

Структурная дивергенция меди и палладия в условиях глобального энергоперехода: Фундаментальный анализ асимметричной long-short спред-стратегии

Павел Гусев*

Апрель 2026

¹TSFC GmbH

Аннотация

Настоящее исследование представляет фундаментальный анализ структурной дивергенции между рынками меди (Cu) и палладия (Pd) в контексте глобального энергоперехода и обосновывает долгосрочную асимметричную спред-стратегию: Long Copper / Short 0.5x Palladium. Опираясь на синтез данных из более чем 80 академических и отраслевых источников, исследование показывает, что два металла находятся на противоположных траекториях спроса: медь сталкивается со структурным дефицитом предложения на фоне четырёх одновременных векторов роста спроса (электрификация транспорта, инфраструктура ИИ, модернизация электросетей и оборона), тогда как палладий сталкивается с разрушением спроса вследствие замещения двигателей внутреннего сгорания электрическими силовыми установками. Мировой спрос на медь, согласно прогнозам, вырастет с 28 до 42 млн тонн к 2040 году (+50%), при прогнозируемом дефиците около 10 млн тонн (S&P Global, 2026). Спрос на палладий со стороны автокатализаторов (84–90% потребления) снижается темпом $-1,3\%$ CAGR и перейдёт к профициту к 2026 году (WPIC). Инверсия отношения Cu/Pd около 2020 года идентифицирована как маркер технологического перехода. Стратегия с соотношением 2:1 обоснована различной волатильностью двух активов и необходимостью ограничения хвостовых рисков по палладиевой ноге. Стресс-тестирование по пяти сценариям, с учётом расходов на ставку финансирования, подтверждает положительное математическое ожидание (+19% за 2–3 года) и выраженную положительную асимметрию: в бычьем сценарии суперцикла доходность достигает +30–83%, тогда как убытки в худшем сценарии ограничены коэффициентом 0.5x по короткой ноге. Стратегия позволяет открыть позицию у истоков структурного мегатренда с многократным потенциалом роста при контролируемом риске снижения.

Ключевые слова: медь, палладий, энергопереход, парный трейдинг, спред-стратегия, электрификация, структурный дефицит, разрушение спроса, дата-центры, электромобили.

Содержание

1	Введение	4
1.1	Постановка проблемы и актуальность	4
1.2	Цели и рамки исследования	5
1.3	Методология и источники данных	5

*tsfc.io, contact@tsfc.io

2	Фундаментальный анализ рынка меди: структурный бычий тезис	6
2.1	Архитектура спроса: четыре вектора роста	6
2.2	Медь и инфраструктура ИИ: парадокс энергетического узкого места	8
2.3	Неэластичность предложения: гипотеза 17-летнего лага	9
2.4	Кризис плавильных мощностей: китайский фактор и фрагментация цепочек поставок	10
2.5	Потолок вторичной переработки и ловушка «городского майнинга»	12
2.6	Пределы замещения алюминием: «твёрдое ядро» незамещаемого спроса	13
2.7	Ценовая эластичность спроса и пороги разрушения	14
3	Фундаментальный анализ рынка палладия: структурный медвежий тезис	16
3.1	Структура спроса: доминирование автокатализаторов	16
3.2	Влияние электрификации автопарка на спрос	17
3.3	Парадокс PHEV/HEV: контрициклический буфер спроса	18
3.4	Динамика предложения: коллапс в Северной Америке и геополитические риски	18
3.5	Издержки производства и ценовой пол палладия	19
3.6	Запасы палладия и инвестиционный спрос	20
3.7	Корреляция Cu/Pd в кризисных условиях	20
3.8	Прогноз баланса рынка палладия до 2030 года	21
4	Историческая динамика спреда Cu/Pd	22
4.1	Четыре структурных режима отношения Cu/Pd (2012–2026)	22
4.2	Инверсия спреда 2020 года как маркер технологического перехода	23
4.3	Степень дисконтирования «смерти ДВС» в текущих ценах палладия	24
4.4	Ретроспективная симуляция стратегии (2012–2026)	25
5	Построение синтетической спред-позиции	25
5.1	Механика стратегии: Long Cu / Short 0.5x Pd	25
5.2	Обоснование асимметричного соотношения (2:1)	26
5.3	Роль ставок финансирования и практика хеджирования через DeFi-деривативы	26
5.4	Инструменты реализации: CME, LME, HyperLiquid	27
6	Стресс-тестирование и сценарный анализ	28
6.1	Базовый сценарий: постепенная электрификация (вероятность: 40–50%) . . .	28
6.2	Бычий сценарий по меди: сквиз + суперцикл (вероятность: 20–25%)	29
6.3	Медвежий сценарий по палладию: ускоренное внедрение BEV (вероятность: 10–15%)	30
6.4	Рисковый сценарий: геополитический шок по палладию (вероятность: 5–10%)	30
6.5	Рисковый сценарий: рецессия и разворот спекулятивного капитала (вероятность: 10–15%)	30
7	Факторы риска и ограничения стратегии	32
7.1	Риски бычьего тезиса по меди	32
7.2	Риски медвежьего тезиса по палладию	33
7.3	Корреляционные и макроэкономические риски	33
7.4	Регуляторные и инфраструктурные риски	33
8	Ограничения исследования	33
9	Заключение	34
	Список литературы	36

А	Матрица замещения меди алюминием по секторам	39
В	Консенсус-прогнозы цены меди (2026–2035)	39
С	Ключевые параметры рынка палладия	39

1 Введение

1.1 Постановка проблемы и актуальность

Мировая экономика вступила в фазу фундаментальной трансформации своей энергетической и транспортной инфраструктуры, масштаб которой не имеет прецедентов со времён электрификации начала XX века. Три одновременных мегатренда — декарбонизация энергетики, цифровизация (включая взрывной рост инфраструктуры искусственного интеллекта) и реиндустриализация оборонного сектора — создают беспрецедентное давление на рынки промышленных металлов, фундаментально перестраивая архитектуру глобального спроса и предложения.

В центре этой трансформации находятся два металла, чьи траектории стремительно расходятся: медь и палладий. Медь — ключевой проводник электрической энергии и тепла — становится критическим ресурсом для каждого элемента «зелёного перехода»: от электромобилей (которые потребляют примерно в 3,6 раза больше меди, чем автомобили с ДВС) до дата-центров ИИ (с интенсивностью 30–47 тонн меди на МВт мощности) и модернизации электросетей (требующей удвоения протяжённости линий электропередачи к 2040 году). Палладий, напротив, привязан к технологии, обречённой на сокращение: 84–90% мирового потребления палладия приходится на автокатализаторы для двигателей внутреннего сгорания — рынок, который неуклонно сжимается по мере электрификации автопарка.

Актуальность исследования определяется несколькими факторами.

Во-первых, масштаб прогнозируемого дефицита меди беспрецедентен. S&P Global в отчёте «Copper in the Age of AI» (январь 2026) оценивает мировой спрос к 2040 году в 42 млн тонн против максимального объёма первичного производства в 33 млн тонн (пик в 2030 году) и потолка вторичной переработки около 10 млн тонн — что даёт дефицит порядка 10 млн тонн, или 24% прогнозируемого спроса. Wood Mackenzie (2025) прогнозирует рост спроса на +24% к 2035 году до 42,7 млн тонн, что требует ввода более 8 млн тонн новых мощностей, которых пока не существует. Мичиганский университет (Simon et al., 2025) демонстрирует, что для стимулирования освоения новых месторождений цена меди должна как минимум удвоиться до 26 000 USD/t, при среднем сроке ввода (лага) от открытия до первого производства в 17,9 года (S&P Global, 2024) [23].

Во-вторых, рынок палладия переживает структурный перелом. После 13 лет подряд дефицита предложения (2012–2024, Johnson Matthey) палладий перешёл к профицитному балансу: WPIC прогнозирует рост профицита до 689 000 унций к 2029 году. Средняя цена палладия упала на 61% от среднегодового пика 2021 года (\$2,398/oz) до среднегодового минимума в \$924/oz в 2024 году. К марту 2026 года цена восстановилась до 1 366 USD/oz (–43% от пика), однако остаётся значительно ниже уровней 2019–2021 годов. Темпы разрушения спроса систематически переоцениваются: потребление палладия в автокатализаторах снижается темпом лишь –1,3% CAGR (WPIC), а не обваливается, как предполагали бы нарративы мгновенного вытеснения ДВС электромобилями.

В-третьих, инверсия отношения Cu/Pd, произошедшая около 2020 года (совпав с началом массовых продаж электромобилей), представляет собой рыночный сигнал, отражающий глубокий технологический сдвиг. Отношение выросло с исторического минимума 2,2х (февраль 2020 года, пик дефицита палладия) до среднего значения 9,3х (2024–2025), сигнализируя о переходе от «палладиевой премии каталитических нейтрализаторов» к «медной премии электрификации».

Эта конъюнктура создаёт возможность для построения асимметричной спред-стратегии, которая эксплуатирует расходящиеся фундаментальные тренды двух металлов. Настоящее исследование обосновывает такую стратегию, систематически анализируя каждое звено причинно-следственной цепочки и подвергая его стресс-тестированию.

1.2 Цели и рамки исследования

Цель исследования — провести комплексный фундаментальный анализ структурной дивергенции между рынками меди и палладия и обосновать параметры долгосрочной асимметричной спред-стратегии: Long Copper / Short 0.5x Palladium.

Задачи исследования:

1. Декомпозировать спрос на медь по четырём ключевым векторам (базовый экономический, энергопереход, ИИ/дата-центры, оборона) с количественными оценками по каждому вектору до 2040 года.
2. Оценить структурные ограничения со стороны предложения меди: неэластичность первичного производства (17-летний лаг), кризис плавильных мощностей, потолок вторичной переработки и пределы замещения алюминием.
3. Декомпозировать спрос на палладий, выделив автомобильный сегмент и проанализировав темпы замещения ДВС электрическими силовыми установками.
4. Проанализировать историческую динамику спреда Cu/Pd, выявить структурные режимы и оценить степень, в которой рынок дисконтировал «сценарий электрификации».
5. Обосновать параметры синтетической позиции (соотношение 2:1, инструменты реализации, управление ставкой финансирования).
6. Провести стресс-тестирование стратегии по пяти сценариям: базовый, бычий по меди, медвежий по палладию, геополитический шок и рецессионный.
7. Систематизировать факторы риска и определить условия инвалидации тезиса.

1.3 Методология и источники данных

Исследование основано на многоуровневой методологии фундаментального анализа, включающей элементы сценарного моделирования и стресс-тестирования. Применяются следующие аналитические подходы.

Анализ физического баланса рынка (баланс спроса и предложения) — агрегирование прогнозов производства, переработки, потребления и запасов из отраслевых источников (ICSG, S&P Global, Wood Mackenzie, WPIC, Johnson Matthey) с перекрёстной верификацией.

Эконометрические оценки эластичности — использование результатов академических исследований ценовой эластичности предложения и спроса на медь (IMF Working Paper, 2024; Ferdi/CERDI, 2025; Stuermer, 2022) и вторичного предложения (Fu, Ueland & Olivetti, 2017) [8, 9, 25].

Вероятностный анализ материальных потоков — включение результатов динамического моделирования вторичных потоков меди (Born & Ciftci, 2024 — 30 000 сценариев; Diersen, Bhuwalka & Olivetti, 2025 — экономическая модель с ценовой обратной связью) [1, 5].

Технологический аудит — оценка уровня технологической готовности (TRL) прорывных технологий извлечения (биовыщелачивание Nuton/SandLix, каталитическое выщелачивание Jetti, подземное выщелачивание ISR Florence Copper) и их потенциального вклада в предложение.

Инженерный анализ замещения — посекторная оценка физических пределов замещения меди алюминием с учётом электропроводности, теплопроводности, объёмных ограничений и регуляторных барьеров.

Сценарное стресс-тестирование — моделирование поведения спред-позиции в экстремальных рыночных условиях с использованием исторических аналогов (никелевый сквиз 2022 года, манипуляция Sumitomo 1996 года).

Источники данных охватывают четыре категории:

- Академические публикации: SEG Discovery (Мичиганский университет), Resources, Conservation and Recycling (Born & Ciftci; Fu et al.), AIChE Journal (Diersen et al.), Nature Scientific Reports (Safarzynska et al.), Science Advances (Crane et al.), PLoS ONE (Ni et al.), MDPI Energies (Sheng et al.), World Bank Working Papers.
- Отраслевые аналитические отчёты: S&P Global «Copper in the Age of AI» (2026), Johnson Matthey PGM Market Report (2025), Wood Mackenzie, IEA Electricity 2026, ICSG Market Balance Forecasts.
- Исследования инвестиционных банков: Goldman Sachs, J.P. Morgan, Bank of America, UBS, Citi, Deutsche Bank, StoneX.
- Корпоративные данные и отчётность: Rio Tinto (Nuton), Anglo American (SandLix), BHP, Ivanhoe Mines, Codelco, Nor Nickel, Sibanye-Stillwater.

2 Фундаментальный анализ рынка меди: структурный бычий тезис

2.1 Архитектура спроса: четыре вектора роста

Мировой спрос на медь в 2025 году оценивается примерно в 28 млн тонн рафинированного металла. S&P Global в отчёте «Copper in the Age of AI» (январь 2026) прогнозирует рост до 42 млн тонн к 2040 году — увеличение на 50% за 15 лет, обусловленное четырьмя структурно независимыми векторами [35].

Таблица 1: Декомпозиция мирового спроса на медь по векторам роста

Вектор спроса	2025 (Мт)	2040 (Мт)	CAGR	Доля в 2040
Базовый экономический (строительство, промышленность, транспорт)	18.0	23.0	1.6%	53%
Энергопереход (EV, ВИЭ, электросети T&D)	8.5	15.6	4.1%	36%
ИИ и дата-центры	1.1	2.5	5.6%	6%
Оборона и робототехника	0.4	1.5	9.2%	4%
Итого	28.0	42.6*	2.8%	100%

*Примечание: S&P Global использует округлённую оценку ~42 Мт; сумма подкатегорий (42.6 Мт) отражает более детальную декомпозицию с перекрытием между секторами.

Источник: S&P Global, «Copper in the Age of AI», январь 2026 [35].

Вектор 1: Базовый экономический спрос составляет фундамент потребления и растёт темпом, близким к росту мирового ВВП (+1,6% CAGR). Строительство, бытовая техника, промышленное оборудование и традиционный транспорт остаются крупнейшими потребителями. К 2040 году этот сегмент достигнет 23 млн тонн — сам по себе превышая текущий уровень совокупного мирового спроса.

Вектор 2: Энергопереход — крупнейший по абсолютному приросту (+7,1 млн тонн). Он включает три подсегмента:

- Электромобили и зарядная инфраструктура: рост с 2,6 до 6,3 млн тонн в год. Электромобиль содержит примерно 83 кг меди — в 3,6 раза больше, чем автомобиль с ДВС (~23 кг) (ICA / Copper Alliance, средние значения для среднеразмерного легкового автомобиля). При прогнозируемом мировом парке электромобилей, превышающем 500 млн единиц к 2040 году, это становится доминирующим подсегментом.

