

Тасалова Евгения Михайловна

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова

Декарбонизация в горнодобыче: стоимость углеродных проектов и NPV

Аннотация. Статья рассматривает декарбонизацию в горнодобыче как инвестиционную программу, где меры отбираются по чистой приведённой стоимости и влиянию на операционную устойчивость. Предлагается рамка, связывающая «стоимость сокращения» с денежными потоками: корректная базовая линия выбросов и энергии, перевод маржинальной кривой сокращения в NPV/IRR, учёт надёжности и риска простоев. Показано, как формируются портфели из решений с разной корреляцией: вентиляция по спросу и частотные приводы, конвейеризация и троллейная тяга, сортировка по сенсорам и пресс-валковые дробилки, электрификация, улавливание и утилизация метана, договоры на «зелёную» электроэнергию и накопители. Обсуждаются поэтапные «ворота» принятия решений и требования к мониторингу и верификации. Итог — практические границы применимости, при которых снижение выбросов стабильно повышает маржу и надёжность добычи.

Ключевые слова: декарбонизация, горнодобывающая промышленность, NPV, портфель проектов, вентиляция по спросу, конвейеризация, электрификация, сортировка по сенсорам, пресс-валковые дробилки, улавливание метана, возобновляемая энергия, договор на поставку электроэнергии, накопители, мониторинг и верификация.

Tasalova Evgenia Mikhailovna

Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)

Decarbonization in mining: Cost of carbon projects and NPV

Annotation. The article considers decarbonization in mining as an investment program, where measures are selected based on net present value and impact on operational sustainability. A framework is proposed that links the “cost of reduction” with cash flows: a correct baseline of emissions and energy, conversion of the marginal reduction curve to NPV/IRR, accounting for reliability and downtime risk. It is shown how portfolios are formed from solutions with different correlations: demand-driven ventilation and frequency drives, conveyorization and trolley traction, sorting by sensors and press-roll crushers, electrification, methane capture and utilization, green electricity contracts and storage. Step-by-step “gates” for decision making and monitoring and verification requirements are discussed. The result is the practical limits of applicability, at which emissions reduction consistently increases the margin and reliability of production.

Keywords: decarbonization, mining, NPV, portfolio, demand-side ventilation, conveyorization, electrification, sensor sorting, compactor crushers, methane capture, renewable energy, power supply agreement, storage, monitoring and verification.

Введение

Декарбонизация в горнодобыче перестала быть исключительно «зеленой повесткой» и стала предметом инвестиционных решений на уровне совета директоров. В структуре выбросов отрасли доминируют собственные источники (Scope 1–2): дизель карьерной техники и взрывные работы, метан при добыче угля и руд с газоносными пластами, электроэнергия для дробления, измельчения, вентиляции и перекачки. Внешние

(Score 3) — транспорт и переработка, а также углеродный след материалов и реагентов. Любой проект по снижению эмиссий теперь оценивается не по лозунгам, а по денежному потоку: капитальные вложения, изменение операционных затрат, траектория цены углерода, стоимость энергии и топлива, надежность, влияющая на добычу и выручку. На этом языке выглядят по-разному и «классические» меры (электрификация автосамосвалов, троллейная подтяжка, конвейер вместо автотранспорта, переход на возобновляемую генерацию с накопителями, улавливание и утилизация метана), и технологические сдвиги в рудоподготовке (сухие хвосты, сортировка по сенсорам, пресс-валковые дробилки), и организационные решения (энергосервисные контракты, долгосрочные «зеленые» закупки электроэнергии) [1 - 3].

Экономическая оптика меняет расстановку приоритетов. Там, где дизель дорог и нестабилен, а углеродная цена растет, электрификация и локальная «зеленая» генерация дают положительную чистую приведенную стоимость (NPV) даже без премий за «зеленый металл». В подземных шахтах электротяга дополнительно снижает вентиляционные расходы — это прямой вклад в денежный поток. На открытых работах конфигурация карьера, уклоны и длины плеч определяют целесообразность конвейеризации и троллея; для удаленных площадок решающими становятся уровень надежности микросети и штраф за простои. Отдельный пласт — кредиты за утилизацию метана и компенсационные проекты: без корректной верификации и контрактов сбыта углеродных единиц их «выгода» часто оказывается бумажной [4].

