккельсен Екатерина Александровна** – студент направления подготовки «Горное дело», специализация «Подземная разработка рудных месторождений» Политехнического института, Северо-Восточный государственный университет, г. Магадан, Российская Федерация; e-mail: katena.glotova.0173@gmail.com

**Information about the authors**

**Veronika V. Arno** – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Polytechnic Institute, North-Eastern State University, Magadan, Russian Federation; e-mail: vvnika@mail.ru

**Eva P. Kolesnichenko** – Student of the field of training “State and Municipal Audit”, Higher School of Public Audit, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation; e-mail: kolesnicheva@gmail.com

**Irina Yu. Garifulina** – Senior Lecturer of the Department of Geology and Mining, Polytechnic Institute, North-Eastern State University, Magadan, Russian Federation; e-mail: irina-kajtukova@yandex.ru

**Natalia E. Lomakina** – Senior Lecturer of the Mining Department, Polytechnic Institute, North-Eastern State University, Magadan, Russian Federation; e-mail: lom\_a\_n@mail.ru

**Elena A. Elnikova** – Senior Lecturer of the Department of Energy, Transport and Construction, Polytechnic Institute, North-Eastern State University, Magadan, Russian Federation; e-mail: lenaemail@mail.ru

**Ekaterina A. Mikkelsen** – Student of the field of study “Mining”, specialization “Underground Mining of Ore Deposits”, Polytechnic Institute, North-Eastern State University, Magadan, Russian Federation; e-mail: katena.glotova.0173@gmail.com

**Article info**

Received: 04.10.2024

Revised: 18.11.2024

Accepted: 20.11.2024

**Информация о статье**

Поступила в редакцию: 04.10.2024

Поступила после рецензирования: 18.11.2024

Принята к публикации: 20.11.2024