

ISSN 1999-4125 (Print)

ISSN 2949-0642 (Online)

Научная статья

УДК 622.271

DOI: 10.26730/1999-4125-2026-3-154-166

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ БОРТОВОГО СОДЕРЖАНИЯ НА ГРАНИЦЫ КАРЬЕРА

Логинов Егор Вячеславович*,
Масальский Сергей Сергеевич

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II

* для корреспонденции: Loginov_EV@pers.spmi.ru



Информация о статье

Поступила:

10 января 2026 г.

Одобрена после
рецензирования:

15 июня 2026 г.

Принята к публикации:

01 июля 2026 г.

Ключевые слова:

открытые горные работы,
карьер, золото, бортовое
содержание, волатильность,
границы карьера, выемочный
блок

Аннотация.

При разработке рудных месторождений особую роль играет бортовое содержание полезного компонента, от которого зависят границы и параметры выемочных блоков. В течение срока разработки месторождения величина бортового содержания может изменяться в зависимости от стоимости минерального сырья на рынке и себестоимости выпуска продукции. В последнее время стоимость золота постоянно увеличивается, что напрямую влияет на величину бортового содержания при разработке золоторудных месторождений. В то же время научная литература последних лет имеет ограничения исследований в данной тематике и за редким исключением рассматривает полноценные модели месторождений. В рамках научного исследования использовались методы математического моделирования с созданием блочных моделей месторождения и дальнейшим их использованием в качестве исходных данных для технических и экономических расчетов. Применялись ГГИС-системы для взаимодействия с блочными моделями и производились экономические расчеты в современных программных комплексах. Целью исследования стало обоснование оптимального конечного контура карьера на основе чистого дисконтируемого дохода при различных бортовых содержаниях золота, для чего производились расчеты на начало, середину и конец 2025 года. Также производилась оптимизация выемочных блоков карьера, оценивалось изменение промышленных запасов месторождения, просчитывались инвестиционные проекты. В результате исследования были получены данные, характеризующие возможный прирост как промышленных запасов золоторудных месторождений в частности, так и рентабельности разработки аналогичных месторождений в целом. Результаты исследования могут быть в дальнейшем использованы при необходимости введения дополнительных капиталовложений в разработку золоторудных карьеров при высокой волатильности рынка.

Для цитирования: Логинов Е.В., Масальский С.С. Техничко-экономическое исследование влияния бортового содержания на границы карьера // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2026. № 3 (175). С. 154-166. DOI: 10.26730/1999-4125-2026-3-154-166, EDN: QDIHZZ

Введение

Актуальность проблемы

Экономически обоснованное бортовое содержание (минимальное промышленное содержание) полезного ископаемого является одним из базисных показателей при разработке рудных месторождений [1–3]. Основываясь на

бортовом содержании полезного ископаемого и технологических принципах проектирования выемочных блоков, обосновываются промышленные запасы месторождений [4, 5].

Данное исследование рассматривает золоторудные месторождения, где вопрос бортового содержания стоит наиболее остро [6–

8]. В современной мировой экономической ситуации золото имеет большую волатильность, причем в сторону увеличения его стоимости, что говорит о постоянно варьирующемся экономически целесообразном бортовом содержании полезного компонента в золотоносных рудах [9–12]. В последнее десятилетие было несколько крупных скачков стоимости золота, первым из которых стал 2020 г., когда золото выросло в цене почти в полтора раза, и период начиная с 2024 г., в котором золото начало стремительно расти вверх в стоимости и до сих пор глобально не остановило свой подъем, увеличившись в цене уже более чем в два раза [13–15].

Анализ существующих исследований по теме

Изучением факторов, влияющих на бортовое содержание полезного компонента в рудах и имеющих впоследствии экономический эффект на горнодобывающее предприятие, занимались многие ученые [16–19]. Так, в последнее время этому вопросу особое внимание уделили Фомин С. И. и Говоров А. С., рассмотрев в своих работах в том числе вопрос оценки факторов, наиболее значимых для реализации проекта открытой разработки рудных месторождений, проведенной с помощью анализа чувствительности, основой которого является метод, позволяющий выявить степень зависимости результатов реализации проекта карьера от изменения одного из его параметров [20–23].

Международный научный обзор темы исследования во многом основывается на изучении возможностей современных программных комплексов и методов, на основе которых работают указанные программы. Также рассматривается возможность изменения бортового содержания полезного ископаемого с течением времени, т. е. увеличения глубины разработки [24, 25].

В целом тематика исследования довольно широко рассмотрена как в зарубежных, так и в отечественных источниках, в которых, однако, редко встречается применение ранее разработанных методик на реально-условных месторождениях [26–29].

Теоретическое исследование решения проблемы

Главным богатством горного предприятия являются минеральные ресурсы, на которые у предприятия имеются соответствующие лицензии на разведку и/или добычу. Если горное предприятие не умеет правильно распоряжаться своими рудными запасами, то его деятельность может быть как просто менее эффективна, так и убыточна в случае чрезвычайного пренебрежения запасами.

Во избежание нерационального пользования ресурсами современные горнодобывающие компании используют программные комплексы, позволяющие наиболее точно определять месторасположение запасов, их геометрические размеры. Вместе с этими данными у проектировщиков появляется возможность использовать другие программные комплексы (или те же программы, но другие их внутренние пакеты) для создания выемочных блоков, то есть участки месторождения с относительно выдержанной мощностью рудного тела, технологически и экономически возможной к отработке, в случае золоторудных месторождений.

Вопрос технологической и экономической возможности отработки как раз таки является одним из ключевых в данном исследовании. С точки зрения технологии параметры выемочных блоков (а следовательно, и исходные данные для их оптимизации) изначально ограничиваются параметрами принятой системы разработки: высотой уступа, рабочим углом откоса. Дальнейшее практически-теоретическое углубление в эту тематику показывает, что высота уступа зависит от мощности рудного тела, дабы избежать сверхнормативных потерь и разубоживания, и от применяемого оборудования на выемочно-погрузочных работах. От экскаваторов, всецело преобладающем виде горного оборудования, используемого на выемочно-погрузочных работах, также частично зависит ширина деления выемочных блоков на ячейки и углы изменения направления простираения контакта выемочных блоков и подходов – участков вскрышных пород.

Полноценное изучение вопроса параметров выемочных блоков на карьере показывает, что наибольшее влияние на них (за вычетом формы рудного тела в пространстве) имеет принятая система ведения буровзрывных работ – сетка скважин. Чем меньше сетка скважин, тем более точно может быть произведена отбойка рудных запасов. В то же время уменьшение сетки скважин влечет за собой повышение себестоимости выемки, что отрицательно сказывается на экономике.

Оптимизация выемочных блоков по экономическим параметрам основывается сугубо на бортовом содержании полезного ископаемого, то есть программные комплексы производят расчеты, в которых они постепенно «наращивают» выемочный блок до момента, пока увеличение размеров не уменьшит бортовое содержание в дополнительно добываемых «ломтиках» (eng. – «slices») до значения меньше указанного.