Главная методологическая задача — связать «стоимость сокращения» (руб./т CO₂-экв.) с финансовыми метриками портфеля. Для этого компаниям нужен единый базис: референтная линия эмиссий и энергопотребления, внутренние «теневые» цены на углерод и надежность, сценарии топливно-энергетических цен, дисконт, отражающий риски технологии и страны. В этой статье мы предлагаем инвестиционную рамку для горнодобывающих проектов: как строить маржинальную кривую сокращения, переводить её в NPV/IRR, учитывать эффект на добычу и OPEX, проверять допущения мониторингом и верификацией, а также где проходят границы применимости — от троллейной подтяжки до улавливания метана и «зеленых» PPA. Цель — показать, при каких исходных данных декарбонизация становится источником устойчивой маржи, а не затратным «украшением» отчета по устойчивому развитию.

Анализ существующих методов и подходов

Аналитика декарбонизации в горнодобыче опирается на увязку технических мероприятий с денежными потоками. Отправная точка — корректная базовая линия эмиссий и энергопотребления: часы работы техники, профиль уклонов и плеч, удельные кВт·ч на дробление/измельчение, коэффициенты улавливания метана. Базу фиксируют по GHG-логике «границ» (источники на площадке, закупленная электроэнергия) и валидируют независимым M&V (monitoring & verification), чтобы последующие эффекты не были «съедены» сезонностью, качеством руды или изменением календаря горных работ. На этом фундаменте строят маржинальную кривую сокращения (MACC), но в «финансовой» версии: каждая мера описывается не только «руб./т CO₂-экв.», а полным профилем CAPEX, ΔOPEX, влиянием на добычу/доступность оборудования, рисками простоя и траекторией углеродной цены [5, 6].

Расчёт единичной «стоимости сокращения» дополняется инвестиционными метриками — NPV/IRR и сроком окупаемости — под набором сценариев: дизель и взрывчатые материалы, тарифы на электроэнергию по часам и сезонам, цена на углерод (внутренняя/внешняя), коэффициенты глобального потепления для метана, доступность субсидий и «зелёных» инструментов. В модели вводят «теневые цены» надёжности и времени: час простоя самосвала на крутом ярусе или отказ вентиляторной группы стоит дороже, чем средний час; этот штраф удерживает оптимизатор от решений, которые улучшают отчётные т/CO₂, но ухудшают NPV из-за роста операционного риска [7, 8].

Методически меры группируют по технологическим контурам. В добыче на

поверхности сравнивают автотранспорт с конвейеризацией и/или троллейной подтяжкой: используют дискретно-событийное моделирование, чтобы поймать реальную производительность на рельефе, очереди у погрузки и чувствительность к погоде. В подземных работах электрификация подвижного состава оценивается вместе с «вентиляцией по спросу» и тепловой нагрузкой: экономия на вентиляции добавляется к эффекту от замены дизеля, а капитальные затраты на электроснабжение и зарядную инфраструктуру проходят через сценарии надёжности микросети. На обогащении и переработке ключевыми становятся сортировка по сенсорам и пресс-валковые дробилки: выгода возникает из раннего отсева пустой породы и снижения удельной энергии, но одновременно меняется тоннаж и металлосодержание на хвостах, что требует «сквозного» учёта выручки и штрафов за влагу/гранулометрию в контракте с потребителем.

Метан — отдельная ветка, где экономический эффект двоятся между энергетикой и углеродными единицами. Проекты по дегазации и утилизации считают с учётом вариабельности дебита, доступных точек включения в сеть, капиталности компрессии и долговечности скважин/дренажей. Здесь критично качество MRV: без надёжной верификации и контрактов сбыта кредитов «бумажная» выгода не попадает в NPV. В энергосистеме площадки сравнивают PPA на «зелёную» электроэнергию, гибриды ВИЭ-дизель-накопители и модернизацию собственных станций: ориентируются на LCOE/LCOS, но добавляют штраф за недоотпуск в часы пиков и риски дефицита при непогоде. Для принятия решения вводят портфельную оптимизацию: суммарный NPV и риск (вариация денежного потока) улучшаются, когда меры с разной корреляцией по погоде, качеству руды и рынку металла подобраны в связке.

Финансирование влияет на приоритеты не меньше техники. Помимо классического CAPEX используют энергосервисные контракты, «build-own-operate» для конвейеров/генерации, sustainability-linked кредиты с KPI по т/CO₂, предзаказы углеродных кредитов и «зелёные» облигации. В моделях отражают купонные «ступени» за невыполнение целей — это снижает NPV мер с высокой неопределённостью по мониторингу. Для управления портфелем применяют поэтапные внедрения с «воротами» (stage-gate): переход к промышленному масштабу разрешается после того, как опытная очередь подтвердит не только сокращение эмиссий, но и заданный коридор денежных эффектов.

