Низкоуглеродная нефтегазовая логистика: многокритериальная оптимизация затрат, надёжности поставок и выбросов метана в цепи поставок

Сомов Андрей Георгиевич
кандидат экономических наук, доцент Высшей школы промышленного менеджмента, Институт промышленного менеджмента, экономики и торговли, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, somovspb@yandex.ru,

Жуков Виталий Вячеславович
генеральный директор, АО «Аврора Логистика», Zhukov-vitaly@mail.ru,

Скворцов Александр Викторович
заместитель генерального директора по экономике и финансам, АО «Аврора Логистика», i@skvortsovav.ru

Решения о диверсификации источников, резервировании мощностей и обновлении флота одновременно определяют стоимость, устойчивость к сбоям и эмиссию метана, однако в литературе надёжность и выбросы обычно трактуются как независимые. Предложена модель ТРИЛОГ — трёхкритериальная задача смешанного целочисленного линейного программирования, где риск недопоставки измеряется условной стоимостью под риском, а метан учитывается сквозным образом по цепи. Модель конкретизирована для морских цепей поставок сжиженного газа как наиболее метаноёмкого звена и параметризована по корпусу из десяти открытых источников. Выявлена эндогенная связь: конфигурация максимальной надёжности превосходит стоимостной оптимум по эмиссии на 31,3 %, а метан-минимальная теряет почти семнадцать процентных пунктов хвостовой надёжности. Введён индикатор предельной метановой цены надёжности; на границе достижимого множества он в 16,7 раза выше, чем в области умеренной надёжности. Компромиссная конфигурация даёт сокращение выбросов на 8,2 % при удорожании на 2,8 %. Показано, что сбор на выбросы метана уже при 50 долл. за тонну эквивалента разрушает резервирование поставок, почти не снижая эмиссии.
Ключевые слова: низкоуглеродная логистика, выбросы метана, цепи поставок СПГ, многокритериальная оптимизация, условная стоимость под риском, надёжность поставок, энергетическая безопасность.

Введение

Метан отвечает почти за 30 процентов прироста глобальной средней температуры с доиндустриальной эпохи. Совокупная эмиссия ископаемого сектора достигла 124 млн т [2]. Около 70 процентов этих выбросов технически устранимы существующими средствами. Более 35 млн тонн с нулевыми чистыми издержками, стоимость улавливаемого газа превышает затраты на мероприятия [2, 10]. Тем не менее признаков устойчивого снижения не наблюдается.

Морская логистика углеводородов испытывает перестройку. По данным набора LNG-T3, построенного на сообщениях автоматической идентификационной системы судов, совокупный пройденный флотом путь после 2022 года вырос на 89,9 процента. Концентрация инфраструктуры остаётся высокой, на десять крупнейших экспортных и импортных терминалов приходится порядка 40 процентов мирового оборота [1]. Это делает систему уязвимой к точечным сбоям, включая перекрытие морских узких мест [7].

Регуляторная среда усиливает связь экологических и логистических решений. Регламент ЕС 2024/1787 вводит требования к метаноинтенсивности импортируемого газа [8]. Расчёты агентства показывают, что снижение интенсивности поставок до технологически достижимых 0,2 процента сократило бы глобальные выбросы более чем на 12 млн т метана, около 20 процентов эмиссии апстрима [2]. Средние интенсивности импортных корзин различаются заметно: порядка 1 процента для ЕС и Великобритании, 0,6 процента для Японии и Кореи, а также1,3 процента для Китая [2].

Центральная проблема работы состоит в следующем. Сложившийся корпус исследований рассматривает стоимость и выбросы попарно либо агрегирует их скалярной свёрткой с экзогенными весами. Неявно допуская независимость надёжности и эмиссии. Механизмы сопряжения прямые, резервирование источников требует контрактования дополнительных объёмов, физически поступающих от поставщиков с иной метаноинтенсивностью. Обход перекрытых коридоров удлиняет рейсы, увеличивая проскок метана и испарение груза. Если связь существует, то мероприятия по укреплению энергетической безопасности сами генерируют эмиссию. Оценки стоимости декарбонизации при фиксированной конфигурации поставок систематически смещены.

Цель работы построить модель, в которой указанная связь возникает эндогенно. Научная новизна складывается из элементов, формализация риска недопоставки через условную стоимость под риском вместо вероятностных метрик. Сквозной учёт метана с разделением стационарных и транспортных источников. Введение индикатора предельной метановой цены надёжности, позволяющего измерять экологическую стоимость мер энергетической безопасности и переводить её в денежную оценку. Эмпирически модель конкретизирована для морских цепей поставок сжиженного природного газа. Звена, где сходятся все три эмиссионных механизма.

