Белорусский экономический журнал. 2026. № 3. С. 28–41.
Belarusian Economic Journal. 2026. No 3. PP. 28–41.

ЭКОНОМИКА СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА И ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ. ЭКОНОМИКА ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНВЕСТИЦИЙ В БЕЗУГЛЕРОДНУЮ ЭНЕРГЕТИКУ В КОНТЕКСТЕ ЗЕЛЕНОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ЭКОНОМИКИ

И.П. Деревяго, Чжоу Боян*

Аннотация. Увеличение доли безуглеродных технологий получения энергии в общем энергетическом балансе и постепенное замещение энергетики, основанной на использовании ископаемого топлива, является одним из основных условий зеленой трансформации экономики и требует значительных инвестиций. В представленном исследовании рассматривается подход к оценке инвестиций в безуглеродную энергетику, основанный на учете положительных внешних эффектов, которые рассматриваются как фактор снижения стоимости финансирования. Особое внимание уделяется эффекту кривой обучения. Его оценка показывает, что ряд безуглеродных технологий имеет значительный потенциал уменьшения затрат. Включение данного потенциала в финансовый анализ проектов в сфере безуглеродной энергетики существенно повышает их инвестиционную привлекательность. Дальнейшие исследования по оценке немонетизированных эффектов и поиску оптимальных инструментов их трансформации в финансовый результат позволят существенно снизить риск принятия неэффективных инвестиционных решений.

Ключевые слова: безуглеродная энергетика, внешние эффекты, зеленые инвестиции, зеленая трансформация, риск финансирования, эффект кривой обучения.

JEL-классификация: G30, Q42, Q54, Q55.

DOI: 10.46782/1818-4510-2026-3-28-41

Материал поступил 1.06.2026 г.

Введение

Ускорение климатических изменений, истощение ресурсов и деградация окружающей среды обусловливают необходимость перехода к новой модели производства и потребления, построенной на принципах экологической устойчивости. На практике это подразумевает зеленую трансформацию экономики. Ее эффективная реализация выступает одним из ключевых приоритетов экономической политики Европейского союза, Китая и ряда других стран мира.

В основе зеленой трансформации лежит структурная перестройка экономики, ориентированная на усиление роли возобновляемых ресурсов (Lo, Nyangchak, Lin, 2025), что в конечном итоге должно содействовать развитию экологически более безопасных технологий и ограничению масштабов воздействия на окружающую среду. Одним из важнейших критериев такой трансформации выступает доля зеленого сектора в структуре ключевых макроэкономических параметров, таких как выпуск продукции, объем инвестиций, общее количестве занятых и т. п. В то же время само понятие зеленого сектора на сегодняшний день не имеет однозначной трактовки. Для включения тех или иных проектов, видов деятельности в состав зеленой экономики могут применяться технологический принцип, оценка соответствия нормам экологи-

* **Деревяго Игорь Петрович** (1218ipd@gmail.com), кандидат экономических наук, профессор, Белорусский государственный университет (г. Минск, Беларусь); https://orcid.org/0000-0003-3170-0512
Чжоу Боян (zhouboyang113@gmail.com), Белорусский государственный университет (г. Минск, Беларусь)

Для цитирования: Деревяго И.П., Чжоу Боян. 2026. Оценка эффективности инвестиций в безуглеродную энергетику в контексте зеленой трансформации экономики. *Белорусский экономический журнал*. № 3. С. 28–41. DOI: 10.46782/1818-4510-2026-3-28-41

ческой безопасности, оценка потенциала снижения воздействия на окружающую среду, степень содействия развитию рынка зеленых товаров и услуг и прочие критерии[1]. Однако независимо от принятого подхода к идентификации зеленого сектора, энергетика выступает его ключевым элементом.