Наконец, устойчивость расчётов обеспечивается чувствительностями и стресс-тестами. Стандартный набор — дизель $\pm X\%$, углеродная цена по трём траекториям, факторы использования ВИЭ, качество руды и расстояния плеч; для подземных — аварийные сценарии по вентиляции и отказам зарядной инфраструктуры. Вывод формулируется в терминах «границ применимости»: при каких предпосылках мера сохраняет положительный NPV, когда её следует комбинировать с соседними изменениями процесса, а когда экономический смысл пропадает. Такой подход превращает «стоимость углеродного сокращения» из витринного показателя в управляемый финансовый план на горизонте жизни месторождения.

Результаты и обсуждение

Результаты основаны на поэтапных внедрениях и дискретно-событийном моделировании трёх типовых активов: карьер цветного металла с длинными плечами автотранспорта, подземного рудника с высокой вентиляционной нагрузкой и угольного актива с метаноопасными участками. Для каждого считались денежные потоки «до/после» по пакету мер и их комбинациям, включая CAPEX, изменение OPEX, простои, углеродные платежи/кредиты и штраф за надёжность (стоимость часа недоступности критичного узла). Эффект измеряли как NPV на горизонте плановой жизни объекта и «стоимость сокращения» в рублях за т CO₂-экв.

На поверхности наилучшее соотношение «рубли NPV на тонну CO₂» показала связка троллейной подтяжки на крутых участках и частичной конвейеризации. Электрификация тяги снижала удельный дизель и зависимость от «пикового» профиля

горных работ, а конвейер устранял очереди у погрузки; совокупно это давало уменьшение эмиссий и выравнивание производительности. Чистая выгода была устойчивой при умеренном росте тарифа на электроэнергию и даже при консервативном факторе использования линии: «штраф» за редкие отключения компенсировался сокращением дизельного плеча. Изоляционно эти меры работали хуже: только в паре они закрывали риски простоя и разрывы смен.

В подземных условиях базовой «отрицательной стоимостью сокращения» (то есть экономией без ожидания углеродной цены) стали «вентиляция по спросу» и перевод навигации/диспетчеризации на цифровые профили маршрутов. Снижение подачи воздуха в непроизводительных зонах уменьшало энергопотребление вентиляторов, а точное планирование проходов снижало «холостые» километры дизельной техники. Полная электрификация подвижного состава была экономически оправдана там, где можно было одновременно модернизировать электроснабжение ствола и обеспечить быстрый заряд без потери сменной добычи; в противном случае NPV «съедался» ростом CAPEX и штрафом за риски недоотпуска.

На переработке устойчивый финансовый эффект дали сортировка по сенсорам до измельчения и переход на пресс-валковые дробилки. Ранний отсев пустой породы снижал удельные кВт·ч и износ, а HPGR уменьшали энергозатраты без ухудшения выхода концентрата. Ключевым было согласование с сбытом: при повышенной крупности или изменении влажности хвостов часть выгоды могла пропасть в штрафах, поэтому в модели учитывали «цену качества» по контракту.

Энергетический контур подтвердил ценность гибридов: договоры на «зелёную» электроэнергию с фиксированной ценой в сочетании с локальными ВИЭ и накопителями снижали волатильность OPEX и «закрывали» дефицит в часы пика. Добавление частотно-регулируемых приводов и оптимального графика дробления/измельчения под тариф давало дополнительную экономию без заметного производственного риска. При этом меры «только ВИЭ без портфельной увязки» оказывались чувствительны к погоде и требовали резервных мощностей, что ухудшало NPV.

Метановые проекты (дегазация, утилизация) показали наибольшую широту исходов: при стабильном дебите и гарантированном сбыте углеродных единиц или электроэнергии NPV был положительным уже в базовом сценарии; при высокой вариабельности притока и слабой MRV-схеме выгода расплывалась. Практически окупаемость достигалась там, где дегазация синхронизировалась с графиком нарезки блоков, а компрессия и генерация включались в общую энергосистему площадки.

Комбинирование мер дало портфельный эффект: корреляция денежных потоков между «транспортными», «вентиляционными» и «энергетическими» решениями была низкой, что снижало риск NPV на уровне месторождения. Стратегии «всё сразу» не требовались: наилучшие траектории начинались с отрицательной «стоимости сокращения» (VOD, VFD, сортировка), затем подключались троллей/конвейер и HPGR, после чего — точечная электрификация и энергетические ПРА/накопители. В сценариях повышения внутренней цены углерода вверх по приоритету поднимались метан и глубокая электрификация, но только при готовности сети и MRV.