Обзор литературы

Многокритериальная оптимизация цепей поставок углеводородов развивается по следующим слабо пересекающимся направлениям. Проектирование сетей при экологических ограничениях, где эмиссия вводится как дополнительная целевая функция. Доминируют модели с диоксидом углерода, а метан либо агрегируется в эквивалент, либо не выделяется. Устойчивость и управление рисками сбоев, где применяются сценарные постановки и робастная оптимизация. Экологический критерий в них, как правило, отсутствует. Инвентаризационные исследования выбросов метана на спутниковых наблюдениях и измерительных кампаниях [3, 5, 6, 12]. Они дают точные эмиссионные факторы, но не связывают их с решениями операторов.

Продвижение измерительной базы создаёт предпосылки для соединения направлений. Наблюдения аппарата Tanager-1 позволили идентифицировать около 200 устойчиво эмитирующих источников апстрима и мидстрима в 56 районах восемнадцати стран. Независимо от этого сопоставление спутниковых наблюдений по объектам показало, что нефтегазовые источники эмитируют примерно 15 процентов времени против 47 процентов у угольных. Носят перемежающийся характер, что принципиально для сценарного моделирования [2].

Открытие набора LNG-T3 в 2026 году впервые дало воспроизводимую основу для анализа морской логистики сжиженного газа. Инвентарь флота охватывает 406 танкеров, активных в исследуемом периоде [1]. Для 2023 года набор охватывает 91 процент официально зарегистрированного мирового оборота [1].

Таким образом, проблема состоит не в дефиците данных, а в отсутствии оптимизационной конструкции. Которая соединяла бы измерительные эмиссионные факторы с решениями о конфигурации цепи и учитывала хвостовые риски сбоев.

Модель ТРИЛОГ, формальная постановка

Обозначения сведены в таблице 1. Горизонт планирования — один год.

Переменные разделены на группы. Твёрдые объёмы задают базовую конфигурацию. Опционные объёмы представляют законтрактованную гибкость. Премия уплачивается независимо от сценария, физическая поставка и

связанные с нею выбросы возникают только при исполнении опциона. Бинарные переменные фиксируют активацию коридора с постоянными издержками контрактования и минимальной загрузкой. Структура разделяет стоимость готовности и стоимость фактического использования резерва, она позволяет надёжности и эмиссии взаимодействовать эндогенно.

Таблица 1
Множества, переменные и параметры модели

Обозначение	Смысл	Единица
i, k, m, s	экспортёр, рынок, класс флота, сценарий нарушения	—
x(i,k,m)	твёрдый законтрактованный объём	млн т СПГ/год
o(i,k,m)	законтрактованная опционная мощность	млн т СПГ/год
z(i,k,m,s)	исполненный опционный объём в сценарии s	млн т СПГ/год
y(i,k)	активация коридора, бинарная	0 или 1
u(k,s)	недопоставка на рынке k в сценарии s	млн т СПГ/год
v(s), ζ	вспомогательные переменные линеаризации CVaR	млн т СПГ/год
p(s)	вероятность сценария s	доля
a(i,k,s)	доля контракта, доставляемая в сценарии s	доля
D(k)	спрос рынка k	млн т СПГ/год
Cap(i)	экспортная мощность, доступная подсистеме	млн т СПГ/год
M(i,k)	пороговая константа, min(Cap(i); 1,15·D(k))	млн т СПГ/год
c(i,k,m)	удельные затраты доставки	долл./т СПГ
F(i,k)	постоянные издержки коридора	млн долл./год
φ, π	премия опциона; штраф дефицита	долл./т СПГ
θ(i), θs(i,k,m)	стационарная и транспортная метаноинтенсивность	т CH4 / т СПГ
q(i,k,m)	ожидаемая физическая поставка	млн т СПГ/год

Примечание. Метаноинтенсивности заданы как масса метана на единицу массы поставленного СПГ, пересчёт на содержание метана в грузе не требуется.