Предположим, что суммарная себестоимость выемки и переработки одной тонны руды на обогатительной фабрике равна условным ста

долларам. Тогда в каждой тонне прирезаемого «ломтика» или одной большой ячейки (при условии наличия прослоек внутренней вскрыши и относительно высоком содержании полезного ископаемого по бокам от прослоек вскрыши) должно быть содержание полезного компонента также на сто долларов, чтобы эта выемка была безубыточна. При этом содержание полезного компонента должно быть не изначальное геологическое, а конечное, учитывающее извлечение после переработки, налоги (НДПИ) и т. п.

Только после учета всего вышеперечисленного могут быть созданы выемочные блоки, теоретически показывающие, сколько промышленных запасов имеется на месторождении.

Дальнейшая оптимизация границ карьера производится методом Лерча-Гроссмана, заключающимся в подсчете стоимости каждого из вынимаемых блоков, которая может быть как положительной, так и отрицательной [30–33]. При этом при расчетах также учитываются геомеханические рекомендации, позволяющие разделить карьер на домены, вписанные в блочную модель месторождения и отражающие изменчивые параметры бортов карьера: ширину предохранительных берм и угол откоса уступов в конечном положении [34–37].

Международный и отечественный опыт решения проблемы

История применения компьютерных технологий в горнодобывающей промышленности насчитывает более полувека. В 60–70-е годы прошлого века исследования были сосредоточены на моделировании месторождений, машинном представлении горно-геологической информации и создании математических моделей карьеров и подземных рудников. В этот период начали формироваться первые автоматизированные системы управления на горных предприятиях. К 1980-м годам выявились основные направления применения компьютерных технологий, включая геологическое моделирование, маркшейдерское обеспечение и проектирование, планирование горных работ. В СССР в 1980-е годы было реализовано несколько отраслевых программ по созданию систем автоматизированного проектирования для горнодобывающей отрасли. Однако, несмотря на значительные достижения, развитие этих систем столкнулось с рядом проблем, таких как отсутствие унификации программного обеспечения и недостаток технических средств на рабочих местах. С распадом СССР многие научные коллективы также распались, и прежние наработки были утрачены. Современные разработки в области горно-геологических информационных систем (ГИС) на постсоветском пространстве были

инициированы новыми коллективами в 1990-е годы [38].

Результатом работ в 1990-е годы уже российских ученых стали горно-геологические информационные системы MINEFRAME, GEOMIX, K-MINE, CAMAPA, которые, однако, занимали не более 5% рынка вплоть до 2022 года.

Зарубежные компании, в свою очередь, десятилетия выстраивали ГИС наподобие Datamine, Micromine, Mineframe, Minescape, Vulcan и т. д. Большинство ГИС формировались из маленьких программных комплексов, решавших какую-то одну определенную задачу. В дальнейшем более крупные компании выкупали меньшие и формировали свои полномасштабные продукты с некоторым разделением.

Так, к примеру, к Datamine относятся программные комплексы с приписками Studio OP (для открытых горных работ), Studio UG (для подземных горных работ), Studio RM (для геологических расчетов), NPV Scheduler (для оптимизации конечных контуров карьера, в том числе методом Лерча-Гроссмана).

Рассматриваемые в данном исследовании расчеты выполняются в ГИС, и их развитие создает пути решения задач, с которыми приходится сталкиваться горному инженеру.

На данный момент большинство зарубежных компаний покинуло российский рынок, открыв тем самым перспективы отечественным разработчикам. Теперь же им, российским компаниям, требуется в короткие сроки нагнать десятилетия программирования зарубежных продуктов, чтобы занять эту нишу и не потерять ее при возвращении конкурентов.

Характерный пример импортозамещения – программный комплекс NanoCAD, ставший заменой зарубежному AutoCAD. CAD-системы на горнодобывающих предприятиях используются с целью вывода для создания чертежей с данными, полученными в результате работы в ГИС-системах. На текущем этапе своего развития NanoCAD справляется с выполнением аналогичных задач, пусть и делает это хуже и неудобнее, поэтому многие российские компании стали постепенно переходить на этот программный продукт.

Пока у большинства российский горнодобывающих компаний присутствуют старые лицензии на ГИС, даже без возможности обновления, они с неохотой будут переходить на аналогичные российские продукты, если аналоги не будут выполнять так же качественно те же самые задачи. В случае, если российские аналоги станут идентичны, у них появится преимущество в виде обновлений программных комплексов под нужды предприятий.

Методы

Проблема исследования заключается в отсутствии общедоступных результатов работ по влиянию бортового содержания на конечный контур карьера с указанием конкретного экономического эффекта. Изучение учебников и научных статей создает общее понимание методов, используемых в современных программных комплексах, тогда как горному инженеру свойственно осознавать правильность как усвоенного материала, так и дальнейших собственных действий только при наличии референса.

Следовательно, выбор методики исследования должен основываться на нахождении средств расчета перспективности изменения бортового содержания с денежным выражением в итоге исследования.

В связи с условностью необходимости выполнения расчетов на программных комплексах и невозможностью как такового экспериментального подхода в решении проблематики исследования метод исследования теоретический: математическое моделирование.

Математическое моделирование наиболее целостно описывает зависимость границ карьера от бортового содержания, так как только математическое моделирование может полноценно рассчитать ранее описанные выемочные блоки.

Первый этап – определение бортовых содержаний полезного ископаемого.

Бортовое содержание рассчитывается для условия равенства всех затрат на выемку и обработку одной тонны руды (себестоимость) к прибыли с продажи извлеченного полезного компонента. Следовательно, значение прибыли получается из выручки за извлеченный полезный компонент за вычетом всех затрат на реализацию товарной продукции. Бортовое содержание рассчитывалось для золота с учетом его рыночной цены на начало (2 600 \$/унция), середину (3 100 \$/унция) и конец (4 000 \$/унция) 2025 года (Таблица 1).

Второй этап – расчет выемочных блоков в программном комплексе Datamine через внутренний оптимизатор выемочных блоков MSO (Mineable Shape Optimiser).

Исходными данными для оптимизатора MSO

являются:

- Блочная модель месторождения с обязательным наличием значений содержания полезного компонента. Также необходимо оставить плотность пород внутри блочной модели. Все остальные данные зачастую не несут какую-либо информацию для оптимизатора (за исключением базовых столбцов, описывающих местоположение и размеры ячеек блочной модели). Любую лишнюю информацию следует удалять из блочной модели с целью ускорения процесса расчета выемочных блоков, единственным исключением является столбец Slopes, в который следует поместить информацию по значению угла откоса борта карьера в зависимости от домена без учета транспортных берм;

- Геологические характеристики рудного тела: азимут простирания, угол падения;

- Параметры системы разработки, также включающие в себя параметры ячеек выемочных блоков: высота, максимальные и минимальные длина и ширина ячеек выемочных блоков;

- Выбор метода расчета выемочных блоков: в случае данного исследования выбирался метод Cut-Off Grade – по бортовому содержанию.

Третий этап – перекодирование исходной блочной модели.

Для этого этапа создается новая блочная модель по прототипу исходной с закодированным разделением на руду (попавшие внутрь выемочных блоков породы) и вскрышу (не попавшие в контур выемочных блоков породы). Затем новая и исходная модели объединяются в одну, создавая основу для оптимизации контуров карьера.

Четвертый этап – оптимизация контура карьера.

Оптимизация границ разработки производилась в программном комплексе NPV Scheduler. Этот комплекс служит как для долгосрочного планирования открытых горных работ с выделением конечного контура карьера, так и для календарного планирования с созданием пушбеков для каждого этапа разработки.

Исходные данные для четвертого этапа:

- Перекодированная блочная модель с

Таблица 1. Расчет бортовых содержаний полезного компонента в условных единицах стоимости
Table 1. Cut-off grade calculation in conventional unit

Наименование	Период		
	начало 2025 г.	середина 2025 г.	конец 2025 г.
Цена золота за вычетом НДС и т. п.	67.45	80.70	104.51
Затраты на транспорт руды	11.3	11.3	11.3
Затраты на переработку руды	18.9	18.9	18.9
Затраты на ОХР	5.6	5.6	5.6
Принятое БС по золоту	0.6	0.5	0.4

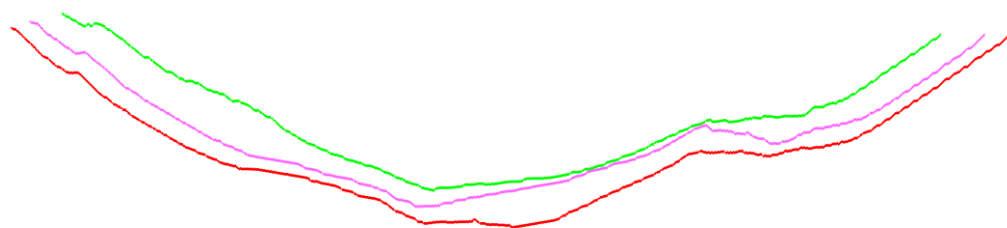


Рис. 1. Сравнение оптимизированных оболочек карьера на продольном разрезе
Fig. 1. Optimized pits comparison on longitudinal section

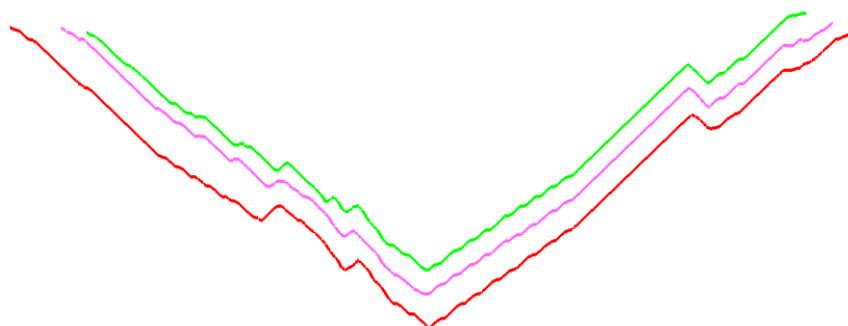


Рис. 2. Сравнение оптимизированных оболочек карьера на поперечном разрезе
Fig. 2. Optimized pits comparison on cross section

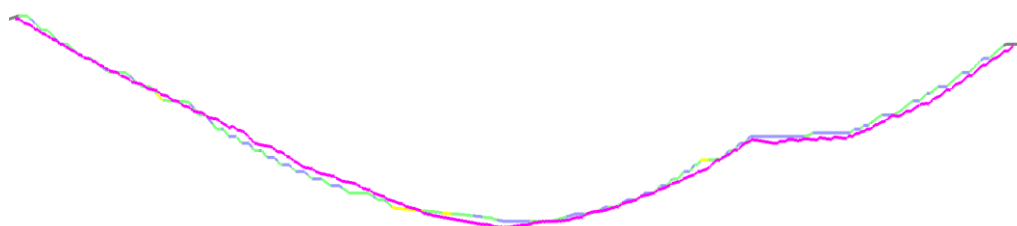


Рис. 3. Сравнение спроектированного карьера и оболочки (при БС, равном 0.6)
Fig. 3. Comparison of designed and optimized pits (when cut-off grade is 0.6)

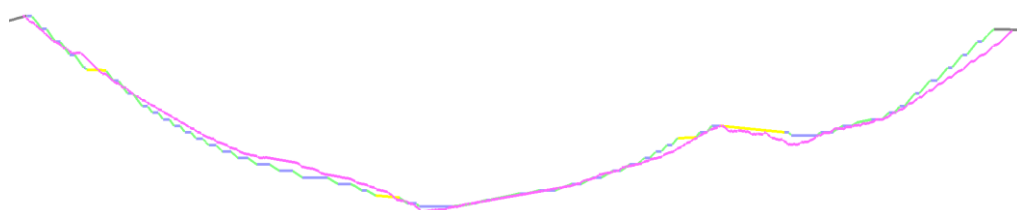


Рис. 4. Сравнение спроектированного карьера и оболочки (при БС, равном 0.5)
Fig. 4. Comparison of designed and optimized pits (when cut-off grade is 0.5)

разделением на руду и вскрышу.

- Геомеханическая характеристика пород – поле Slopes в блочной модели, описывающее параметры бортов.

- Макроэкономическая информация по разработке месторождения: себестоимость добычи руды, выемки вскрышных пород, переработки полезного ископаемого, сквозное извлечение полезного компонента и т. п.

Итогом четвертого этапа являются три оптимизированные (по критерию максимизации NPV) оболочки карьера, показанные на

продольном и поперечном разрезах на Рис. 1 и 2 (уменьшение значения бортового содержания сверху вниз от 0.6 до 0.4). Из Рис. 1 и 2 видно, что при уменьшении бортового содержания границы разработки изменяются в большую сторону.

Пятый этап – построение карьеров.

Построение карьеров следует производить с учетом ранее полученных оболочек. Результат построения карьера должен укладываться в 10% разности от оболочки по горной массе и полученному полезному компоненту. Только в

таком случае можно считать, что карьер построен корректно.

На Рис. 3–5 представлено сравнение построенных карьеров с оболочками по продольным профилям. В Таблице 2 сведены значения по отклонениям спроектированных карьеров от оболочек

Результаты исследования

Технология

В Таблице 3 указаны параметры проектных карьеров по вариантам бортовых содержаний

Сравнение трех карьеров по трем разным бортовым содержаниям показывает, что при изменении бортового содержания от 0.6 к 0.5 объем рудных запасов, попадающих в контур карьера, увеличился на три миллиона тонн, что составило двадцать три процента прироста.

При переходе от бортового содержания, равного 0.5, к значению 0.4 прирост запасов составил 3.3 миллиона тонн, что обеспечивает

увеличение объема руды на двадцать один процент.

Итого уменьшение бортового содержания на 0.1 в рамках рассматриваемого месторождения увеличивает промышленные запасы примерно на двадцать процентов. Следовательно, с точки зрения технологии и рационального пользования недрами оптимальные границы карьера обеспечиваются при бортовом содержании, равном 0.4.

Экономика

Определение оптимальных границ карьера производилось по критерию максимизации NPV (чистого дисконтированного дохода). Дисконтирование не может не быть применено в контексте горнодобывающего предприятия в связи со спецификой потока денежных средств: инвестиционные вложения в проект начинаются на этапе геологоразведочных работ, которые продолжаются, как правило, в течение

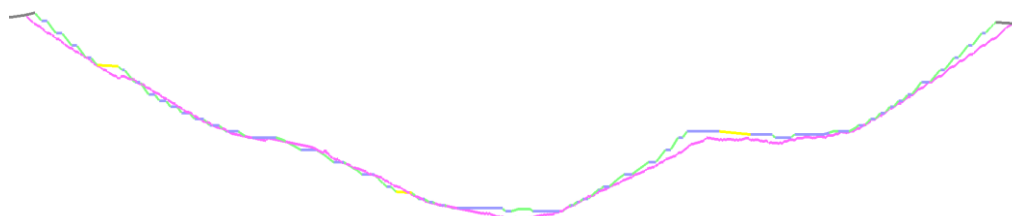


Рис. 5. Сравнение спроектированного карьера и оболочки (при БС, равном 0.4)

Fig. 5. Comparison of designed and optimized pits (when cut-off grade is 0.4)

Таблица 2. Сравнение отклонений объемов горной массы и полезного компонента в спроектированных карьерах относительно оптимизированных оболочек

Table 2. Comparison of rock mass and useful component volume in designed pits relative to optimized pits

Наименование	Отклонение при бортовом содержании, %		
	0.6	0.5	0.4
Горная масса	+5.16	+8.88	-0.37
Полезный компонент	-3.02	-2.13	-2.21

Таблица 3. Параметры проектирования карьеров

Table 3. Designed pits parameters

Показатель	Ед. изм.	Варианты карьеров по бортовому содержанию золота		
		0.6	0.5	0.4
Высота финального уступа:				
- в устойчивых породах	м	20	20	20
- в неустойчивых породах	м	10	10	10
Высота рабочего уступа				
- добычного уступа	м	5	5	5
- вскрышного уступа	м	10	10	10
Угол уступа:				
- нерабочего уступа	градус	40–60	40–60	40–60
- рабочего уступа	градус	40–70	40–70	40–70
Ширина бермы безопасности	м	6–9	6–9	6–9
Объем карьера (горная масса)	млн м ³	87.0	117.0	138.7
Тоннаж руды	млн т	12.8	15.8	19.1
Площадь карьера по поверхности	тыс. м ²	755	766	770
Максимальная глубина карьера	м	310	335	370

нескольких лет [39–41].

При оптимистичном варианте начала разработки нового золоторудного месторождения строительство обогатительной фабрики не требуется, что сокращает срок введения месторождения в эксплуатацию за счет уменьшения времени на строительство горнообогатительного комбината. Некоторые крупные российские золотодобывающие компании с этой целью выстраивают коммуникации между разными месторождениями, объединенными в один хаб [42, 43].

Контекст горнодобывающего предприятия подразумевает наличие только одного товара для реализации полезного ископаемого [44, 45]. Безусловно, рудная залежь может содержать в себе один или несколько попутных компонентов, которые также будет рентабельно извлекать из горных пород [46, 47]. В рамках исследования в качестве полезного компонента выступает только один полезный компонент – золото.

Расчет экономической выгоды предлагаемых решений, т. е. исчисление NPV, следует производить с учетом действующего законодательства государства, внутри которого располагается месторождение, себестоимости выпуска товарной продукции и дисконтирующего фактора [48, 49]. Процент дисконтирования для данного исследования принимался равным двенадцати в связи с проведением расчетов в иностранной валюте, которая, правда, в последнее время также показывает некоторую увеличенную волатильность, связанную с геополитическими процессами [50, 51].

Российское законодательство на момент 2025 г. облагает юридические лица налогом на прибыль в размере двадцати пяти процентов. Налогооблагаемая прибыль в рамках горнодобывающего производства равна выручке за вычетом затрат на производство продукции (раннее указанная себестоимость добычи), амортизации и налогов, в т. ч. НДС.

В Российской Федерации налог на добычу полезного ископаемого (НДПИ) для золота с

2025 года привязан к мировой цене. Нельзя не заметить, насколько своевременным для российского бюджета стало введение «плавающей» налоговой ставки. Учитывая изменение стоимости золота на мировом рынке почти в полтора раза за 2025 год, ставка НДС для золота увеличилась от базового значения на 5.3%, то есть резкий скачок стоимости золота не только увеличивает выгодность разработки золоторудных месторождений, но и повышает доходы государственного бюджета «прогрессивно».

Результаты расчета NPV по вариантам бортового содержания приведены в Таблице 4.

Экономическая оценка оптимальных границ карьера также показывает, что оптимальным по критерию максимизации NPV является наименьшее бортовое содержание. NPV для бортового содержания 0.4 на семьдесят процентов выше, чем при бортовом содержании, равном 0.5, и в два с половиной раза больше, чем при бортовом содержании полезного компонента, равном 0.6.

Выводы

Мировой рынок драгоценных металлов в последние годы претерпевает значительные изменения вслед за чередой нововведений в геополитической сфере. Гигантские корпорации, ранее размещавшие свое производство в азиатских странах, вынуждены переносить предприятия в наиболее развитые государства с гораздо большими налогами и стоимостью рабочей силы. Азиатские государства, значительно развившись за последние десятилетия, начинают иметь вес в мировой политике.

Все эти мировые межгосударственные процессы заставляют инвесторов пересматривать приоритеты своих инвестиционных политик и начинают придавать большое значение драгоценным металлам, да и сами государства вынуждены больше доверять золотым резервам, чем инвестициям.

Постоянный мониторинг мирового спроса на золото и оперативное изменение технологических параметров разработки

Таблица 4. Кумулятивные значения экономических показателей разработки по вариантам бортовых содержаний

Table 4. Cumulative value of economic performance of deposit development for each of cut-off grade

Показатель	Варианты карьеров по борт. содержанию золота		
	0.6	0.5	0.4
Выручка от продажи золота за вычетом НДС, аффинажа и т. п.	1313594	1846574	2730217
Операционные затраты	908333	1168467	1398939
Прибыль для целей налогообложения	405261	678107	1331278
Налог на прибыль	101322	169531	332815
Чистая прибыль	303939	508576	998463
Срок окупаемости	14	17	20
NPV	168510	245164	416608

месторождений позволит горнодобывающим предприятиям максимизировать свою прибыль.

Данное исследование было посвящено изучению вопроса влияния бортового содержания на границы разработки и дополнительного эффекта от увеличения границ – повышения рентабельности разработки месторождений.

В ходе исследования были рассчитаны бортовые содержания, оптимизированы границы разработки по методу Лерча-Гроссмана, спроектированы и обоснованы технологически и экономически карьеры по разному бортовому содержанию.

Итог исследования: изменение бортового содержания на 0.1 при разработке золоторудного месторождения может приводить к росту NPV на 70% с продлением срока службы предприятия на два-три года.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Singh N. Cut-off Grade-A Concept // International Journal For Multidisciplinary Research. 2025. Vol 7. DOI: 10.36948/ijfmr.2025.v07i05.56528.
2. Balci Mehmet, Kumral Mustafa. Impacts of Grade Distribution and Economies of Scale on Cut-off Grade and Capacity Planning // Mining, Metallurgy & Exploration. 2024. Vol. 41. DOI: 10.1007/s42461-024-00982-8.
3. Roos Chris. Visualizing and Quantifying Uncertainty in Cut-off Grade Selection // Mining, Metallurgy & Exploration. 2024. Vol. 41. DOI: 10.1007/s42461-024-01147-3.
4. Birch Clinton, Cawood Frederick. Optimizing the cut-off grade for tabular gold deposits, considering the South African gold tax and mineral resource royalty regime // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2024. Vol. 124. Pp. 387–396. DOI: 10.17159/2411-9717/3195/2024.
5. Стагурова О. В., Капутин Ю. Е., Васильев С. А., Жидков С. Н., Катанский М. Ю. Оценка запасов и проектирование добычных работ с использованием системы Gemcom на месторождении золота в Восточной Сибири // Записки Горного института. 2005. Т. 162. С. 113.
6. Акбаров Т. Г., Уразов Ж. Д., Нишанов А. Ш., Нишанов Д. К. Опыт и перспективы разработки сложноструктурных жил Кочбулакского золоторудного месторождения // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2023. № 2. С. 97–110. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_2_0_97.
7. Федосеев В. В., Гаджиева Л. А. Опыт и результаты переоценки золоторудных месторождений Челябинской области для открытой разработки и выщелачивания путем понижения бортового содержания // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2020. № 1. С. 328–339. DOI: 10.46689/2218-5194-2020-1-1-328-339.
8. Федосеев В. В., Рябов Ю. И., Гаджиева Л. А. Переоценка золоторудных месторождений Челябинской области – основа развития минерально-сырьевой базы АО «ЮГК» // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2020. № 4. С. 547–560.
9. Золотова С. В., Глекова В. В., Ежова М. В. [и др.] Влияние международных и национальных институтов на динамику мировых цен на золото // Финансовые рынки и банки. 2024. № 10. С. 239–244.
10. Shafiee Shahriar, Topal E. An overview of global gold market and gold price forecasting // Resources Policy. 2010. Vol. 35. Pp. 178–189. DOI: 10.1016/j.resourpol.2010.05.004.
11. Pala Fahrettin, Görgün Mehmet, Torusdağ Mustafa, Demirtaş Furkan, Barut Abdulkadir. The impact of uncertainty in global gold and oil prices on stock market index returns: the case of the mist countries // Kafkas Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi. 2025. Vol. 16. Pp. 550–577. DOI: 10.36543/kauibfd.2025.021.
12. Kowalewski Paweł, Skopiec Dominik. Price processes in the global gold market // Bank i Kredyt. 2024. Vol. 55. Pp. 381–424. DOI: 10.5604/01.3001.0054.8498.
13. Solikhun Solikhun, Siregar Muhammad. Analyzing Perceptron Algorithm for Global Gold Price Prediction using Quantum Computing Approach // Kinetik: Game Technology, Information System, Computer Network, Computing, Electronics, and Control. 2025. DOI: 10.22219/kinetik.v10i1.2024.
14. Chen Luyu. Global Gold Price Forecast Based on VAR Model // Science and Technology of Engineering, Chemistry and Environmental Protection. 2025. Vol. 1. DOI: 10.61173/g5heyf97.
15. Rini Utari, Suparno Fanteri, Aminah Siti, Haeruddin Haeruddin. Global gold price volatility and its correlation to resource and reserve dynamics at PT Merdeka Copper Gold Tbk // Intan Jurnal Penelitian Tambang. 2025. Vol. 8. Pp. 64–69. DOI: 10.56139/intan.v8i2.346.
16. Birch Clinton. Optimization of cut-off grades considering grade uncertainty in narrow, tabular gold deposits. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2017. Vol. 117. Pp. 149–156. DOI: 10.17159/2411-9717/2017/v117n2a6.
17. Gu Xiaowei, Zhao Y.-Q, Qing Wang, Xu X.-C. Relationship Between Cut-off Grade and Ultimate Pit of Open Pit Mine. Dongbei Daxue Xuebao // Journal of Northeastern University. 2018. Vol. 39. Pp. 575–578. DOI: 10.12068/j.issn.1005-3026.2018.04.024.
18. Birch Clinton. Optimizing cut-off grade considering grade estimation uncertainty – A case study of Witwatersrand gold-producing areas // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2022. Vol. 122. Pp. 1–10. DOI: 10.17159/2411-9717/1403/2022.

19. Gu Q.-H., Chun-Ni B., Li F.-B., John A. The optimization and application of cut-off grades of multiple metal open-pit mines based on equivalent grade // *Metallurgical and Mining Industry*. 2014. Vol. 6. Pp. 83–91.
20. Говоров А. С., Фомин С. И. Оценка наиболее значимых факторов для реализации проекта открытой разработки рудных месторождений // *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2025. № 1. С. 29–38. DOI: 10.21440/0536-1028-2025-1-29-38.
21. Фомин С. И., Говоров А. С. Стратегия формирования рабочей зоны карьеров на основе управления бортовым содержанием полезных компонентов в руде // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2024. № 11. С. 165–179. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_11_0_165.
22. Фомин С. И., Говоров А. С. Обоснование выбора бортового содержания полезных компонентов в руде при проектировании карьеров // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2023. № 12. С. 169–182. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_12_0_169.
23. Фомин С. И., Говоров А. С. Обоснование сценарного подхода к определению границ карьеров с учетом стохастического характера исходных данных // *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2023. № 5. С. 70–78. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-5-70-78.
24. Jafar Nurliah, Wahid Hendra, Widodo Sri. Classification of Ni Levels for Determination Cut-Off Grade in Region X // *Journal of Geology and Exploration*. 2022. Vol. 1. Pp. 1–7. DOI: 10.58227/jge.v1i1.3.
25. Githiria J. Cut-off grade optimisation to maximise the net present value using whittle 4X // *International Journal of Mining and Mineral Engineering*. 2016. Vol. 7. Pp. 313–327. DOI: 10.1504/IJMMME.2016.10000784.
26. Rohmaningrum Denzi, Horman Juanita. CUT OFF GRADE NIKEL LATERIT PADA BLOK 1A PT. ANUGRAH SUKSES MINING // *INTAN Jurnal Penelitian Tambang*. 2022. Vol. 3. Pp. 20–25. DOI: 10.56139/intan.v3i1.46.
27. Немокаев А. А. Определение нижнего предела бортового содержания при повариантных расчетах с учетом технологических факторов // *Рациональное освоение недр*. 2021. № 2(58). С. 24–26. DOI: 10.26121/RON.2021.40.92.003.
28. Осипов В. Л. Определение рудных интервалов при подсчете запасов в программе Micromine // *Горные науки и технологии*. 2015. № 2. С. 23–31. DOI: 10.17073/2500-0632-2018-2-23-31.
29. Оганесян А. Г., Багдасарян А. Т., Мамян С. В., Кочарян Р. А. Разработка методики применения лимитов содержаний для подсчета запасов жил и жилых зон // *Вестник Национального политехнического университета Армении. Metallurgy, материаловедение, недропользование*. 2024. № 2. С. 80–89. DOI: 10.53297/18293395-2024.2-80.
30. Эпштейн И. В., Полуэктов А. И. Предложения по совершенствованию нормативных требований для ТЭО кондиций // *Недропользование XXI век*. 2022. № 2(94). С. 126–133.
31. Вяльцев А. С. Использование нелинейных методов оценки содержаний полезного компонента // *Горный журнал*. 2021. № 9. С. 46–52. DOI: 10.17580/gzh.2021.09.08.
32. Билин А. Л., Наговицын Г. О. Параметры участков открытых горных работ на месторождении Партомчорр (Мурманская область) при применении водоводных сооружений и новой конструкции борта карьера // *Устойчивое развитие горных территорий*. 2025. Т. 17. № 1(63). С. 464–472. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-1-464-472.
33. Ордин А. А., Васильев И. В. Оптимизация проектной мощности золоторудного карьера на основе лагового моделирования // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2021. № 2. С. 71–80. DOI: 10.15372/FTPRPI20210208.
34. Ордин А. А., Васильев И. В. Лаговая модель для обоснования оптимальной проектной мощности золоторудного карьера «Брекчия» // *Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов*. 2021. № 7. С. 50–55.
35. Бабанури Н., Дехани Х., Ходевеси М. Алгоритм поиска пути оптимизации предельной границы карьера с учетом геомеханических условий // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2022. № 1. С. 50–58. DOI: 10.15372/FTPRPI20220106.
36. Арно В. В., Колесниченко Е. П., Гарифулина И. Ю. [и др.] Обоснование предельных границ карьера месторождения «Павлик» // *Горная промышленность*. 2024. № 6. С. 120–124. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-6-120-124.
37. Арно В. В., Миккельсен А. Е. Алгоритм Лерча-Гроссмана в решении задач горного дела // *Вестник Северо-Восточного государственного университета*. 2024. № 42. С. 87–90.
38. Наговицын О. В., Лукичев С. В. История развития отечественных горно-геологических информационных систем // *Горная промышленность*. 2024. № 5. С. 46–51. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-5-46-51.
39. Солдатова А. О., Столяров А. И. Венчурные инвестиции в «юниорные» компании горнодобывающей отрасли // *Банковские услуги*. 2025. № 2. С. 22–34. DOI: 10.36992/2075-1915_2025_2_22.
40. Дьяконова С. Н., Сысоева Д. В., Осипов А. А. Изучение и анализ факторов риска при инвестировании в медь // *ФЭС: Финансы. Экономика. Стратегия*. 2024. Т. 21. № 2. С. 39–44.

41. Растяникова Е. В. Транснациональные корпорации в мировом горнодобывающем комплексе в условиях перехода от глобализации к фрагментации // Восточная аналитика. 2024. Т. 15. № 1. С. 89–102. DOI: 10.31696/2227-5568-2024-01-089-102.
42. Zaitsev A. Y. Implementation of project and process management in mining enterprises // *Technoeconomics*. 2022. Vol. 1. № 2(2). Pp. 12–20. DOI: 10.57809/2022.2.2.2.
43. Кузьменко Г. Н. Состояние и перспективы развития горнодобывающей отрасли в Магаданской области на примере активов компании «Полиметалл» // Золото и технологии. 2017. № 3(37). С. 52–55.
44. Митрофанов Н. М. Рынки важнейших полезных ископаемых Центральной Азии. Мировой рынок золота и нефти // Молодой ученый. 2022. № 49(444). С. 141–146.
45. Силима П. П., Назарова Ю. А. Влияние горнодобывающей промышленности на экономический рост в регионе Южно-Африканских стран // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2023. Т. 24. № 1. С. 57–75. DOI: 10.22363/2312-8143-2023-24-1-57-75.
46. Ito Yusa, Watanabe Yasushi, Aoki Shogo, Echigo Takuya, Kon Yoshiaki, Mimura Takumi. Gold Mineralization Triggered by Contact Metamorphism at Mano Deposit in the South Kitakami Belt, Japan // *Resource Geology*. 2025. DOI: 75.10.1111/rge.70016.
47. Deberdt Raphael, Park Hyeyoon. Securing critical minerals supplies in the context of a mineral-poor country: reviewing South Korea's domestic and international engagement // *Mineral Economics*. 2025. DOI: 10.1007/s13563-025-00563-1.
48. Wu Wei, Ren Zhuojun, Liu Wei, Zhu Yujia, Deng Juqiong. Visualized dynamic analysis of digital deposit model in mine economic evaluation // *Advances in Engineering Innovation*. 2025. Vol. 16. DOI: 10.54254/2977-3903/2025.20941.
49. Mohammed Cherai, Rddad Larbi, Azougay Abdellah, Khafouri Azzeddine, Adardor Said, Talbi Fouad. Optimized Open-Pit Design, Waste Management, and Equipment Selection for the Jbel Tirremi Fluorite Deposit, Morocco // *Earth Systems and Environment*. 2025. DOI: 10.1007/s41748-025-00718-8.
50. Aiki Taiwo, Banjo Oluwatobi, Okoh Victor, Olafimihan Tunde. The End of Dollar-Only Power? Euro, Yuan and Digital Money in a Multipolar World // *Saudi Journal of Economics and Finance*. 2025. Vol. 9. Pp. 428–456. DOI: 10.36348/sjef.2025.v09i1.002.
51. Bhatt Vishwa, Mistry Dharmendra. Pivoting from the Dollar: India's Role in the BRICS Strategy for Financial Sovereignty and Local Currency Settlement // *International Journal of Innovations & Research Analysis*. 2025. Vol. 5. Pp. 41–48. DOI: 10.62823/IJIRA/5.3(II).7951.

© 2026 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Логинов Егор Вячеславович, доцент кафедры РМОС, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II (199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д.2), кандидат технических наук, ORCID: 0000-0003-3965-0839, e-mail: Loginov_EV@pers.spmi.ru

Масальский Сергей Сергеевич, студент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II (199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д.2), e-mail: 433ckacl750@gmail.com

Заявленный вклад авторов:

Логинов Егор Вячеславович – постановка исследовательской задачи, концептуализация исследования.

Масальский Сергей Сергеевич – обзор соответствующей литературы, сбор и анализ данных, проведение расчетов, выводы, написание текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

TECHNICAL AND ECONOMIC RESEARCH ON CUT-OFF GRADE INFLUENCE ON OPEN-PIT BOUNDARY

Egor V. Loginov*, Sergey S. Masalskiy

Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University

* for correspondence: Loginov_EV@pers.spmi.ru



Article info

Received:

10 January 2026

Accepted for publication:

15 June 2026

Accepted:

01 July 2026

Keywords: open-pit mining, quarry, gold, on-board maintenance, volatility, quarry boundaries, excavation block

Abstract.