По оценкам Всемирного института ресурсов, около 75% антропогенных выбросов парниковых газов обусловлено процессами производства и использования энергии[2]. В связи с этим трансформация энергетического комплекса является одним из важнейших условий обеспечения экологической устойчивости (Зорина, 2021). Согласно данным Лондонской фондовой биржи, энергетика и связанные с ней виды деятельности обеспечивают более 60% выпуска в зеленом секторе, а с учетом транспорта, функционирование которого напрямую определяется количеством и качеством потребленной энергии, эта доля будет превышать 80%[3]. Ключевая роль энергетики в развитии зеленой экономики во многом обусловлена значительным потенциалом снижения воздействия на окружающую среду, поэтому ее трансформация на основе внедрения безуглеродных технологий определяет успех зеленой трансформации в целом.

Энергетический комплекс и связанные с ним виды деятельности отличаются высокой капиталоемкостью. Как результат, широкомасштабное замещение ископаемого топлива на безуглеродные источники энергии требует значительных инвестиционных затрат в создание новых мощностей и инфраструктуры. Вместе с тем мобилизация необходимых финансов не всегда возможна без государственной поддержки. Ряд преимуществ безуглеродной энергетики не превращается в денежный поток непосредственного инвестора, поэтому ее развитие зависит от того, насколько государственное регулирование позволяет поддерживать инвестиционную привлекательность зеленого сектора.

Международный опыт показывает, что политика зеленой трансформации может приводить к искажению стимулов, усилению диспропорций и неэффективному использованию инвестиций, если она недостаточно учитывает территориальные особенности, сложившуюся структуру экономики, доступность необходимых ресурсов и прочие факторы (Rodrigues-Pose, Bartalucci, 2024). В итоге меры государственной поддержки развития безуглеродной энергетики часто не приводят к ожидаемым результатам. В частности, Европейскому союзу приходится пересматривать ранее заявленные цели по отказу от ископаемого топлива, а ряд проектов в рамках так называемой Зеленой сделки (The European Green Deal) не достигли запланированных результатов (Henrekson, Sandström, Stenkula, 2026). На этом фоне особенно выделяются решения отдельных стран об отказе от атомной энергии, которые сегодня все чаще рассматриваются как ошибочные. Несмотря на то, что после ряда аварий и инцидентов атомная генерация стала восприниматься как один из наиболее опасных источников энергии, с точки зрения эмиссии парниковых газов она оценивается как экологически более приемлемая альтернатива использованию ископаемого топлива. Особенно это касается действующих атомных электростанций. С учетом того, что наибольшая нагрузка на окружающую среду характерна для стадии строительства, продление их эксплуатации связано с минимальным экологическим ущербом.

Потенциальная роль государственной поддержки в обеспечении успеха зеленой трансформации может быть продемонстрирована на примере Китая, который на сегодняшний день благодаря целенаправленной политике правительства является лидером в сфере развития безуглеродной энергетики. Вместе с тем китайская экономическая модель, в рамках которой инвестиции наряду с экспортом выступают основным драйвером роста, также характеризуется недостаточной эффективностью такой поддержки. Чрезмерное стимулиро-

[1] McDowall W., Fuchs J. Measuring the Green Economy. URL: https:// www.repository-escoe.com/id/eprint/71/1/ESCoE%20DP%202025-09.pdf

[2] Ge M., Friedrich J., Vigna L. Where Do Emissions Come From? 4 Charts Explain Greenhouse Gas Emissions by Sector. URL: https://www.wri.org/insights/4-charts-explain-greenhouse-gas-emissions-countries-and-sectors

[3] London Stock Exchange Group. Investing in the Green Economy 2024. Growing in a Fractured Landscape. URL: https://www.lseg.com/en/insights/investing-green-economy-2024-growing-fractured-landscape

вание инвестиционных расходов приводит к созданию избыточных мощностей, возникновению структурных диспропорций, что снижает отдачу от финансовых вложений (Shiwei, Tingwei, Xing, Lancui, Yi-Ming, 2021). Это касается и зеленой энергетики, потенциал которой в Китае используется далеко не полностью по причине особенностей регулирования отрасли, региональных дисбалансов, неравномерного развития различных элементов энергетической инфраструктуры. Как результат, объемы использования ископаемого топлива остаются высокими[4].

Обеспечение эффективной зеленой трансформации, как энергетического сектора, так и экономики в целом, требует повышения обоснованности инвестиционных решений, включая решения по оказанию государственной поддержки. В связи с этим в рамках данной статьи рассматриваются методологические и практические вопросы оценки инвестиций в безуглеродную энергетику с учетом стратегических приоритетов устойчивого развития.

Методологический подход к оценке инвестиций в безуглеродную энергетику с учетом приоритетов зеленой трансформации

В качестве базового критерия для оценки инвестиционных решений принято использовать показатель чистого дисконтированного дохода (ЧДД). Его применение обеспечивает сопоставимость расчетов независимо от продолжительности проекта, его уровня риска, различий в графике денежных потоков (Berk, DeMarzo, 2017). При оценке инвестиций в безуглеродную энергетику принятие решений о финансировании также может базироваться на ЧДД. В то же время необходимость учета стратегических интересов экологической устойчивости подразумевает, что в оценку должны включаться не только непосредственные финансовые потоки, но и немонетизированные внешние эффекты, которые в сложившихся институциональных условиях не влияют на финансовые результаты проекта, однако могут иметь существенное значение в долгосрочной перспективе.

В экономической науке рассмотрению внешних эффектов уделяется значительное внимание при изучении вопросов неэффективности рынка (Daly, Farley, 2011). С этой позиции немонетизированные внешние эффекты можно также назвать нерыночными, хотя реальные денежные потоки определяются не только рыночными факторами.

В рамках проблемы оценки инвестиций в безуглеродную энергетику все нерыночные эффекты целесообразно разделить на две группы – эффекты со стороны спроса и со стороны предложения. Первые во многом носят институциональный характер и часто рассматриваются как субъективные, поскольку определяются приоритетностью вопросов экологии в системе экономического регулирования и готовностью субъектов экономики платить за экологические блага. Вторые в большей степени зависят от объективных факторов, связанных с развитием технологий и доступностью ресурсов, необходимых для производства энергии.

В отношении безуглеродной энергетики эффекты со *стороны спроса* выражаются в двух аспектах. Первый аспект связан с регулированием энергетического рынка, которое может как стимулировать, так и сдерживать развитие. С одной стороны, в ряде стран и регионов с целью стимулирования возобновляемой энергетики применяются специальные тарифы и иные инструменты (Минажова, Бекбаев, Кожагелди, Абитаева, Мынбаева, 2023; Зорина, Юркевич, 2024), направленные на поддержку необходимого уровня доходов от реализации безуглеродной энергии. С другой стороны, типовая модель рынка электроэнергии может ставить в невыгодные условия производителей, чья генерация определяется погодными условиями и не может оперативно реагировать на потребности рынка (Christophers, 2024). Как результат выработка солнечной и ветровой энергии часто приводит к избытку ее предложения и падению цен, которые иногда могут принимать даже отрицательные значения, что существенно снижает возможности получения доходов. В то же время при неблагоприятных для возобновляемой генерации

[4] Hove A. China's Messy Power Sector Mid-Game. URL: https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2026/04/Comment-Chinas-Messy-Power-Sector-Mid-Game.pdf

погодных условиях образуется дефицит, который сопровождается ростом цен. Однако производители солнечной и ветровой энергии не могут им воспользоваться в полной мере. В данном контексте институциональное регулирование энергетического рынка играет ключевую роль в формировании инвестиционной привлекательности безуглеродной энергетики в целом и солнечной и ветровой генерации в частности.

Второй аспект связан с уровнем спроса на улучшение состояния окружающей среды. Развитие безуглеродной энергетики в первую очередь обусловливается необходимостью замещения ископаемого топлива и устранения негативных экологических последствий, связанных с его использованием. Таким образом, удовлетворяются не только энергетические, но и экологические потребности. Последние могут включать широкий спектр положительных эффектов, включая уменьшение загрязнения, снижение заболеваемости, сохранение экосистем и пр. В частности, по некоторым оценкам, замещение 1 МВт · ч, произведенного с помощью угля и природного газа, позволит снизить ущерб от загрязнения на 50 и 10 долл. США соответственно[5]. В то же время развитие отдельных видов безуглеродной энергетики может повлечь специфические негативные последствия, такие как отчуждение дополнительных территорий для размещения солнечных панелей, затопление земель при строительстве гидроэлектростанций, риски, связанные с хранением отработанных радиоактивных отходов и пр.

Возможность экономической оценки разнообразных экологических эффектов и ее трансформации в денежный поток зависит от наличия необходимой информации и соответствующих институциональных условий. Однако несмотря на значительные различия, все безуглеродные источники объединяет положительный экологический эффект, связанный со снижением эмиссии диоксида углерода. Его денежная оценка может определяться исходя из цены единицы такой эмиссии (как правило, 1 тонны диоксида углерода) на основе углеродного налога, рыночной стоимости или иных источников информации.

На сегодняшний день только небольшое количество государств ввело углеродный налог, а ставки по нему различаются в десятки и более раз (Шушкевич, Лопачук, Лихтарович, 2025), что усложняет использование такого налога в качестве базы ценообразования. Рыночный механизм оценки стоимости является более объективным. Тем не менее, сегодня не существует единого глобального рынка для квот на эмиссию парниковых газов. Только отдельные страны и регионы охвачены подобными торговыми системами, а диапазон цен на начало 2026 г. варьировался от 90 долл. США за 1 тонну углерода в европейской торговой системе до 10 долл. США в Китае и Южной Корее[6]. Поэтому возможность монетизации экологического эффекта, обусловленного спросом на уменьшение эмиссии парниковых газов, определяется доступом производителей безуглеродной энергии на рынок углерода.

Нерыночные эффекты со *стороны предложения* можно разделить на три группы: ресурсные, институциональные и технологические. Ресурсные эффекты, как правило, имеют широкую рыночную базу для оценки, включая цены на ископаемое топливо, оборудование и прочие ресурсы, а соответственно без проблем поддаются монетизации. Вместе с тем отдельные аспекты, связанные с доступностью ресурсов и риском перебоя поставок, не всегда могут быть учтены рынком и являются источником значительной неопределенности. Безусловным преимуществом безуглеродной энергетики в данном случае выступает независимость от поставок ископаемого топлива и колебания цен на него, что не всегда можно учесть в прямой форме при оценке эффективности инвестиций. Обратной стороной является зависимость возобновляемых источников от погодных условий, однако при наличии рынка электроэнергии данный фактор частично учитывается в ценообразовании, как было показано выше.

[5] IRENA. 2025. Renewable Power Generation Costs in 2024. International Renewable Energy Agency. Abu Dhabi. URL: https://www.irena.org/Publications/2025/Jun/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2024.

[6] International Carbon Action Partnership. 2025. ICAP Allowance Price Explorer. URL: https://icapcarbonaction.com/en/ets-prices

Институциональные эффекты со стороны предложения обусловливаются характером регулирования в сфере энергетики, которое определяет возможности создания и использования тех или иных элементов энергетической системы. Такие факторы, как возможность использования различных льгот и субсидий, направленных на поддержку производителей безуглеродной энергии, характер административных и иных процедур, связанных со строительством и эксплуатацией энергетических объектов и пр., обычно учитываются при обосновании инвестиционных проектов. Тем не менее, полностью учесть институциональное влияние на их экономическую оценку невозможно, особенно принимая во внимание длительный период реализации таких проектов, в течение которого нормативные и законодательные изменения могут существенно повлиять на финансовые результаты.

Для анализа технологических эффектов, обусловленных инвестициями в безуглеродную энергетику, целесообразно обратиться к концепции кривой обучения (Kileber, Parente, 2024). Эффект кривой обучения выражается потенциалом снижения затрат на различных стадиях жизненного цикла развития технологий. На этапе зрелости данный эффект практически не проявляется, тогда как на ранних стадиях он может сыграть важную роль в повышении эффективности. С этой точки зрения ряд сравнительно молодых технологий получения безуглеродной энергии имеет преимущества перед относительно зрелыми технологиями, основанными на использовании ископаемого топлива.

При изучении эффекта кривой обучения в широком понимании принято выделять три компонента (Hoekstra, Alkemade, 2025):

• эффект непосредственного обучения (learning by doing), который заключается в повышении эффективности за счет совершенствования навыков и компетенций с ростом опыта использования технологий;

• эффект масштаба (Scale Effect), обусловленный экономией на различных издержках, которые можно отнести к постоянным, при расширении производства и увеличении количества мощностей;

• эффект исследований (learning by searching), который выражается в снижении удельных затрат на производство по мере увеличения роста исследований и накопления инноваций.

Вклад различных компонентов в общий эффект может различаться в зависимости от технологии и конкретных условий ее применения. Например, исследования могут играть ведущую роль в повышении эффективности для инновационных компаний и стран-лидеров в развитии тех или иных технологий, тогда как эффект масштаба и обучения будет более значимым для их последователей. При этом в любом случае важной особенностью эффекта кривой обучения является разрыв во времени между понесенными затратами и его проявлением. Это затрудняет возможность учета и монетизации эффекта в рамках конкретного проекта. Как правило, первоначальные инвесторы формируют технологическую и производственную базу, накапливают опыт, которыми они или их конкуренты смогут воспользоваться только в рамках последующих проектов. Поэтому эффект кривой обучения во многом носит нерыночный характер, хотя формирование институциональных условий для монетизации будущего потенциала может способствовать его трансформации в текущий доход инвестора.

Общая классификация нерыночных (немонетизированных) эффектов, оценка которых позволит повысить обоснованность решений по инвестированию в безуглеродную энергетику с учетом требований долгосрочной экологической устойчивости экономики, представлена на рис. 1.

Использование ЧДД в качестве базового критерия принятия решений подразумевает трансформацию этих эффектов в денежный поток. Однако немаловажное значение субъективного фактора и вероятностный характер ряда нерыночных эффектов осложняют их включение в финансовый анализ в явном виде. В рамках сложившегося на практике подхода недостаточно определенные элементы оценки принято учитывать неявно, через влияние риска на ставку дисконта (процента), которая применяется при расчете ЧДД.



Рис. 1. Классификация нерыночных (немонетизированных) эффектов

Источник. Авторская разработка.

Традиционно риск является источником рисковой премии, а рост его уровня приводит к увеличению ставки. Вместе с тем в отношении безуглеродной энергетики следует отметить, что неучтенные нерыночные эффекты выражают ее роль в снижении общего уровня риска и повышении долгосрочной устойчивости развития. Поэтому их включение в оценку инвестиций должно приводить к падению рисковой премии. В данном случае можно говорить о положительной неопределенности, или рисковой премии со знаком «минус», которая в обобщенном виде выражает дополнительный финансовый потенциал безуглеродной энергетики, неучтенный в рамках конкретных инвестиционных проектов.

Для определения величины положительной неопределенности в зависимости от характера нерыночных эффектов и наличия необходимой информации могут использоваться различные методы оценки инвестиционного и финансового рисков (Berk, DeMarzo, 2017). Продемонстрировать влияние положительной неопределенности на расчет эффективности инвестиций в безуглеродную энергетику можно с помощью показателя внутренней нормы доходности (ВНД). Его значение характеризует критический уровень ставки дисконта, при которой ЧДД проекта при прочих равных условиях равно нулю. Попытка учесть нерыночные эффекты в явном виде приведет к изменению ВНД. Таким образом, разница между ВНД без учета нерыночных эффектов (IRR_m) и с их учетом (IRR_{nm}) может стать отправной точкой для определения величины положительной неопределенности (u_p):

$$u_p = IRR_m - IRR_{nm}.$$

Результаты использования данного подхода в связи с ограниченностью информации могут рассматриваться как недостаточно точные с точки зрения явной оценки ЧДД, однако полученное значение положительной неопределенности может в дальнейшем использоваться в качестве основы для регулирования ставки дисконта, что вполне соответствует сложившейся финансовой практике.

Оценки влияния нерыночных эффектов на эффективность инвестиций в безуглеродную энергетику

Сравнительная оценка ВНД для различных технологий производства электроэнергии требует обширной финансово-экономической информации. Затраты и доходы для одной и той же технологии могут

существенно различаться в зависимости от уровня ее развития в той или иной стране, административно-законодательного регулирования в сфере энергетики и иных факторов. Особенно это касается возобновляемых источников, финансовый потенциал которых во многом определяется природно-географическими условиями. Поскольку в рамках данной статьи ставится задача сравнить разные технологии, за основу оценки приняты усредненные данные, доступные в открытых источниках.

Предложенная методология предполагает расчет ВНД с учетом и без учета нерыночных эффектов. При этом денежная оценка последних – довольно сложная задача. Особенно это касается эффектов со стороны спроса и институциональных эффектов, субъективный характер которых затрудняет выработку единого подхода к определению их монетизированной величины. Среди них эффект, обусловленный снижением эмиссии диоксида углерода, вероятно, является наименее субъективным. Физически его объем для различных технологий производства электроэнергии может быть рассчитан на основе материального баланса. Поскольку наиболее современные газовые электростанции потребляют около 150 куб. м природного газа на производство 1 МВт·ч электроэнергии, это эквивалентно эмиссии порядка 0,3 т CO_2. На практике, учитывая реальный уровень действующих технологий, данная величина может быть в 2 и более раз выше. Для наиболее эффективных угольных электростанций производство 1 МВт·ч электроэнергии требует около 0,5 т угля (количество может варьироваться в зависимости от качества угля), что предполагает эмиссию на уровне 1,2 т CO_2. Фактический уровень эмиссии, как и для газовой генерации, существенно выше. Соответственно, при замещении угольных и газовых электростанций безуглеродными источниками получения электричества можно говорить о положительном эффекте в размере, эквивалентном объему снижения выбросов. Однако значительные региональные расхождения в стоимости квот на эмиссию диоксида углерода, а также отсутствие механизма монетизации данного эффекта во многих странах усложняют его включение в финансовые расчеты.

В рамках данного исследования основное внимание уделяется оценке технологических эффектов, которые по своей природе являются более объективными, так как определяются логикой инновационного развития и связаны с эффектом кривой обучения. На основе данных Международного агентства по возобновляемой энергетике (IRENA) был проведен анализ параметров стоимости наиболее распространенных для возобновляемой энергетики технологий (солнечные панели, ветровая генерация) во взаимосвязи с динамикой установленной мощности и количеством патентов. В качестве базы для анализа были выбраны Китай, Индия, Германия и США. Эти страны, с одной стороны, относятся к лидерам в сфере развития возобновляемой энергетики, что позволяет получить наиболее полные данные для анализа, а с другой – представляют модели с различными подходами к развитию, что дает возможность изучить роль институциональных различий.

В табл. 1 представлена оценка корреляции между стоимостью капитальных вложений в расчете на 1 кВт мощности и объемом установленной мощности, а также между стоимостью капитальных вложений в расчете на 1 кВт мощности и количеством патентов (за исключением Индии, для которой число патентов статистически незначительно). Поскольку влияние указанных факторов на стоимость проявляется не сразу, анализ проводился для вариантов с различной величиной временного лага. Как показывают результаты, для ветровой энергетики взаимосвязь между стоимостью и масштабом использования сильнее, чем для солнечной, а эффект проявляется фактически без запаздывания (за исключением Индии). Для солнечной энергетики взаимосвязь между стоимостью и масштабом использования может усиливаться в течение 3–4 лет. В Китае лаг составляет 4 года, в Германии – 3 года, в Индии и США – 1 год.