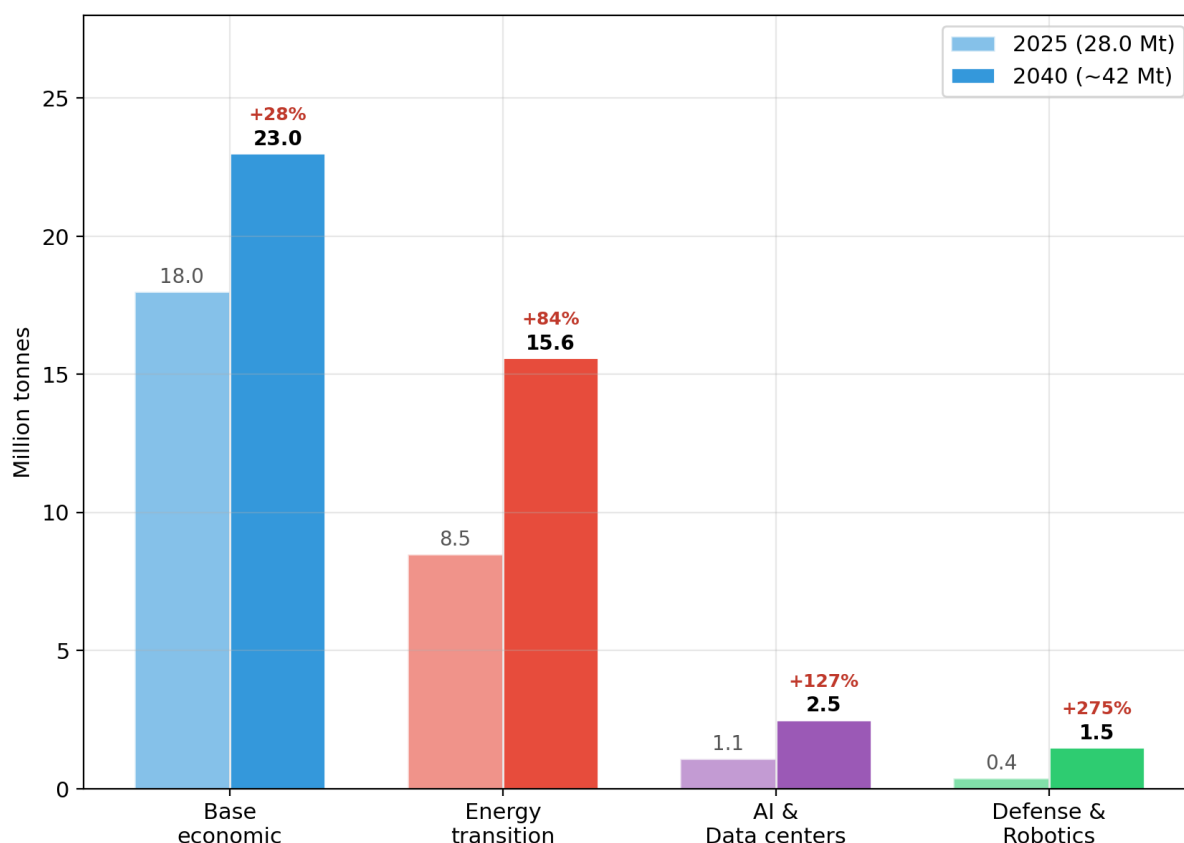


Рис. 1: Декомпозиция мирового спроса на медь по векторам роста

- Передача и распределение электроэнергии (T&D): удвоение спроса с примерно 3,5 до 7,1 млн тонн в год. По данным IEA, к 2040 году мир должен добавить или модернизировать 80 млн км электросетей — эквивалент всей существующей мировой системы передачи. Интенсивность потребления меди: 19 500 кг/км для магистральных линий, 3 700 кг/км для распределительных линий. Совокупные инвестиции в T&D должны достичь \$7,5 трлн к 2040 году (S&P Global).
- Возобновляемая энергетика: солнечная генерация ~1,1 Мт, ветровая ~0,4 Мт, системы аккумулирования ~0,5 Мт к 2040 году.

Вектор 3: ИИ и дата-центры — самый быстрорастущий сегмент по CAGR (+5,6%), с потенциалом ускорения. S&P Global прогнозирует рост потребления электроэнергии дата-центрами с 860 ТВт·ч (2025) до 1 587 ТВт·ч (2030). Медеемкость дата-центров составляет 30–47 тонн на МВт установленной мощности (для тренировочных кластеров ИИ) — в 7–12 раз больше, чем для традиционной генерации. Morgan Stanley оценивает совокупный спрос со стороны новых дата-центров в 740 000 тонн только в 2026 году. Критически важно, что этот спрос неэластичен по цене: стоимость меди составляет 2–4% от совокупного капекса дата-центра (примерно \$115 млн против инвестиций в \$3–5 млрд, S&P Global), и застройщики «используют её без учёта цены» (Wood Mackenzie) [37].

Вектор 4: Оборона и робототехника — новый вектор, ранее не выделявшийся в отраслевых прогнозах. S&P Global прогнозирует рост военного потребления примерно в 3,8 раза к 2040 году (с 0,4 до 1,5 Мт). Потенциальный дополнительный подвектор — человекоподобные роботы: S&P Global оценивает потребление в 1,6 Мт/год при масштабировании до 1 млрд единиц; однако этот сценарий спекулятивен и не включён в базовый прогноз 42 Мт — он представляет потенциал роста за горизонтом 2040 года.

Критической особенностью текущей архитектуры спроса является независимость векторов. В отличие от суперцикла 2000-х годов, где рост потребления определялся единственным фактором (китайская урбанизация), текущий цикл опирается на четыре структурно различных драйвера, каждый из которых подкреплён государственными обязательствами и долгосрочными инфраструктурными программами. Утрата одного вектора (например, замедление инвестиций в ИИ) не устраняет давления со стороны остальных трёх.

2.2 Медь и инфраструктура ИИ: парадокс энергетического узкого места

Взрывной рост инфраструктуры искусственного интеллекта создаёт парадоксальную ситуацию для рынка меди. С одной стороны, 30–50% дата-центров, запланированных к вводу в 2026 году, рискуют быть отложенными из-за ограничений энергоснабжения (Sightline Climate). С другой стороны, каждое решение проблемы энергодефицита — будь то модернизация сети, строительство генерирующих мощностей за счётчиком (behind-the-meter) или расширение ВИЭ — требует ещё больше меди.

Десинхронизация строительных циклов. Строительство дата-центра занимает 1,5–3 года; однако подключение к сети может растянуться до 4–7 лет (Bloomberg). В Северной Вирджинии — крупнейшем в мире рынке дата-центров — Dominion Energy увеличила сроки подключения объектов мощностью свыше 100 МВт до 7 лет. Очереди на присоединение в PJM (крупнейший сетевой оператор США) превышают 60 ГВт при среднем сроке ожидания 4+ года (GridLab). В Калифорнии ожидание достигает 9 лет (Introl).

Таблица 2: Сроки строительства генерирующих мощностей

Технология	Срок строительства	Текущие задержки
Солнечная генерация	1.2–2 года	Минимальные
Газовая генерация (BТМ)	1.5–3 года	Дефицит турбин до 2028–2029
Газовая генерация (сетевых масштаба)	3–7 лет	Время ожидания >5 лет
Наземная ветрогенерация	2–3.5 года	Очереди на присоединение
SMR (малые модульные реакторы)	5–8 лет (оптимистично)	Первые коммерческие блоки не ранее 2030
Крупные АЭС (Gen III+)	10–18 лет	Vogtle: \$32 млрд, задержка 7 лет

Источники: SEIA, Reuters, SemiAnalysis, Utility Dive, Introl, CSIS.

Парадокс воздействия на спрос на медь. Энергетическое узкое место оказывает двуправленное влияние.

Замедляющий эффект: отложенное строительство дата-центров снижает прямой спрос на медь (~30–47 т/МВт). По данным Precedence Research, в сценарии «встречного ветра» спрос дата-центров ограничивается 700 ТВт·ч к 2035 году вместо базовых 945 ТВт·ч, что эквивалентно недобору примерно 0,5–1 млн тонн.

Усиливающий эффект: осознание узкого места ускоряет инвестиции в модернизацию T&D — крупнейшего потребителя меди. Спрос на медь со стороны T&D удваивается до 7,1 Мт/год. Переход к генерации за счётчиком требует дополнительной медной инфраструктуры.

Парадоксальный вывод: энергетическое узкое место, по всей вероятности, не снижает, а увеличивает совокупный спрос на медь. Как отметил для Reuters аналитик CRU: «Электросеть является узким местом не только для дата-центров, но и для ветровой, солнечной энергетики и электромобилей». Медь — не «жертва» энергетического узкого места, а его «разрешитель»: каждое решение проблемы (больше сетей, больше генерации, больше накопителей) требует ещё больше меди, создавая самоусиливающийся цикл спроса.

Таблица 3: Количественная оценка парадокса (2040)

Компонент	Спрос при полной реализации (Мт)	Спрос при энергетическом узком месте	Разница
Дата-центры (прямой)	2.5	1.7–2.0	–0.5 ... –0.8
Модернизация T&D	7.1	7.5–8.0 (ускорение)	+0.4 ... +0.9
ВИЭ (генерация для ДЦ)	вкл. в энергопереход	+0.2–0.5 (ВТМ)	+0.2 ... +0.5
Газовая генерация (ВТМ)	вкл. в базовый	+0.1–0.3	+0.1 ... +0.3
Чистый эффект			+0.2 ... +0.9

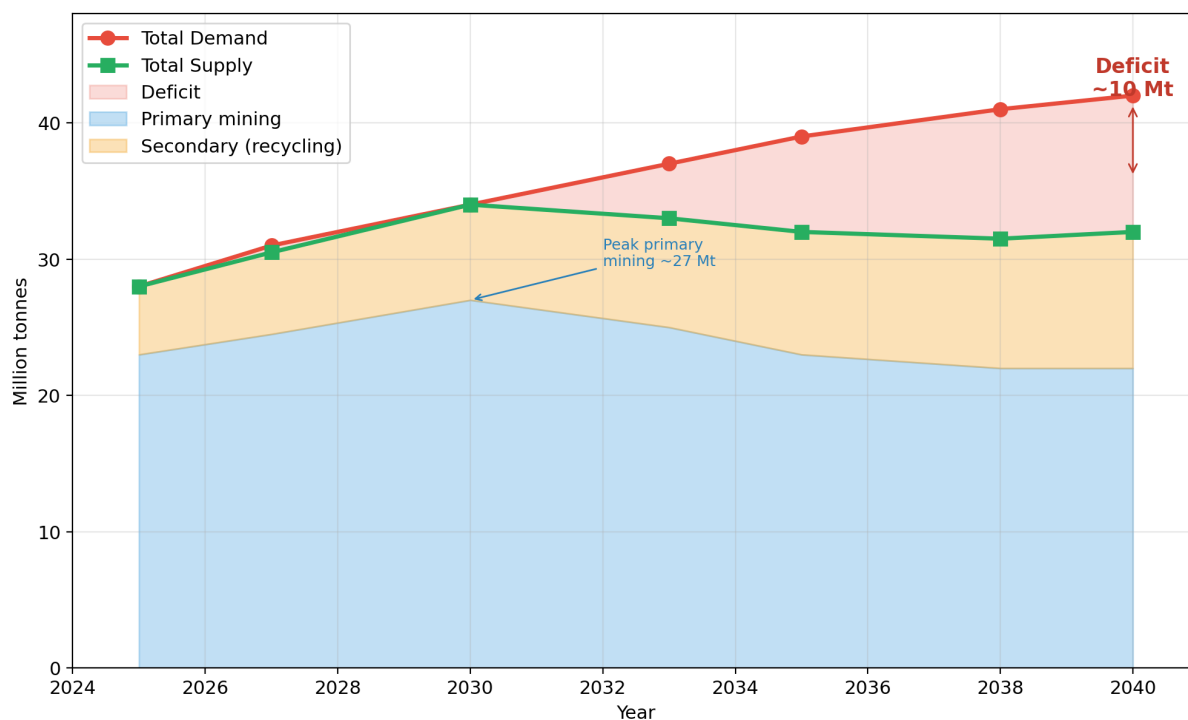


Рис. 2: Прогнозируемый разрыв спроса и предложения меди (2025–2040)

2.3 Неэластичность предложения: гипотеза 17-летнего лага

Центральный тезис со стороны предложения состоит в том, что даже двукратный рост цены меди неспособен спровоцировать быстрый приток нового физического металла на рынок. Средний срок ввода (лаг) от открытия месторождения до начала коммерческого производства составляет 17,9 года в мировом масштабе (S&P Global / MiningVisuals, декабрь 2024), достигая 29 лет в США и 34 лет в Замбии [36].

Ценовой порог для стимулирования производства. Исследование Мичиганского университета (Simon et al., опубликовано в SEG Discovery, май 2025) демонстрирует, что текущая цена меди (примерно 13 000 USD/t, март 2026) недостаточна для запуска нового горнодобывающего мегацикла. Цена должна как минимум удвоиться — до примерно 26 000 USD/t — чтобы обеспечить экономическую жизнеспособность новых проектов. Средняя стоимость строительства нового рудника составляет \$22,359 на тонну годовой мощности (на основе 26 проектов с планируемым запуском к 2030 году). Чтобы удовлетворить только базовый экономический рост (BAU) к 2050 году, необходимо ввести 78 новых крупных рудников мощностью 500 000 т/год каждый — тогда как исторически отрасль вводит лишь 2–3 крупных рудника за десятилетие [23].

Деградация содержания металла в руде усугубляет проблему. Среднее содержание меди

Таблица 4: Сроки ввода новых месторождений по юрисдикциям

Страна/регион	Средний лаг (лет)	Ключевой фактор задержки
Замбия	34	Инфраструктурные ограничения, энергокризис
США	29	Регуляторная среда (NEPA), судебные тяжбы
Мировое среднее	17.9	Комбинация факторов
Чили	~16	Дефицит воды, социальные протесты
ДРК	~10	Геополитические риски, ускоренное лицензирование

Источник: S&P Global, World Bank (база данных открытий 1950–2014).

в руде снизилось примерно на 40% с 1991 года: с ~1,0% до ~0,52% Cu (S&P Global MI). В Чили (крупнейший производитель) содержание упало с 1,02% (2000) до 0,66% (2022) — снижение на 35% (Codelco). При снижении содержания с 1% до 0,65% требуется переработать примерно на 54% больше горной массы для получения того же объёма металла, что влечёт пропорциональный рост энергопотребления, водопользования и операционных издержек [17, 18].

Эластичность предложения. Академические исследования документируют существенно более высокую ценовую эластичность на уровне отдельного рудника, чем предполагали бы агрегированные модели. Ferdi/CERDI (2025), применяя SVAR + Local Projections к данным по 195 рудникам в 43 странах (2000–2019), обнаружили эластичность около 50% в среднем и до 157% на горизонте $h = 5$ лет [8]. Однако эта эластичность действует преимущественно на интенсивной марже (существующие рудники наращивают выпуск), а не на экстенсивной марже (ввод новых рудников). Stuermer (2022), используя агрегированные данные за 1880–2020 годы, оценивает эластичность в +5% на каждые +10% роста цены — значительно более скромно [25].

Агрегированная оценка предложения (2026–2030). Расширения brownfield (Oyu Tolgoi, Камоа-Kakula, Quellaveco, Escondida) дадут примерно 1,2–1,8 млн тонн инкрементального прироста к пику 2028–2030 годов. Прорывные технологии (биовыщелачивание Nuton TRL 7, ISR Florence Copper TRL 8, каталитическое выщелачивание Jetti TRL 7) — в совокупности 200–1 150 тыс. т. ИИ-оптимизация действующих операций — 150–600 тыс. т. С учётом мобилизации вторичного сырья суммарный потенциал составляет 1 500–4 050 тыс. т, покрывая лишь 13–40% совокупного дефицита 2026–2030 годов.

2.4 Кризис плавильных мощностей: китайский фактор и фрагментация цепочек поставок

Преобладающий публичный нарратив медного кризиса фокусируется на «дефиците руды»; однако более точный диагноз указывает на критическую концентрацию плавильных мощностей в Китае как ключевой системный риск.

Масштаб концентрации. Китай контролирует 47,2% мировых плавильных мощностей (10,05 млн тонн из 21,3 млн тонн мирового производства). С 2005 года на Китай приходится >90% мирового прироста плавильных мощностей (IEA). Совокупные мощности электролитического рафинирования в Китае достигли 14,22 млн тонн/год (октябрь 2025), 70% которых контролируется группой CSPT (16 крупнейших компаний) [31].

Коллапс TC/RC как системный индикатор. Плата за переработку/рафинирование (TC/RC, Treatment/Refining Charges) представляет собой плату, которую горнодобывающая компания вносит плавильному заводу за переработку медного концентрата (~25–35% Cu) в рафинированную катодную медь (99,99% Cu). Это стандартная модель отрасли: горняк производит полуфабрикат (концентрат), не имеющий прямого рынка, и платит за услугу его преобразования в биржевой товар. На здоровом рынке TC/RC положительны и обеспечива-

ют маржу плавильщика. Когда TC/RC отрицательны, экономика инвертируется: плавильщик платит горняку за право получить сырьё, чтобы загрузить простаивающие мощности и заработать на побочных продуктах (серная кислота, золото, серебро).

TC/RC продемонстрировали беспрецедентное снижение:

Период	TC/RC (\$/т)	Комментарий
2023	~\$80	Стабильный рынок
Начало 2024	~\$45	Начало дефицита после закрытия Cobre Panama
Январь 2025	–\$49	Исторический рекорд — плавильщики платят горнякам
Бенчмарк 2026	\$0	Беспрецедентно: соглашение Antofagasta-CSPT — нулевая плата за переработку

Отрицательные TC/RC означают инверсию экономики переработки: плавильщики платят горнодобывающим компаниям за право переработать концентрат. Этот парадокс объясняется не абсолютным дефицитом руды, а тем, что было построено слишком много плавильных мощностей: мощности выросли на 30–40% за пять лет, тогда как предложение концентрата увеличилось лишь на 15–20%.

Стратификация по размеру предприятий (SMM, сентябрь 2025) обнажает глубину кризиса: крупные заводы работают с загрузкой 88%, средние — 79%, малые — 60%. Малые предприятия, работающие с загрузкой 60%, являются генераторами избыточного спроса на концентрат — они готовы закупать сырьё при отрицательных TC/RC, создавая «ценовой шум» на спот-рынке.

Механизм выживания: побочные продукты. Несмотря на отрицательные TC/RC, массовых закрытий заводов не произошло. Причина — беспрецедентный рост доходов от побочных продуктов: цены на серную кислоту подскочили примерно на 500% за 2,5 года, достигнув 1 045 юаней (\$145)/т в январе 2025 года. Совокупный эффект для китайских плавильщиков оценивается в \$1,5 млрд дополнительной прибыли в 2024 году. Серная кислота стала обеспечивать более 64% дохода от побочных продуктов (против исторического среднего в 27%).

Фрагментация цепочек поставок. Параллельно с плавильным кризисом разворачивается фрагментация глобальных торговых потоков:

- Ресурсный национализм: Индонезия ввела полный запрет на экспорт медного концентрата (с 2023 года); ДРК — запрет на экспорт кобальта плюс требование 40–60% локальной переработки; Армения — экспортные пошлины.
- Тарифная война: 50%-й тариф США на медную продукцию (Section 232, июль 2025) создал рекордную премию COMEX над LME в \$2,520/т (30%), сформировав де-факто двухконтурную систему ценообразования.
- Концентрат как оспариваемый актив: чилийский и перуанский концентрат (в совокупности ~67% китайского импорта) становится предметом конкуренции между США и Китаем.

Кризисные сценарии (горизонт 5 лет):

Замечание о расхождении прогнозов баланса 2026 года. Ключевые источники радикально расходятся в оценках баланса рынка рафинированной меди в 2026 году: J.P. Morgan прогнозирует дефицит –330 тыс. т, ICSG — дефицит –150 тыс. т, а Goldman Sachs — профицит +160 тыс. т. Разница между крайними оценками составляет около 490 тыс. т. Расхождение объясняется различными допущениями относительно китайского спроса (GS оценивает его в –8% г/г в 4-м кв. 2025, JPM — как устойчивый) и трактовкой эффекта тарифа Section 232 (GS включает обратные потоки запасов из США, JPM — нет). Настоящее исследование принимает консенсусный средний прогноз — умеренный дефицит около 100–200 тыс. т в

Сценарий	Вероятность	Влияние на цену
Каскадный ресурсный национализм	80–90% (в процессе)	+20–40%
Фрагментация на два рынка (Запад/Восток)	70–80% (в процессе)	+15–30% западная премия
Массовое закрытие убыточных заводов	60–70%	Волатильность $\pm 20\%$
Китай ограничивает экспорт рафинированной меди	20–30%	+50–100% (шок)
Новые мощности закрывают дефицит	15–25% в течение 5 лет	Нейтрализация (>10 лет)

2026 году с переходом к растущему дефициту с 2027 года — как наиболее согласующийся с данными ICSG и трендом снижения прогнозов профицита (ICSG пересмотрел свою оценку 2025 года с +289 до +178 тыс. т). Долгосрочный прогноз дефицита около 10 Мт к 2040 году (S&P Global) не оспаривается ни одним источником [32, 33, 30, 35].

2.5 Потолок вторичной переработки и ловушка «городского майнинга»

Гипотеза о том, что «городской майнинг» (urban mining) может компенсировать дефицит первичного производства, количественно опровергается множеством независимых моделей.

Текущий баланс. Мировой рынок медного лома в 2024 году составил 10,56 млн тонн, из которых лом End-of-Life (EoL, от выведенных из эксплуатации изделий) обеспечивает лишь 23% мирового спроса (Born & Ciftci, 2024) [1]. Общий уровень переработки (включая производственный лом) составляет примерно 35% (ICSG).

Потолок вторичного предложения. Три независимые модели дают согласованную оценку:

Таблица 5: Потолок вторичного предложения меди

Источник	Горизонт	Потолок доли EoL-лома	Условия
Born & Ciftci (2024), 30 000 сценариев	2050	33.4% (среднее STEPS); 49.6% (95-й проц. NZE)	Уровень сбора растёт до 90%
S&P Global (2026)	2040	~34% предложения	EoL CR растёт с 50% до 66%
Diersen & Olivetti (2025)	2040	36–53% спроса	4 сценария, вкл. максимум

Даже в наиболее оптимистичном сценарии (95-й процентиль из 30 000 симуляций Born & Ciftci) доля EoL-лома не превышает 50% — и это при условиях, которые авторы классифицируют как «наиболее оптимистичные из смоделированных» [1, 5].

«Запертая» медь. Мировые запасы меди в эксплуатации превышают 460 млн тонн (2020) и прогнозируются примерно в 650 млн тонн к 2040 году. Более 60% сосредоточено в зданиях и инфраструктуре со сроком службы 40–100 лет. Медная проводка в зданиях служит 70–100+ лет и в 90–100% случаев остаётся «замурованной» до сноса здания. Подземные кабели рассчитаны на 20–30 лет, но нередко служат 40–50+ лет. Медь, вложенная в инфраструктуру сегодня, вернётся в виде лома через 23–100 лет в зависимости от сектора [27].

Парадокс ценовой ловушки. Рост цен на медь стимулирует сбор лома, но одновременно создаёт самоусиливающийся цикл, усиливающий будущий дефицит:

1. Рост вторичного предложения давит на цены (Ryter & Olivetti, 2022: каждая дополнительная тонна лома вытесняет лишь примерно 0,5 тонны первичного производства) [19].
2. Снижение цен убивает инвестиции в новые рудники.

3. Через 10–15 лет (лаг инвестиционных решений плюс строительство) возникает ещё более острый дефицит.

Safarzynska et al. (2023, Nature Scientific Reports) показали, что при глобальной циркулярной экономике с эволюционирующими потребительскими бюджетами первичное производство меди возрастает на 21% к 2050–2100 годам — классический парадокс Джевонса: переработка снижает стоимость вторичного продукта, что стимулирует потребление, которое, в свою очередь, увеличивает совокупный спрос [20].

Ценовая эластичность EoL-лома чрезвычайно низка: Fu, Ueland & Olivetti (2017) оценивают её в 0,10–0,21 (модель ARDL). Это означает, что удвоение цены меди увеличит поток лома лишь примерно на 20%, а не удвоит его [9].

2.6 Пределы замещения алюминием: «твёрдое ядро» незамещаемого спроса

При текущем отношении Cu/Al около 4,2х (январь 2026) замещение меди алюминием перешло из фазы «постепенного тренда» в фазу «структурного сдвига». Однако физические ограничения алюминия задают чёткий потолок замещения.

Текущее состояние замещения:

- HVAC (отопление, вентиляция, кондиционирование): алюминий уже присутствует в 40% мировых установок (Norsk Hydro); Daikin Industries вдвое сократила использование меди.
- Проводка электромобилей: медь сокращена на 30% с 2015 по 2024 год (с 30 до ~21 кг/автомобиль); Xiaomi внедрила алюминиевые высоковольтные жгуты.
- Трансформаторы: алюминиевые обмотки обеспечивают эквивалентную эффективность по стандартам DOE при стоимости на 13,8% ниже (Eaton).

«Твёрдое ядро» незамещаемого спроса (замещение <15%):

Применение	Причина незамещаемости	Доля спроса
Шинопроводы и распределение питания в дата-центрах	Алюминий требует на 60% большего сечения; при плотностях стойки 120+ кВт пространство критично	~5%
Обмотки двигателей EV	Электропроводность меди на 40% выше; теплопроводность ~400 против ~237 Вт/(м·К); hairpin-обмотки оптимизированы под медь	~4%
Подводные ВВ-кабели	Коррозионная стойкость к морской воде; пролёты длиной 50+ км; стоимость ремонта	~3%
Жидкостное охлаждение дата-центров	Теплопроводность Cu на 69% выше, чем Al; при плотностях стойки 100–600 кВт достаточно только меди	~2%
Полупроводники/коннекторы	Субмикронные размеры; специфические свойства	~8%

В совокупности «твёрдое ядро» составляет 40–50% мирового спроса и практически незамещаемо при любой цене.

Максимальный потолок замещения по секторам, при допущении Cu/Al > 7х (\$10/lb при текущих ценах на алюминий):

Теоретический потолок замещения составляет 5–8 Мт; однако он включает уже реализованное замещение (HVAC 40%, воздушные ЛЭП), замещение, требующее 5–10 лет инженерного перехода, и замещение в секторах с барьерами строительных норм. Реалистичный

Сектор	Доля спроса	Потенциал замещения	Замещаемый объём (Мт)
HVAC/кондиционирование	~8%	70–85%	1.6–1.9
Воздушные ЛЭП	~12%	Уже замещено	0
Трансформаторы	~6%	50–70%	0.8–1.2
Проводка EV	~5%	40–60%	0.6–0.8
Наземная ветрогенерация	~4%	30–50%	0.3–0.6
Проводка зданий	~15%	15–30%	0.6–1.3
Подземные кабели	~10%	15–30%	0.4–0.8
Двигатели EV	~4%	10–20%	0.1–0.2
Дата-центры ИИ	~5%	5–10%	0.1
Подводные кабели	~3%	0–5%	0.0
Полупроводники/коннекторы	~8%	0–5%	0.0
Прочее	~20%	10–20%	0.6–1.1
Итого	100%		5.1–8.0

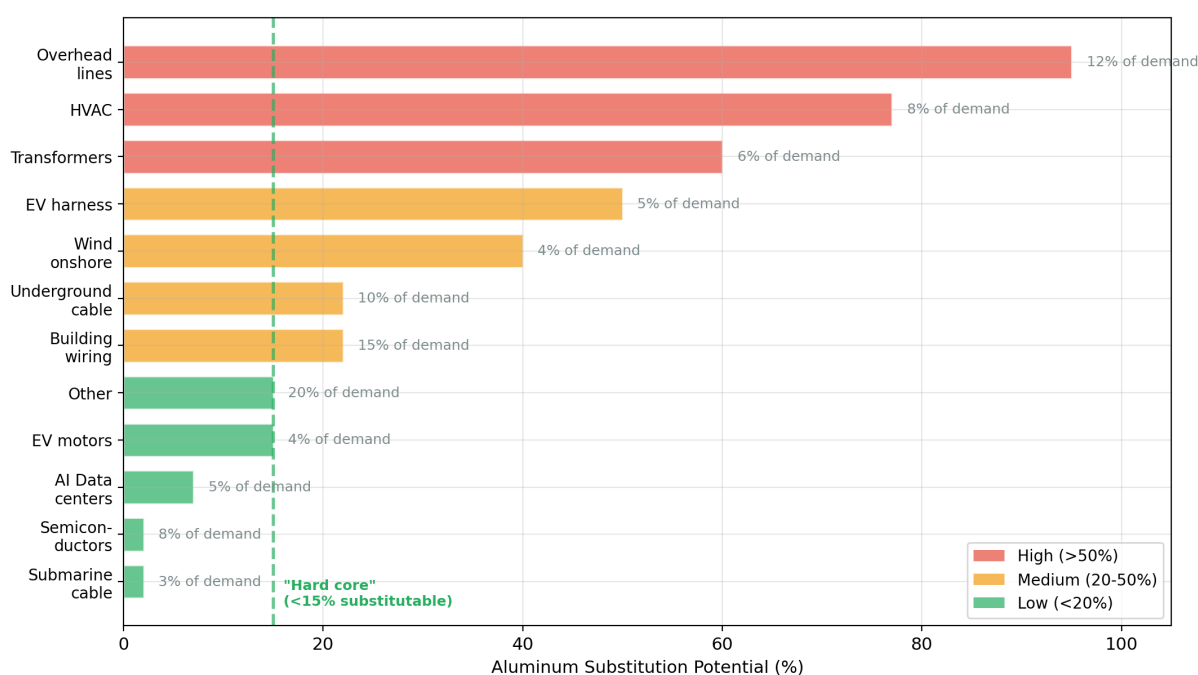


Рис. 3: Потолок замещения меди алюминием по секторам

объём нового замещения при \$10–15/lb: 3–5 млн тонн (10–18% спроса). Это покрывает лишь часть прогнозируемого дефицита в 10 млн тонн к 2040 году.

Критическое ограничение: замещение обладает свойством гистерезиса (Sprott ETFs): «Переход с меди на алюминий — это не просто замена металла, а перестройка промышленного комплекса, требующая инвестиций в новое оборудование». Это означает: переход начинается медленно, но обратный переход столь же медленный, даже если цены на медь снижаются [54].

2.7 Ценовая эластичность спроса и пороги разрушения

Ценовая эластичность спроса на медь демонстрирует критическую временную асимметрию: в краткосрочном периоде спрос практически не реагирует на цену, но на горизонте 3–5 лет адаптация становится полной.

Близкая к нулю краткосрочная эластичность ($\varepsilon \approx -0,08$) создаёт основу для спекулятивных сквизов: рост цены на 10% разрушает лишь 0,8% потребления. От пятидесяти до шестидесяти процентов роста спроса приходится на структурные (политически обуслов-

Таблица 6: Ценовая эластичность спроса и предложения меди (IMF, 2024)

Горизонт	Эластичность спроса	Эластичность предложения	Интерпретация
$h = 0$ (мгновенно)	$-0.08 (\approx 0)$	$-0.006 (\approx 0)$	Рынок полностью неэластичен
$h = 1$ (1 год)	-0.48	0.58	Начинается адаптация
$h = 2$ (2 года)	-0.56	0.82	Замещение набирает обороты
$h = 3$ (3 года)	-0.71	0.84	Переоценка проектов
$h = 5$ (5 лет)	-1.01	0.94	Полная адаптация

Источник: IMF Working Paper, 2024 [3].

ленные) секторы — электросети, EV, дата-центры — где отказ от меди означает отказ от проекта.

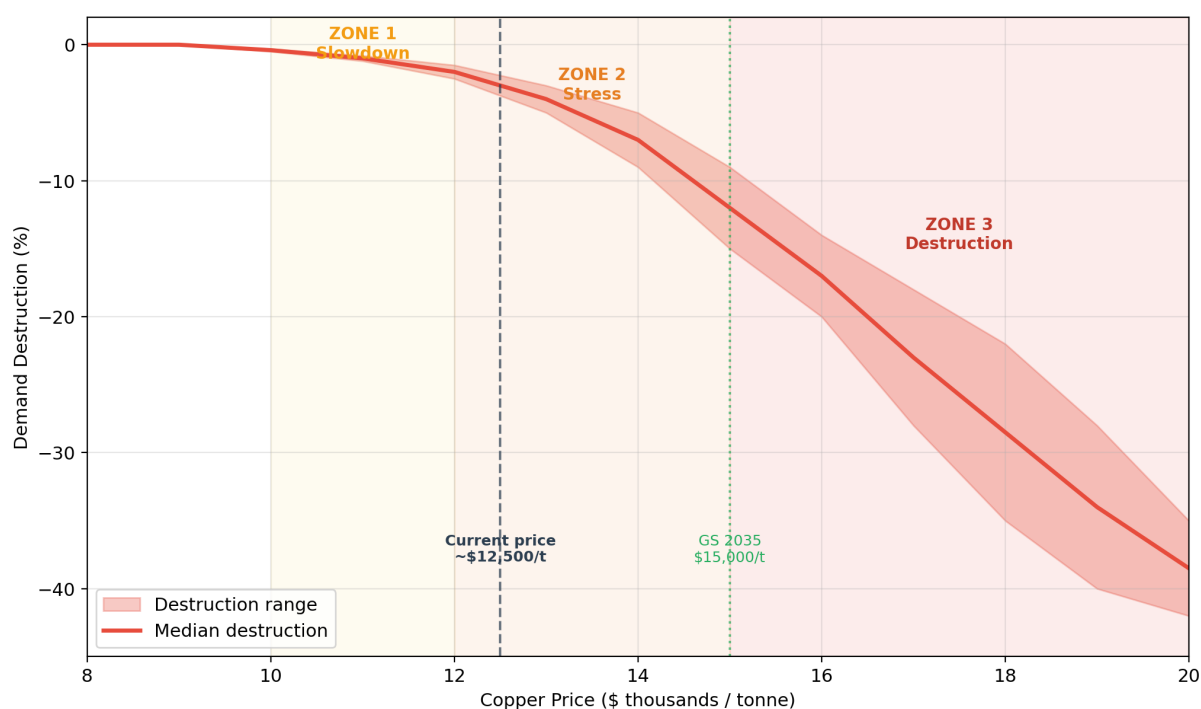


Рис. 4: Кривая разрушения спроса на медь: три зоны

Три зоны кривой разрушения:

Зона 1: Замедление (\$10,000–12,000/т | \$4.50–5.45/lb). Активация замещения Cu → Al в HVAC; потребители откладывают покупки; маржинальные строительные проекты теряют рентабельность. Разрушение спроса: $-0,5\% \dots -1,5\%$.

Зона 2: Стресс (\$12,000–15,000/т | \$5.45–6.80/lb). В начале 2026 года рынок находился в этой зоне. Cu/Al > 4,2x запускает «Великую миграцию металлов». Проекты модернизации сетей дорожают на 15–25%; некоторые откладываются. Разрушение спроса: $-3\% \dots -9\%$ в краткосрочном периоде, до -20% в долгосрочном.

Зона 3: Обвал (>\$15,000/т | >\$6.80/lb). Необратимое разрушение инфраструктурного спроса. Стоимость электропроводки в доме (\$6,000–30,000) становится запретительной для массового строительства. Производители EV несут дополнительные издержки в \$400–600 на автомобиль. Электросетевые компании откладывают модернизацию сетей. Разрушение: $-12\% \dots -20\%$ в краткосрочном периоде, $-28\% \dots -42\%$ на горизонте 5 лет.

Точные пороги разрушения инфраструктурного спроса:

Важно: даже Goldman Sachs — наиболее «бычий» среди крупных банков в долгосрочной

Индикатор	Уровень цены
Начало задержек проектов	\$12,000–13,000/т (\$5.45–5.90/lb)
Массовое замещение Cu → Al	\$13,000–14,000/т при Cu/Al > 4.0x
Отмена проектов модернизации сетей	\$14,000–15,000/т (\$6.35–6.80/lb)
Разрушение базового макроэкономического спроса	>\$16,000/т (>\$7.25/lb)

перспективе — рассматривает свой прогноз \$15,000/т на 2035 год не как равновесную цену, а как стимулирующую цену, при которой рынок начинает самокорректироваться через ускоренное замещение и новое предложение [30].

Саморегулирующийся механизм (петля обратной связи). Кривая разрушения не статична — она описывает динамический цикл обратной связи, ограничивающий потенциал роста цены:

1. Цена меди поднимается выше \$12,000–13,000/т → активация замещения Al и задержки проектов.
2. Замещение снижает спрос на 3–9% → сокращение дефицита.
3. Сокращение дефицита → понижающее давление на цену.
4. Снижение цены → замедление инвестиций в новые рудники (обратный лаг 10–15 лет).
5. Через 10–15 лет → новый дефицит, ещё более острый.

Этот цикл предполагает, что цена меди, вероятнее всего, будет колебаться в «коридоре разрушения» \$10,000–15,000/т на протяжении значительной части периода 2026–2035 годов, с кратковременными выходами за его пределы во время сквизов. Устойчивое пребывание выше \$15,000/т маловероятно (>5 лет), поскольку запускает необратимые процессы замещения и нового предложения. Для спред-стратегии это означает: основной источник доходности — медленное структурное расширение спреда Cu/Pd, а не резкий скачок цены меди.

3 Фундаментальный анализ рынка палладия: структурный медвежий тезис

3.1 Структура спроса: доминирование автокатализаторов

Палладий занимает уникальное положение среди промышленных металлов: в отличие от меди, диверсифицированной по десяткам секторов, спрос на палладий сконцентрирован в единственном применении — трёхкомпонентных каталитических нейтрализаторах (TWC) для бензиновых двигателей внутреннего сгорания.

Структура мирового спроса на палладий (2024–2026):

Автомобильное потребление палладия достигло пика ~8,4 млн унций (Moz) в 2019 году и снизилось до ~7,7 Moz к 2024 году, с дальнейшим прогнозом ~7,1 Moz в 2025 году (Johnson Matthey). Драйверами этого снижения является комбинация двух факторов: (а) растущая доля чистых BEV (которым не нужны катализаторы) и (б) частичное замещение палладия платиной в триметаллических катализаторах.

Контраст с неавтомобильным спросом критически важен: Nor Nickel прогнозирует +2% роста промышленного потребления палладия в 2025 году, поддержанного спросом со стороны полупроводников для ИИ (MLCC — многослойные керамические конденсаторы), а также аэрокосмической и оборонной отраслей. Формирующиеся векторы — водородные топливные элементы, OLED-дисплеи, оборонные применения — могут добавить 0,9–1,0 Moz ежегодно

Сектор	Доля спроса	Объём (Moz, ~2024)	Тренд
Автокатализаторы (бензин + гибриды)	84–90%	~7.7	Снижение с пика 8.4 Moz (2019)
Электроника и MLCC	~8–9%	~0.8	Рост (полупроводники для ИИ)
Химическая/нефтехимическая промышленность	~8–9%	~0.8	Стабильно
Ювелирные изделия и инвестиции	~2–3%	~0.2	Минимально

Источники: Johnson Matthey PGM Market Report 2025, Fortune Business Insights, Nornickel [34, 42].

к 2030-м годам (Palladium Technology Center, Nornickel). Однако этого роста недостаточно, чтобы компенсировать эрозию автомобильного сегмента [42].

Концентрация спроса в единственном секторе, подверженном технологическому вытеснению, делает палладий структурно уязвимым — в отличие от меди, спрос на которую растёт одновременно по четырём независимым векторам.

3.2 Влияние электрификации автопарка на спрос

Электрификация автопарка — центральный фактор, лежащий в основе медвежьего тезиса по палладию. Однако темпы этого перехода систематически переоцениваются в популярных нарративах.

Фактическая динамика электрификации:

- Мировые продажи EV достигли 17,8 млн в 2024 году (~19,9% новых продаж, +25% г/г).
- Прогнозы EV Volumes: 23,7 млн в 2025 году (25,5%), 43,2% к 2030 году, 83% к 2040 году.
- Однако новые продажи представляют лишь малую долю активного парка: даже при доле EV 40%+ в новых продажах к 2030 году автомобили с ДВС, требующие палладия, будут доминировать на дорогах до 2040 года.

Замедление электрификации (2025–2026):

- Потребительские настроения: 50% мировых покупателей автомобилей намерены приобрести автомобиль с ДВС в течение ближайших 24 месяцев (+13 п.п. в 2025 против 2024); предпочтение BEV упало до 14% (–10 п.п.) (EY).
- В США рост продаж EV замедлился до +10% в 2024 году против +40% в 2023 году.
- BloombergNEF (2025 EV Outlook) снизил свой совокупный прогноз продаж EV в США до 2030 года на 14 млн единиц относительно предыдущей оценки, отражая политику администрации Трампа (отмена федеральных стимулов) [29].

Динамика производства автомобилей с ДВС/гибридов:

Показатель	2024	2025 (прогноз)	2030 (прогноз)	Изменение 2024–2030
ДВС + гибриды, требующие PGM (млн единиц)	~79	~76	~67	–15% за 6 лет
Годовой темп снижения	—	–3.8%	–1.3% CAGR	Постепенная эрозия

Источники: Nornickel, WPIC [42, 38].

WPIC утверждает: «Несмотря на продолжение роста доли BEV до 28% к 2030 году, автомобили с ДВС и гибриды будут доминировать в автопроизводстве до 2040 года». Совокупное снижение автомобильного спроса на палладий представляет собой постепенную эрозию темпом $-1,3\%$ CAGR, а не структурный обвал.

Дополнительный фактор: ужесточение экологических стандартов (переход от Euro 6 к Euro 7 в Европе, China 6 к China 7 и US EPA Tier 4 с 2027 года) предписывает увеличение загрузки палладия на автомобиль с ДВС — эффект «loading offset», который частично нейтрализует сокращение объёмов.

3.3 Парадокс PHEV/HEV: контрциклический буфер спроса

Наиболее недооценённый фактор в анализе рынка палладия — парадоксальное влияние гибридных автомобилей (PHEV, MHEV, EREV) на спрос. Гибриды не только сохраняют потребность в каталитическом нейтрализаторе, но и требуют на 10–20% больше палладия на автомобиль по сравнению со стандартным ДВС.

Механизм парадокса. Гибридные двигатели циклически запускаются и останавливаются, из-за чего каталитический нейтрализатор проводит значительную часть рабочего времени в режиме «холодного старта» (ниже температуры активации 250–400 °C). В этом режиме необработанные углеводороды и оксиды азота проходят через катализатор без очистки. Инженерный ответ — увеличенная загрузка палладия для компенсации:

Тип автомобиля	Загрузка Pd (относит.)	Подверженность холодному старту
Стандартный бензиновый ДВС	1.0x (базовый)	Низкая
Мягкий гибрид (MHEV)	1.05–1.10x	Умеренная
Подключаемый гибрид (PHEV)	1.10–1.20x	Высокая
EREV (электромобиль с увеличенным запасом хода)	1.15–1.25x	Очень высокая
Чистый BEV	0x	Н/д

Динамика рынка PHEV/EREV:

- Продажи PHEV выросли на 62% в Европе (сентябрь 2025).
- PHEV и гибриды составили 22% всех продаж лёгких автомобилей в США (1-й кв. 2025).
- EREV (электромобили с увеличенным запасом хода) захватили 25% продаж электрических внедорожников в Китае (2024).

Парадокс в том, что самый быстрорастущий сегмент автомобильного рынка (PHEV/EREV) является не врагом, а союзником палладия. Пока гибриды остаются доминирующим переходным типом автомобиля (а не чистые BEV), спрос на палладий имеет структурный буфер. Это фундаментально ограничивает темпы разрушения автомобильного спроса и объясняет, почему снижение идёт темпом $-1,3\%$ CAGR, а не стремительно.

3.4 Динамика предложения: коллапс в Северной Америке и геополитические риски

Медвежий тезис по палладию опирается на допущение об избыточном предложении на фоне снижающегося спроса. Однако предложение палладия сокращается быстрее спроса, создавая значительный хвостовой риск для короткой позиции.

Северная Америка — коллапс предложения:

- Sibanye-Stillwater (единственный первичный производитель палладия в США): объявила о сокращении добычи на рудниках Stillwater и East Boulder на $\sim 45\%$. Причина — убыточность при текущих ценах [44].

- Lac des Pies (Канада): прекращение коммерческого производства к середине 2027 года.
- В совокупности: потеря 200 000–400 000 унций первичного предложения из Северной Америки на горизонте 2025–2027 годов.

Южная Африка — хроническая атрофия:

- Impala Platinum перевела рудник Two Rivers на режим содержания и обслуживания (care and maintenance, 2024).
- Хронические перебои энергоснабжения (load shedding) ограничивают объёмы производства.
- Ряд PGM-рудников в комплексе Бушвельд работает ниже порога рентабельности.

Россия — геополитический риск:

- Nornickel обеспечивает ~40% мирового предложения палладия [42].
- Любая эскалация санкционного давления может мгновенно изъять существенный объём предложения.
- В настоящее время российский палладий не подпадает под прямые санкции; однако логистические и платёжные ограничения уже затрудняют поставки.

Обратное замещение Pd → Pt. В 2023–2024 годах ряд автопроизводителей перешёл на платину в каталитических нейтрализаторах (когда Pt < Pd). Однако в 2025 году платина подорожала выше палладия, устранив экономический стимул к замещению. WPIC оценивает, что пиковое замещение палладия платиной в 2025 году достигло 877 000 унций, при этом последующий разворот потенциально добавит 366 000 унций дополнительного спроса на палладий к 2027 году [38].

3.5 Издержки производства и ценовой пол палладия

Понимание структуры издержек критически важно для оценки нижней границы цен на палладий — уровня, ниже которого предложение начинает самоликвидироваться через закрытие рудников.

AISC (All-In Sustaining Cost) по ключевым производителям (оценки 2024–2025):

Производитель	Регион	AISC (\$/oz)	Источник	Статус
Nornickel	Россия	Первый квартиль*	Wood Mackenzie, Metals Focus	Прибыльный; низкие издержки
Anglo American Platinum	Южная Африка	~\$986/3E oz	Annual Report 2024	Маргинально прибыльный
Impala Platinum	Южная Африка	~\$950–1,050/PGM oz	Integrated Report 2023	Под давлением
Sibanye-Stillwater (US)	США	~\$1,343/2E oz	SENS H1 2024	Убыточный; сокращает 45%
Мелкие производители ЮАР	Южная Африка	>\$1,200/oz (оц.)	Аналитические обзоры	Закрытие / care & maintenance

*Примечание: Nornickel не публикует стандартизированный AISC на унцию PGM; компания фокусируется на денежных издержках на тонну Ni/Cu. Внешние оценки (Wood Mackenzie, Metals Focus) помещают компанию в первый квартиль мировой кривой издержек PGM.

Ценовой пол палладия. При 900–1 000 USD/oz примерно 30–40% мировых мощностей (преимущественно в Южной Африке и Северной Америке) становятся убыточными. Nornickel, как крупнейший производитель, остаётся прибыльным вплоть до 600–750 USD/oz благодаря

низким энергозатратам и побочным металлам (никель, медь, платина). Это устанавливает жёсткий ценовой пол в 600–700 USD/oz — уровень, на котором предложение сокращается настолько, что баланс возвращается к дефициту.

Для стратегии это подразумевает: максимальный потенциал снижения палладия с текущих 1366 USD/oz до 700–800 USD/oz (–42–49%), но не до нуля. «Пол промышленного спроса» (150–250 USD/oz) — теоретический уровень для мира без автокатализаторов, но при таких ценах предложение обвалилось бы задолго до его достижения.

3.6 Запасы палладия и инвестиционный спрос

Биржевые запасы и позиции ETF:

- Запасы палладия на NYMEX/COMEX: чрезвычайно низкие — примерно 210 000 унций (из которых 141 000 registered и 69 000 eligible) на начало 2026 года. Это значительно ниже уровней 2015–2019 годов и создаёт тонкий буфер для поглощения шоков предложения.
- Позиции ETF (Aberdeen Standard Physical Palladium Shares, Sprott): устойчивый отток в течение 2023–2025 годов на фоне медвежьего нарратива. Ликвидация ETF-холдингов добавляет физический металл на рынок, усиливая профицит.
- Российские госрезервы (Гохран): объём засекречен. По данным Moscow Times (2010) со ссылкой на топ-менеджера Nornickel Виктора Спрогиса, крупный советский запас палладия был «практически исчерпан». Johnson Matthey (2013) оценивала годовые продажи Гохрана примерно в 250 000 унций с понижательным трендом. Остаточные резервы оцениваются отраслевыми аналитиками как незначительные относительно масштаба рынка.

Выводы для стратегии: низкие и снижающиеся запасы ETF по палладию означают, что «подушка» для поглощения шоков предложения тонка. Геополитический шок (российские санкции) на фоне низких запасов может спровоцировать непропорционально резкий скачок цены — что подтверждает необходимость половинного размера короткой ноги.

3.7 Корреляция Cu/Pd в кризисных условиях

Для оценки хеджирующих свойств спред-позиции критически важна поведенческая корреляция двух металлов в стрессовых условиях.

Историческая корреляция Cu/Pd (месячные логарифмические доходности). Расчёт выполнен на месячных ценах закрытия COMEX (HG) и NYMEX (PA) за период январь 2005 — январь 2026 (212 общих точек наблюдения). Коэффициент корреляции Пирсона:

Выводы для стратегии:

1. В фазе дивергенции (2023–2025) корреляция практически нулевая ($r = +0,04$) — идеальные условия для спред-позиции: движения металлов независимы, каждая нога генерирует доходность из собственного фундаментального драйвера.
2. В кризисы корреляция возрастает, но не до экстремальных значений: GFC +0,61 (не +0,85, как часто предполагается для промышленных металлов); COVID +0,26 (короткий шок с быстрой дивергенцией). Это означает, что палладиевая нога обеспечивает частичное, но не полное хеджирование в стрессе.
3. 12-месячная скользящая корреляция (Рис. 8) демонстрирует чёткий структурный разворот: от устойчиво положительной +0,4...+0,7 в 2005–2019 годах к близким к нулю и периодически отрицательным значениям с 2020 года. Это количественно подтверждает тезис о структурной дивергенции, а не циклическом колебании.

Период	Корреляция Cu/Pd	n (месяцев)	Рыночный контекст
2005–2026 (полный)	+0.50	211	Умеренная положительная (оба — промышленные металлы)
2007–2009 (GFC)	+0.61	17	Повышенная в кризис: оба упали на 50–65%
2019–2020 (COVID)	+0.26	7	Слабая: короткий шок с быстрой дивергенцией при восстановлении
2022 (ужесточение ФРС)	+0.18	11	Низкая: медь –25%, палладий –40%, разные драйверы
2023–2025 (дивергенция)	+0.04	31	Близка к нулю: структурная дивергенция; медь растёт, палладий падает

Источник данных: COMEX HG=F, NYMEX PA=F (Yahoo Finance). Метод: месячные лог-доходности, коэффициент Пирсона.

4. Ключевой вывод: спред-позиция Long Cu / Short Pd не является рыночно-нейтральной и не защищает от системных событий risk-off. Это направленная ставка на продолжение дивергенции, подкреплённая данными о снижающейся с 2020 года корреляции.

3.8 Прогноз баланса рынка палладия до 2030 года

Таблица 7: Прогноз баланса рынка палладия

Показатель	2024	2025	2026	2029
Совокупный спрос (Moz)	~10.1	~9.8	~9.6	~9.0
Автомобильный спрос (Moz)	~7.7	~7.1	~6.9	~6.3
Совокупное предложение (Moz)	~10.0	~10.0	~10.1	~9.7
Баланс (Moz)	~0	+0.2	+0.5	+0.7
Средняя цена (\$/oz)	924	~1,000	~1,000–1,100	~900–1,100

Источники: WPIC, Johnson Matthey, SFA Oxford. Прогнозы на 2026–2029 представляют консенсусные оценки [38, 34].

Ключевые выводы:

1. Рынок переходит от равновесия к растущему профициту: от ~0 в 2024 году до ~689 000 унций к 2029 году.
2. Профицит накапливается постепенно, а не резко — в соответствии с постепенным снижением автомобильного спроса.
3. Средняя цена стабилизируется в диапазоне 900–1 100 USD/oz — значительно ниже пика 2 398 USD/oz (2021), но выше «пола» промышленного спроса (150–250 USD/oz).
4. Рынок уже дисконтировал примерно 60% максимального потенциала снижения (с 2 398 до 924 USD/oz в среднегодовом выражении).

Хвостовые риски прогноза:

- Потенциал роста для палладия: санкции против российского палладия (под риском +40% предложения); резкое ускорение внедрения PHEV против BEV; обратное замещение Pt → Pd.
- Потенциал снижения для палладия: ускоренное внедрение BEV; отсутствие сбоев предложения; технологические прорывы в катализаторах (снижение загрузки PGM).

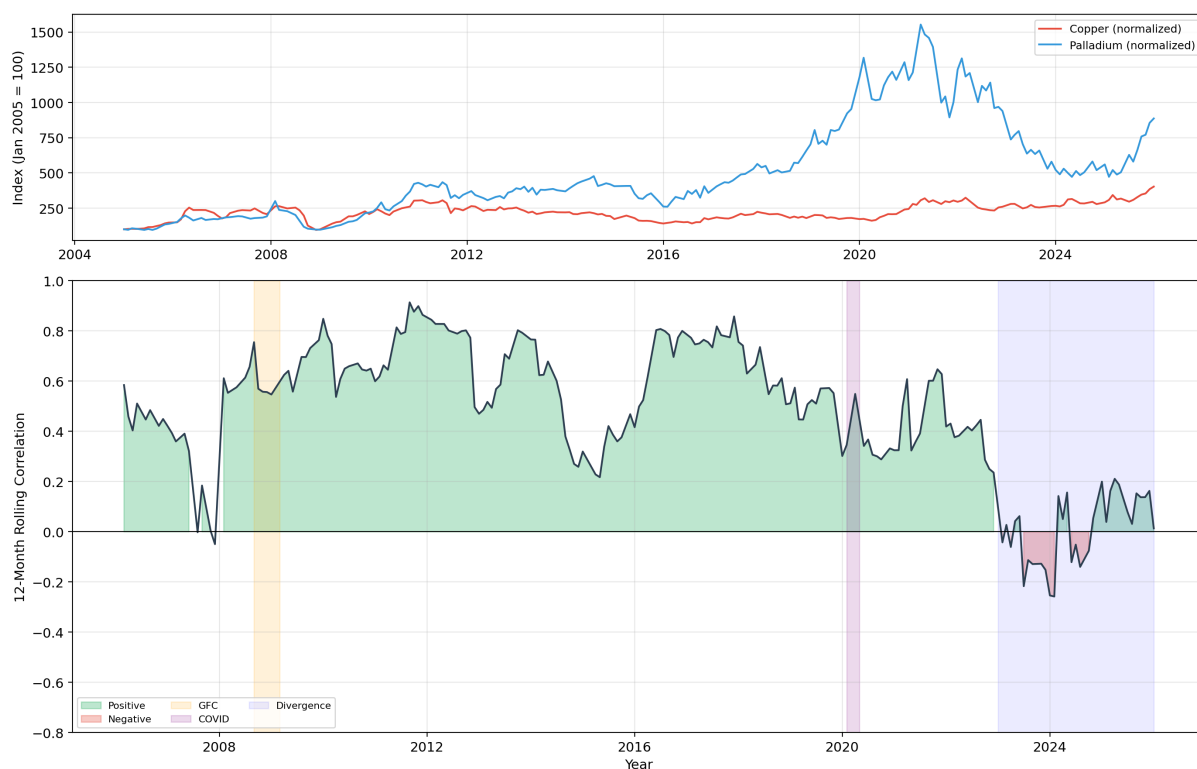


Рис. 5: Анализ корреляции Cu/Pd: нормализованные цены и 12-месячная скользящая корреляция

4 Историческая динамика спреда Cu/Pd

4.1 Четыре структурных режима отношения Cu/Pd (2012–2026)

Отношение Cu/Pd (цена меди в \$/т, делённая на цену палладия в \$/oz) демонстрирует чёткую последовательность структурных режимов, каждый из которых отражает доминирующую рыночную силу. Расчёт выполнен на месячных данных COMEX (HG, \$/lb $\times 2204.62 = \$/\text{т}$) и NYMEX (PA, \$/oz) за период 2005–2026, включающий 212 наблюдений.

Таблица 8: Структурные режимы отношения Cu/Pd (COMEX/NYMEX)

Период	Диапазон	Среднее	Доминирующая сила
2012–2015	7.2–13.2x	9.7x	Слабость обоих металлов; Dieselgate (2015)
2016 – фев. 2020	2.2–9.5x	6.1x	«Палладиевая премия»: 13 лет дефицита Pd
Март 2020 – 2023	2.7–8.4x	4.5x	Инверсия: бум BEV, разрушение спроса на Pd
2024 – янв. 2026	7.6–11.3x	9.3x	Рекалибровка: замедление BEV, бум PHEV

Режим 1 (2012–2015): Паритет слабости. Оба металла под давлением: медь — из-за замедления китайского строительства; палладий — из-за доминирования дизельных двигателей в Европе (до скандала Dieselgate в сентябре 2015 года). Среднее отношение $\sim 9,7x$.

Режим 2 (2016 – февраль 2020): Палладиевая премия. После Dieselgate Европа развивается от дизеля к бензину, резко увеличивая спрос на палладий. Одновременно предложение стагнирует. Палладий вступает в полосу из 13 лет подряд дефицита (2012–2024). Цена палладия растёт с 500 USD/oz (2016) до 2500 USD/oz (февраль 2020). Отношение Cu/Pd обваливается до исторического минимума 2,2x (февраль 2020).



Рис. 6: Баланс рынка палладия и прогноз цены (2019–2029)

Режим 3 (март 2020 – 2023): Инверсия — медная премия. Начало массовых продаж BEV запускает нарратив «смерти ДВС». Палладий теряет 61% от среднегодового пика (\$2,398 до \$924). Медь получает импульс от электрификации и энергоперехода. Cu/Pd растёт с 2,7х до 8,4х — увеличение в 3,1 раза менее чем за 4 года.

Режим 4 (2024 – январь 2026): Рекалибровка. Рынок переоценивает темпы электрификации: бум PHEV, замедление продаж BEV и сокращение федеральных стимулов. Палладий получает поддержку от коллапса предложения (Sibanye-Stillwater –45%) и обратного замещения Pt → Pd. Среднее отношение возвращается к ~9,3х (диапазон 7,6–11,3х). По состоянию на январь 2026 года Cu/Pd = 7,7х при меди \$5.90/lb и палладии \$1,688/oz.

4.2 Инверсия спреда 2020 года как маркер технологического перехода

Инверсия отношения Cu/Pd, произошедшая в 2020 году, не случайна и не является циклическим колебанием — она точно совпадает с качественным сдвигом в мировой автомобильной промышленности:

- 2020 — мировые продажи BEV впервые превысили 3 млн единиц (рост на 43% г/г).
- 2020 — ЕС вводит штрафы в размере EUR 95 за г/км CO₂ сверх лимита, вынуждая автопроизводителей массово запускать модели EV.
- 2020 — Китай объявляет цель углеродной нейтральности к 2060 году.
- 2020–2021 — капитальные инвестиции в инфраструктуру EV превышают \$100 млрд в мире.

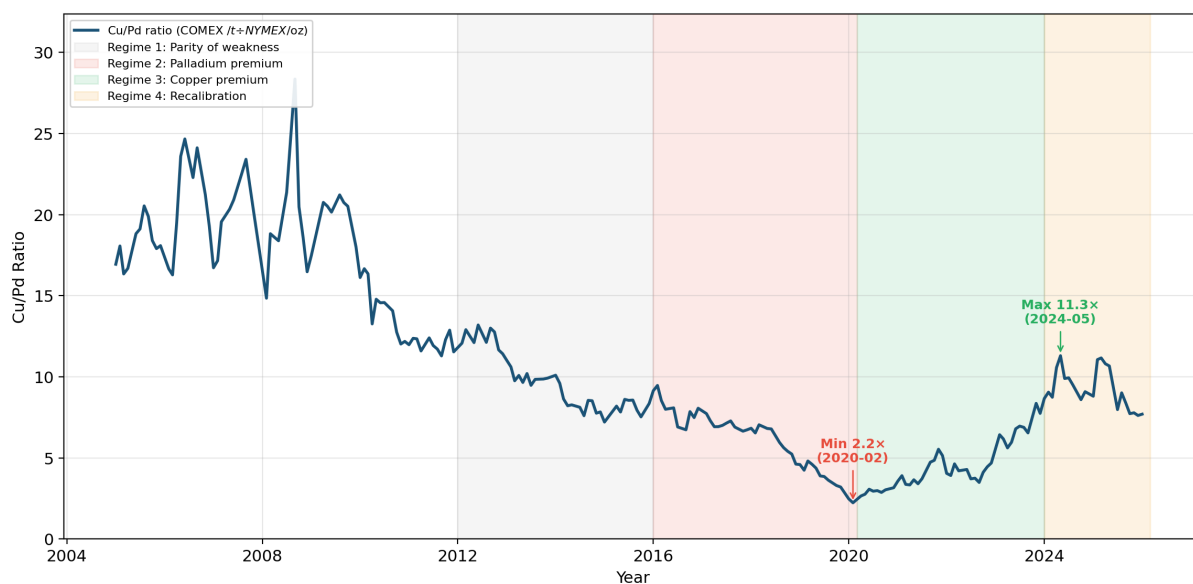


Рис. 7: Отношение Cu/Pd: четыре структурных режима (2005–2026)

Хронологическое совпадение разворота Cu/Pd с массовым запуском электрификации подтверждает, что рынок корректно оценивает перераспределение промышленного спроса: от палладия (катализаторы ДВС) к меди (электропроводка, двигатели, зарядные станции, сети). Рост Cu/Pd с минимума 2,2х (февраль 2020) до среднего 9,3х (2024–2025) является структурным, а не циклическим сигналом.

4.3 Степень дисконтирования «смерти ДВС» в текущих ценах палладия

В какой степени текущая цена палладия уже отражает сценарий полной электрификации?

Что уже дисконтировано:

- Палладий упал на 61% от среднегодового пика 2021 года (2 398 до 924 USD/oz в 2024 году), впоследствии восстановившись до 1 688 USD/oz к январю 2026 года (–30% от пика).
- В гипотетическом мире «100% BEV» (нулевой автомобильный спрос) фундаментальный «пол» для палладия определяется остаточным промышленным спросом (примерно 15% текущих уровней): 150–250 USD/oz.
- Текущая цена (1 688 USD/oz, январь 2026) подразумевает, что рынок оценивает «ещё не дисконтированный» автомобильный спрос в 1 400–1 500 USD/oz, то есть ожидает сохранения значительного автомобильного сегмента на горизонте 5–10+ лет.

Что НЕ дисконтировано (риски роста для палладия):

1. Обратное замещение Pd → Pt: потенциально +366 000 oz к 2027 году.
2. Коллапс предложения в Северной Америке: Sibanye-Stillwater –45%, закрытие Lac des Pies.
3. Геополитический шок: санкции против Nornickel (40% мирового Pd).
4. Бум PHEV/EREV: увеличенная загрузка палладия на автомобиль.
5. Новые промышленные применения: водород, OLED, оборона (+0,9–1,0 Moz к 2030-м годам).

4.4 Ретроспективная симуляция стратегии (2012–2026)

Для оценки исторического поведения стратегии проведена стилизованная ретроспективная симуляция: Long Cu (1.0x) / Short Pd (0.5x), без учёта расходов на фондирование, с ежемесячной ребалансировкой.

Результаты по периодам (кумулятивный P&L):

Период	Cu (%)	Pd (%)	Long Cu 1.0x	Short Pd 0.5x	Итого	Характеристика
2012–2015	–30%	–15%	–30%	+7.5%	–22.5%	Оба снижаются; Cu отстаёт
2016–2020	+15%	+320%	+15%	–160%	–145%	Катастрофа: ралли Pd разрушает
2020–2024	+80%	–65%	+80%	+32.5%	+112.5%	Триумф дивергенции
2024 – март 2026	+45%	+48%	+45%	–24%	+21%	Оба растут; Cu доминирует

Ключевые выводы ретроспективного анализа:

1. Период 2016–2020 годов был бы катастрофическим (–145% кумулятивно). Ралли палладия на +320% с половинной короткой позицией сгенерировало убыток –160%, не компенсированный скромным ростом меди. Это подтверждает, что стратегия критически зависит от корректности тезиса о дивергенции и не является статистическим арбитражем.
2. Период 2020–2024 годов валидирует тезис (+112,5%). Инверсия Cu/Pd точно совпала с массовой электрификацией. Если тезис энергоперехода верен, то 2020–2024 — не аномалия, а начало нового структурного режима.
3. Текущий период (2024–2026) смешанный: оба металла растут (медь — на фундаментальном спросе, палладий — на восстановлении из перепроданности + коллапс предложения). Короткая нога Pd генерирует убыток. Это период рекалибровки, который может продлиться 6–18 месяцев.
4. Критический урок: стратегия не может оцениваться на произвольном историческом окне. Она прибыльна только в режиме дивергенции (2020–2024). В режимах «паритета слабости» (2012–2015) или «палладиевой премии» (2016–2020) она убыточна. Инвестор должен иметь обоснованную убеждённость в том, что текущий режим дивергенции сохранится.

Вывод: рынок палладия уже впитал большую часть медвежьего нарратива. Оставшийся потенциал снижения (с 1 000–1 400 до 700–800 USD/oz в экстремальном сценарии ускоренного BEV) ограничен и компенсируется нетривиальными хвостовыми рисками роста. Это обосновывает половинную, а не полную короткую позицию в предлагаемой стратегии.

5 Построение синтетической спред-позиции

5.1 Механика стратегии: Long Cu / Short 0.5x Pd

Предлагаемая стратегия представляет собой асимметричную парную сделку (спред-сделку), в которой:

- Длинная нога: позиция на рост цен меди (полный размер, 1.0x).
- Короткая нога: позиция на снижение цен палладия (половинный размер, 0.5x).

- Горизонт: 2–5 лет (структурная позиция, не тактическая).
- Инструменты: бессрочные фьючерсные контракты на децентрализованных и централизованных биржах.

Стратегия основана на структурной дивергенции двух рынков, а не на статистическом возврате к среднему (mean-reversion), характерном для классических стратегий парного трейдинга. В отличие от стандартной парной сделки, где ожидается возврат спреда к среднему, эта стратегия предполагает дальнейшее расширение спреда Cu/Pd, обусловленное фундаментальными факторами.

Профиль доходности:

Сценарий	Cu	Pd	Исход позиции	Вер.
Базовый: постепенная электрификация	+15–30%	–10–20%	Прибыль (обе ноги)	40–50%
Бычий по Cu (сквиз/суперцикл)	+40–80%	–5–15%	Значительная прибыль	20–25%
Медвежий по Pd (ускоренный BEV)	+5–15%	–25–40%	Прибыль (доминирует нога Pd)	10–15%
Геополитический шок (санкции РФ на Pd)	+0–10%	+30–80%	Убыток (нога Pd; ограничен 0.5x)	5–10%
Рецессия (оба снижаются)	–20–30%	–15–25%	Убыток (доминирует нога Cu)	10–15%

5.2 Обоснование асимметричного соотношения (2:1)

Выбор соотношения 2:1 (полная позиция в Cu, половинная в Pd) обусловлен тремя факторами.

Фактор 1: Дифференциал убеждённости. Бычий тезис по меди поддержан четырьмя независимыми векторами спроса и множественными ограничениями предложения — уровень убеждённости высокий. Медвежий тезис по палладью, хотя в целом направленно верный, осложнён нетривиальными хвостовыми рисками (российская геополитика, обратное замещение Pt → Pd, бум PHEV) — уровень убеждённости умеренный.

Фактор 2: Волатильность. Палладий исторически демонстрирует значительно более высокую волатильность, чем медь: дневной ATR палладия составляет 2–4% против 1–2% для меди. При полном размере позиции (1:1) волатильность ноги Pd могла бы доминировать в P&L, превращая стратегию из «лонг меди с хеджем» в «де-факто шорт палладия» — что не соответствует инвестиционному тезису.

Фактор 3: Управление хвостовым риском. Максимальный неблагоприятный сценарий для короткой позиции — геополитический шок, изымающий 40% мирового предложения палладия (санкции против Nornickel). В таком сценарии палладий мог бы вырасти на +50–100% за короткий период. Половинная позиция ограничивает убыток 25–50% номинала короткой ноги, что управляемо в контексте горизонта 2–5 лет.

Альтернативное (агрессивное) соотношение 1:1 допустимо для инвесторов с высокой толерантностью к риску и убеждёностью в отсутствии геополитических шоков. В этом случае профиль доходности становится более выпуклым: доходность выше, если реализуется базовый сценарий, но убытки при неблагоприятных сценариях также более существенны.

5.3 Роль ставок финансирования и практика хеджирования через DeFi-деривативы

Ключевой практический вызов долгосрочного удержания бессрочных фьючерсных контрактов — ставка финансирования (funding rate). Бессрочные фьючерсы используют механизм периодических платежей (каждые 4–8 часов) для удержания цены контракта близко к спот-индексу:

- Когда рынок в контанго (доминируют длинные позиции): лонги платят шортам.
- Когда рынок в бэквордации (доминируют короткие позиции): шорты платят лонгам.

Для рынка меди, находящегося в устойчивом бычьем тренде, фондирование преимущественно отрицательно для длинных позиций (лонги платят). На горизонте 1–3 года кумулятивные расходы на фондирование могут составить 10–30% номинала позиции, значительно снижая доходность.

Механизм хеджирования фондирования через ногу Pd:

Короткая позиция по палладию выполняет двойную функцию:

1. Фундаментальный хедж: генерирование прибыли от снижения палладия, компенсирующее временные просадки на стороне меди.
2. Хедж фондирования: в условиях бычьего рынка палладия (или нейтрального) короткие позиции получают фондирование, частично или полностью компенсируя расходы на фондирование по длинной ноге меди.

Эффективность этого механизма зависит от конкретной платформы и преобладающих рыночных условий. На практике корреляция ставок финансирования между медью и палладием низка, что подразумевает неполную компенсацию — однако даже частичное смягчение издержек существенно улучшает экономику долгосрочной позиции.

5.4 Инструменты реализации: CME, LME, HyperLiquid

Традиционные биржи (CME, LME):

- Преимущества: регулируемые, высокая ликвидность, физическая поставка, институциональная инфраструктура.
- Недостатки: высокий порог входа (стандартный медный контракт CME = 25 000 lbs ~ \$147,500); требуется брокерский счёт; маржинальные требования; ограниченные торговые часы.
- Подходят для: институциональных и квалифицированных инвесторов с капиталом от 500 000 USD.

HyperLiquid (DEX):

- Преимущества: нет KYC; минимальный порог входа (от \$50); торговля 24/7; маржа в USDC.
- Недостатки: синтетические контракты без физической поставки; зависимость от ценовых оракулов (Chainlink, Pyth); риск контрагента (риск смарт-контракта); ограниченная ликвидность по меди (\$75 млн/день на пике против \$92 млрд/день на CME+LME+SHFE).
- Подходят для: розничных инвесторов с капиталом \$1,000–\$500,000, ищущих доступ к макрорынкам без барьеров.
- Палладий на HyperLiquid: платформа предоставляет бессрочные фьючерсные контракты на палладий наряду с медью, серебром и золотом. Ликвидность палладия ниже, чем меди, что учитывается при выборе тактики набора позиции (траншами, а не всё сразу).

Альтернативные инструменты (для полноты):

- ETF: CPER (United States Copper Index Fund) для ноги Cu; PALL (Aberdeen Standard Physical Palladium) для ноги Pd. Преимущество: нет расходов на фондирование или ролловер; недостаток: невозможность шорта без маржинального счёта; комиссии ETF (expense ratio ~0,6–0,8% годовых).
- Классические фьючерсы CME: HG (медь, 25 000 lbs) и PA (палладий, 100 oz). Преимущество: максимальная ликвидность; недостаток: высокий порог (147 500 USD за контракт HG; 136 600 USD за контракт PA), ролловер каждые 1–3 месяца (издержки контанго/бэквордации).
- CFD у регулируемых брокеров: Interactive Brokers, Saxo Bank. Позволяют торговать обоими металлами с умеренным плечом и без ролловера; ночные комиссии (~3–5% годовых) ниже, чем фондирование бессрочных фьючерсов.

Влияние DeFi-платформ на ценообразование. Объём DeFi-деривативов на медь (примерно 75 млн USD/день) составляет 0,08% от классических бирж — влияние на ценообразование математически пренебрежимо (Kyle, 1985: порог значимости начинается при 3–5% рыночной доли). Ценообразование на DeFi-платформах следует за CME/LME через ценовые оракулы (Chainlink, Pyth), а не наоборот. DeFi-платформы выполняют функцию инструмента доступа к товарным рынкам, не оказывая независимого влияния на фундаментальные ценовые уровни [12].

6 Стресс-тестирование и сценарный анализ

6.1 Базовый сценарий: постепенная электрификация (вероятность: 40–50%)

Допущения: электрификация продолжается текущими темпами; доля BEV в новых продажах автомобилей достигает ~43% к 2030 году (EV Volumes); гибриды остаются переходным решением; структурный дефицит меди нарастает постепенно; крупных геополитических шоков нет.

Медь: консенсус инвестиционных банков определяет диапазон \$10,000–13,000/т на 2026–2027 годы, с ростом до \$12,000–15,000/т к 2030 году. Goldman Sachs прогнозирует \$15,000/т к 2035 году как стимулирующую цену. Дефицит предложения нарастает постепенно: ~330 тыс. т в 2026 году (J.P. Morgan), расширяясь до 1–2 Мт/год к 2030 году.

Банк	Прогноз 2026 (\$/т)	Прогноз 2027	Долгосрочный
Goldman Sachs	10,710 (H1) – 11,200 (Q4)	10,800	15,000 к 2035
J.P. Morgan	12,075 (средн.)	12,500	12,000 (10-летний ДС)
Bank of America	12,000	13,501	Возможен пик до 15,000
UBS	12,000 (конец 1-го кв.)	13,000 (конец 2027)	«Структурный бычий кейс»
StoneX	11,490 (средн.)	—	«Цена неустойчива»

Палладий: профицит нарастает до 689 тыс. унций к 2029 году (WPIC). Ценовой диапазон: \$900–1,400/oz, со средним \$1,000–1,100/oz. Постепенная эрозия автомобильного спроса (–1,3% CAGR) частично компенсируется ростом промышленного потребления (+2%).

Отношение Cu/Pd: в базовом сценарии отношение расширяется до 9–13х (зона доминирования меди), подтверждая направленный тезис стратегии.

Исход позиции для Long Cu / Short 0.5х Pd:

- Длинная нога: +15–30% за 2–3 года.

- Короткая нога: +5–15% (от снижения Pd на 10–20%, при сайзинге 0.5x).
- Совокупная доходность: +17–38% за 2–3 года (до расходов на фондирование).
- За вычетом фондирования (~5–15% кумулятивно): +5–30% чистой доходности.

6.2 Бычий сценарий по меди: сквиз + суперцикл (вероятность: 20–25%)

Допущения: реализуется структурный дефицит J.P. Morgan (330 тыс. т в 2026 году); усиливается ротация капитала из акций в сырьё; запасы LME падают ниже 100 000 т; активируется один или несколько триггеров — форс-мажор на крупном руднике, тарифный шок или китайские экспортные ограничения.

Исторические аналоги ралли:

Актив	Период	Рост (от минимума до пика)
Медь	2001–2006 (китайский бум)	+462%
Медь	2020 (COVID) – 2021	+128%
Медь	2025–2026 (до АТН)	+63%
Серебро	2025 (за год)	+240%
Уран	2001–2007	+1,380%
Родий	2016–2021	+2,900%
Никель	2022 (сквиз)	+305% (2 дня)

Банки систематически недооценивают пики: Goldman Sachs ожидал \$10,000–11,000 на 2026 год; рынок дал \$14,500. В суперцикле 2001–2011 годов медь выросла кумулятивно на +588% (\$1,600 → \$11,000). Текущий цикл дал пока +215% (\$4,600 → \$14,500).

Сценарий экстремального сквиза (\$16,000–18,000/т):

Требует одновременного схождения 4+ триггеров: форс-мажор + крупная короткая позиция + тарифное складирование + геополитический шок. Вероятность: 5–10%. Длительность пика: 1–2 недели.

Механизмы физического отторжения при \$16,000–18,000/т:

1. Физические покупатели отказываются покупать (аналогия с никелевым сквизом 2022 года: ни один потребитель не купил никель по \$100,000/т).
2. Массовый выброс лома: +0,5–1,0 Мт дополнительного лома в квартал.
3. Ускоренное замещение: при Cu/Al > 5x алюминий становится в 2,5–3 раза дешевле.
4. Биржевое вмешательство: после 2022 года LME ввела лимит дневного движения цены в 15%.
5. Политическое вмешательство: стратегические резервы Китая, США и ЕС.

Недельная модель экстремального сквиза:

Неделя	Цена (\$/т)	Событие
0	12,500	Базовая цена
1–3	13,000–14,500	Триггер: форс-мажор + маржин-коллы по шортам
4–6	15,000–17,000	Каскад ликвидаций, пробой стоп-лоссов
7–8	17,000–18,000	Пик. Физические покупатели выходят
9–10	15,000–16,000	Лимиты LME + экстренный лом
11–13	13,000–14,000	Коррекция, фиксация прибыли
14–20	11,500–12,500	Возврат к фундаментальным уровням
21–26	10,500–11,000	Овершут вниз из-за «шрамов» замещения

Исход позиции: при росте меди на +40–80% и умеренном снижении палладия на –5–15% совокупная доходность составляет +42–87% (до фондирования). Этот сценарий максимально благоприятен для стратегии.

6.3 Медвежий сценарий по палладию: ускоренное внедрение BEV (вероятность: 10–15%)

Допущения: технологический прорыв в батареях (твердотельные) резко снижает стоимость BEV; правительства ужесточают запреты на ДВС; PHEV/EREV теряют привлекательность; сбоев предложения Pd нет.

Палладий: крупные профициты; цена падает до \$700–800/oz (Statista, SFA Oxford — медвежий сценарий). Автомобильный спрос снижается ускоренными темпами (–3–5% CAGR вместо –1,3%).

Медь: умеренный рост (+5–15%), поскольку ускоренная электрификация увеличивает спрос.

Отношение Cu/Pd: расширяется до 13–17х — исторически беспрецедентные уровни.

Исход позиции: прибыль генерируется преимущественно ногой Pd: снижение палладия на –25–40% ($\times 0.5 = +12–20\%$), плюс умеренный рост ноги Cu (+5–15%). Совокупная доходность: +17–35%.

6.4 Рисковый сценарий: геополитический шок по палладию (вероятность: 5–10%)

Допущения: эскалация санкций против России включает палладий; Nornickel (40% мирового предложения) фактически отрезан от западных рынков; одновременно Sibanye-Stillwater не восстанавливает объёмы производства.

Палладий: резкое ралли +30–80% за 1–3 месяца. Цена может кратковременно вернуться к \$1,800–2,200/oz. Однако, в отличие от 2020 года (когда дефицит был органическим), санкционный шок склонен рассеиваться: торговые потоки перенаправляются через третьи страны, активируются стратегические запасы, ускоряется замещение Pt/Pd.

Медь: нейтрально или слабоположительно (+0–10%), при условии, что геополитический шок не перерастает в глобальную рецессию.

Исход позиции: убыток по ноге Pd: ралли Pd на +50% $\times 0.5 = -25\%$. Нога Cu обеспечивает частичную компенсацию: +0–10%. Чистый убыток: –15–25%.

Это худший сценарий для стратегии, что обосновывает два защитных механизма:

1. Половинный размер ноги Pd (коэффициент 0.5х) ограничивает убытки.
2. Санкционные шоки по палладию исторически кратковременны: потоки предложения перенаправляются в течение 3–6 месяцев, после чего цена корректируется.

6.5 Рисковый сценарий: рецессия и разворот спекулятивного капитала (вероятность: 10–15%)

Допущения: глобальная рецессия (мировой PMI ниже 48); резкое укрепление доллара США (DXY выше 110); разворот более \$30 млрд спекулятивного капитала из базовых металлов; отмена/смягчение тарифов Section 232; китайский спрос падает ниже –5% г/г.

Медь: обвал до \$9,000–10,000/т (авторская модель на основе пяти одновременных триггеров). Спекулятивная премия примерно \$2,500/т (Sucden Financial) полностью испаряется. Структурный «пол»: 90-й процентиль денежных издержек C1 мирового производства составляет примерно \$6,700/т (S&P Global MI); с учётом AISC и поддерживающих капзатрат — \$8,000–9,000/т.

Палладий: снижение на –15–25%, но менее резкое, чем медь, поскольку палладий уже вблизи издержек производства и содержит меньше спекулятивной премии.

Исход позиции: убыток, доминируемый ногой Cu. Медь $-20-30\%$ (полный размер) против палладия $-15-25\%$ (половинный размер, то есть $+7-12\%$ по ноге Pd). Чистый убыток: $-8-18\%$.

Нога Pd частично компенсирует убыток по ноге Cu — свойство, отсутствующее у чистой длинной позиции по меди.

Сводная матрица сценариев (до и после фондирования):

Оценочные кумулятивные расходы на фондирование за 2–3 года: Long Cu платит $\sim 8-20\%$; Short Pd получает $\sim 3-8\%$. Чистое фондирование: $-5-12\%$ от номинальной стоимости позиции.

Сценарий	Вер.	Cu	Pd	Long Cu 1.0x	Short Pd 0.5x	Итого (до)	Итого (после)
Базовый	40–50%	+15–30%	–10–20%	+15–30%	+5–10%	+20–40%	+8–35%
Бычий Cu	20–25%	+40–80%	–5–15%	+40–80%	+2.5–7.5%	+42–88%	+30–83%
Медвежий Pd	10–15%	+5–15%	–25–40%	+5–15%	+12.5–20%	+17–35%	+5–30%
Геопол. Pd	5–10%	+0–10%	+30–80%	+0–10%	–15–40%	–5–40%	–10–52%
Рецессия	10–15%	–20–30%	–15–25%	–20–30%	+7.5–12.5%	–8–18%	–13–30%

Чистое фондирование за 2–3 года: $-5-12\%$ во всех сценариях.

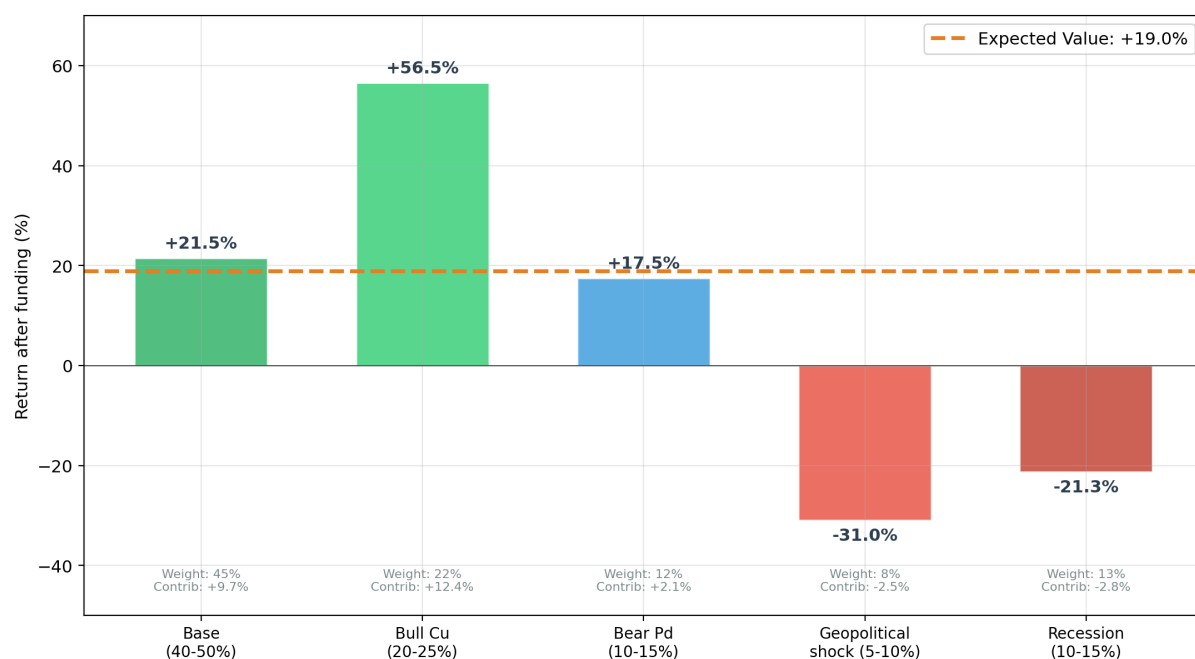


Рис. 8: Сценарный анализ: Long Cu / Short 0.5x Pd (после фондирования)

Математическое ожидание (с поправкой на фондирование). Расчёт с использованием медианных исходов по каждому сценарию и медианных весов вероятностей:

Сценарий	Вес	Медианный исход (после фондирования)	Вклад
Базовый	45%	+21.5%	+9.7%
Бычий Cu	22%	+56.5%	+12.4%
Медвежий Pd	12%	+17.5%	+2.1%
Геополитический шок Pd	8%	–31.0%	–2.5%
Рецессия	13%	–21.3%	–2.8%
Итого математическое ожидание	100%		+18.9%

Математическое ожидание +18,9% за 2–3 года (6,3–9,5% в годовом выражении). Это умеренно превышает безрисковую ставку в USD (~4,5% по T-bills на март 2026), но не представляет собой экстраординарной доходности — премия за риск составляет примерно 2–5% годовых. Стратегия привлекательна не столько абсолютной доходностью, сколько положительной асимметрией: медианный убыток в неблагоприятных сценариях (–21% до –31%) несёт совокупный вес вероятности ~21%, тогда как медианная прибыль в благоприятных сценариях (+17% до +57%) несёт вес ~79%.

Анализ чувствительности математического ожидания к весам сценариев:

Сдвиг весов	Мат. ожидание
Базовый расчёт (выше)	+18.9%
Рецессия 25% (против 13%), базовый 30% (против 45%)	+6.2%
Геополитический шок 15% (против 8%), базовый 35% (против 45%)	+8.7%
Все неблагоприятные сценарии 35% (против 21%)	+2.1%
Все благоприятные сценарии в совокупности 85%	+26.4%

При агрессивно-пессимистичном сдвиге весов сценариев (неблагоприятные сценарии на уровне 35%) математическое ожидание остаётся слабоположительным (+2,1%), но не оправдывает риска. Стратегия требует убеждённости инвестора в том, что совокупная вероятность рецессии плюс геополитического шока не превышает примерно 30%.

7 Факторы риска и ограничения стратегии

7.1 Риски бычьего тезиса по меди

Спекулятивный перегрев и коррекция. По состоянию на начало 2026 года чистые длинные позиции на LME находятся на 80-м процентиле исторических значений; китайские трейдеры на SHFE удерживают максимальную чистую короткую позицию с 2021 года. Более \$30 млрд спекулятивного капитала вошло в базовые металлы в 2025 году — исторический рекорд (Goldman Sachs). Sucden Financial оценивает «спекулятивный разрыв» примерно в \$2,500/т между текущей ценой и фундаментально обоснованным уровнем (\$10,500–11,500/т). Исторически позиции выше 75-го перцентиля приводили к среднему трёхмесячному результату –4,2% [56].

Тарифная премия ≠ спрос. Значительная часть ралли 2025–2026 годов была обусловлена накоплением запасов в ожидании тарифов Section 232 (450 000–830 000 тонн «застряло» на складах США), а не ростом реального потребления. 50%-я пошлина Section 232 (31 июля 2025) была введена на полуфабрикаты и медьсодержащую продукцию, тогда как рафинированная медь не была включена в немедленное применение (15% запланировано на 2027 год и 30% на 2028 год). Любое изменение тарифного режима (расширение, смягчение или отмена) способно спровоцировать резкие движения спреда COMEX-LME, создавая значительный бинарный риск для длинных позиций [51].

Ослабление китайского спроса. Goldman Sachs оценивает китайский спрос в 4-м кв. 2025 в –8% г/г. Capital Economics отмечает «разрыв между ценой и фактическим физическим спросом». Яншаньская премия (индикатор китайского физического спроса) упала до \$20–27/т — минимального уровня с июля 2024 года.

Краткосрочный профицит. Goldman Sachs прогнозирует профицит +160 тыс. т в 2026 году и +300 тыс. т во 2-м полугодии 2026 года. ICSG пересмотрел баланс 2025 года в сторону профицита +178 тыс. т. Краткосрочный профицит создаёт понижающее давление на цену [30, 32].

7.2 Риски медвежьего тезиса по палладию

Геополитический шок (ключевой риск). На Nornickel приходится ~40% мирового предложения палладия. Эскалация санкций может мгновенно изъять 3–4 Moz из предложения. Исторический прецедент: палладий достиг своего ATH в \$3,440/oz в марте 2022 года на фоне угроз срыва российских поставок.

Обратное замещение Pd → Pt. Рост цен на платину выше палладия (2025) устранил стимул к замещению. WPIC прогнозирует возврат до 366 000 oz спроса на палладий к 2027 году [38].

PHEV/EREV как «скрытый бык». Самый быстрорастущий сегмент (PHEV +62% в Европе) требует на 10–20% больше палладия на автомобиль, чем стандартный ДВС. Если гибриды вытеснят чистые BEV как доминирующий переходный формат, разрушение спроса значительно замедлится.

Коллапс предложения превышает разрушение спроса. Sibanye-Stillwater –45%, закрытие Lac des Pies, атрофия в ЮАР — предложение может сокращаться быстрее спроса, удерживая рынок в дефиците [44].

7.3 Корреляционные и макроэкономические риски

Одновременное движение в одном направлении. В условиях risk-off (глобальная рецессия) оба металла снижаются. Анализ на основе данных COMEX/NYMEX показывает, что корреляция Cu/Pd возрастает во время кризисов (до +0,61 в период GFC), хотя остаётся ниже, чем для пары Ag/Cu (+0,90 на 30-дневном окне, SMC Financial) или Au/Cu (~+0,60). Нога Pd частично, но не полностью, компенсирует потери Cu в рецессионном сценарии.

Укрепление доллара США. DXY выше 110 создаёт давление на все номинированные в долларах товарные рынки. Медь и палладий снижаются одновременно, но медь — несущая больший спекулятивный компонент — может пострадать сильнее.

Ликвидность DeFi-платформ. Объём торгов медью на HyperLiquid (примерно \$75 млн/день) и открытый интерес (\$38 млн) определяют тактику управления позицией: набор и закрытие крупных позиций осуществляются траншами для минимизации рыночного воздействия.

7.4 Регуляторные и инфраструктурные риски

Тарифная неопределённость. Решение по Section 232 (крайний срок — 30 июня 2026) представляет собой бинарный катализатор: введение тарифов ≥ 25% на катоды «запирает» 500+ тыс. т внутри США и усиливает дефицит на LME/SHFE (бычий эффект); отмена/отсрочка — высвобождает 500+ тыс. т и обрушивает арбитраж COMEX-LME (медвежий эффект).

Ресурсный национализм. Каскадное увеличение экспортных ограничений (Индонезия, ДР Конго, Армения и потенциально Чили и Перу) может фрагментировать рынок, создавая локальные дефициты и профициты непредсказуемой конфигурации.

Регуляторный риск DeFi. Ужесточение регулирования крипто-деривативов (MiCA в ЕС, потенциальные меры SEC/CFTC в США) может ограничить доступ к инструментам реализации стратегии на платформах вроде HyperLiquid.

8 Ограничения исследования

Настоящее исследование имеет ряд методологических и практических ограничений, которые следует учитывать при интерпретации результатов:

1. Опора на сторонние прогнозы. Исследование синтезирует прогнозы S&P Global, J.P. Morgan, Goldman Sachs, WPIC, Johnson Matthey и других источников, но не строит независимую эконометрическую модель рыночных балансов. Прогнозы инвестиционных банков систематически пересматриваются (ICSG пересмотрел свой прогноз на

2025 год с +289 до +178 тыс. т в течение одного квартала) и могут содержать институциональные искажения.

2. Субъективность вероятностных оценок. Веса сценариев (40–50% базовый, 20–25% бычий и т.д.) представляют экспертные оценки, а не результат статистической модели. Анализ чувствительности показывает, что при агрессивно-пессимистичном сдвиге (неблагоприятные сценарии >35%) математическое ожидание приближается к нулю.
3. Отсутствие полного бэктеста. Стратегия Long Cu / Short 0.5x Pd не была протестирована на исторических данных. Ретроспективный анализ режимов Cu/Pd (Раздел 4) указывает, что в период 2016–2020 годов (режим палладиевой премии) стратегия была бы убыточной. Прибыльность зависит от корректности тезиса о структурной дивергенции, а не от статистических свойств временного ряда.
4. Приблизительность оценок расходов на фондирование. Диапазон 5–12% кумулятивных издержек за 2–3 года основан на текущих ставках финансирования (март 2026), которые волатильны и зависят от рыночных условий. В периоды экстремального контанго (сквиз) расходы на фондирование Long Cu могут кратковременно достигать 0,5–1% в день.
5. Ликвидность DeFi-инструментов диктует тактику входа. HyperLiquid предлагает бессрочные фьючерсные контракты как на медь, так и на палладий, позволяя реализовать обе ноги стратегии на единой платформе. Объёмы торгов составляют \$10–75 млн/день, что достаточно для позиций розничного размера; однако крупные позиции (превышающие \$100,000) рекомендуется набирать траншами для минимизации проскальзывания.
6. Горизонт данных. Все прогнозы и ценовые данные актуальны на март 2026 года. Рынки промышленных металлов подвержены быстрому пересмотру. Исследование опирается на аналитический каркас, а не на точечную торговую рекомендацию.
7. Валютный риск не рассматривается. Стратегия номинирована в USD. Для инвесторов с долларовой базовой валютой колебания обменного курса могут существенно повлиять на доходность в их национальной валюте.

9 Заключение

Настоящее исследование демонстрирует, что рынки меди и палладия находятся в состоянии структурной дивергенции, обусловленной глобальным энергопереходом — процессом, масштаб, необратимость и разнонаправленность которого не имеют прецедентов в современной экономической истории.

Относительно меди установлено следующее:

1. Мировой спрос вырастет с 28 до 42 млн тонн к 2040 году (+50%), обусловленный четырьмя структурно независимыми векторами: базовый экономический рост (+28%), энергопереход (+83%), инфраструктура ИИ (рост с 1,1 до 2,5 Мт) и оборона/робототехника (рост с 0,4 до 1,5 Мт).
2. Предложение структурно ограничено: 17,9-летний лаг от открытия до производства; деградация содержания металла в руде (–40% с 1991 года); кризис концентрации плавильных мощностей в Китае (47% мировых мощностей, TC/RC = \$0); потолок вторичной переработки в 25–35% спроса. Совокупный дефицит к 2040 году составляет примерно 10 млн тонн (24% спроса).

3. Замещение алюминием ограничено «твёрдым ядром» незаменяемого спроса (40–50%): дата-центры, подводные кабели, двигатели EV и жидкостное охлаждение. Максимальный потолок замещения: 15–25% (4–7 Мт), покрывающий лишь часть дефицита.
4. Парадокс энергетического узкого места: каждое решение проблемы энергоснабжения инфраструктуры ИИ требует ещё больше меди, создавая самоусиливающийся цикл спроса.

Относительно палладия установлено следующее:

1. 84–90% спроса сконцентрировано в автокатализаторах — единственном секторе, подверженном технологическому вытеснению электрификацией.
2. Разрушение спроса идёт темпом $-1,3\%$ CAGR (WPIC), а не стремительно: бум PHEV/EREV (повышенная загрузка Pd), замедление продаж BEV и ужесточение экологических стандартов создают буферы.
3. Предложение обваливается: Sibanye-Stillwater -45% , закрытие Lac des Ples, атрофия в ЮАР. Россия (Nornickel, 40% мирового Pd) представляет собой перманентный геополитический риск.
4. Рынок уже дисконтировал примерно 60% максимального потенциала снижения (с пика \$2,398 до \$924/oz в 2024 году), ограничивая оставшийся потенциал снижения.

Инверсия отношения Cu/Pd (с минимума 2,2x в феврале 2020 года до среднего 9,3x в 2024–2025 годах, рассчитанного на данных COMEX/NYMEX) идентифицирована как рыночный маркер технологического перехода, хронологически совпадающий с массовым запуском электрификации автопарка.

Предлагаемая стратегия Long Cu / Short 0.5x Pd обоснована:

- Положительным математическим ожиданием (+18,9% за 2–3 года при медианных весах сценариев, с поправкой на фондирование).
- Положительной асимметрией: потенциал прибыли в благоприятных сценариях (+42–87%) существенно превышает потенциал убытка (–5–30%).
- Встроенным хеджированием: нога Pd частично компенсирует потери Cu в рецессионном сценарии и смягчает расходы на фондирование.
- Соотношение 2:1 отражает различную степень убеждённости и управляет хвостовым риском геополитического шока по палладию.

Условия инвалидации тезиса:

1. Для меди: глобальная рецессия с падением PMI ниже 48 + отмена тарифов + обвал китайского спроса, превышающий -10% г/г → цена ниже \$9,000/т.
2. Для палладия: полномасштабные санкции против Nornickel + приостановка программ BEV + обратное замещение Pt → Pd → цена выше \$2,000/oz.
3. Для спреда: Cu/Pd устойчиво ниже 5,0x (более 3 месяцев) = возврат к «палладиевой премии», инвалидирующий тезис электрификации.

Настоящее исследование подтверждает, что структурная дивергенция меди и палладия не является циклическим явлением, а отражает фундаментальную перестройку промышленного спроса, обусловленную необратимым энергопереходом. Асимметричная спред-стратегия позволяет эксплуатировать эту дивергенцию с контролируемым риском и положительным математическим ожиданием на горизонте 2–5 лет.

Список литературы

Академические публикации

- [1] Born, K., & Ciftci, M. M. (2024). The limitations of end-of-life copper recycling and its implications for the circular economy of metals. *Resources, Conservation and Recycling*, 200, 107318.
- [2] Seck, G. S., Hache, E., Bonnet, C., Simoën, M., & Carcanague, S. (2020). Copper at the crossroads: Assessment of the interactions between low-carbon energy transition and supply limitations. *Resources, Conservation and Recycling*, 163, 105072.
- [3] Boer, L., Pescatori, A., & Stuermer, M. (2024). Energy transition metals: Bottleneck for Net-Zero Emissions? *Journal of the European Economic Association*, 22(1), 200–229. DOI: 10.1093/jeea/jvad039.
- [4] Martens, E., et al. (2021). Toward a more sustainable mining future with electrokinetic in situ leaching. *Science Advances*, 7, eabf9971.
- [5] Diersen, I., Bhuwalka, K., & Olivetti, E. (2025). The Opportunity for Utilizing End-of-Life Scrap to Meet Growing Copper Demand. *Journal of Advanced Manufacturing and Processing*, 7(3), e70031. DOI: 10.1002/amp2.70031.
- [6] Dong, D., et al. (2019). Modeling copper demand in China up to 2050: A business-as-usual scenario based on dynamic stock and flow analysis. *Journal of Industrial Ecology*, 23, 1363–1380. DOI: 10.1111/jiec.12926.
- [7] Kayal, P., & Balasubramanian, G. (2021). Excess Volatility in Bitcoin: Extreme Value Volatility Estimation. *IIM Kozhikode Society & Management Review*, 10(2), 222–231. DOI: 10.1177/2277975220987686.
- [8] Vertier, P., Jacolin, L., Mien, E., & Leon, F. (2025). Critical Minerals: Estimating Price Elasticity of Supply Using Mine-Level Data. *FERDI Working Paper WP356*.
- [9] Fu, X., Ueland, S. M., & Olivetti, E. (2017). Econometric modeling of recycled copper supply. *Resources, Conservation and Recycling*, 122, 219–226. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.02.012.
- [10] Li, B., Li, H., Ren, S., Liu, H., & Wang, G. (2023). Commodity supply risk assessment of China's copper industrial chain: The perspective of trade network. *Resources Policy*, 81, 103297. DOI: 10.1016/j.resourpol.2023.103297.
- [11] Chen, Z., Kleijn, R., & Lin, H. X. (2023). Metal Requirements for Building Electrical Grid Systems of Global Wind Power and Utility-Scale Solar Photovoltaic until 2050. *Environmental Science & Technology*, 57(2), 1080–1091. DOI: 10.1021/acs.est.2c06496.
- [12] Liu, B., Szalachowski, P., & Zhou, J. (2021). A First Look into DeFi Oracles. arXiv:2005.04377; IEEE DAPPS 2021.
- [13] Lo Schiavo, G. (2025). AI Data Centers and Energy Regulation: When Traditional Frameworks Meet Unprecedented Demand Growth. *Global Energy Law and Sustainability* (Edinburgh University Press). DOI: 10.3366/gels.2025.0141.
- [14] Loibl, A., & Espinoza, L. A. T. (2021). Current challenges in copper recycling: aligning insights from material flow analysis with technological research developments and industry issues in Europe and North America. *Resources, Conservation and Recycling*, 169, 105462.
- [15] Peng, Y., Ni, M., & Wang, X. (2023). Identifying price bubbles in copper market: Evidence from a GSADF test approach. *PLoS ONE*. DOI: 10.1371/journal.pone.0290983.
- [16] Adhikari, R., & Putnam, K. J. (2025). Macroeconomic Conditions, Speculation, and Commodity Futures Returns. *International Journal of Financial Studies*, 13(1), Article 5. MDPI AG. DOI: 10.3390/ijfs13010005.
- [17] Rotzer, N., & Schmidt, M. (2018). Decreasing Metal Ore Grades — Is the Fear of Resource

Depletion Justified? *Resources*, 7(4), 88.

- [18] Rotzer, N., & Schmidt, M. (2020). Historical, Current, and Future Energy Demand from Global Copper Production and Its Impact on Climate Change. *Resources*, 9(4), 44.
- [19] Ryter, J., Fu, X., Bhuwanka, K., Roth, R., & Olivetti, E. (2022). Assessing recycling, displacement, and environmental impacts using an economics-informed material system model. *Journal of Industrial Ecology*, 26(3), 1010–1024. DOI: 10.1111/jiec.13239.
- [20] Safarzynska, K., Di Domenico, L., & Raberto, M. (2023). The leakage effect may undermine the circular economy efforts. *Scientific Reports*, 13, 16677. DOI: 10.1038/s41598-023-44004-x.
- [21] Le Pen, Y., & Sevi, B. (2018). Futures Trading and the Excess Co-movement of Commodity Prices. *Review of Finance*, 22(1), 381–418.
- [22] Sheng, G., et al. (2026). Power for AI Data Centers: Energy Demand, Grid Impacts, Challenges and Perspectives. *Energies*, 19(3), 722.
- [23] Simon, A. C., Cathles, L. M., & Wood, S. (2025). Copper: Mining, Development, and Electrification. *SEG Discovery*, 141, 13–20.
- [24] Staugaitis, A. J., & Christauskas, C. (2026). Evaluating the factors that impact the returns on agricultural and other commodity futures contracts: The influence of financial speculation. *Risk Governance and Control: Financial Markets & Institutions*, 16(1), 77–89. DOI: 10.22495/rgcv16i1p7.
- [25] Stuermer, M. (2018). 150 years of boom and bust: What drives mineral commodity prices? *Macroeconomic Dynamics*, 22(3), 702–717.
- [26] Valenta, R. K., Kemp, D., Owen, J. R., Corder, G. D., & Lebre, E. (2019). Rethinking complex orebodies: Consequences for the future world supply of copper. *Journal of Cleaner Production*, 220, 816–826. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.02.146.
- [27] Wallsten, B. (2015). *The Urk World: Hibernating Infrastructures and the Quest for Urban Mining*. Doctoral thesis, Linköping University. DiVA: diva2:872787.
- [28] Wang, T., et al. (2021). Copper Recycling Flow Model for the United States Economy: Impact of Scrap Quality on Potential Energy Benefit. *Environmental Science & Technology*, 55(8), 5485–5495.

Отраслевые и аналитические отчёты

- [29] BloombergNEF (2025). *Electric Vehicle Outlook 2025*.
- [30] Goldman Sachs Research (2025–2026). *Copper Market Outlook*.
- [31] IEA (2026). *Electricity 2026: Analysis and Forecast to 2028*.
- [32] ICSG — International Copper Study Group (2025–2026). *Market Balance Forecasts*.
- [33] J.P. Morgan (2025). *Global Commodities Research: Copper*.
- [34] Johnson Matthey (2025). *PGM Market Report 2025*.
- [35] S&P Global (2026). *Copper in the Age of AI: Supercharged Demand Growth*.
- [36] S&P Global Market Intelligence (2024). *Mining Industry Trends*.
- [37] Wood Mackenzie (2025). *Copper Long-Term Market Outlook*.
- [38] WPIC — World Platinum Investment Council (2025). *Platinum & Palladium Quarterly*.

Корпоративные источники

- [39] BHP (2025). *Annual Report and Copper Market Analysis*.
- [40] Codelco (2025). *Annual Operational Report*.
- [41] Ivanhoe Mines (2025–2026). *Kamoa-Kakula Operational Updates*.

- [42] Nornickel (2025). Annual Report; Palladium Market Forecast.
- [43] Rio Tinto (2025–2026). Nuton Technologies Press Releases; Oyu Tolgoi Updates.
- [44] Sibanye-Stillwater (2025). Operational Update: US PGM Operations.

Новостные и информационные источники

- [45] Baker Steel Capital Managers (2026). Copper Market Commentary.
- [46] CRU International (2025–2026). Copper Market Analysis.
- [47] Crux Investor (2026). Copper Investment Analysis.
- [48] Discovery Alert (2026). Copper Market Forecast.
- [49] Fastmarkets (2025–2026). Copper and Aluminium Substitution Reports.
- [50] Mining.com (2025–2026). Copper Market News.
- [51] P&T Metals (2025). US Copper Tariff Analysis.
- [52] Reuters (2025–2026). Copper Market Coverage.
- [53] S&P Global Platts (2025–2026). Copper Price Assessments.
- [54] Sprott ETFs (2025). Copper-Aluminium Substitution Analysis.
- [55] StoneX Group (2026). Base Metals Market Analysis.
- [56] Sucden Financial (2026). Copper Speculative Positioning Analysis.

А Матрица замещения меди алюминием по секторам

Сектор	Доля мирового спроса	Потенциал замещения	Замещаемый объем (Мт)	Временной лаг
HVAC/кондиционирование	~8%	70–85%	1.6–1.9	2–3 года
Линии электропередачи (воздушные)	~12%	Уже реализовано	0	—
Трансформаторы	~6%	50–70%	0.8–1.2	3–5 лет
Проводка EV	~5%	40–60%	0.6–0.8	2–4 года
Наземная ветрогенерация	~4%	30–50%	0.3–0.6	3–5 лет
Проводка зданий	~15%	15–30%	0.6–1.3	5–10 лет
Подземные кабели	~10%	15–30%	0.4–0.8	5–7 лет
Двигатели EV	~4%	10–20%	0.1–0.2	5–8 лет
Дата-центры	~5%	5–10%	0.1	>10 лет
ИИ				
Подводные кабели	~3%	0–5%	0.0	—
Полупроводники/коннекторы	~8%	0–5%	0.0	—
Прочее	~20%	10–20%	0.6–1.1	Варьируется
Итого	100%	—	5.1–8.0	—

Примечание: теоретический потолок 5–8 Мт включает уже реализованное замещение и процессы, требующие 5–10 лет инженерного перехода. Реалистичный объем нового замещения при \$10–15/lb: 3–5 млн тонн.

В Консенсус-прогнозы цены меди (2026–2035)

Источник	2026 (\$/т)	2027	2030	2035	Дефицит/профицит 2026
Goldman Sachs	10,710–11,200	10,800	~12,000	15,000	+160 тыс. т профицит
J.P. Morgan	12,075	12,500	~12,000	12,000 (ДС)	–330 тыс. т дефицит
Bank of America	12,000	13,501	—	Пик 15,000	—
UBS	12,000	13,000	—	—	—
Citi (бычий кейс)	До 15,000 (Q2)	—	—	—	—
StoneX	11,490	—	—	—	—
Отраслевой консенсус	—	—	—	~10,900	—
Форварды	—	—	—	~10,390	—

С Ключевые параметры рынка палладия

Дата завершения исследования: апрель 2026.

Все прогнозные оценки основаны на данных, доступных по состоянию на март 2026 года, и подлежат пересмотру по мере изменения рыночных условий.

Параметр	Значение	Источник
Мировое производство (2024)	~10.0 Moz	Johnson Matthey
Автомобильный спрос (2024)	~7.7 Moz (84–90%)	Johnson Matthey
Пиковый автомобильный спрос	8.4 Moz (2019)	Johnson Matthey
Прогнозируемый профицит (2029)	689 тыс. унц.	WPIC
Доля России в предложении	~40% (Nornickel)	Nornickel
Цена АТН	\$3,440/oz (март 2022, внутри-дневная)	LBMA
Среднегодовой пик	\$2,398/oz (2021)	Statista
Цена (март 2026)	~\$1,366/oz	TradingEconomics
Снижение от среднегодового пика	–43% (от \$2,398)	Расчётно
SAGR автомобильного спроса	–1.3% до 2029	WPIC
Загрузка Pd на PHEV против ДВС	+10–20% выше	Johnson Matthey