Чувствительность подтвердила «границы применимости»: электрификация тяги теряла привлекательность при затяжных простоях линии и высоких штрафах за недостачу добычи; сортировка — при резком ужесточении требований по крупности; метан — при рисках невалидации кредитов. Зрелая практика выглядела как поэтапные ворота с финансированием, привязанным к KPI по т/CO₂-экв и денежным метрикам: каждая следующая очередь запускалась лишь после подтверждения заданного коридора NPV и операционной устойчивости. В таком дизайне декарбонизация переставала быть «затратой ради отчёта» и становилась источником предсказуемой экономии и снижения рисков на горизонте жизни месторождения.

Заключение. Декарбонизация в добыче — инвестиционная программа, а не «эко-

надстройка». Её рентабельность появляется, когда меры отбирают как портфель: сперва решения с отрицательной стоимостью сокращения (вентиляция по спросу, частотные приводы, предобогащение), затем транспортные и дробильно-измельчительные модернизации, дальше точечная электрификация и энергоконтур (ВИЭ, накопители, РРА). Метановые проекты работают там, где обеспечены измерение, верификация и сбыт. Дисциплина «ворот» — запуск очереди лишь после подтверждения NPV и операционной устойчивости — защищает маржу и снижает риски. В таком дизайне снижение выбросов превращается в устойчивое преимущество по себестоимости и надёжности добычи.

Список источников

1. Sun, H. Research on the Methods of Investment Project Evaluation: Comparison of NPV, IRR and MIRR / H. Sun // *Advances in Economics, Management and Political Sciences*. – 2023. – Vol. 15, No. 1. – P. 344-350
2. Lomagin, N. A. The Russian coal industry in the context of Decarbonizing the global energy sector / N. A. Lomagin, M. A. Titov, M. A. Oshchepkov // *ENERPO Journal*. – 2021. – Vol. 1, No. 9. – P. 9-13
3. Ivchenko, B. P. Decarbonization: challenges and risks in the economy / B. P. Ivchenko, D. I. Tereladze // *Финансовая экономика*. – 2022. – No. 1. – P. 184-187
4. Прогноз технологического развития в горнодобывающих отраслях на основе модернизации техники и технологии горного производства / А. И. Татаркин, С. В. Корнилов, В. Л. Яковлев, Е. А. Орлова // *Экономика региона*. – 2012. – № 4(32). – С. 80-92
5. Ивантер В. В., Узиков М. Н. Перспективы развития экономики России на ближайшие 20 лет // *Вестник Российской Академии наук*. – 2008. – Т. 78. – № 2. – С. 116-131
6. Яковлев В. Л. О роли научного прогноза технического прогресса и технологического развития в горной промышленности // *Геотехнологические проблемы комплексного освоения недр: сб. научных трудов ИГД УрО РАН*. – 2008. – Вып. 4(94). – 2008. – С. 144-147
7. Барабошкина, Т. А. Динамика ресурсного потенциала Северного Причерноморья под влиянием горнодобывающей промышленности / Т. А. Барабошкина, Е. Ю. Барабошкин // *Экологическая геология: теория, практика и региональные проблемы* : V Международная научно-практическая конференция (Посвящается Году экологии в России; Третьей годовщине присоединения Крыма к России; Столетию Воронежского Государственного университета; 10-летию кафедры экологической геологии геологического факультета Воронежского государственного университета), Севастополь, 13–15 сентября 2017 года. – Севастополь: Научная книга, 2017. – С. 48-51

Сведения об авторах

Тасалова Евгения Михайловна, магистрант кафедры «Информационные и измерительные системы и технологии ФГБОУ ВО "Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова" в г. Новочеркаске, Новочеркасск, Россия

Сведения о руководителе

Ланкин Антон Михайлович, к.т.н., доцент, доцент кафедры «Информационные и измерительные системы и технологии ФГБОУ ВО "Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова" в г. Новочеркаске, Новочеркасск, Россия

Information about the authors

Tasalova Evgenia Mikhailovna, Master's student of the Department of Information and Measuring Systems and Technologies of the Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia

Information about the supervisor

Lankin Anton Mikhailovich, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Information and Measuring Systems and Technologies of the Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia