INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Otajonov Bahrom Otaboevich	— Senior lecturer of the department of Mining Electromechanics; Tashkent State Technical University, 100095, Tashkent, University Str., 2, Uzbekistan. E-mail: bahrom9097@yandex.com ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-8871-7724
Rakhimov Abduvalixodja Vahobovich	— Senior lecturer of the department of Mining Electromechanics; Tashkent State Technical University, 100095, Tashkent, University Str., 2, Uzbekistan.
Yunusov Jasurbek Farxod ugli	— Senior lecturer of the department of Mining Electromechanics; Tashkent State Technical University, 100095, Tashkent, University Str., 2, Uzbekistan E-mail: jasurbekyunusov@tdtu.uz ORCID ID: https://orcid.org/0009-0002-5126-0059
Norimonov Shamsiddin Nuraddinovich	— Assistant of the department of Mining Electromechanics; Tashkent State Technical University, 100095, Tashkent, University Str., 2, Uzbekistan E-mail: shamsiddintmjgorniy@gmail.com ORCID ID: https://orcid.org/0009-0001-7785-3082

НЕАДДИТИВНОСТЬ РЕЗЕРВОВ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ В ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЦЕПИ: ПРАВИЛО УЗКОГО МЕСТА ПРИ ОЦЕНКЕ РЕЗЕРВОВ КАРЬЕРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Махмудов Ш.А.

Навоийский государственный горно-технологический университет, Навои, Узбекистан

Doi: 10.5281/zenodo.23663300

АННОТАЦИЯ Рассматривается методическая ошибка, распространённая при обосновании программ повышения эффективности использования горного оборудования: суммирование резервов, рассчитанных раздельно по звеньям последовательной технологической цепи. На материале пофамильных эксплуатационных данных 73 единиц выемочного и бурового оборудования золотодобычного рудника за 2024 г. и производственных показателей за 2021 г. показано, что такое суммирование завышает оценку достижимого прироста в 2,2 раза: формальная сумма резервов по шести направлениям воздействия составляет 40,21 млн м³ эквивалента, тогда как реализуемый прирост равен 18,30 млн м³ — резерву выемочно-погрузочного звена, оказавшегося ограничивающим. Для приведения резервов разнородных звеньев к единой шкале обоснован коэффициент выхода взорванной горной массы — 34,2 м³ на 1 погонный метр скважины. Установлено, что ранжирование направлений воздействия по фонду времени и по натуральному результату не совпадает, поскольку производительность часа работы машин различных типов несопоставима. Выявлен парадокс планирования: направление, занимающее первое место в обоих ранжированиях и обладающее наивысшей реализуемостью, при изолированном внедрении даёт нулевой прирост выемки — весь эффект накапливается в запасе взорванной горной массы, увеличивая его с 70 до 167 суток потребления. Показано, что это обстоятельство не является основанием откладывать соответствующие мероприятия, поскольку прирост технологического буфера сам по себе снижает риск роста технологической компоненты потерь. Сформулированы условия, при которых суммирование резервов правомерно.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА Резервы производительности; последовательная технологическая цепь; узкое место; аддитивность; горно-транспортный комплекс; технологический буфер; открытые горные работы.

Введение

Обоснование программ повышения эффективности использования горного оборудования обычно строится по следующей схеме: потери фонда времени раскладываются по причинам, для каждой причины оценивается устранимая часть, полученные величины переводятся в единицы продукции и суммируются. Итоговая сумма предъявляется как достижимый прирост производства и служит основанием для распределения ресурсов между мероприятиями.

Настоящая работа показывает, что последний шаг этой схемы содержит систематическую ошибку, а её величина на реальном объекте оказывается кратной.

Источник ошибки состоит в том, что карьерный горно-транспортный комплекс представляет собой последовательную технологическую цепь: подготовка горной массы к выемке (бурение и взрывание), выемка и погрузка, транспортирование, разгрузка. Резервы, рассчитанные для разных звеньев этой цепи, измеряются в разных сущностях. Резерв бурового звена выражается в горной массе, подготовленной к выемке; резерв выемочно-погрузочного звена — в массе вынутой. Дополнительно подготовленная масса становится продукцией только при наличии свободной выемочной и транспортной мощности; в противном случае она накапливается в запасе.

Отсюда следует, что резервы последовательных звеньев не складываются, а реализуемый прирост определяется наименьшим из них. Это положение согласуется с общим принципом теории ограничений [1, 2], однако в практике обоснования мероприятий на горных предприятиях систематически не учитывается — по-видимому, потому, что расчёт резервов ведётся в разрезе причин потерь, а не в разрезе звеньев цепи, и принадлежность причины к тому или иному звену при суммировании теряется.

Практические последствия ошибки серьёзны. Завышенная оценка прироста ведёт к завышенным плановым заданиям, к неверному распределению ресурсов между мероприятиями и — при последующем недостижении заявленного эффекта — к дискредитации самой методики оценки резервов.