Критерий, ожидаемые полные затраты:

$$F1 = \Sigma\, c(i,k,m)\cdot x(i,k,m) + \Sigma\, \varphi\cdot o(i,k,m) + \Sigma\, p(s)\cdot\Sigma\, c(i,k,m)\cdot z(i,k,m,s) + \Sigma\, F(i,k)\cdot y(i,k) + \Sigma\, p(s)\cdot\Sigma\, \pi\cdot u(k,s) \quad (1)$$

Критерий, условная стоимость под риском недопоставки на уровне α = 0,95. Она характеризует ожидаемый размер дефицита в верхнем хвосте распределения потерь за пределами соответствующего квантиля [4]. Линеаризуется через вспомогательные переменные:

$$F2 = \zeta + 1/(1-\alpha)\cdot\Sigma\, p(s)\cdot v(s) \quad (2)$$

$$v(s) \geq \Sigma\, u(k,s) - \zeta,\quad v(s) \geq 0 \quad (3)$$

Выбор этой меры вместо вероятности бесперебойной поставки принципиален. Вероятностная метрика не различает сценарии с дефицитом в один процент спроса и в треть спроса. Экономический ущерб определяют тяжёлые редкие исходы. Для интерпретации вводится хвостовая надёжность:

$$R = (1 - F2 / \Sigma\, D(k))\cdot 100\ \% \quad (4)$$

Критерий, сквозная эмиссия метана в эквиваленте диоксида углерода:

$$F3 = GWP\cdot\Sigma\, [\theta(i) + \theta s(i,k,m)]\cdot q(i,k,m), \quad (5)$$

$$q(i,k,m) = x(i,k,m) + \Sigma\, p(s)\cdot z(i,k,m,s) \quad (6)$$

Стационарная составляющая объединяет апстрим, сбор, сжижение и регазификацию. Транспортная раскрывается как

$$\theta s = tl\cdot f(m)\cdot slip(m) + tr\cdot fv \quad (7)$$

где tl и tr - продолжительность гружёного рейса и полного оборота в сутках, f(m) - суточная доля груза, сжигаемая как топливный газ, slip(m) - проскок метана по типу двигателя и fv - суточная доля неорганизованных выбросов и сброса испарившегося газа. Разложение отражает измерительную реальность: проскок пропорционален сожжённому топливу и времени в пути, тогда как испарение продолжается и в балластном переходе [5].

Система ограничений имеет вид:

$$\Sigma\, [x(i,k,m) + o(i,k,m)] \leq Cap(i) \quad (8)$$

$$\Sigma\, [x(i,k,m) + o(i,k,m)] \leq M(i,k)\cdot y(i,k) \quad (9)$$

$$\Sigma\, x(i,k,m) \geq MinFlow\cdot y(i,k) \quad (10)$$

$$0 \leq z(i,k,m,s) \leq o(i,k,m) \quad (11)$$

$$\Sigma\, a(i,k,s)\cdot[x + z] + u(k,s) \geq D(k) \quad (12)$$

$$\Sigma\, a(i,k,s)\cdot[x + z] \leq 1{,}15\cdot D(k) \quad (13)$$

$$\Sigma\, p(s)\cdot\Sigma\, u(k,s) \leq (1 - SL)\cdot\Sigma\, D(k) \quad (14)$$

Ограничение (8) — баланс экспортных мощностей; (9) и (10) связывают активацию коридора с потоком и задают минимальную загрузку MinFlow = 3 млн т; (11) ограничивает исполнение опционов законтрактованной гибкостью; (12) — удовлетворение спроса со сценарной доступностью маршрута; (13) исключает валовое перепроизводство; (14) фиксирует ожидаемый уровень сервиса SL не ниже 99 % как эксплуатационное обязательство поставщика. Дополнительно x, o, z, u, v ≥ 0 и y(i,k) принимает значения 0 или 1. Размерность задачи — 617 переменных, из них 21 бинарная.

Фронт Парето строится методом ε-ограничений: минимизируется F1 при последовательном ужесточении верхних границ по F2 и F3 [11]. Полное решение целочисленной задачи в каждом узле сетки оказалось вычислительно неустойчивым, поэтому применена процедура «релаксация — фиксация — доразрешение»: решается линейная релаксация, бинарные переменные округляются, задача доразрешается при фиксированных y. Каждая полученная точка является допустимым решением исходной смешанной целочисленной задачи, а разность с оценкой линейной релаксации даёт доказанный зазор оптимальности.

Данные и параметризация

Параметризация опирается на корпус из десяти открытых наборов данных и на опубликованные эмпирические оценки из сопровождающих их рецензируемых статей.

Стационарные метаноинтенсивности заданы по опубликованному ранжированию: Норвегия демонстрирует наименьшую интенсивность апстрима, производители Ближнего Востока находятся ниже среднемирового уровня, показатели Алжира, Ливии и Ирана превышают катарские в три-пять раз, разрыв между лучшими и худшими странами превышает стократный [2]. Цены ФОБ отражают уровень 2024–2025 гг. и представляют оценки полных затрат в точке отгрузки, включая сжижение; они заданы как сценарные величины, а не котировки конкретных контрактов.

