Как транспорт на альтернативном топливе трансформирует рынки цветных металлов: сценарный подход

Игорь Макаров
Руководитель, департамент мировой экономики; доцент, факультет мировой экономики и мировой политики, imakarov@hse.ru

Григорий Баранов
Магистрант, факультет мировой экономики и мировой политики, baranovg@mail.ru

Матвей Чистиков
Аспирант, факультет мировой экономики и мировой политики, департамент международных отношений, mchistikov@hse.ru

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 101000, Москва, ул. Мясницкая, 20

Аннотация

Развитие технологий, обеспокоенность климатическими изменениями и стремление многих стран сократить выбросы парниковых газов за последнее десятилетие существенно повысили мировой спрос на автомобили на альтернативных видах топлива. Наиболее перспективной заменой традиционному углеводородному транспорту выглядят электромобили, включая полностью электрические модели (BEV) и подзаряжаемые гибриды (PHEV). На некоторых региональных рынках электротранспорт, вероятно, выйдет на лидирующие позиции уже в 2030-е гг. Вместе с тем, в отличие от машин с двигателем внутреннего сгорания, производство электромобилей требует более широкого спектра цветных металлов, что может ограничить дальнейшую электрификацию транспорта.

С помощью сценарного подхода в статье проанализирована динамика рынка электромобилей и рассчитана потребность в ключевых металлах для каждого сценария. Результаты показывают, что до 2050 г. ускоренное развитие электротранспорта окажет значительное влияние на рынок кобальта, умеренное — на рынки лития, никеля и меди, незначительное — на рынки марганца и алюминия. Распространение электромобилей в ближайшие десятилетия создает для стран — экспортеров цветных металлов, включая Россию, существенные возможности наращивания поставок на мировые рынки.

Ключевые слова: альтернативные топлива; электромобили; полностью электрические автомобили; подзаряжаемые гибридные автомобили; рынок цветных металлов

Цитирование: Makarov I., Baranov G., Chistikov M. (2025) Scenarios of Development for Non-Ferrous Metal Markets amid the Spread of Alternative Fuel Vehicles. *Foresight and STI Governance*, 19(2), pp. 28–41. https://doi.org/10.17323/fstig.2025.24480

Scenarios of Development for Non-Ferrous Metal Markets amid the Spread of Alternative Fuel Vehicles

Igor Makarov
School Head, School of World Economy; Associate Professor, Faculty of World Economy and International Affairs, imakarov@hse.ru

Grigory Baranov
Master Student, Faculty of World Economy and International Affairs, baranovg@mail.ru

Matvey Chistikov
Doctoral Student, Faculty of World Economy and International Affairs, Department of International Affairs, mchistikov@hse.ru

National Research University Higher School of Economics (HSE University), 20 Myasnitskaya Str., Moscow 101000, Russian Federation

Abstract

Advances in technology, growing concern about climate change, and the setting of greenhouse gas emission reduction targets in many countries have contributed to a significant increase in the demand for alternative fuel vehicles globally over the last decade. Electric vehicles, which include all-electric vehicles (BEVs) and plug-in hybrids (PHEVs), are the most promising alternative to conventional hydrocarbon vehicles. It is very likely that in some regions of the world electric vehicles will dominate the market as early as the 2030s. However, compared to internal combustion engine vehicles, the production of electric vehicles requires a wider range of non-ferrous metals, which may become one of the bottlenecks for further electrification of transportation. This paper presents a scenario analysis of the development of the electric vehicle market, and then calculates the key metal requirements for each of the scenarios considered. The results of this analysis reveal that, between now and 2050, the accelerating spread of electric vehicles will have a significant impact on the cobalt market, a moderate impact on the lithium, nickel, and copper markets, and a minor impact on the manganese and aluminum markets. The results of the analysis demonstrate that the increasing use of electric vehicles in the coming decades opens up significant opportunities for countries specializing in the production of non-ferrous metals, including Russia, to increase their supply to global markets.

Keywords: alternative fuels; electric vehicles; all-electric vehicles; plug-in hybrid vehicles; non-ferrous metal market.

Citation: Makarov I., Baranov G., Chistikov M. (2025) Scenarios of Development for Non-Ferrous Metal Markets amid the Spread of Alternative Fuel Vehicles. *Foresight and STI Governance*, 19(2), pp. 28–41. https://doi.org/10.17323/fstig.2025.24480

Транспорт — вторая после энергетики отрасль по выбросам парниковых газов, особенно CO_2. По данным Международного энергетического агентства (МЭА), в 2023 г. на транспортный сектор приходилось 21.8% мировой эмиссии CO_2, причем доля автомобильного транспорта составляла около 75% этих выбросов (IEA, 2024).

Электромобили с нулевыми прямыми выбросами парниковых газов рассматриваются как главный способ уменьшения углеродного следа транспортной отрасли (IPCC, 2022). Однако в сравнении с машинами, оснащенными двигателем внутреннего сгорания (ДВС), электротранспорт обладает конструкционными, технологическими и эксплуатационными особенностями, ограничивающими его массовое внедрение. Одним из ключевых сдерживающих факторов выступает производство компонентов с применением материалов, которые прежде либо не использовались в автомобилестроении, либо задействовались в значительно меньших объемах. В первую очередь это касается определенных цветных металлов.

По мере распространения и ужесточения углеродного регулирования на мировых рынках возрастет спрос на автомобильный транспорт с низким уровнем эмиссии парниковых газов, особенно на электромобили как сегмент с наибольшим потенциалом. Их внедрение, поддерживаемое государственными субсидиями, приведет к снижению себестоимости производства и эксплуатационных расходов благодаря эффекту масштаба. Такие изменения неизбежно окажут существенное влияние на рынки металлов. Вместе с тем возможно и обратное воздействие: динамика цен на металлы будет влиять на глобальные перспективы развития электрического транспорта.

Воздействие электротранспорта на сопряженные отрасли, в том числе на цветную металлургию, широко освещается в академических исследованиях и отраслевой аналитике. Ценность подобных работ во многом зависит от актуальности данных (становление рынка электромобилей началось лишь во второй половине 2010-х гг.) и применяемых моделей. В исследовании (Xu et al., 2020) рассмотрены три наиболее вероятных сценария развития технологий аккумуляторных батарей для электромобилей, вероятность их реализации и прогнозируемый спрос на некоторые цветные металлы. Для моделирования траектории распространения автомобильного электротранспорта, включая полностью электрические модели (Battery Electric Vehicle, BEV) и подзаряжаемые гибриды (Plug-in Hybrid Electric Vehicle, PHEV), авторы опирались на показатели парка автомобилей и сценарные оценки МЭА (IEA, 2020), а также ряд долгосрочных факторов (Xu et al., 2020).

В аналитическом докладе BloombergNEF по итогам 2023 г. перспективы рынка электромобилей представлены в двух вариантах — Economic Transition Scenario (ETS) с преобладанием рыночных стимулов без существенных регуляторных изменений и Net Zero 2050 — достижение углеродной нейтральности глобального автопарка к 2050 г. В менее амбициозной версии ETS доля электромобилей в глобальных продажах легкового сегмента оценивается в 73% к 2040 г. Для создания углеродно нейтрального автопарка к 2050 г. продажи автомобилей на ископаемом топливе должны полностью прекратиться к 2038 г. Прогнозируется значительный рост потребностей в литии, меди, алюминии и никеле, необходимых для обеспечения достаточного уровня выпуска аккумуляторных батарей. Для качественной оценки спроса на цветные металлы в докладе сопоставляются кумулятивная потребность с объемами запасов, а также с планируемыми производственными мощностями (BloombergNEF, 2023; 2024).

В настоящем исследовании рассматриваются возможные изменения на глобальных рынках цветных металлов на базе трех сценариев роста электромобильного сегмента. Сценарии представлены как для самого рынка электротранспорта, так и для производного спроса на металлы, необходимые для создания компонентов. Для оценки динамики глобального рынка электромобилей на долгосрочном горизонте до 2050 г. применяются методы моделирования развития подрывных технологий на базе сценарного анализа и с опорой на последние доступные данные за 2024 г. Расчет кумулятивного спроса на цветные металлы выполнен с детализацией по типам аккумуляторных батарей, в производстве которых они применяются. Степень воздействия электротранспорта на рынки цветных металлов оценивается на основе критериев, предложенных в различных источниках.