Цель работы — количественно оценить величину ошибки суммирования резервов последовательных звеньев на материале действующего карьера, установить условия правомерности суммирования и сформулировать правило корректного определения реализуемого прироста.

Дополнительно решаются две сопутствующие задачи: обоснование коэффициента приведения резервов разнородных звеньев к единой натуральной шкале и проверка совпадения ранжирований направлений воздействия по фонду времени и по натуральному результату.

Обзор литературы

Ограничения и пропускная способность производственных систем

Положение о том, что производительность последовательной системы определяется её наиболее ограничивающим элементом, сформулировано в общем виде в теории ограничений [1, 2]. Практическое следствие этого положения — приоритет воздействия на ограничивающее звено и бесполезность наращивания мощности прочих звеньев — стало основой ряда управленческих методик.

Применительно к производственным системам с несколькими последовательными переделами разработаны показатели, учитывающие взаимозависимость звеньев. Показатель общей пропускной эффективности (Overall Throughput Effectiveness) предложен как расширение показателя общей эффективности оборудования на уровень производственной линии; он позволяет выявлять узкое место и оценивать вклад отдельного оборудования в результат системы [3]. Существенно, что эти разработки выполнены применительно к дискретному производству с явно определёнными межоперационными запасами.

В горной отрасли аналогичная постановка развита слабее. Показатель общей эффективности оборудования применяется, как правило, к отдельной машине или к однородной группе машин [4, 5], а вопрос о корректном объединении оценок по разнородным звеньям в явном виде не ставится.

Согласование звеньев горно-транспортного комплекса

Наиболее разработанным направлением согласования звеньев в горной отрасли является анализ соответствия выемочного и транспортного звеньев. Фактор соответствия (match factor) в расширенной формулировке C. N. Burt и L. Caccetta [6] позволяет оценить сбалансированность разнородных парков погрузочных машин и автосамосвалов. Обзор методов выбора оборудования [7] систематизирует подходы к обоснованию состава парка и отмечает, что значение фактора соответствия, равное единице, не является безусловно оптимальным.

Работы по имитационному моделированию транспортных потоков [8, 9] и по применению методов машинного обучения к оптимизации работы автотранспорта [10] развивают тот же круг задач. Общая черта этих работ — сосредоточенность на паре «погрузка — транспорт»; связь с буровзрывным звеном, находящимся выше по цепи, обычно выносится за рамки модели в виде предположения о

неограниченности запаса подготовленной горной массы.

Это предположение и составляет предмет настоящей работы: оно правомерно, пока запас достаточен, но именно оно делает некорректным суммирование резервов бурового и выемочного звеньев.

Оценка резервов в горной отрасли

Прикладные исследования эффективности использования горного оборудования дают фактические значения интегральных показателей существенно ниже нормативных ориентиров: 25 % для экскаваторов и 38 % для автосамосвалов по данным вероятностной модели [4], со сходными выводами в [5]. Метод OMEE [11] рассматривает эффективность как совместный результат управленческих процессов, оперативного контроля и условий эксплуатации.

Общим для этих работ является то, что оценка выполняется для одного типа оборудования либо агрегируется без явного указания правила объединения. Вопрос о том, как соотносятся резервы, полученные для разных звеньев цепи, и допустимо ли их складывать, в рассмотренной литературе прямо не обсуждается.

Нерешённая задача

Обзор показывает, что общий принцип ограничений известен [1, 2], инструменты его применения к дискретному производству разработаны [3], а согласование выемочного и транспортного звеньев в горной отрасли исследовано детально [6–10]. Не решённой остаётся задача корректного объединения резервов, рассчитанных по разнородным звеньям горно-транспортного комплекса, и количественной оценки ошибки, возникающей при их формальном суммировании.

Материалы и методы

Объект и информационная база

Объектом исследования является горно-транспортный комплекс золотодобычного рудника — крупного глубокого карьера с цикличной и циклично-поточной технологией.

Использованы первичные производственные документы предприятия:

Реестр простоев, коэффициентов использования и технической готовности за 2024 г. — пофамильный учёт по 74 единицам оборудования (45 экскаваторов и 29 буровых станков), из которых 73 имеют полный набор показателей фонда времени; 14 статей простоя.

Технический отчёт за 2021 г. — выемка горной массы 109 620 тыс. м³; буровые работы 2 394 910 пог. м; взрывные работы 82 005 тыс. м³; остаток взорванной горной массы на конец года 15 623 тыс. м³; транспортирование автомобильным транспортом 109 117,7 тыс. м³.

Реестр простоев за 2021 г. — пофамильный учёт с указанием фактических объёмов по каждой машине, использован для определения удельной производительности.

Ограничения информационной базы, определяющие границы выводов: стоимостные показатели не предоставлены, оценка выполняется в натуральном выражении; данные по автотранспорту представлены агрегированно; пофамильные объёмы продукции имеются только за 2021 г., вследствие чего переводные коэффициенты рассчитаны по данным 2021 г. и применены к структуре потерь 2024 г.