Таблица 2
Параметры экспортёров и структура поставок в опорных конфигурациях, млн т СПГ в год

Экспортёр	θ, %	ФОБ, долл./МБТЕ	Cap	A	B	C	D
США	0,85	8,5	115	52,2	113,1	115,0	74,7
Катар	0,25	4,5	95	95,0	92,1	74,5	95,0
Австралия	0,45	6,5	88	88,0	86,7	88,0	88,0
Россия	1,35	5,5	36	36,0	3,9	36,0	27,2
Алжир	1,00	6,0	16	16,0	3,0	16,0	16,0
Нигерия	1,60	6,8	18	18,0	0,0	18,0	3,2
Норвегия	0,10	7,5	10	10,0	10,0	10,0	10,0

Примечание. θ — стационарная метаноинтенсивность цепи по ранжированию [2]; Cap — экспортная мощность, доступная моделируемой подсистеме трёх рынков. A — стоимостной оптимум; B — метан-минимальная конфигурация; C — максимум надёжности; D — компромисс ТРИЛОГ.

Сценарии нарушений и их вероятности (таблица 3) заданы экспертно с опорой на частоты наблюдавшихся событий в морской логистике углеводородов за 2020–2025 гг. и не являются статистическими оценками; их устойчивость проверена отдельно.

Таблица 3
Сценарное пространство

Сценарий	p(s)	Затронутые направления и эффект
Базовый	0,58	все маршруты доступны полностью
Ормузский пролив	0,03	Катар — доступность 15 %
Суэц и Баб-эль-Мандеб	0,12	Катар в ЕС, Алжир и Нигерия в АТР — 85 %; США в АТР — 90 %
Панамский канал	0,10	США в АТР — доступность 80 %
Санкционное ужесточение	0,10	Россия в ЕС — 25 %; Россия в АТР — 70 %
Малаккский пролив	0,04	дальнемагистральные приходы в АТР — 90 %
Авария на заводе СПГ	0,03	Австралия — доступность 60 %

Технологические классы флота различаются проскоком метана: 3,0 % для четырёхтактных двигателей низкого давления и 0,3 % — медиана по объединённой выборке двухтактных [12]. Для двухтактных двигателей высокого давления принято 0,2 %, соответствующее середине измеренного для этого класса диапазона 0,1–0,5 %; значение ниже объединённой медианы, поскольку последняя включает и двухтактные двигатели низкого давления.

Согласованность параметризации проверена двумя независимыми способами. Во-первых, взвешенные по структуре поставок интенсивности импортных корзин, воспроизводимые моделью, сопоставлены с публикуемыми агентством: для Японии и Кореи расчёт даёт 0,69 % против 0,6 % [2]. Расхождения по Европейскому союзу и Китаю объясняются учётом в корзине агентства трубопроводного газа, интенсивность которого для китайских поставок из Центральной Азии существенно выше. Во-вторых, транспортный эмиссионный модуль прошёл внешнюю проверку на согласованность с прямым бортовым измерением полной эмиссии рейса США — Бельгия, охватившим погрузку, гружёный и балластный переходы и выгрузку [5]. Измеренная эмиссия метана составила 0,10 % доставленного объёма при среднем проскоке 3,8 %. Модельное значение для этого маршрута в конфигурации с преобладанием четырёхтактных двигателей составляет 0,101 %, то есть практически совпадает с опубликованной оценкой. Следует подчеркнуть, что согласие одного агрегированного показателя на одном маршруте не является валидацией многокритериальной модели в целом.

Потенциалы глобального потепления приняты по Шестому оценочному докладу МГЭИК: 29,8 для столетнего и 82,5 для двадцатилетнего горизонта применительно к метану ископаемого происхождения [9].

Результаты

Решено 670 узлов сетки ε-ограничений, из них 557 образуют недоминируемое множество. Все точки — допустимые решения исходной целочисленной задачи; медианный зазор оптимальности относительно оценки линейной релаксации составляет 0,59 %, девяностый процентиль — 1,05 %, максимум — 2,77 %.

Диапазоны критериев, по хвостовой надёжности от 80,00 до 97,53 процента, по метану от 67,14 до 103,00 млн т эквивалента в год. Значение 97,53 процента не является технологическим пределом отрасли. Это граница достижимого множества в рассматриваемой параметризации, определяемая заданными экспортными мощностями и сценарным пространством. Сопоставление крайних точек обнаруживает искомую связь. Максимизация надёжности повышает выбросы на 31,3 процента. Обратное направление выразительнее, минимизация метана снижает эмиссию до 67,14 млн т. Но обрушивает хвостовую надёжность с 96,94 до 80,00 процентов, почти на семнадцать процентных пунктов.