When developing ore mineral deposits, a special role plays cut-off grade which influences boundaries and parameters of minable shapes. During a period of the mineral deposit development the cut-off grade can be changed due to the mineral's price on global market and the cost of its production. Recently, the gold price has been gradually increasing what has a direct impact on the gold deposits cut-off grade value. At the same time, scientific literature of last years on this topic has been limited and only a few studies have considered comprehensive models of gold deposits. As part of the scientific research, mathematical modeling methods were used to create block models of the deposit for the further block models implication as initial data for technical and economic calculations. Mining geological and informational systems (MGIS) were used for work with block models. Economic calculations were made with the use of up-to-date programs. The aim of the current research is justification of optimal final pit boundary based on net present value for different gold cut-off grade, for this the calculations for the beginning, middle and end of 2025 year were made. During the study optimization of minable shapes was also held, the change of ore volume was calculated, investment projects were studied. As a result of the study, data was obtained that characterizes the potential increase in both the probable reserves of gold deposits and the profitability of developing similar deposits. The research results can be further used when it is necessary to make additional investments in the development of gold ore open pits in conditions of high market volatility.

For citation: Loginov E.V., Masalskiy S.S. Technical and economic research on cut-off grade influence on open-pit boundary. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2026; 3(175):154-166. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2026-3-154-166, EDN: PTNCRJ

REFERENCES

1. Singh N. Cut-off Grade-A Concept. *International Journal For Multidisciplinary Research*. 2025; 7. DOI: 10.36948/ijfmr.2025.v07i05.56528.
2. Balci Mehmet, Kumral Mustafa. Impacts of Grade Distribution and Economies of Scale on Cut-off Grade and Capacity Planning. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2024; 41. DOI: 10.1007/s42461-024-00982-8.
3. Roos Chris. Visualizing and Quantifying Uncertainty in Cut-off Grade Selection. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2024; 41. DOI: 10.1007/s42461-024-01147-3.
4. Birch, Clinton, Cawood Frederick. Optimizing the cut-off grade for tabular gold deposits, considering the South African gold tax and mineral resource royalty regime. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2024; 124:387–396. DOI: 10.17159/2411-9717/3195/2024.
5. Stagurova O.V., Kaputin Y.E., Vasilev S.A., Zhidkov S.N., Katanskii M.Y. Reserve assessment and mine design using the Gemcom system at a gold deposit in Eastern Siberia. *Journal of Mining Institute*. 2005; 162:113.
6. Akbarov T.G., Urazov J.D., Nishanov A.Sh., Nishanov D.K. Mining of structurally complex lodes at Kochbulak fold deposit: Experience and prospects. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(2):97–110. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_2_0_97.
7. Fedoseev V.V., Gadzhieva L.A. Experience and results of re-evaluation of gold deposits of the chelyabinsk region for open development and leaching by reducing onboard content. *Izvestiya Tluskogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*. 2020; 1:328–339. DOI: 10.46689/2218-5194-2020-1-1-328-339.
8. Fedoseev V.V., Ryabov Yu.I., Gadzhieva L.A. Experience of Revaluation of Gold Ore Deposits of the Chelyabinsk Region: Improvement of Parameters of Open Pit Mining. *Izvestiya Tluskogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*. 2020; 4:547–560.
9. Zolotova S.V., Glekova V.V., Ezhova M.V., Lityagina E.A., Beliaev A.A. The influence of international and national institutions on the dynamics of world gold prices. *Finansovye rynki i banki*. 2024; 10:239–244.
10. Shafiee Shahriar, Topal E. An overview of global gold market and gold price forecasting. *Resources Policy*. 2010; 35:178–189. DOI: 10.1016/j.resourpol.2010.05.004.
11. Pala Fahrettin, Görgün Mehmet, Torusdağ Mustafa, Demirtaş Furkan, Barut Abdulkadir. The impact of uncertainty in global gold and oil prices on stock market index returns: the case of the mist countries. *Kafkas Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler*

Fakültesi Dergisi. 2025; 16:550–577. DOI: 10.36543/kauibfd.2025.021.

12. Kowalewski Paweł, Skopiec Dominik. Price processes in the global gold market. *Bank i Kredyt.* 2024; 55:381–424. DOI: 10.5604/01.3001.0054.8498.

13. Solikhun Solikhun, Siregar Muhammad. Analyzing Perceptron Algorithm for Global Gold Price Prediction using Quantum Computing Approach. *Kinetik: Game Technology, Information System, Computer Network, Computing, Electronics, and Control.* 2025. DOI: 10.22219/kinetik.v10i1.2024.

14. Chen Luyu. Global Gold Price Forecast Based on VAR Model. *Science and Technology of Engineering, Chemistry and Environmental Protection.* 2025; 1. DOI: 10.61173/g5heyf97.

15. Rini Utari, Suparno Fanteri, Aminah Siti, Haeruddin Haeruddin. Global gold price volatility and its correlation to resource and reserve dynamics at PT Merdeka Copper Gold Tbk. *Intan Jurnal Penelitian Tambang.* 2025; 8:64–69. DOI: 10.56139/intan.v8i2.346.

16. Birch Clinton. Optimization of cut-off grades considering grade uncertainty in narrow, tabular gold deposits. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy.* 2017; 117:149–156. DOI: 10.17159/2411-9717/2017/v117n2a6.

17. Gu Xiaowei, Zhao Y.-Q, Qing Wang, Xu X.-C. Relationship Between Cut-off Grade and Ultimate Pit of Open Pit Mine. Dongbei Daxue Xuebao. *Journal of Northeastern University.* 2018; 39:575–578. DOI: 10.12068/j.issn.1005-3026.2018.04.024.

18. Birch Clinton. Optimizing cut-off grade considering grade estimation uncertainty – A case study of Witwatersrand gold-producing areas. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy.* 2022; 122:1–10. DOI: 10.17159/2411-9717/1403/2022.

19. Gu Q.-H, Chun-Ni B., Li F.-B., John, A. The optimization and application of cut-off grades of multiple metal open-pit mines based on equivalent grade. *Metallurgical and Mining Industry.* 2014; 6:83–91.

20. Govorov A.S., Fomin S.I. Assessing the most significant factors for open-pit mining project implementation. *Minerals and Mining Engineering.* 2025; 1:29–38. DOI: 10.21440/0536-1028-2025-1-29-38.

21. Fomin S.I., Govorov A.S. Strategy of formation of operating space in open pit mines based on cut-off grade control. *MLAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024; 11:165–179. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_11_0_165.

22. Fomin S.I., Govorov A.S. Validation of the chosen cutoff grade value in open pit mine design. *MLAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023; 12:169–182. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_12_0_169.

23. Fomin S.I., Govorov A.S. Justifying the scenario approach to pit limits determination taking into account the stochastic nature of the input data. *Minerals and Mining Engineering.* 2023; 5:70–78. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-5-70-78.

24. Jafar Nurliah, Wahid Hendra, Widodo Sri. Classification of Ni Levels for Determination Cut-Off Grade in Region X. *Journal of Geology and Exploration.* 2022; 1:1–7. DOI: 10.58227/jge.v1i1.3.

25. Githiria J. Cut-off grade optimisation to maximise the net present value using whittle 4X. *International Journal of Mining and Mineral Engineering.* 2016; 7:313–327. DOI: 10.1504/IJME.2016.10000784.

26. Rohmaningrum Denzi, Horman Juanita. CUT OFF GRADE NIKEL LATERIT PADA BLOK 1A PT. ANUGRAH SUKSES MINING. *INTAN Jurnal Penelitian Tambang.* 2022; 3:20–25. DOI: 10.56139/intan.v3i1.46.

27. Nemokaev A.A. Determination of the lower limit of the cut-of-grade in case of comparative analysis taking into account technological factors. *Ratsionalnoe osvoenie nedr.* 2021; 2(58):24–26. DOI: 10.26121/RON.2021.40.92.003.

28. Osipov V.L. Opredelenie rudnykh intervalov pri podschete zapasov v programme Micromine. *Mining science and Technology.* 2015; 2:23–31. DOI: 10.17073/2500-0632-2018-2-23-31.

29. Hovhannisyan A.H., Baghdasaryan A.T., Mamyan S.V., Kocharyan R.A. Development of a method for applying content limits to calculate the reserves of vein and vein zones. *Proceedings of NPUA. Metallurgy, Material Science, Mining Engineering.* 2024; 2:80–89. DOI: 10.53297/18293395-2024.2-80.

30. Epshtein I.V., Polyektov A.I. Proposals for statutory requirements improvement for mining feasibility study. *Nedropolzovanie XXI vek.* 2022; 2(94):126–133.

31. Vyaltsev A.S. Application of nonlinear methods in evaluation of mineral grades. *Gornyi Zhurnal.* 2021; 9:46–52. DOI: 10.17580/gzh.2021.09.08.

32. Bilin A.L., Nagovitsyn G.O. Parameters of open-pit mining areas at the partomchorr deposit (Murmansk region) when applying waterworks for flood flows and a new pit wall design. *Sustainable Development of Mountain Territories.* 2025; 17(1(63)):464–472. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-1-464-472.

33. Ordin A.A., Vasil'ev I.V. Optimization of Open Pit Gold Mine Design Capacity Using Lag Modeling Approach. *Journal of Mining Science.* 2021; 57(2):240–248. DOI: 10.1134/S1062739121020083.

34. Ordin A.A., Vasil'ev I.V. Lagovaya model' dlya obosnovaniya optimal'noy proektnoy moshhnosti zolotorudnogo kar'era "Brekchiya". *Naukoemkie tehnologii razrabotki i ispol'zovaniâ mineral'nykh resursov.* 2021; 7:50–55.

35. Babanouri N., Dehghani H., Khodaveisi M. A Path Search Algorithm for Optimizing Ultimate Limit of Open Pit Mines with Geomechanical Constraints. *Journal of Mining Science.* 2022; 58(1):44–51. DOI: 10.15372/FTPRPI20220106.

36. 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. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-6-120-124.

37. Arno V.V., Mikkelsen E.A. The lerchs-grossmann algorithm in solving mining problems. *Vestnik of North-Eastern Federal University*. 2024; 42:87–90.

38. Nagovitsyn O.V., Lukichev S.V. History of development of the Russian mining and geological information systems. *Russian Mining Industry*. 2024; 5:46–51. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-5-46-51.

39. Soldatova A.O., Stolyarov A.I. Venture capital investments in junior mining companies. *Banking services*. 2025; 2:22–34. DOI: 10.36992/2075-1915_2025_2_22.

40. Dyakonova S.N., Sysoeva D.V., Osipov A.A. Study and analysis of risk factors when investing in copper *Fes: finance. economy. strategy*. 2024; 21(2)39–44.

41. Rastyannikova E.V. Transnational corporations in the global mining complex in the transition from globalization to fragmentation. *Eastern Analytics*. 2024; 15(1):89–102. DOI: 10.31696/2227-5568-2024-01-089-102.

42. Zaitsev A.Y. Implementation of project and process management in mining enterprises. *Technoeconomics*. 2022; 1(2(2)):12–20. DOI: 10.57809/2022.2.2.2.

43. Kuzmenko G.N. Sostoyanie i perspektivy razvitiya gomodobyvayushhej otrasli v magadanskoj oblasti na primere aktivov kompanii "Polimetall". *Gold and Technologies*. 2017; 3(37):52–55.

44. Mitrofanov N.M. Markets of the most important minerals of central asia. Global gold and oil markets. *Young scientist*. 2022; 49(444):141–146.

45. Silima P.P., Nazarova Yu.A. The impact of the mining industry on economic growth in the countries of

the Southern African region. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2023; 24(1):57–75. DOI: 10.22363/2312-8143-2023-24-1-57-75.

46. Ito Yusa, Watanabe Yasushi, Aoki Shogo, Echigo Takuya, Kon Yoshiaki, Mimura Takumi. Gold Mineralization Triggered by Contact Metamorphism at Mano Deposit in the South Kitakami Belt, Japan. *Resource Geology*. 2025. DOI: 75.10.1111/rge.70016.

47. Deberdt Raphael, Park Hyeyoon. Securing critical minerals supplies in the context of a mineral-poor country: reviewing South Korea's domestic and international engagement. *Mineral Economics*. 2025. DOI: 10.1007/s13563-025-00563-1.

48. Wu Wei, Ren Zhuojun, Liu Wei, Zhu Yujia, Deng Juqiong. Visualized dynamic analysis of digital deposit model in mine economic evaluation. *Advances in Engineering Innovation*. 2025; 16. DOI: 10.54254/2977-3903/2025.20941.

49. Mohammed Cherai, Rddad Larbi, Azougay Abdellah, Khafouri Azzeddine, Adardor Said, Talbi Fouad. Optimized Open-Pit Design, Waste Management, and Equipment Selection for the Jbel Tirremi Fluorite Deposit, Morocco. *Earth Systems and Environment*. 2025. DOI: 10.1007/s41748-025-00718-8.

50. Aiki Taiwo, Banjo Oluwatobi, Okoh Victor, Olafimihan Tunde. The End of Dollar-Only Power? Euro, Yuan and Digital Money in a Multipolar World. *Saudi Journal of Economics and Finance*. 2025; 9:428–456. DOI: 10.36348/sjef.2025.v09i11.002.

51. Bhatt Vishwa, Mistry Dharmendra. Pivoting from the Dollar: India's Role in the BRICS Strategy for Financial Sovereignty and Local Currency Settlement. *International Journal of Innovations & Research Analysis*. 2025; 5:41–48. DOI: 10.62823/IJIRA/5.3(II).7951.

© 2026 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Egor V. Loginov, Associate Professor at Department of Open Pit Mining, Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University (199106, Russia, Saint-Petersburg, 21st Line, 21) Candidate of Engineering Sciences, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3965-0839>, e-mail: Loginov_EV@pers.spmi.ru

Sergey S. Masalskiy, Student, Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University (199106, Russia, Saint-Petersburg, 21st Line, 21), e-mail: 433ckacl750@gmail.com

Contribution of the authors:

Egor V. Loginov – research problem statement, conceptualisation of research.

Sergey S. Masalskiy – reviewing the relevant literature, data collection, data analysis, calculations, drawing the conclusions, writing the text.

All authors have read and approved the final manuscript.