Расчёт резервов по направлениям воздействия

Потери фонда времени, определяемые как разность между технически доступным временем и фактическим временем работы, разложены на три компоненты по группам статей первичного учёта: ресурсную (отсутствие запасных частей), организационную (включая отсутствие транспорта) и технологическую (буровзрывные работы, технологические ожидания).

Достижимая часть каждой компоненты определена умножением на коэффициент технической достижимости, рассчитанный по внутреннему эталону: для каждой группы однотипных машин эталонным принят уровень компоненты у лучшего дециля группы, а достижимым резервом — превышение фактической доли над эталонной:

$$R_i = \max\left(0,\ g_i - b_{k(i)}\right) \cdot T_{\text{кал},i}$$

где g_i — фактическая доля компоненты в фонде времени i-й машины; b_k — эталонная доля по группе k.

Полученные величины сгруппированы по шести направлениям воздействия, каждое из которых соответствует определённой компоненте, группе оборудования и ответственной службе.

Приведение к единой натуральной шкале

Резерв бурового звена выражается в погонных метрах скважин, резерв выемочно-погрузочного — в кубометрах горной массы. Для приведения к единой шкале введён коэффициент выхода взорванной горной массы:

$$k_V = \frac{V_{\text{взр}}}{L_{\text{бур}}}$$

где $V_{\text{взр}}$ — годовой объём взрывных работ; $L_{\text{бур}}$ — годовой объём бурения.

По данным 2021 г.: kV = 82 005 · 10^{3} / 2 394 910 = 34,24 м³ на 1 погонный метр.

Коэффициент имеет содержательный смысл: дополнительно пробурённый погонный метр даёт дополнительно подготовленную к выемке горную массу. Существенно, что приведение делает величины сопоставимыми, но не делает их взаимозаменяемыми: подготовленная масса и вынутая масса остаются разными сущностями, и

это различие составляет предмет дальнейшего анализа.

Часовая производительность машин принята по фактическим данным 2021 г.: для экскаваторного парка 109 620 тыс. м³ / 176 373 маш.-ч = 621,5 м³/маш.-ч; для бурового парка 2 394 910 пог. м / 123 310 маш.-ч = 19,42 пог. м/маш.-ч.

Формулировка правила узкого места

Пусть технологическая цепь состоит из m последовательных звеньев, и для каждого звена j рассчитан резерв ΔV_j, приведённый к единой натуральной шкале. Пусть P_j — фактическая производительность звена j, а B_j — ёмкость межзвенного буфера между звеньями j и j+1.

При отсутствии буферов достаточной ёмкости реализуемый прирост производства определяется как

$$\Delta V_{\text{реал}} = \min_{j=1\ldots m} \Delta V_j$$

Суммирование резервов правомерно только в случае, когда резервы относятся к параллельным, а не последовательным элементам, либо к разным причинам потерь внутри одного звена. В последнем случае суммирование корректно при условии, что причины независимы, что обеспечивается аддитивностью разложения потерь фонда времени.

Величина ошибки при неправомерном суммировании оценивается коэффициентом завышения:

$$\kappa = \frac{\sum_j \Delta V_j}{\min_j \Delta V_j}$$

Расчёты выполнены средствами Python (библиотеки pandas, numpy, scipy).

Результаты

Резервы по направлениям воздействия

Цепочка перевода потерь фонда времени в производственный результат представлена на рисунке 1.



Рисунок 1.
Цепочка перевода резерва фонда времени в производственный результат

Результаты расчёта достижимого резерва по шести направлениям приведены в таблице 1.

Таблица 1
Достижимый резерв по направлениям воздействия, 2024 г.

№	Направление	Звено цепи	Достижимый резерв, маш.-ч	Натуральный результат	Эквивалент, млн м³
1	Обеспечение запасными частями буровых станков	буровое	31 078	603,5 тыс. пог. м	20,66
2	Транспортное обеспечение экскаваторов	выемочно-погрузочное	18 827	11,70 млн м³	11,70
3	Обеспечение запасными частями экскаваторов	выемочно-погрузочное	6 652	4,13 млн м³	4,13
4	Организация смены (экскаваторы)	выемочно-погрузочное	3 964	2,46 млн м³	2,46
5	Организация смены (буровые станки)	буровое	1 213	23,6 тыс. пог. м	0,81
6	Транспортное обеспечение буровых станков	буровое	653	12,7 тыс. пог. м	0,43
	Формальная сумма		62 387	—	40,21

Расхождение ранжирований по фонду времени и по натуральному результату

Сопоставление порядка направлений при ранжировании по двум основаниям представлено на рисунке 2.

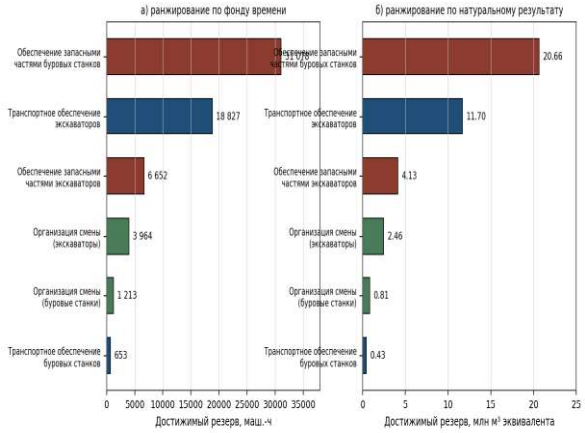


Рисунок 2.
Ранжирование направлений воздействия по фонду времени и по натуральному результату

По фонду времени первое место занимает направление 1 (31 078 маш.-ч), второе — направление 2 (18 827 маш.-ч); соотношение 1,65 : 1. По натуральному результату порядок сохраняется, но соотношение изменяется до 1,77 : 1, а разрыв с последующими направлениями увеличивается.

Расхождение обусловлено различием производительности часа работы машин разных типов: час работы бурового станка даёт 19,42 пог. м, что эквивалентно 664 м³ подготовленной массы, тогда как час работы экскаватора даёт 621,5 м³ вынутой массы. В рассматриваемом случае величины близки, вследствие чего расхождение умеренно и порядок направлений не изменяется.

Однако само расхождение методически принципиально. Ранжирование по фонду времени корректно лишь при сопоставимой производительности часа у сравниваемых машин. При сопоставлении, например, экскаватора и вспомогательной техники, различающихся по часовой производительности на порядок, такое ранжирование даёт неверный порядок направлений. Отсюда следует правило: направления воздействия ранжируются по натуральному результату, приведённому к единой шкале; фонд времени служит промежуточной величиной.

Группировка резервов по звеньям и величина ошибки суммирования

Резервы, сгруппированные по звеньям технологической цепи, приведены в таблице 2.

Таблица 2
Резервы по звеньям технологической цепи

Звено	Направления	Резерв, маш.-ч	Натуральный результат	Эквивалент, млн м³	Сущность результата
Буровое	1, 5, 6	32 944	639,8 тыс. пог. м	21,91	подготовленная горная масса
Выемочно-погрузочное	2, 3, 4	29 443	18,30 млн м³	18,30	вынутая горная масса
Формальная сумма		62 387	—	40,21	—
Реализуемый прирост		—	—	18,30	вынутая горная масса

Реализуемый прирост определяется наименьшим из резервов последовательных звеньев:

$$\Delta V_{\text{реал}} = \min(21{,}91;\ 18{,}30) = 18{,}30 \text{ млн м}^3$$

Коэффициент завышения при формальном суммировании:

$$\kappa = \frac{40{,}21}{18{,}30} = 2{,}20$$

Таким образом, суммирование резервов по направлениям воздействия без учёта их принадлежности к звеньям цепи завышает оценку достижимого прироста в 2,2 раза.

Соотношение резервов звеньев и сценарные оценки прироста представлены на рисунке 3.

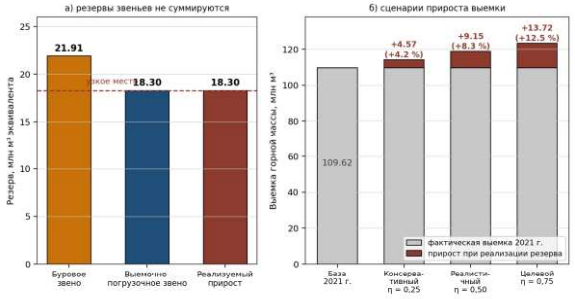


Рисунок 3 — Правило узкого места: резервы звеньев не суммируются, и сценарные оценки прироста выемки

Узким местом является выемочно-погрузочное звено, а внутри него — транспортное обеспечение, дающее 11,70 млн м³ из 18,30 млн м³ резерва звена.

Резерв бурового звена превышает потребность на 3,61 млн м³, или на 19,7 %.

Парадокс планирования: направление с наивысшим приоритетом даёт нулевой прирост

Направление 1 — обеспечение буровых станков запасными частями — занимает первое место в обоих ранжированиях (по фонду времени и по натуральному результату) и обладает наивысшей реализуемостью среди всех направлений: оно требует оборотных средств и организационной работы, но не капитальных вложений, а горизонт получения эффекта составляет до шести месяцев.

Однако при изолированном внедрении этого направления прирост выемки горной массы равен нулю.

Обоснование состоит в следующем. Дополнительно подготовленная горная масса в объёме 20,66 млн м³ может быть вынута только при наличии свободной выемочной и транспортной мощности. Поскольку выемочно-погрузочное звено является ограничивающим, такая мощность отсутствует, и весь эффект накапливается в запасе взорванной горной массы.

Количественная оценка этого накопления приведена в таблице 3.

Таблица 3

Влияние изолированного внедрения направления 1 на запас взорванной горной массы

Показатель	Значение
Годовой объём взрывных работ (2021 г.), тыс. м³	82 005
Остаток взорванной горной массы на конец 2021 г., тыс. м³	15 623
Запас в сутках потребления	70
Прирост подготовленной массы при реализации направления 1, млн м³	20,66
Прирост запаса, %	+140
Запас в сутках потребления после реализации	167
Прирост выемки горной массы, млн м³	0

Запас взорванной горной массы возрастает с 70 до 167 суток потребления, то есть более чем вдвое, при нулевом приросте производства.

Устойчивость результата

Проверка устойчивости выполнена варьированием четырёх параметров относительно реалистичного сценария реализации резерва (рисунок 4).

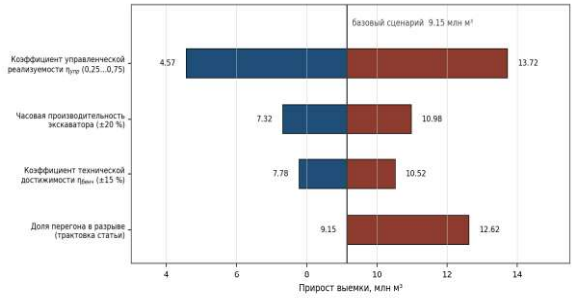


Рисунок 4 — Анализ чувствительности оценки прироста выемки к ключевым параметрам

Таблица 4

Чувствительность результата к параметрам расчёта

Параметр	Диапазон варьирования	Влияние на реализуемый прирост	Влияние на вывод о узком месте
Коэффициент управленческой реализуемости	0,25…0,75	пропорциональное	отсутствует
Часовая производительность экскаватора	±20 %	7,32…10,98 млн м³	отсутствует при отклонении до +20 %
Коэффициент технической достижимости	±15 %	7,78…10,52 млн м³	отсутствует
Трактовка статьи «перегон»	базовая / с включением в разрыв	9,15…12,62 млн м³	отсутствует

Отдельно проверено влияние коэффициента выхода взорванной горной массы, входящего только в расчёт бурового звена. Его варьирование в пределах ±15 % изменяет резерв бурового звена в диапазоне 18,62…25,20 млн м³, оставляя резерв выемочного звена неизменным; реализуемый прирост при этом не изменяется, поскольку ограничивающим остаётся выемочное звено во всём диапазоне.

Вывод о том, какое звено является ограничивающим, устойчив к варьированию всех рассмотренных параметров. Смена

ограничивающего звена потребовала бы, чтобы резерв бурового звена оказался меньше резерва выемочного, то есть снижения коэффициента выхода взорванной массы более чем на 16 % либо соответствующего роста производительности экскаваторов. Ни то, ни другое не находится в пределах правдоподобной погрешности исходных данных.

Обсуждение

Условия правомерности суммирования резервов

Полученный результат не означает, что резервы нельзя складывать никогда. Суммирование правомерно в двух случаях.

Первый — резервы относятся к разным причинам потерь внутри одного звена. Так, для выемочно-погрузочного звена резервы направлений 2, 3 и 4 (транспортное обеспечение, запасные части, организация смены) складываются корректно: они относятся к одному и тому же оборудованию и устраняют разные, независимые причины его простоя. Корректность обеспечивается аддитивностью разложения потерь фонда времени, при которой сумма компонент тождественно равна общей величине потерь без остаточного члена.

Второй — звенья работают параллельно, а не последовательно. Если два участка карьера обслуживаются независимыми комплексами, резервы этих комплексов складываются.

Ошибка возникает при суммировании резервов последовательных звеньев, и её величина тем больше, чем сильнее различаются резервы звеньев. В предельном случае, когда резерв одного звена близок к нулю, суммирование даёт величину, не имеющую никакого отношения к достижимому приросту.

Отсюда следует практическое требование к методике оценки резервов: расчёт, ведущийся в разрезе причин потерь, должен сопровождаться отнесением каждой причины к звену технологической цепи, и объединение результатов должно выполняться по правилу узкого места, а не суммированием.

Роль межзвенного буфера и разрешение парадокса

Установленный выше парадокс — направление с наивысшим приоритетом даёт нулевой немедленный прирост — на первый взгляд ведёт к заключению, что мероприятия по буровому звену следует отложить до расширения выемочно-транспортной мощности. Такое заключение представляется неверным по трём причинам.

Первая — различие горизонтов. Резерв бурового звена достигается организационными средствами с горизонтом до шести месяцев и не требует капитальных вложений. Резерв выемочного звена в основной своей части (транспортное обеспечение, 11,70 из 18,30 млн м³) требует структурного решения с горизонтом 12–24 месяца. Откладывание быстрых мероприятий до завершения медленных означает потерю времени без какой-либо компенсации.

Вторая — буферная функция запаса. Запас взорванной горной массы представляет собой межзвенный буфер, демпфирующий рассогласование буровзрывного и выемочного звеньев. Увеличение буфера снижает вероятность ситуаций, при которых экскаватор простаивает из-за отсутствия подготовленной массы, то есть уменьшает риск роста технологической компоненты потерь. Прямая количественная оценка этого эффекта требует данных о частоте таких простоев в разрезе участков, которые в информационной базе отсутствуют; поэтому здесь фиксируется лишь направление эффекта, а не его величина.

Третья — последовательность реализации. Если мероприятия по буровому звену завершаются к моменту, когда расширяется выемочно-транспортная мощность, накопленный запас позволяет реализовать прирост немедленно, без задержки на подготовку фронта работ. При обратной последовательности расширенная выемочная мощность окажется не обеспеченной подготовленной массой.

Таким образом, рациональная стратегия состоит в параллельной реализации: быстрые мероприятия по буровому звену с накоплением буфера и одновременное развёртывание долгосрочного решения по транспортному обеспечению. Парадокс разрешается не отказом от приоритетного направления, а отказом от оценки его эффекта по немедленному приросту производства.

Существенно, что этот вывод получен только благодаря явному учёту структуры цепи. При формальном суммировании резервов направление 1 выглядело бы источником 20,66 млн м³ немедленного прироста, что привело бы к завышенным ожиданиям и к последующему выводу о нерезультативности мероприятия.

Ограничение верхней оценки прироста

Правило узкого места задаёт верхнюю границу реализуемого прироста, но не гарантирует её достижения. Реализуемый прирост 18,30 млн м³ соответствует полному устранению управляемых потерь выемочно-погрузочного звена, что предполагает коэффициент управленческой реализуемости, равный единице.

При частичной реализации прирост снижается пропорционально: при коэффициенте 0,25 он составляет 4,57 млн м³, при 0,50 — 9,15 млн м³, при 0,75 — 13,72 млн м³. Эти величины следует рассматривать как сценарные, поскольку коэффициент реализуемости не вычисляется из

данных, а задаётся исходя из предположений о полноте выполнения управленческих решений.

Отметим, что при частичной реализации резерва выемочного звена превышение резерва бурового звена возрастает: если выемочное звено реализует лишь половину резерва (9,15 млн м³), то избыток бурового звена составит уже 12,76 млн м³, то есть 139 % от реализуемого прироста. Это усиливает изложенный выше аргумент о необходимости соотносить темпы реализации по звеньям.

Ограничения исследования

Первое. Переводные коэффициенты рассчитаны по данным 2021 г. и применены к структуре потерь 2024 г., поскольку пофамильные объёмы продукции за 2024 г. отсутствуют. Это допущение влияет на абсолютные величины резервов, но не на соотношение резервов звеньев, поскольку коэффициенты применяются к обоим звеньям на основе данных одного и того же года.

Второе. Транспортное звено не рассматривается как самостоятельное звено цепи, а включено в выемочно-погрузочное через статью «организационные простои по транспорту» в реестре погрузочного оборудования. Причина — отсутствие пофамильного учёта по автосамосвалам. Строго говоря, цепь содержит не два, а три звена, и полный анализ требует раздельной оценки резерва транспортного звена. Данное упрощение является консервативным: раздельный учёт транспортного звена мог бы выявить ещё более узкое место и, следовательно, ещё меньший реализуемый прирост.

Третье. Эффект увеличения буфера зафиксирован качественно, без количественной оценки, ввиду отсутствия данных о простоях экскаваторов из-за отсутствия подготовленной массы в разрезе участков.

Четвёртое. Исследование выполнено на одном объекте. Численные значения — коэффициент завышения 2,20, соотношение резервов звеньев — специфичны для данного карьера и данного соотношения мощностей звеньев. Переносу подлежит правило и методика его применения, а не численные значения.

Сопоставление с литературой

Полученный результат представляет собой применение общего принципа теории ограничений [1, 2] к задаче оценки резервов эксплуатации горного оборудования и его количественную верификацию на промышленных данных. Новизна состоит не в самом принципе, а в демонстрации того, что при принятой практике расчёта резервов в разрезе причин потерь принадлежность причины к звену цепи теряется, вследствие чего ошибка возникает систематически и достигает кратной величины.

Работа развивает направление, представленное показателями уровня производственной линии [3], перенося логику учёта взаимозависимости звеньев на горно-транспортный комплекс, где межзвенные буферы существуют лишь частично: между буровзрывным и выемочным звеном буфер имеется (запас взорванной массы), между выемочным и транспортным — отсутствует принципиально.

Последнее обстоятельство объясняет, почему в литературе по согласованию выемочного и транспортного звеньев [6–10] вопрос о суммировании резервов не возникает: там рассматривается пара звеньев без буфера, для которой взаимозависимость очевидна. Ошибка появляется именно при расширении анализа на звенья, разделённые буфером, где иллюзия независимости сохраняется до тех пор, пока ёмкость буфера не исчерпана.