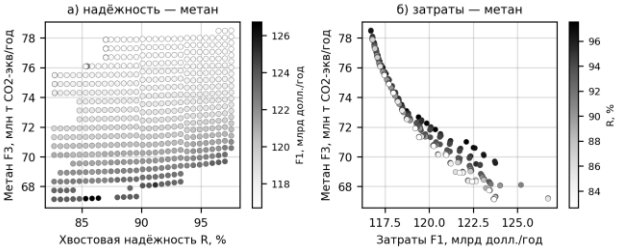


Рисунок 1 — Фронт Парето модели ТРИЛОГ в проекциях надёжность — метан и затраты — метан

Механизм связи раскрывается через структуру поставок, таблица 2. Метан-минимальная конфигурация полностью исключает Нигерию, обладающую наибольшей стационарной интенсивностью 1,60 %, и сокращает Россию и Алжир до минимальной загрузки коридора, замещая их американскими объёмами; индекс концентрации Херфиндаля — Хиршмана возрастает с 0,216 до 0,303, а число активных коридоров сокращается с двенадцати до девяти. В рамках рассматриваемого сценарного пространства такой рост концентрации сокращает диверсификацию источников и приводит к снижению хвостовой надёжности. Напротив, конфигурация максимальной надёжности удерживает все семь источников и двенадцать коридоров, но вынуждена задействовать высокоинтенсивные объёмы, что и порождает тридцатипроцентный прирост эмиссии.

Таблица 4
Опорные конфигурации цепи поставок

Показатель	A	B	C	D
Затраты F1, млрд долл. в год	116,70	127,05	147,78	120,01
Метан F3, млн т экв. в год	78,47	67,14	103,00	72,00
Мера риска F2, млн т	9,48	62,00	7,65	12,00
Хвостовая надёжность R, %	96,94	80,00	97,53	96,13
Индекс концентрации	0,216	0,303	0,223	0,238
Опционная мощность, млн т	65,0	138,7	21,5	75,6
Активных коридоров	12	9	12	14
Зазор оптимальности, %	0,42	0,70	0,00	1,06

Практически значима компромиссная конфигурация D, полученная наложением ограничений F2 не более 12 млн т и F3 не более 72 млн т эквивалента. Она обеспечивает сокращение выбросов на 8,2 % относительно стоимостного оптимума при удорожании на 2,8 % и потере надёжности на 0,81 процентного пункта; в абсолютном выражении это соответствует предотвращению около 0,217 млн т метана ежегодно. Достигается это не отказом от проблемных поставщиков, а перераспределением: доля Нигерии сокращается с 18,0 до 3,2 млн т, России — с 36,0 до 27,2 млн т, тогда как число активных коридоров возрастает до четырнадцати, что и удерживает надёжность.

Центральный аналитический инструмент модели — предельная метановая цена надёжности, определяемая как приращение метан-минимальной границы на единицу прироста хвостовой надёжности. Поскольку решения об активации коридоров дискретны, эта граница кусочно-постоянна со скачками (рисунок 2, а), и поточечная производная на мелкой сетке неустойчива. Поэтому индикатор рассчитывается как средняя по интервалу величина (рисунок 2, б).

Индикатор возрастает от 0,091 млн т эквивалента на процентный пункт в области умеренной надёжности до 1,525 на границе достижимого множества — в 16,7 раза. Рост не строго монотонен, на интервале от 95 до 97 процентов показатель временно снижается. Это отражает дискретную перестройку набора активных коридоров. Экономическая интерпретация существенна для регулирования, первые пятнадцать процентных пунктов хвостовой надёжности обеспечиваются при близкой к нулю предельной метановой цене. Последний неполный процентный пункт обходится на порядок дороже. В денежном выражении при цене эквивалента 80 долларов за тонну стоимость последнего интервала достигает 122 млн долларов на процентный пункт против 7,3 млн долларов в области умеренной надёжности. Это даёт количественное основание для калибровки нормативов резервирования. Требования, устанавливаемые вблизи границы достижимого множества, порождают непропорциональный экологический ущерб.

Анализ чувствительности к горизонту оценки потепления выявил порог переключения технологического класса флота. При столетнем потенциале переход на двухтактные двигатели высокого давления оправдан лишь при сборе около 233,6 доллара за тонну эквивалента. При двадцатилетнем горизонте порог снижается до 84,4 доллара. Различие в 2,8 раза означает, что выбор метрики эквивалентности непосредственно определяет инвестиционную привлекательность обновления флота.