Цель статьи — на базе сценарного анализа выявить, на рынок каких цветных металлов развитие электромобилей окажет наибольшее влияние и, следовательно, дефицит каких металлов может сдерживать развитие электротранспорта. Этой цели подчинена структура исследования. Во втором разделе сопоставляются основные виды альтернативных топлив для автомобилей и обосновывается перспектива замещения электромобилями транспорта на традиционных углеводородах. В третьем разделе моделируется динамика автомобильного рынка и проводится сценарный анализ развития электромобильного сегмента на основе концепции S-кривой, ретроспективных данных и ряда долгосрочных факторов. Четвертый раздел посвящен оценке кумулятивного спроса на цветные металлы, применяемые при производстве ключевых компонентов электромобилей, и эффекта переориентации потребителей на электротранспорт для отраслевых рынков. В заключении обобщаются результаты сценарного анализа и выделяются компенсаторные механизмы на исследуемых рынках.

Потенциал автомобилей на альтернативном топливе

В структуре эмиссии парниковых газов от автомобильного транспорта преобладают прямые выбросы веществ, образующихся при сгорании углеводородного топлива. Снижение углеродного следа автомобилей направлено прежде всего на отказ от традиционных видов горючего: бензина, дизеля и других нефтепродуктов. Без декарбонизации транспортной отрасли достижение глобальных и национальных климатических

целей практически невозможно. Страны с активной климатической повесткой (в частности, правительства Европейского Союза (ЕС), Великобритании и Канады) уже объявляют о планах запрета автомобилей с ненулевыми выбросами, а некоторые компании — о намерениях сократить выпуск машин с ДВС (IEA, 2023; IEA, 2024). Следствием этих процессов становится масштабное применение альтернативных видов топлива и рост спроса на них.

Анализ жизненного цикла существующих видов альтернативного топлива позволяет выявить ряд серьезных экологических ограничений в их применении.

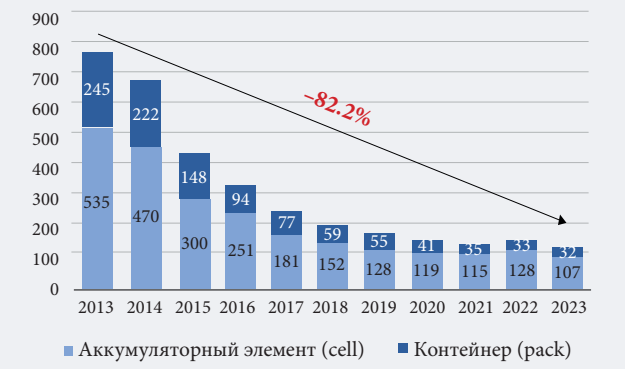
Во-первых, заменой бензину и дизелю могут служить природный газ, пропан, спирты и их производные, компоненты синтетических топлив, смеси с традиционным горючим и т. д. Однако при их сгорании также образуются парниковые газы — CO_2, CH_4 (метан) и N_2O (оксид азота), что противоречит глобальным целям по снижению выбросов, достижению углеродной нейтральности и удержанию прироста глобальной средней температуры в пределах 1.5–2°C сверх доиндустриальных уровней (согласно Парижскому соглашению 2015 г.).

Во-вторых, хотя существуют автомобили на биотопливе, многие технологии его производства основаны на переработке растительного сырья (сахарного тростника, кукурузы, сои), пригодного для питания людей и животных (биотопливо первого поколения)[1]. Применение биотоплива в транспортной отрасли снижает углеродный след, но в отдельных случаях может противоречить принципу социальной ответственности и задаче искоренения голода, включенной в перечень Целей устойчивого развития ООН[2]. В перспективе производство и массовое распространение таких видов топлива как основной замены традиционному топливу может быть ограничено или запрещено.

В случае продвинутых биотоплив из непищевого сырья (отработанных жиров и масел, древесной биомассы, органических отходов, водорослей) и углеродонейтральных синтетических топлив высокая капиталоемкость производства и недостаточные мощности снижают их перспективность с точки зрения масштабного уменьшения углеродоемкости автотранспорта в среднесрочном периоде (IEA, 2024). До 2050 г. автомобили на таких топливах уступают электрическим и водородным аналогам по возможностям сокращения совокупной стоимости владения (ССВ) (Хомутов и др., 2021). Углеродонейтральные синтетические топлива практически отсутствуют на рынке, а планируемые производственные мощности для их выпуска на порядки меньше текущих потребностей экономики (Krajinska, 2021).

В-третьих, сегмент водородных электромобилей, несмотря на свой потенциал, развивается медленно из-за ограниченных объемов выпуска и специфики водорода как энергоносителя. Выпуск систем топливных элементов представляет собой технологически сложный

Рис. 1. **Средневзвешенная стоимость компонентов аккумуляторной батареи — электрохимического элемента и контейнера/упаковки (*долл./кВт*ч*)**



Источник: составлено авторами по данным (BloombergNEF, 2023).

процесс с применением дорогостоящих металлов платиновой группы — их себестоимость сравнима с ценой малогабаритного автомобиля с ДВС. Кроме того, в отличие от стандартных видов топлива, химико-физические характеристики водорода требуют трансформации всей логистической цепи: транспортировки, хранения и заправки. При низких показателях продаж рентабельность заправочных комплексов и других инфраструктурных проектов остается недостаточной (Хомутов и др., 2021). Неэффективность проявляется и в производстве: низкий спрос сдерживает инвестиции в новые мощности и оптимизацию процессов, что ведет к удорожанию водородного топлива, автомобилей на нем и подрывает конкуренцию. В свою очередь, высокая ССВ и слаборазвитая инфраструктура тормозят формирование массового спроса на водородные электромобили. Возникает порочный круг, для преодоления которого требуется внедрение комплексных нерыночных механизмов поддержки.

Наибольшим потенциалом среди транспорта на альтернативных видах топлива сегодня обладают электромобили BEV и PHEV. В первых аккумулярная энергия преобразуется электродвигателем в механическую работу; во вторых — электромотор дополняет ДВС, который задействуется при исчерпании заряда аккумулятора.

Потенциал электромобилей обусловлен двумя ключевыми факторами. Во-первых, ежегодным снижением стоимости благодаря удешевлению компонентов, прежде всего аккумуляторных батарей (рис. 1), и эффекту масштаба (через распределение постоянных капитальных затрат на большее количество машин). На этапе внедрения электротранспорта на национальных рынках важную роль играют программы субсидирования покупки автомобилей с низким углеродным следом

[1] https://bigenc.ru/technology_and_technique/text/3878201, дата обращения 15.03.2025.
[2] https://www.undp.org/sustainable-development-goals, дата обращения 15.03.2025.

(опыт ЕС, США и Китая). Удешевление также происходит за счет конкуренции между автопроизводителями по мере расширения рынка (IEA, 2023).

Во-вторых, прямой углеродный след при эксплуатации электромобиля минимален, поскольку преобразование электроэнергии в механическую работу не сопровождается химическими реакциями горения и выбросом CO_2. Косвенный углеродный след, возникающий при сжигании ископаемых топлив для генерации электроэнергии, пока значителен, но будет сокращаться с развитием низкоуглеродной возобновляемой энергетики.

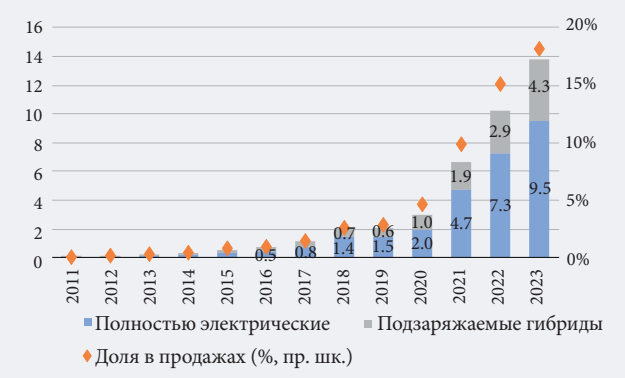
Помимо рассмотренных типов электротранспорта, на рынке представлены различные промежуточные варианты, например гибриды (Hybrid Electric Vehicle, HEV), основным силовым агрегатом в которых выступает ДВС, а аккумулятор заряжается только при эксплуатации машины без подключения к внешнему источнику электроэнергии. Такие модификации конструктивно близки к традиционным автомобилям и из-за высокого уровня прямых выбросов не будут классифицироваться как электромобили и учитываться в дальнейшем анализе. В долгосрочных прогнозах МЭА и BloombergNEF доля BEV в продажах будет расти, а PHEV — постепенно снижаться (IEA, 2024; BloombergNEF, 2024).