Заключение

Установлено, что суммирование резервов производительности, рассчитанных по направлениям воздействия без учёта их принадлежности к звеньям последовательной технологической цепи, приводит к систематическому завышению оценки достижимого прироста. На материале действующего карьера коэффициент завышения составил 2,20: формальная сумма резервов по шести направлениям — 40,21 млн м³ эквивалента против реализуемого прироста 18,30 млн м³.

Сформулировано правило узкого места применительно к оценке резервов: реализуемый прирост определяется наименьшим из резервов последовательных звеньев. Определены условия правомерности суммирования: резервы складываются, если относятся к разным независимым причинам потерь внутри одного звена либо к параллельно работающим комплексам.

Обоснован коэффициент приведения резервов разнородных звеньев к единой натуральной шкале — 34,2 м³ взорванной горной массы на 1 погонный метр скважины, рассчитанный по фактическим производственным данным. Показано, что приведение делает величины сопоставимыми, но не взаимозаменяемыми: подготовленная и вынутая горная масса остаются разными сущностями.

Установлено, что ранжирование направлений воздействия по фонду времени и по натуральному результату может не совпадать вследствие различия часовой производительности машин разных типов. Сформулировано правило: ранжирование выполняется по натуральному результату, приведённому к единой шкале, а фонд времени служит промежуточной величиной.

Выявлен парадокс планирования: направление, занимающее первое место в обоих ранжированиях

и обладающее наивысшей реализуемостью, при изолированном внедрении даёт нулевой прирост выемки. Весь эффект накапливается в запасе взорванной горной массы, увеличивая его с 70 до 167 суток потребления.

Показано, что данный парадокс не является основанием откладывать соответствующие мероприятия. Обоснована стратегия параллельной реализации: быстрые мероприятия по звену, находящемуся выше по цепи, с накоплением межзвенного буфера и одновременное развёртывание долгосрочного решения по ограничивающему звену. Парадокс разрешается отказом от оценки эффекта мероприятия по немедленному приросту производства.

Практическое требование к методике оценки резервов состоит в том, что расчёт, ведущийся в разрезе причин потерь, должен сопровождаться отнесением каждой причины к звену технологической цепи, а объединение результатов должно выполняться по правилу узкого места.

KETMA-KET TEXNOLOGIK ZANJIRDA UNUMDORLIK ZAXIRALARINING NOADDITIVLIGI: KARYER USKUNALARI ZAXIRALARINI BAHOLASHDA TOR JOY QOIDASI

Maxmudov Sh.A.
Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti, Navoiy, O‘zbekiston.

ANNOTATSIYA Ushbu maqola kon uskunalaridan foydalanish samaradorligini oshirish dasturlarini asoslashda keng tarqalgan metodologik xatoni – ketma-ket jarayon zanjirining har bir bosqichi uchun alohida hisoblangan zahiralarni yig‘ishni – ko‘rib chiqadi. Oltin konidagi 73 ta qazib olish va burg‘ilash uskunasining 2024-yil uchun har bir mashina bo‘yicha ekspluatatsion ma’lumotlari hamda 2021-yil ishlab chiqarish ko‘rsatkichlari asosida bunday yig‘indi erishiladigan o‘sishni 2,2 barobar ortiq baholashi ko‘rsatilgan: olti ta’sir yo‘nalishi bo‘yicha nominal umumiy zahira hajmi 40,21 million m³ ekvivalentni tashkil etsa, haqiqiy o‘sish esa 18,30 million m³ ni — qazib olish va yuklash bosqichidagi zahirani — tashkil etadi, bu esa cheklovchi omil ekanligi ma’lum bo‘ldi. Geterogen bosqichlardagi zaxiralarni yagona shkalaga keltirish uchun quduqning har bir pogon metriga 34,2 m³ portlatilgan tog‘ jinsi massasi chiqish koeffitsiyentini belgilash taklif etilgan. Turli mashinalar turlarining soatlik unumdorligi solishtirib bo‘lmaydiganligi sababli, ta’sir yo‘nalishlarini vaqt fondi va natural natija bo‘yicha reytinglash mos kelmasligi aniqlangan. Rejalashtirish paradoksi aniqlangan: ikkala reytingda ham birinchi o‘rinni egallagan va eng yuqori amalga oshirish imkoniyatiga ega yo‘nalish alohida amalga oshirilganda qazib olish hajmida sof o‘sishni bermaydi — butun ta’sir portlatilgan tog‘ jinsi zaxirasida to‘planib, uni 70 kunlik iste’moldan 167 kunlik iste’molgacha oshiradi. Bu holat tegishli chora-tadbirlarni kechiktirish uchun asos bo‘lmasligi ko‘rsatildi, chunki texnologik zaxira hajmining o‘sishi yo‘qotishlarning texnologik komponentining oshish xavfini kamaytiradi. Zaxiralarni birlashtirishni asoslash shartlari ishlab chiqildi.