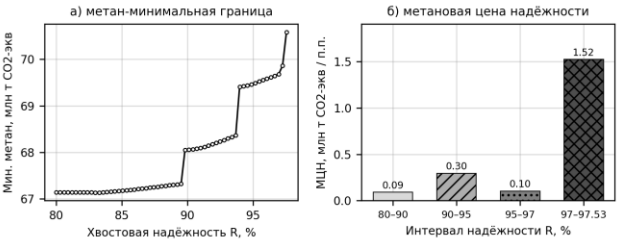


Рисунок 2 — Метан-минимальная граница и предельная метановая цена надёжности по интервалам

Развёртка по сбору за выбросы метана выполнена в диапазоне от 0 до 300 долларов за тонну эквивалента с шагом 25 долларов. Сбор включён в удельные затраты доставки и начисляется на всю сквозную эмиссию цепи, включая транспортную составляющую. Результат, рисунок 3, обнаруживает эффект, прямо относящийся к конструкции регулирования. Уже при ставке 50 долларов законтрактованная опционная мощность сокращается с 65,0 до 40,5 млн т. Хвостовая надёжность падает с 96,94 до 92,20 процентов, выбросы снижаются лишь с 78,47 до 78,24 млн т, то есть на 0,3 процента. В области низких ставок сбор оплачивается сокращением резервирования, а не сокращением эмиссии. Реальное снижение выбросов наступает при от 225 до 250 долларов, когда флот переключается на двигатели высокого давления и эмиссия падает до 76,21 млн т. Введение ограничения на меру риска устраняет побочный эффект. Надёжность удерживается на исходном уровне 96,94 процента, достигаемое сокращение выбросов практически эквивалентно 76,44 против 76,21 млн т.

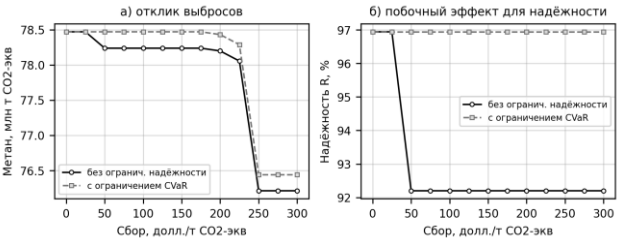


Рисунок 3 — Отклик выбросов и хвостовой надёжности на сбор за выбросы метана

Устойчивость выводов проверена относительно двух наиболее спорных групп параметров, см. таблицу 5. Сценарные вероятности масштабировались коэффициентами 0,5 и 1,5 с перенормировкой базового сценария; метаноинтенсивности экспортёров сжимались и растягивались в логарифмической шкале вокруг среднего геометрического теми же коэффициентами, что сохраняет положительность и меняет именно разброс, определяющий структуру решения.

Таблица 5
Чувствительность к сценарным вероятностям и разбросу метаноинтенсивностей

Возмущение	Метан-минимум, млн т экв.	R стоимостного оптимума, %	Нигерия исключена
Вероятности ×0,5	65,92	92,46	да
Базовый случай	67,14	96,94	да
Вероятности ×1,5	68,33	96,30	да
Разброс θ ×0,75	66,12	96,94	да
Разброс θ ×1,25	70,11	96,94	да

Качественная структура решения устойчива. Во всех пяти вариантах метан-минимальная конфигурация полностью исключает Нигерию и сокращает Россию до минимальной загрузки коридора, а направление связи «надёжность — метан» сохраняется. Наибольшую чувствительность проявляет надёжность стоимостного оптимума при уменьшении вероятностей нарушений вдвое: она снижается до 92,46 %, поскольку при менее вероятных сбоях оптимизация затрат приобретает меньше резервирования.

Обсуждение

Результаты позволяют пересмотреть допущение об аддитивности экологических и логистических целей. Эндогенная связь означает, что оценки затрат на декарбонизацию, выполненные при фиксированной конфигурации поставок, смещены. Они не учитывают, что мероприятия по повышению устойчивости самостоятельно генерируют эмиссию. Величина смещения в рассмотренной постановке достигает трети совокупных выбросов.

Индикатор предельной метановой цены надёжности пригоден для регуляторной практики после перевода в денежную шкалу умножением на цену эквивалента. Его выпуклость указывает на существование области, в которой энергетическая безопасность и климатические цели не конкурируют.

Результат по сбору за выбросы уточняет дискуссию о трансграничном углеродном регулировании. Инструмент, рассчитанный исключительно на ценовой сигнал, обладает протяжённой зоной. В которой он не снижает эмиссию, но разрушает резервирование поставок. Это аргумент в пользу сопряжённого регулирования, где метановое требование дополняется нормативом надёжности.