Текущее состояние и специфика рынка электромобилей

Становление рынка BEV началось в 2010-е гг. вслед за развитием технологий аккумулирования электроэнергии, прежде всего перезаряжаемых литий-ионных батарей в бытовой технике и электронике. По сравнению с другими распространенными типами — свинцовыми и никелевыми аккумуляторами, литиевые отличаются большей удельной энергоемкостью по массе и объему, а также сроком службы, т. е. сохранением рабочих характеристик на большем числе циклов зарядки-разрядки (Liang et al., 2019). Их легкость и компактность позволили расширить применение в автомобилестроении без значительных конструктивных изменений.

К настоящему времени электромобили стали наиболее динамично растущим сегментом легкового автотранспорта. В 2020 г. прирост продаж составил 43% г/г на фоне снижения мирового спроса на легковые автомобили на 16%. В 2021 г. этот показатель превысил 120% г/г в ситуации дефицита комплектующих из-за пандемии. В 2022 г. он снизился до 55% г/г в условиях геополитической нестабильности и нарушения глобальных цепочек поставок. В 2023 г. прирост замедлился до 35% вследствие сокращения программ субсидирования покупки электромобилей на ряде крупных рынков и ограниченного проникновения на рынки развивающихся стран (IEA, 2024). В результате доля этого сегмента в мировых продажах легковых автомобилей выросла с 2.8% в 2019 г. до более 18% в 2023 г.[3] (рис. 2).

Рис. 2. **Динамика глобальных продаж легковых электромобилей в 2011–2023 гг. (*млн ед.*)**



Источник: составлено авторами по данным (IEA, 2024; OICA, 2024).

Ключевыми драйверами спроса остаются прямые субсидии и налоговые вычеты на покупку электромобилей на крупнейших рынках Европы, Северной Америки и Азии, эффект масштаба и высокие цены на ископаемое топливо (IEA, 2023). Также наблюдается переток долгосрочных инвестиций из сегмента автомобилей на традиционном топливе в новые производства электротранспорта, обусловленный курсом на декарбонизацию. Стремительное проникновение BEV сопровождается развитием соответствующей инфраструктуры: электрических зарядных станций (ЭЗС) и специализированных сервисных центров. К началу 2024 г. число публичных ЭЗС в мире достигло 3.9 млн (IEA, 2024).

Доля BEV растет и в коммерческом сегменте, достигнув 3.4% продаж в 2023 г. Однако требования к повышенной дальности хода и приоритет грузоподъемности ограничивают применение аккумуляторных батарей как источника энергии (рис. 3). Ускорению электрификации этих сегментов будет способствовать рост энергоемкости аккумуляторов и плотности сети ЭЗС сверхвысокой мощности.

Несмотря на значительный рост доли электромобилей в глобальном масштабе, их географическое распределение остается неравномерным. На Китай, Европу и Северную Америку приходится около 95% всех продаж легковых электромобилей и более 85% — в коммерческом сегменте (рис. 4). Китай выступает абсолютным мировым лидером по продажам электротранспорта в обоих сегментах. В 2023 г. его доля в реализации легковых электромобилей достигла 60%, в коммерческом сегменте — около 55%.

Лидерство Китая носит устойчивый характер благодаря сочетанию нескольких факторов: программы государственной поддержки покупателей и производителей на этапе становления рынка, значительного контроля над глобальными цепочками поставок критических

[3] Рынок легковых автомобилей анализируется нами на базе данных OICA, скорректированных для Северной Америки из-за особенностей статистического учета крупногабаритных внедорожников и пикапов. Эти транспортные средства широко используются в регионе как личный транспорт, но не включаются в легковой сегмент.

Рис. 3. **Динамика глобальных продаж коммерческих электромобилей в 2011–2023 гг. (*млн ед.*)**

Примечание: коммерческий сегмент включает легкие коммерческие автомобили, грузовые автомобили и автобусы.

Источник: составлено авторами по данным (IEA, 2024; OICA, 2024).

металлов и минералов для аккумуляторных батарей, а также масштабного развития внутреннего производства электромобилей разных классов.

Доли Европы и США с Канадой в продажах легковых электромобилей в 2023 г. составили 23% и 11% соответственно. В коммерческом сегменте, помимо Китая и Европы, заметна доля Южной Кореи, где активно растут продажи легких коммерческих электромобилей (LCV) и электробусов от национальных автоконцернов Kia и Hyundai.

Сценарии развития рынка электромобилей

При построении сценариев для последующего анализа рынков цветных металлов использовались следующие ключевые параметры:

1. Целевой моделируемый параметр — глобальный объем продаж новых электромобилей (BEV и PHEV).

2. В основу модели положена концепция S-кривой, математически выражаемая сигмовидной функцией. Данный подход продемонстрировал высокую точность в исследованиях подрывных технологий и, в частности, электромобилей (Foster, 1986; Geroski, 2000; Mahajan, Muller, 1979).

3. Временной горизонт анализа — период до 2050 г. Этот рубеж служит ориентиром для большинства долгосрочных целей по сокращению выбросов парниковых газов в рамках международных климатических соглашений и национальных программ декарбонизации.

4. Нами построены три сценария — траектории развития рынка электромобилей. Каждый сценарий характеризуется факторами, влияющими только на скорость распространения электромобилей, при этом сам факт увеличения доли электротранспорта рассматривается как устойчивый долгосрочный тренд. Подробное описание различий в сценариях представлено в табл. 1.

5. Учитывая неоднородность рынка электромобилей и различия в транспортных моделях и государственных политиках разных стран, для определения объема глобального спроса агрегируются результаты моделирования на региональных рынках. Особенности последних представлены в табл. 2 и 3.

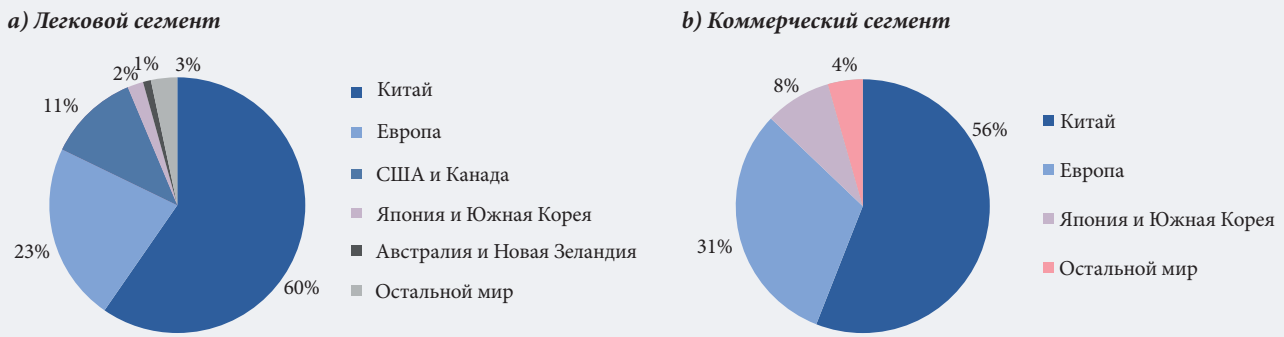
6. Распределение долей рынка между BEV и PHEV осуществляется на основе исторической динамики и соответствующих оценок МЭА для 2025, 2030 и 2035 гг. (IEA, 2024)

7. Моделирование продаж проводится раздельно для легкового и коммерческого сегментов.

В сценарном анализе применены исторические данные о продажах новых электромобилей за 2012–2023 гг. от МЭА (IEA, 2024) и Ассоциации европейских производителей автомобилей (European Automobile Manufacturers' Association, ACEA)[4]; сведения о реализации всех типов автомобилей за 2005–2023 гг. от Международной организации производителей автомобилей (International Organization of Motor Vehicle Manufacturers, OICA) (OICA, 2024) и аналитических агентств (S&P Global, 2024). Их агрегирование проведено согласно описанной методике.

Рассмотрим поэтапно моделирование глобальных объемов продаж новых электромобилей.

Рис. 4. **Географическая структура продаж легковых и коммерческих электромобилей в 2023 г.**



Источник: составлено авторами по данным (IEA, 2024).

[4] https://www.acea.auto/nav/?content=publications, дата обращения 15.03.2025.

Табл. 1. Описание сценариев развития рынка электромобилей

Конфигурация модели	Характеристики модели и сценария	Примеры использования
Сценарий 1. Обобщенная логистическая функция		
$s(t) = \frac{1}{(1+e^{-bt})^{1/\vartheta}}$ t — порядковый номер года (за 1 принимается первый год временного ряда); $s(t)$ — доля электромобилей в продажах в момент t; $b > 0$ — параметр, определяющий темп роста; $\vartheta > 0$ — параметр, влияющий на изменение кривизны функции (значение функции в точке перегиба) и, соответственно, на темп роста функции у асимптот.	— Обобщенная сигмоидная функция с гибкой настройкой формы S-кривой. Характеризуется гибкой подстройкой формы S-кривой под исторические данные и плавающим значением ординаты точки перегиба функции. — Низкая вероятность соблюдения заявленных сроков по запрету продаж автомобилей с ДВС. — Постепенное увеличение доли BEV и снижение доли PHEV.	Оценка уровня автомобилизации в Китае (Huo, Wang, 2012)
Сценарий 2. Функция Гомпертца		
$s(t) = e^{-be^{-ct}}$ t — порядковый номер года (за 1 принимается первый год временного ряда); $s(t)$ — доля электромобилей в продажах в момент t; $b > 0$ — параметр, определяющий темп роста; $c > 0$ — параметр, определяющий смещение функции по оси абсцисс.	— Разновидность несимметричной (относительно точки перегиба) сигмоидной функции, которая характеризуется быстрым ростом на начальном этапе распространения технологии и плавным замедлением темпов после достижения точки перегиба функции. — Замедление распространения электромобилей при сворачивании мер господдержки. — Низкая вероятность соблюдения заявленных сроков по запрету продаж автомобилей с ДВС. — Постепенное увеличение доли BEV и снижение доли PHEV.	— Моделирование размера автомобильного рынка в Китае (Qian, Soopramanien, 2014) — Моделирование продаж электромобилей в 20 крупных странах (Kumar et al., 2022) — Моделирование уровня автомобилизации в 59 странах (Rota et al., 2016)
Сценарий 3. Стандартная логистическая функция		
$s(t) = \frac{1}{1+ae^{-bt}}$ t — порядковый номер года (за 1 принимается первый год временного ряда); $s(t)$ — доля электромобилей в продажах в момент t; $a > 0$ — параметр, определяющий точку пересечения графика функции с осью ординат (смещение по оси абсцисс); $b > 0$ — параметр, определяющий темп роста.	— Стандартная логистическая функция характеризуется симметричной формой S-кривой относительно точки перегиба с постоянным значением ординаты 50%, а также более крутым наклоном графика функции на моделируемом временном горизонте. — Ускоренные темпы роста доли электромобилей и отказа от автомобилей на ископаемом топливе, в т. ч. соответствующие заявленным срокам полной декарбонизации транспорта. — Ускоренное увеличение доли BEV и снижение доли PHEV.	— Моделирование размера автомобильного рынка в Китае (Qian, Soopramanien, 2014) — Моделирование продаж электромобилей в 20 крупных странах (Kumar et al., 2022) — Моделирование парка электромобилей в 26 странах из разных регионов мира (Rietmann et al., 2020)
Источник: составлено авторами.		

Табл. 2. Региональные рынки электромобилей и их специфика: легковой сегмент

Региональный рынок	Специфика
Китай	Крупнейший мировой рынок электромобилей в абсолютном выражении, центр сосредоточения глобальных производственных мощностей комплектующих
Скандинавия+	Страны-лидеры по уровню проникновения электротранспорта. Включает Данию, Исландию, Норвегию, Финляндию и Швецию
Европа со сформировавшимся рынком электромобилей	Зрелый рынок электромобилей крупнейших экономик Западной и Центральной Европы
Остальная Европа	Формирующийся рынок электромобилей, преимущественно в странах Восточной Европы и малых европейских государствах
Япония и Южная Корея	Высокоразвитые страны Азии с устоявшимся рынком электротранспорта
США и Канада	Государства Северной Америки с активным распространением электромобилей. Региональная особенность — протяженные маршруты и автомобилецентричная культура
Австралия и Новая Зеландия	Развивающие электротранспорт страны с энергетическими ограничениями из-за изолированного географического положения
Остальной мир	Прочие государства, характеризующиеся низким проникновением электромобилей
Источник: составлено авторами.	

Табл. 3. Региональные рынки электромобилей и их специфика: коммерческий сегмент

Региональный рынок	Специфика
Китай	Лидер мирового рынка коммерческого электротранспорта, высокие темпы электрификации общественного транспорта
Европа (ЕС + ЕАСТ)	Крупные экономики ЕС и ЕАСТ — второй центр развития коммерческого электротранспорта. Активное масштабирование рынка в Западной и Центральной Европе
Япония и Южная Корея	Азиатские страны с растущим сегментом коммерческого электротранспорта, ведущие автоконцерны обладают компетенциями в производстве электрогрузовиков
Остальной мир	Страны с зачаточным или отсутствующим рынком коммерческого электротранспорта
Источник: составлено авторами.	

На первом этапе оценивается объем продаж автомобилей всех типов. До 2031 г. продажи легкового сегмента определяются на базе прогнозов S&P Global по развитию мирового рынка автомобилей массой до 6 т (*light vehicles*) в разрезе анализируемых регионов (S&P Global, 2024). На горизонте 2031–2050 гг. темп прироста продаж в легковом сегменте принимается равным прогнозному темпу прироста ВВП на душу населения. Выбор в качестве прокси-характеристики подушевого ВВП обусловлен тем, что основной спрос на электромобили предъявляют домохозяйства. Продажи в коммерческом сегменте на весь период 2024–2050 гг. моделируются на базе динамики реального ВВП каждого региона путем приравнивания темпов увеличения продаж к темпам роста ВВП. Актуальные оценки долгосрочной динамики реального ВВП до 2060 г. представлены Организацией экономического сотрудничества и развития (ОЭСР) за 2023 г.[5] Применение данного индикатора обусловлено тем, что коммерческий сегмент сильнее зависит от общеэкономической конъюнктуры и внешнеторговых потоков. Моделирование реализуется отдельно для каждого региона и типа автотранспорта, детали приведены в табл. 2 и 3, результаты — в Приложении 1[6].

На втором этапе моделируется доля продаж электромобилей в общем объеме реализации автотранспорта на основе концепции S-кривой. Выбор моделирования относительной величины вызван необходимостью корректировки на лимитирующий фактор — объем продаж всех типов автомобилей. Это позволяет избежать нереалистичных прогнозов, превышающих рыночный спрос и производственные возможности автопрома.

Для построения трех траекторий развития рынка электромобилей задействованы различные модификации сигмовидных функций с характерной S-образной формой (табл. 1).

Гибкость функции в Сценарии 1 позволяет точно настроить форму S-кривой под исторические данные, задавая базовую траекторию развития рынка электромобилей при сохранении текущих тенденций. Функция Гомпертца, применяемая в Сценарии 2, отличается быстрым ростом у нижней асимптоты и постепенным замедлением после точки перегиба (фиксированное значение $1/e$). Эта особенность позволяет моделировать ситуацию замедления рынка после сворачивания программ господдержки спроса.

Сценарий 3 представляет оптимистичный вариант развития рынка. Ускоренное проникновение электромобилей может быть обусловлено несколькими факторами:

1) колебаниями цен на углеводородное топливо и прогрессом возобновляемой энергетики, способными быстрее изменить потребительские предпочтения;

2) ростом инвестиций в исследования и разработки (ИиР) для удешевления ключевых компонентов аккумуляторных батарей и снижения стоимости кВт*ч производимой ими энергии;

3) реализацией амбициозных планов по запрету автомобилей на ископаемом топливе благодаря приоритету климатической повестки;

4) усилением внимания к энергобезопасности с расширением спектра энергоносителей.

На этапе моделирования нижняя асимптота функций принимается равной 0 (минимально возможной доле в продажах), верхняя — 1 (максимально возможной доле). Анализ легкового сегмента опирается на исторические данные за 2012–2023 гг., коммерческого — за 2013–2023 гг. Обучение моделей для трех сценариев проводилось с помощью нелинейного метода наименьших квадратов, применяемого для подгонки кривых нелинейного вида.

На завершающем этапе расчетов на базе результатов моделирования общих продаж автомобилей и доли электромобилей вычисляется целевая переменная — объемы реализации новых электромобилей в абсолютном выражении. Итоги моделирования доли электромобилей в продажах по регионам мира приведены в Приложении 2. Графики доли электромобилей в глобальных продажах легковых и коммерческих автомобилей показаны на рис. 5.

На третьем этапе рассматриваются совокупные глобальные продажи электромобилей. На исторических данных за 2012–2023 гг. определено соотношение BEV к BEV+PHEV. Для прогнозирования данной пропорции до 2050 г. задействованы оценки МЭА (IEA, 2023) для 2025, 2030 и 2035 гг. и регрессионный анализ. На базе полученных пропорций проведено разделение глобальных объемов реализации новых электромобилей на BEV и PHEV.

Таким образом, в Сценарии 1 в легковом сегменте доля BEV в глобальных продажах автомобилей вырастет до 42.8% к 2030 г., 74.5% — к 2040 г. и 91.7% — к 2050 г. При этом доля PHEV достигнет пиковых 10.1% в 2029 г., а затем будет постепенно сокращаться вплоть до 2050 г. В коммерческом сегменте доля BEV в продажах составит 76.1% к 2050 г.; доля PHEV — только 3.8% (рис. 5 и 6).

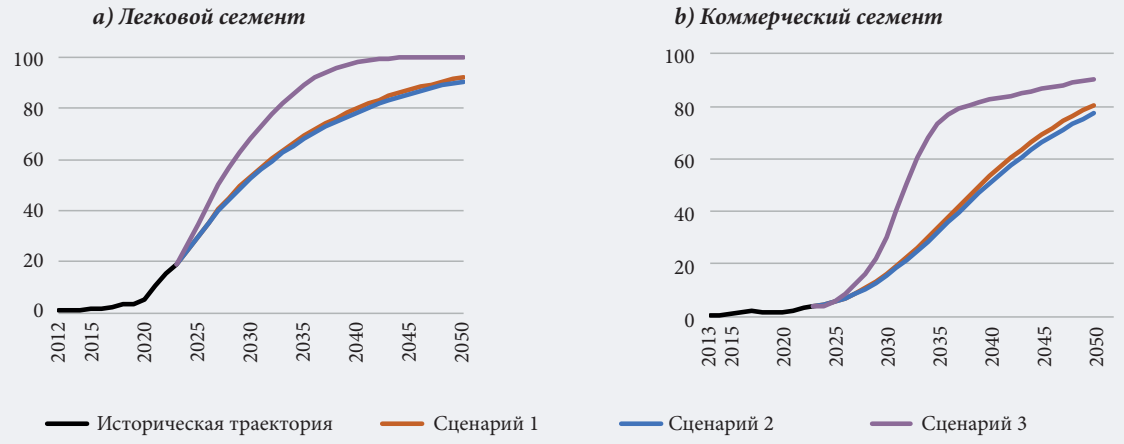
Траектория развития рынка электромобилей, полученная в Сценарии 2, оказалась очень близкой к траектории Сценария 1. В легковом сегменте доля BEV в глобальных продажах может составить 42.2% в 2030 г., 73.1% — в 2040 г. и 90.3% — в 2050 г. Доля PHEV достигнет максимального уровня 10% в 2029 г., а затем также будет постепенно снижаться. В коммерческом сегменте доля BEV в продажах вырастет до 73.1% к 2050 г.; доля PHEV сократится до 3.7% (рис. 5 и 6). Такое сходство результатов сценариев показывает, что динамика исторических данных в значительной мере характерна для паттерна быстрого роста доли электромобилей на начальном этапе и замедления темпов распространения после достижения уровня в 37%, соответствующего значению ординаты точки перегиба функции Гомпертца.

В сценарии 3 ожидается ускорение проникновения обоих типов электромобилей: доля BEV в глобальных

[5] https://www.oecd.org/en/data/indicators/real-gdp-long-term-forecast.html?oecdcontrol-ed8cfcbb26-var3=2005&oecdcontrol-ed8cfcbb26-var4=2060, дата обращения 15.03.2025.

[6] Материалы приложений размещены на онлайн-странице статьи: https://foresight-journal.hse.ru/article/view/24480

Рис. 5. **Доли электромобилей в глобальных продажах легковых и коммерческих автомобилей (%)**



Примечание: до 2023 г. — исторические данные, далее до 2050 г. — результаты моделирования.

Источник: составлено авторами по данным (IEA, 2024; OICA, 2024).

продажах автомобилей может составить 56.8% к 2030 г., 97.7% — к 2040 г. и 100% — к 2050 г. Доля PHEV возрастет с 6.9% в 2024 г. до 10.9% в 2030 г., а затем будет постепенно снижаться в пользу BEV. В коммерческом сегменте к 2050 г. доля BEV может достичь 90% всех продаж, при этом реализация PHEV полностью прекратится с 2045 г. (рис. 6 и 7).

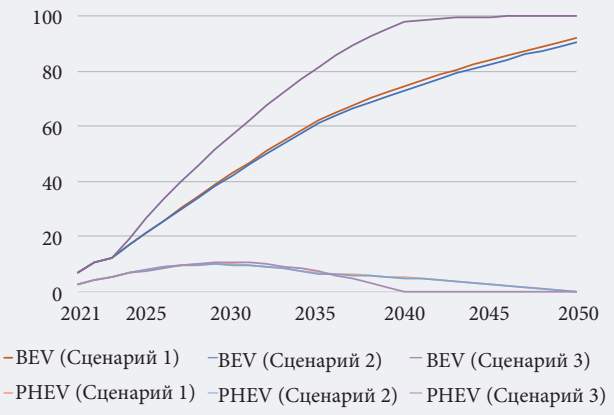
Долгосрочный спрос на цветные металлы — компоненты электромобилей

Цветные металлы входят в состав различных комплектующих электромобилей. Среди компонентов, способных существенно повлиять на рынки сырья по мере ускорения развития электротранспорта, выделяются аккумуляторные батареи и связанные с ними проводники электрического тока[7].

Хотя батареи для электротранспорта различаются по химическому составу компонентов, наиболее востребованы литий-ионные аккумуляторы. Преобладают литий-никель-кобальт-марганец-оксидный (NCM), литий-никель-кобальт-алюминий-оксидный (NCA) или их смеси (более 90% рынка в 2020 г.), а также литий-железо-фосфатные (LFP) аккумуляторы, применявшиеся в ранних моделях электромобилей и вновь набирающие популярность на фоне удорожания никеля и кобальта (IEA, 2022). Тип аккумулятора определяется составом катода, в то время как для анода обычно используется графит.

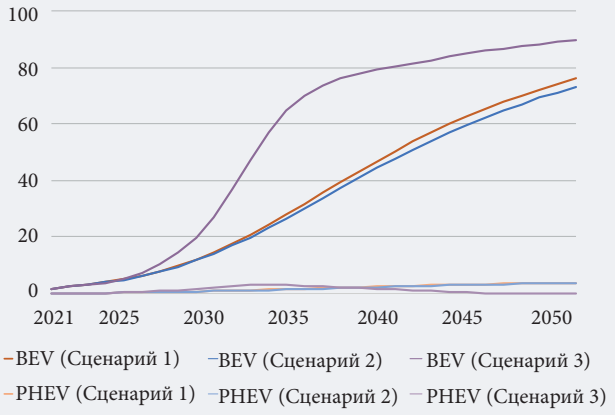
Помимо литий-ионных, перспективными технологиями выступают литий-серные и натрий-ионные аккумуляторы, обладающие рядом преимуществ (Kumar, 2024). Литий-серные аккумуляторы отличаются относительно высокой плотностью энергии, а натрий-ионные — продолжительным сроком службы. Кроме того, они потенциально экономичнее и экологичнее литий-

Рис. 6. **Доли легковых BEV и PHEV в глобальных продажах до 2050 г., все сценарии (%)**



Источник: составлено авторами.

Рис. 7. **Доли коммерческих BEV и PHEV в глобальных продажах до 2050 г., все сценарии (%)**



Источник: составлено авторами.

[7] https://about.bnef.com/blog/lithium-ion-battery-pack-prices-hit-record-low-of-139-kwh/, дата обращения 15.03.2025.

ионных аналогов. В настоящее время аккумуляторы этих типов только начинают выходить на рынок электромобилей (первое серийное производство электромобилей с натрий-ионными аккумуляторами запущено лишь в 2023 г.)[8], что затрудняет прогнозирование спроса в средне- и долгосрочной перспективе.

Развитие электротранспорта может изменить рыночный баланс не только металлов, применяемых в катодах аккумуляторных батарей, но и меди и других цветных металлов. Электрификация автомобилестроения потребует значительного наращивания доли материалов с высокой электропроводностью. Перечень ключевых цветных металлов, на рынки которых влияет распространение электромобилей, представлен в табл. 4.

Оценим влияние электротранспорта на рынки указанных цветных металлов до 2050 г. на основе сценарного подхода. Моделирование эффектов проводится в несколько этапов:

1. Рынок литиевых аккумуляторных батарей для электромобилей характеризуется динамичными изменениями — активными ИиР и заменой одних химических компонентов другими. В работе выделены два типа аккумуляторов с наибольшим потенциалом: NCX (NCM и NCA) и LFP (Xu et al., 2020; Maisel et al., 2023).

Для определения доли аккумуляторов каждого типа использованы оценки из работы (Maisel et al., 2023). Представленные в ней сценарии, изначально построенные до 2040 г., были экстраполированы до 2050 г. с сохранением исходной логики исследования. Авторы выделяют два сценария развития рынка аккумуляторов в зависимости от преобладающего типа перспективных технологий для электромобилей. Сценарий NCM предполагает доминирование аккумуляторов NCM-типа с постепенным увеличением доли никеля в их составе. Ключевые металлы: литий, никель, кобальт, марганец, алюминий. Сценарий LFP основан на преобладании аккумуляторов LFP-типа. Ключевые металлы: литий, алюминий.

Для легкового и коммерческого сегментов принята схожесть структур аккумуляторных батарей в рамках каждого сценария, различие заключается только в их энергетической емкости.

Данные о содержании металлов в аккумуляторах разных типов относительно их мощности, использованные для расчета компонентного состава и построения сценариев, приведены в работе (Maisel et al., 2023). Данные по необходимой мощности аккумуляторов для легкового и коммерческого BEV содержится в докладах МЭА за 2023 и 2024 гг. (IEA, 2023; IEA, 2024). Учитывая, что коммерческий сегмент включает три типа транспортных средств (легкие коммерческие автомобили, грузовики и автобусы), для расчета средней мощности аккумулятора использованы данные о структуре рынка за 2023 г. (IEA, 2023). В итоге необходимая мощность для легковых BEV принята за 60 кВт, для легкового PHEV — 15 кВт, для коммерческих BEV — 211 кВт, для коммерческих PHEV — 50 кВт. Компонентный состав аккумуляторов представлен в Приложении 3.

Компонентный состав рассмотрен на уровне аккумуляторной батареи, поэтому материалы для производства проводки и корпуса, включая медь и алюминий, напрямую не учитываются при построении сценариев.

2. Для расчета количества меди в одном электромобиле используются эмпирические данные. В легковом BEV ее содержится 89 кг, в коммерческом — 200 кг; в легковом PHEV — 40 кг, в коммерческом — 89 кг (ICA, 2017). В отличие от других металлов, учтенных только в составе аккумуляторной батареи, значения меди рассчитаны на уровне всего аккумуляторного блока, готового к установке в автомобиль.

3. На заключительном этапе моделирования определены сценарии кумулятивного спроса на каждый цветной металл за период 2024–2050 гг. на базе оценок: химического состава аккумуляторов в производстве электромобилей; содержания цветных металлов в аккумуляторах, топливных элементах и проводниках; продаж новых электромобилей. Для металлов, входящих в состав аккумуляторных батарей, выполняется дополнительное разделение на сценарии NCM и LFP.

4. Полученные объемы спроса на цветные металлы сравниваются с показателями разведанных запасов и ресурсов. Под последними понимается наличие элемента в земной коре в форме и количестве, экономически оправдывающих его извлечение сейчас или в будущем. Запасы — та часть выявленных ресурсов, добыча которой целесообразна при текущей экономической конъюнктуре, требованиях к физико-химическим характеристикам сырья и достигнутом уровне технологий.

Графики для сравнительного анализа представлены на рис. 8, численные значения — в Приложении 4.

Влияние электромобилей на рынки цветных металлов может быть минимальным, умеренным, значительным и существенным. При распределении металлов по этим категориям используются следующие критерии:

1) потребность в металлах для удовлетворения спроса на электромобили;

2) страновая структура добычи, распределение запасов и ресурсов;

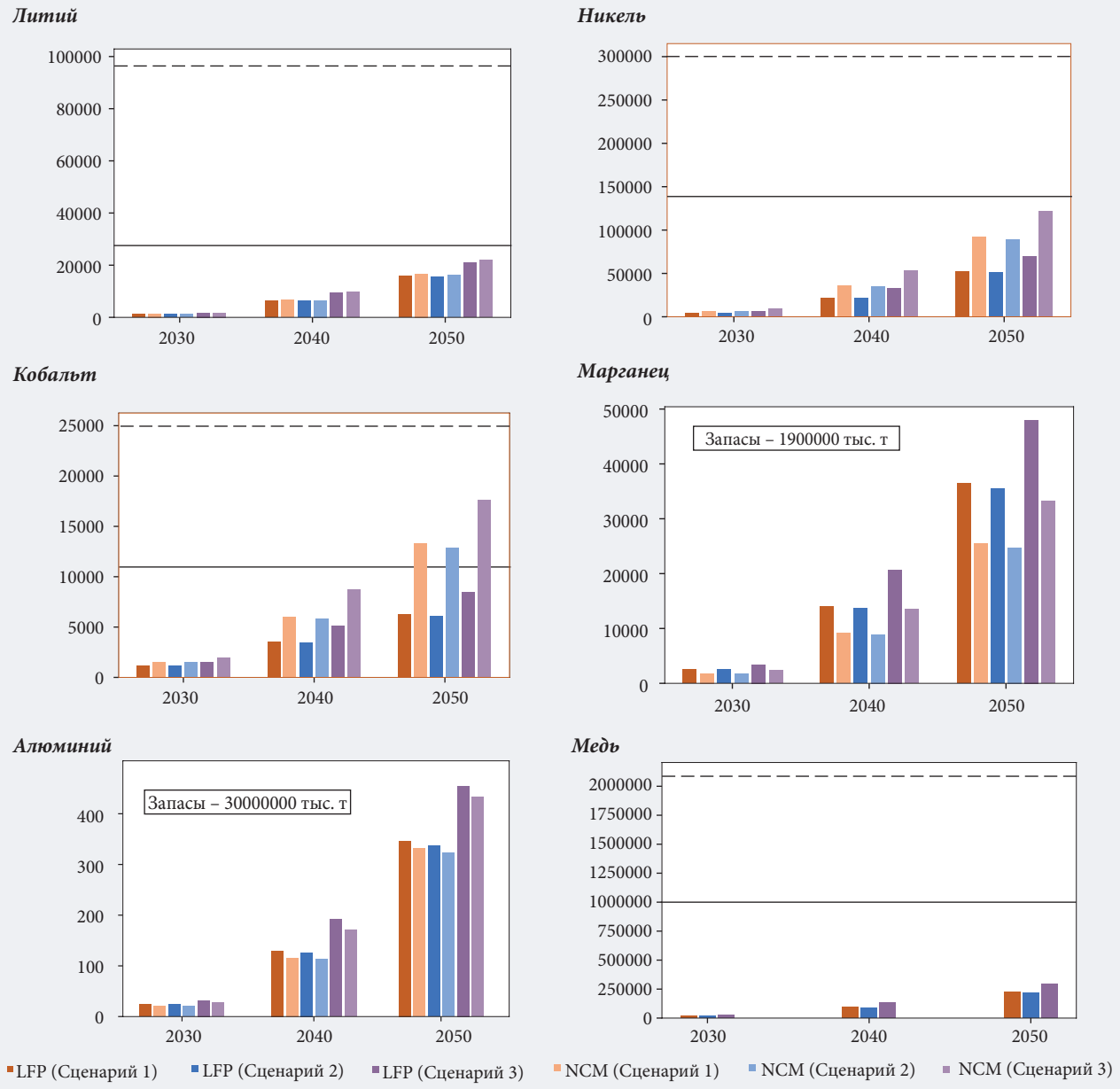
3) возможность переработки и вторичного использования металлов.

Существенное рыночное влияние: кобальт

При реализации сценария NCM потребность в кобальте может превысить его существующие запасы. Даже в сценарии LFP объем спроса достигнет 55–77% запасов. Учитывая, что 74% текущего производства и 55% разведанных запасов приходятся на Конго, при росте дефицита возможна выраженная ценовая дискриминация.

В настоящее время переработка литий-ионных аккумуляторов часто менее выгодна и более рискованна, чем добыча и покупка металла. Основные причины: волатильность товарно-сырьевых рынков, удаленность перерабатывающих предприятий, сложности транспортировки аккумуляторов, их конструктивное многообразие. На доставку аккумуляторов к месту переработки приходится около 40% затрат всего процесса (Slattery et al., 2021). Это связано с большим весом и высокими техническими требованиями к перевозке. Иногда авто-

Рис. 8. **Кумулятивный спрос на цветные металлы, входящие в состав аккумуляторных батарей электромобилей, для различных сценариев** (*тыс. т*)



Примечание: сплошная линия обозначает запасы, пунктирная — ресурсы.

Источник: составлено авторами.

дилерам проще отправить к месту переработки электромобиль целиком, чем самостоятельно извлекать и транспортировать аккумулятор[9].

С учетом дальнейшего роста производства аккумуляторов не только для электромобилей, но и для систем хранения энергии влияние на рынок кобальта может быть значительным.

Значительное рыночное влияние: литий и никель

Совокупная потребность в литии для электромобилей может составить 55–78% от текущих запасов — существенный объем, учитывая высокий спрос на литий-ионные батареи и в других отраслях. Несмотря на наличие безлитиевых альтернатив, их технологическая готовность остается низкой. Дополнительный аргумент — концентрация 79% запасов в четырех странах и расположение более 90% производственных мощностей в Азиатско-Тихоокеанском регионе и Южной Америке. Это усиливает их переговорные позиции в диалоге с производителями из Северной Америки и Европы.

Потребность в никеле может составить 40–94% запасов, при этом сейчас на долю аккумуляторов прихо-

[8] https://carnewschina.com/2023/12/27/volkswagen-backed-jac-yiwei-ev-powered-by-sodium-ion-battery-starts-mass-production-in-china/, дата обращения 15.03.2025.

Табл. 4. **Перечень анализируемых цветных металлов, их специфика и применение в электромобилях**

Цветной металл	Применение в электромобилях	Специфика металла
Литий	Ключевой компонент катода всех типов литий-ионных аккумуляторов (положительно заряженный ион выступает переносчиком электрического заряда)	Около 95% производства и 80% запасов сконцентрированы в четырех странах: Австралии (4 предприятия), Китае (3), Аргентине (2) и Чили (2). Более 90% мощностей по выпуску аккумуляторных батарей и компонентов приходятся на страны Азии при лидерстве Китая (свыше 70%).
Никель	Компонент катода аккумуляторов NCM- и NCA-типа	Основное применение — производство стали и сплавов. Крупнейшие производители — Индонезия и Филиппины (около 60% мировой добычи). Значительные запасы имеются также в России, Австралии и Бразилии. Россия — ведущий поставщик металла высокого качества, необходимого для аккумуляторов электромобилей (20% мировых поставок).
Кобальт	Компонент катода аккумуляторов NCM- и NCA-типа	Более 70% мировой добычи сосредоточено в Конго, где находится почти половина мировых запасов. Контроль над глобальными цепочками поставок осуществляет Китай, лидирующий в производстве готового к промышленному использованию металла.
Марганец	Компонент катода аккумуляторов NCM-типа	Основной потребитель — металлургия (производство стали). Глобальные ресурсы оцениваются как значительные; около 85% рентабельных запасов находятся в ЮАР, Австралии, Бразилии, Китае и Украине. Может замещаться алюминием в распространенной NCA технологии.
Алюминий	Компонент катода аккумуляторов NCA-типа; применяется также в элементах и упаковке (фольге электродов, материале корпуса) аккумуляторов всех типов	Применяется в сферах, где критичен вес изделия. Около 90% добычи бокситов (сырья) сконцентрировано в Австралии, Гвинее, Китае, Бразилии, Индонезии и Индии. Более 50% обогащения и производства первичного металла осуществляется в Китае, доля других стран не превышает 6–7%. Характеризуется простым и многоразовым процессом переработки.
Медь	Основной материал в кабелях и проводах всех типов электромобилей	Крупнейшие игроки глобального рынка — Чили и Перу. Разведанные запасы обнаружены на всех населенных континентах, ресурсы оцениваются как достаточные.

Источник: составлено авторами по данным (US Geological Survey, 2024; Xu et al., 2020; Yao, Luman, 2021).

дится около 7% потребления металла (IEA, 2022). Доля никеля будет расти в аккумуляторах NCM-типа, замещая более дорогие элементы, прежде всего кобальт (Barber, Marshall, 2021). На будущий рынок никеля влияют разнонаправленные факторы: около 20% мирового объема никеля, пригодного для аккумуляторов, производятся в РФ, что в текущих геополитических условиях создает давление на рынок (IEA, 2022). С другой стороны, в сфере основного применения никеля — производстве сплавов — развиваются мощности по переработке и вторичному использованию.

Переработка использованных аккумуляторов для получения лития и никеля имеет те же ограничения, что и в случае с кобальтом. При этом извлечение лития и никеля еще менее рентабельно (Barber, Marshall, 2021).

Умеренное рыночное влияние: медь

Кумулятивный спрос на медь для автомобильного электротранспорта к 2050 г. может составить 23–30% от ее запасов. Несмотря на наличие достаточных мощностей для переработки, эта величина значительна, поскольку основными потребителями меди выступают энергетика и строительство, где развитие ВИЭ и распределенной генерации будет поддерживать высокий спрос[10]. Результатом роста спроса на медь в автомобилестроении может стать структурное изменение рынка и возникновение конкуренции за поставки с отраслями — традиционными потребителями металла.

Минимальное рыночное влияние: марганец и алюминий

Включение алюминия и марганца в категорию металлов, на рынок которых развитие автомобильного электротранспорта окажет минимальное воздействие, обусловлено небольшим совокупным спросом в сравнении с запасами металлов к 2050 г.: менее 0.1% для алюминия и от 1.3% до 2% — для марганца. Хотя в статье учитывался только алюминий, используемый непосредственно в аккумуляторной батарее, запасы этого металла значительно превышают потребности в нем. Кроме того, алюминий относится к металлам с относительно простым многократным процессом переработки, поэтому уже входит в число самых перерабатываемых и повторно используемых. Около 75% добытого алюминия находится в обращении по настоящий день[11]. Запасов алюминия и марганца достаточно для покрытия спроса на аккумуляторы для электромобилей.

Заключение

В исследовании проанализировано, как развитие автомобилей на альтернативных видах топлива влияет на глобальные рынки цветных металлов на горизонте до 2050 г.

Наибольшим потенциалом доминирования в сегменте автомобилей на альтернативных видах топлива обладают электромобили — BEV и PHEV. Этот сегмент характеризуется околонулевыми значениями прямого

[9] https://www.wired.com/story/cars-going-electric-what-happens-used-batteries/, дата обращения 15.03.2025.

[10] https://ar2020.nornickel.com/commodity-market-overview/copper, дата обращения 15.03.2025.

[11] https://www.aluminum.org/Recycling, дата обращения 15.03.2025.

углеродного следа, растущим распространением на глобальных рынках, устойчивым снижением цены и ССВ, поддержанным стимулирующими мерами национальных правительств и эффектом масштаба.

По результатам сценарного анализа, к 2050 г. доля легковых BEV в продажах может составить 90–100%, доля PHEV достигнет пика 10–11% около 2030 г., а затем начнет снижаться. В коммерческом сегменте доля BEV к 2050 г. может составить 73–90%, доля PHEV не превысит 4% на протяжении всего периода. Объем спроса на цветные металлы для электромобилей сопоставлен с основными характеристиками их рынков — объемом запасов и ресурсов, страновой структурой производства, крупными отраслями-потребителями. Выявлено, что в долгосрочной перспективе развитие электромобилей способно оказать существенное влияние на рынок кобальта; умеренное — на рынки лития, никеля и меди; минимальное — на рынки марганца и алюминия.

Балансированию рынков цветных металлов могут способствовать организация сети предприятий по переработке компонентов электромобилей, покрывающей крупные центры развития электротранспорта; увеличение плотности электрозарядных станций для снижения объема аккумуляторных батарей; повторное использование отработавших в электромобилях аккумуляторов для стационарного хранения энергии. Риск значительных дефицитов никеля и кобальта может быть преодолен за счет перераспределения рынка в пользу аккумуляторов LFP-типа, в состав которых данные металлы не входят. Сегодня NMC-аккумуляторы активно уступают место батареям LFP-типа. В частности, по некоторым оценкам, доля батарей с использованием кобальта в Китае в 2024 г. составит 31% по сравнению с 44% — в 2022 г.[12] Устойчивому функционированию рынка меди будут способствовать наращивание инвестиций во вторичную переработку и изучение потенциала месторождений руд, относящихся к категории ресурсов.

Результаты моделирования продаж электромобилей согласуются со складывающимися рыночными тенденциями и спецификой региональных автомобильных рынков, однако для представленных сценариев существует ряд ограничений и неопределенностей:

1) высокая неясность перспектив развития водородного сегмента из-за его серьезного отставания от PHEV по ключевым для потребителей параметрам ССВ и доступности инфраструктуры;

2) скорость проникновения электромобилей на рынки развивающихся стран со слабым регулированием выбросов CO_2 и низким уровнем экономического и технологического развития;

3) потенциальные сбои в смежных отраслях, например, в генерации и распределении электроэнергии;

4) возможные нарушения глобальных цепочек поставок компонентов и материалов вследствие растущей геополитической напряженности.

Для технологий аккумулирования и передачи электроэнергии ключевые неопределенности связаны с возможностями качественных изменений их компонентного состава (например, при выводе на рынок новых литий-серных и литий-воздушных аккумуляторов) и с темпами совершенствования их переработки.

Исследование выполнено при поддержке Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ.

Библиография

Хомутов И.А., Лишневецкая А.И., Квон К.Р., Кукуруз Г.Г. (2021) *Зеленая революция в Европе: что она несет России. Часть 1. Автотранспорт*, М.: ИГ Петромаркет.

BloombergNEF (2023) *Electric Vehicle Outlook 2023,* New York: BloombergNEF. https://about.bnef.com/electric-vehicle-outlook/, дата обращения 15.03.2025.

BloombergNEF (2024) *Electric Vehicle Outlook 2024,* New York: BloombergNEF. https://about.bnef.com/electric-vehicle-outlook/, дата обращения 15.03.2025.

Foster R. (1986) Working The S-Curve: Assessing Technological Threats. *Research Management*, 29(4), 17–20. https://doi.org/10.1080/00345334.1986.11756976

Geroski P.A. (2000) Models of Technology Diffusion. *Research Policy*, 29(4–5), 603–625. https://doi.org/10.1016/s0048-7333(99)00092-x

Huo H., Wang M. (2012) Modeling Future Vehicle Sales and Stock in China. *Energy Policy*, 43, 17–29. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.09.063

IPCC (2022) *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,* Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/, дата обращения 15.03.2025.

ICA (2017) *The Electric Vehicle Market and Copper Demand*, McLean, VA: International Copper Association. https://internationalcopper.org/wp-content/uploads/2017/06/2017.06-E-Mobility-Factsheet-1.pdf, дата обращения 15.03.2025.

IEA (2020) *Global EV Outlook 2020*, Paris: International Energy Agency. https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2020, дата обращения 15.03.2025.

IEA (2022) *Global EV Outlook 2022*, Paris: International Energy Agency. https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2022, дата обращения 15.03.2025.

IEA (2023) *Global EV Outlook 2023*, Paris: International Energy Agency. https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023, дата обращения 15.03.2025.

[12] https://www.mining.com/web/worlds-biggest-cobalt-miner-is-gloomy-on-the-ev-metals-future/, дата обращения 15.03.2025.

IEA (2024) *Global EV Outlook 2024*, Paris: International Energy Agency. https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024, дата обращения 15.03.2025.

Krajinska A. (2021) *Magic Green Fuels,* Brussels: European Federation for Transport and Environment. https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2021/11/2021_12_TE_e-fuels_cars_pollution.pdf, дата обращения 15.03.2025.

Kumar R.R., Guha P., Chakraborty A. (2022) Comparative Assessment and Selection of Electric Vehicle Diffusion Models: A Global Outlook. *Energy*, 238(C), 1–16. https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121932

Kumar A. (2024) A Comprehensive Review of an Electric Vehicle Based on the Existing Technologies and Challenges. *Energy Storage*, 6(5), e70000. https://doi.org/10.1002/est2.70000

Liang Y., Zhao C., Yuan H., Chen Y., Zhang W., Huang J.Q., Yu D., Liu Y., Titirici M., Chueh Y., Yu H., Zhang Q. (2019) A Review of Rechargeable Batteries for Portable Electronic Devices. *InfoMat*, 1, 6–32. https://doi.org/10.1002/inf2.12000

Mahajan V., Muller E. (1979) Innovation Diffusion and New Product Growth Models in Marketing. *Journal of Marketing*, 43(4), 55–68. https://doi.org/10.2307/1250271

Maisel F., Neef C., Marscheider-Weidemann F., Nissen N.F. (2023) A Forecast on Future Raw Material Demand and Recycling Potential of Lithium-ion Batteries in Electric Vehicles. *Resources, Conservation and Recycling*, 192, 106920. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.106920

OICA (2024) *Global Sales Statistics*. https://www.oica.net/category/sales-statistics/, дата обращения 15.03.2025.

Qian L., Soopramanien D. (2014) Using Diffusion Models to Forecast Market Size in Emerging Markets with Applications to the Chinese Car Market. *Journal of Business Research*, 67 (6), 1226–1232. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2013.04.008

Rietmann N., Hugler B., Lieven T. (2020) Forecasting the Trajectory of Electric Vehicle Sales and the Consequences for Worldwide CO2 Emissions. *Journal of Cleaner Production*, 261, 121038. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121038

Rota M.F., Carcedo J.M., Garcia J.P. (2016) Dual Approach for Modelling Demand Saturation Levels in the Automobile Market. The Gompertz Curve: Macro Versus Micro Data. *Investigacion Economica*, 75 (296), 43–72. https://doi.org/10.1016/j.inveco.2016.07.003

S&P Global (2024) *Light Vehicle Sales Forecast*, Washington, D.C.: S&P Global.

Slattery M., Dunn J., Kendall A. (2021) Transportation of Electric Vehicle Lithium-Ion Batteries at End-of-Life: A Literature Review. *Resources, Conservation and Recycling*, 174, 105755. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105755

US Geological Survey (2023) *Mineral Commodity Summaries 2023*, Reston, VA: US Geological Survey. https://doi.org/10.3133/mcs2023

US Geological Survey (2024) *Mineral Commodity Summaries 2024*, Reston, VA: US Geological Survey. https://doi.org/10.3133/mcs2024

Xu C., Dai Q., Gaines L., Hu M., Tukker A., Steubing B. (2020) Future Material Demand for Automotive Lithium-Based Batteries. *Communications Materials*, 1, 99. https://doi.org/10.1038/s43246-020-00095-x