KALIT SO‘ZLAR Ishlab chiqarish zaxiralari; ketma-ket jarayon zanjiri; tor joy; qo‘shiluvchanlik; qazib olish va tashish tizimi; jarayon buferi; ochiq karyer usuli.

THE NON-ADDITIVITY OF PRODUCTION RESERVES IN A SEQUENTIAL TECHNOLOGICAL CHAIN: THE BOTTLENECK RULE IN THE EVALUATION OF RESERVES FOR MINE EQUIPMENT

Makhmudov Sh.A.
Navoi State Mining and Technological University, Navoi, Uzbekistan

This paper examines a methodological error commonly found in the justification of programs aimed at improving the efficiency of mining equipment use: the summation of reserves calculated separately for each link in a sequential process chain. Using operational data by unit for 73 pieces of mining and drilling equipment at a gold mine for 2024 and production indicators for 2021, it is shown that such aggregation overestimates the achievable increase by a factor of 2.2: the formal sum of reserves across the six areas of intervention amounts to 40.21 million m³

equivalent, whereas the realizable increase is 18.30 million m³—the reserve of the mining and loading stage, which proved to be the limiting factor. To bring the reserves of heterogeneous segments onto a single scale, a yield coefficient for blasted rock mass of 34.2 m³ per linear meter of borehole was established. It was found that the ranking of impact areas based on time allocation and actual output does not coincide, since the hourly productivity of different types of machinery is not comparable. A planning paradox has been identified: the direction that ranks first in both classifications and has the highest feasibility, when implemented in isolation, yields zero net increase in excavation—the entire effect accumulates in the stockpile of blasted rock, increasing it from 70 to 167 days of consumption. It is shown that this circumstance does not justify postponing the relevant measures, since the increase in the technological buffer itself reduces the risk of an increase in the technological component of losses. Conditions under which the summing of reserves is justified are formulated.

Productivity reserves; sequential technological chain; bottleneck; additivity; mining and haulage system; technological buffer; surface mining.

REFERENCES

1. Goldratt E. M., Cox J. The goal: a process of ongoing improvement. — Croton-on-Hudson: North River Press, 1984.
2. Goldratt E. M. Theory of constraints. — Croton-on-Hudson: North River Press, 1990.
3. Muthiah K. M. N., Huang S. H. Overall throughput effectiveness (OTE) metric for factory-level performance monitoring and bottleneck detection // International Journal of Production Research. — 2007. — Vol. 45, No. 20. — P. 4753–4769.
4. Jandaghi Jafari A., Hoseinie S. H., Bagherpour R., Mofidi M., Ghodrati B. Quantifying operational uncertainties in mining machinery fleet productivity using a stochastic Overall Equipment Effectiveness (OEE) analysis // Resources Policy. — 2026. — Vol. 115.
5. Basharaf M., Sayadi A. R., Rahimdel M. J. Improving productivity in mine loading and hauling operations through OEE analysis // Resources Policy. — 2026. — Vol. 115. — Art. 105873.
6. Burt C. N., Caccetta L. Match factor for heterogeneous truck and loader fleets // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. — 2007. — Vol. 21, No. 4. — P. 262–270.
7. Burt C. N., Caccetta L. Equipment selection for surface mining: a review // Interfaces. — 2014. — Vol. 44, No. 2. — P. 143–162.
8. Chaowasakoo P., Seppälä H., Koivo H., Zhou Q. Digitalization of mine operations: scenarios to benefit in real-time truck dispatching // International Journal of Mining Science and Technology. — 2017. — Vol. 27, No. 2. — P. 229–236.
9. Hashemi A. S., Sattarvand J. Simulation based investigation of different fleet management paradigms in open pit mines: a case study of Sungun copper mine // Archives of Mining Sciences. — 2015. — Vol. 60, No. 1. — P. 195–208.
10. Choi Y., Nguyen H., Bui X.-N., Nguyen-Thoi T. Optimization of haulage-truck system performance for ore production in open-pit mines using big data and machine learning-based methods // Resources Policy. — 2022. — Vol. 75. — Art. 102522.
11. Gutiérrez-Diez J. C., Fernández-Muñiz Z., Fernández-Martínez J. L. et al. New method to study the effectiveness of mining equipment: a case study of surface drilling rigs // Applied Sciences. — 2024. — Vol. 14, No. 5. — Art. 2185.
12. Elevli S., Elevli B. Performance measurement of mining equipments by utilizing OEE // Acta Montanistica Slovaca. — 2010. — Vol. 15, No. 2. — P. 95–101.
13. Paraszczak J. Understanding and assessment of mining equipment effectiveness // Mining Technology. — 2005. — Vol. 114, No. 3. — P. 147–151.

INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Makhmudov Sherzod Azamatovich	Associate Professor of the Department of Mining Electromechanics, PhD; Navoi State Mining and Technological University, 210100, Navoi, M.Torobiy Str., 72, Republic of Uzbekistan. E-mail: 1yy2@mail.ru ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-0057-2829