Ограничения. Модель параметризована по опубликованным агрегированным оценкам, а не по первичным микроданным. Матрица межстрановых потоков и сценарные вероятности заданы экспертно и воспроизводят опубликованные агрегаты. Точки фронта получены процедурой с фиксацией бинарных переменных и потому являются допустимыми, но в общем случае не строго оптимальными решениями; доказанный зазор приведён выше. Наиболее перспективное направление уточнения — замена экспертных сценарных вероятностей эмпирическими оценками из рейсовых записей, где каждому рейсу присвоена оценка достоверности подтверждения от 1 до 5 [1]. Далее, горизонт ограничен одним годом, что исключает динамику ввода мощностей; расширение до многопериодной постановки с инвестиционными решениями составляет естественное продолжение.

Заключение

Предложена модель ТРИЛОГ, объединяющая ожидаемые затраты, условную стоимость под риском недопоставки и сквозную эмиссию метана в единой оптимизационной конструкции, и приведена её полная формальная постановка.

Установлено, что надёжность поставок и выбросы метана связаны эндогенно: конфигурация максимальной надёжности превышает стоимостной оптимум по эмиссии на 31,3 %, а метан-минимальная теряет почти семнадцать процентных пунктов хвостовой надёжности. Введённый индикатор предельной метановой цены надёжности возрастает от 0,091 до 1,525 млн т эквивалента на процентный пункт при движении к границе достижимого множества. Устойчивость выводов подтверждена при возмущении сценарных вероятностей и разброса метаноинтенсивностей на ±50 и ±25 % соответственно.

Компромиссная конфигурация обеспечивает сокращение выбросов на 8,2 % при удорожании на 2,8 % и потере надёжности на 0,81 процентного пункта. Выявлен порог переключения технологического класса флота, различающийся в 2,8 раза в зависимости от горизонта оценки потепления. Показано, что сбор за выбросы метана в отсутствие сопряжённого требования к надёжности в области низких ставок сокращает резервирование поставок, практически не снижая эмиссии.

Литература

1. Zhou C., Ciais P., Mittakola R. T., Zhu B., Su Y., Xu Y. Global Marine LNG Terminals, Tankers & Trade: A High-Resolution AIS-Based Dataset of LNG Trade (2020–2024) // Scientific Data. 2026. Vol. 13. Art. 1153. DOI: 10.1038/s41597-026-07454-2.
2. International Energy Agency. Global Methane Tracker 2026. Paris: IEA, 2026. URL: https://www.iea.org/reports/global-methane-tracker-2026 (дата обращения: 10.09.2026).
3. Omara M., Gautam R., O'Brien M. A., Himmelberger A., Franco A., Meisenhelder K., Hauser G., Lyon D. R., Chulakadabba A., Miller C. C., Franklin J., Wofsy S. C., Hamburg S. P. Developing a spatially explicit global oil and gas infrastructure database for characterizing methane emission sources at high resolution // Earth System Science Data. 2023. Vol. 15. P. 3761–3790. DOI: 10.5194/essd-15-3761-2023.
4. Rockafellar R. T., Uryasev S. Optimization of Conditional Value-at-Risk // The Journal of Risk. 2000. Vol. 2, No. 3. P. 21–41. DOI: 10.21314/JOR.2000.038.
5. Balcombe P., Heggo D. A., Harrison M. Total Methane and CO2 Emissions from Liquefied Natural Gas Carrier Ships: The First Primary Measurements // Environmental Science & Technology. 2022. Vol. 56, No. 13. P. 9632–9640. DOI: 10.1021/acs.est.2c01383.
6. Howarth R. W. The greenhouse gas footprint of liquefied natural gas (LNG) exported from the United States // Energy Science & Engineering. 2024. Vol. 12, No. 11. P. 4843–4859. DOI: 10.1002/ese3.1934.
7. Pratson L. F. Assessing impacts to maritime shipping from marine chokepoint closures // Communications in Transportation Research. 2023. Vol. 3. Art. 100083. DOI: 10.1016/j.commtr.2022.100083.
8. Regulation (EU) 2024/1787 of the European Parliament and of the Council of 13 June 2024 on the reduction of methane emissions in the energy sector and amending Regulation (EU) 2019/942 // Official Journal of the European Union. 2024. OJ L, 2024/1787, 15.07.2024.
9. IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, B. Zhou (eds.). Cambridge, United Kingdom; New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2021. 2391 p. DOI: 10.1017/9781009157896.
10. Höglund-Isaksson L., Gómez-Sanabria A., Klimont Z., Rafaj P., Schöpp W. Technical potentials and costs for reducing global anthropogenic methane emissions in the 2050 timeframe – results from the GAINS model // Environmental Research Communications. 2020. Vol. 2. Art. 025004. DOI: 10.1088/2515-7620/ab7457.
11. Mavrotas G. Effective implementation of the ε-constraint method in multi-objective mathematical programming problems // Applied Mathematics and Computation. 2009. Vol. 213, No. 2. P. 455–465. DOI: 10.1016/j.amc.2009.03.037.
12. Grönholm T., Mäkelä T., Luoma K., Heikkilä M. Methane and carbon monoxide emissions originating from LNG-powered ships measured at a remote marine station // Marine Pollution Bulletin. 2026. Vol. 232. Art. 120039. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2026.120039.

Low-carbon oil and gas logistics: multi-objective optimization of cost, delivery reliability and methane emissions across the supply chain

Somov A.G., Zhukov V.V., Skvortsov A.V.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, JSC «Avrora Logistika»

JEL classification: C10, C50, C60, C61, C80, C87, C90

Decisions on supplier diversification, capacity reservation and fleet renewal jointly determine cost, disruption resilience and methane emissions, yet the literature normally treats reliability and emissions as independent. The paper proposes TRILOG, a tri-objective mixed-integer linear programme in which supply risk is quantified using the conditional value-at-risk (CVaR) of unmet demand, while methane is accounted for across the entire chain. The model is specified for maritime LNG supply chains as the most methane-intensive segment and parameterised on a corpus of ten open data sources. An endogenous coupling is identified: the maximum-reliability configuration exceeds the cost optimum in methane emissions by 31.3 %, while the methane-minimal configuration loses almost seventeen percentage points of tail reliability. A Marginal Methane Cost of Reliability (MMCR) indicator is introduced; at the boundary of the attainable set it is 16.7 times higher than in the moderate-reliability range. The compromise configuration delivers an 8.2 percent emission reduction at a 2.8 percent cost increase. A methane emissions charge expressed per tonne of CO2 equivalent is shown to erode supply redundancy already at 50 USD/t while barely reducing emissions.

Keywords: low-carbon logistics, methane emissions, LNG supply chains, multi-objective optimisation, conditional value-at-risk, supply reliability, energy security.

References

1. Zhou C., Ciais P., Mittakola R. T., Zhu B., Su Y., Xu Y. Global Marine LNG Terminals, Tankers & Trade: A High-Resolution AIS-Based Dataset of LNG Trade (2020–2024). Scientific Data. 2026;13:1153. DOI: 10.1038/s41597-026-07454-2.
2. International Energy Agency. Global Methane Tracker 2026. Paris: International Energy Agency; 2026. Available at: https://www.iea.org/reports/global-methane-tracker-2026 (accessed September 10, 2026).
3. Omara M., Gautam R., O'Brien M. A., Himmelberger A., Franco A., Meisenhelder K., Hauser G., Lyon D. R., Chulakadabba A., Miller C. C., Franklin J., Wofsy S. C., Hamburg S. P. Developing a spatially explicit global oil and gas infrastructure database for characterizing methane emission sources at high resolution. Earth System Science Data. 2023;15:3761–3790. DOI: 10.5194/essd-15-3761-2023.
4. Rockafellar R. T., Uryasev S. Optimization of Conditional Value-at-Risk. The Journal of Risk. 2000;2(3):21–41. DOI: 10.21314/JOR.2000.038.
5. Balcombe P., Heggo D. A., Harrison M. Total Methane and CO2 Emissions from Liquefied Natural Gas Carrier Ships: The First Primary Measurements. Environmental Science & Technology. 2022;56(13):9632–9640. DOI: 10.1021/acs.est.2c01383.
6. Howarth R. W. The greenhouse gas footprint of liquefied natural gas (LNG) exported from the United States. Energy Science & Engineering. 2024;12(11):4843–4859. DOI: 10.1002/ese3.1934.
7. Pratson L. F. Assessing impacts to maritime shipping from marine chokepoint closures. Communications in Transportation Research. 2023;3:100083. DOI: 10.1016/j.commtr.2022.100083.
8. European Parliament and Council of the European Union. Regulation (EU) 2024/1787 of the European Parliament and of the Council of 13 June 2024 on the reduction of methane emissions in the energy sector and amending Regulation (EU) 2019/942. Official Journal of the European Union. 2024;L, 2024/1787, 15 July 2024.