Что касается взаимосвязи исследовательской активности и стоимости технологий, то в отношении солнечной энергетики роль данного фактора статистически более

Таблица 1

Оценка взаимосвязи показателя стоимости капитальных вложений с уровнем энергетических мощностей и количеством патентов по данным за 2010 –2024 гг.

Наименование параметра корреляции с показателем удельной стоимости капитальных вложений	Лаг (запаздывание реакции стоимости на изменение параметра), лет				
	0	1	2	3	4
Китай, солнечная энергетика					
Установленная мощность	-0,663	-0,699	-0,764	-0,796	-0,792
Количество патентов	-0,801	-0,774	-0,795	-0,834	-0,846
Китай, ветровая энергетика					
Установленная мо щность	-0,970	-0,968	-0,959		
Количество патентов	-0,962	-0,980	-0,978	-0,972	
Германия, солнечная энергетика					
Установленная мощность	-0,803	-0,872	-0,932	-0,950	-0,938
Количество патентов	-0,985	-0,983	-0,979		
Германия, ветровая энергетика					
Установленная мощность	-0,942	-0,929	-0,925		
Количество патентов	-0,923	-0,925	-0,912	-0,926	
США, солнечная энергетика					
Установленная мощность	-0,811	-0,812	-0,810		
Количество патентов	-0,985	-0,971	-0,955	-0,953	
США, ветровая энергетика					
Установленная мощность	-0,960	-0,946	-0,928		
Количество патентов	-0,984	-0,978	-0,965		
Индия, солнечная энергетика					
Установленная мощность	-0,677	-0,732	-0,690	-0,642	
Индия, ветровая энергетика					
Установленная мощность	-0,880	-0,880	-0,940	-0,906	

Источник. Авторская разработка на основе данных IRENA.

значима, чем фактора суммарной мощности, тогда как для ветровой энергетики значимость обоих факторов практически одинакова. Одновременно можно увидеть, что степень корреляции между стоимостью технологий и установленной мощностью в Индии наиболее низкая из четырех стран. Это можно связать с недостатком исследовательской активности по сравнению с остальными тремя государствами.

В целом, несмотря на ограниченный объем данных, проведенная оценка показала значительный уровень корреляции между стоимостью технологий и масштабом ее использования. При этом высокая исследовательская активность, вероятнее всего, способствует усилению данной взаимосвязи. Однако опыт Индии показывает, что даже при низком уровне исследовательской активности рост установки мощностей дает эффект снижения стоимости, на что могут влиять как непосредственно эффекты обучения и масштаба, так и значительные возможности трансфера технологий в современном мире даже при недостаточности собственной инновационной базы.

В табл. 2 представлены результаты количественной оценки эффекта кривой обучения для 10-летнего (2015–2024 гг.) и 15-летнего (2010–2024 гг.) периодов. В основу оценки положен показатель среднего снижения стоимости капитальных вложений вследствие двукратного увеличения установленных мощностей. Анализ результатов показывает, что, как правило, чем быстрее растет масштаб применения технологии, тем ниже темпы снижения стоимости относительно темпов роста масштаба. Одной из причин подобной динамики является то, что при более медленном расширении деятельности больше возможностей учитывать передовые организационно-технологические изменения. В то же время увеличение темпов абсолютного падения стоимости требует ускорения темпов роста установленных мощностей. Именно поэтому максимальные темпы снижения стоимости солнечной энергетики с 2010 по

Таблица 2

Уровень снижения стоимости капитальных вложений в зависимости от роста мощностей для различных технологий

Показатель	Китай	Индия	Германия	США
Солнечная энергетика за период 2015–2024 гг.				
Темпы роста установленной мощности, раз	20,51	19,46	2,33	8,12
Снижение стоимости капитальных вложений в результате двукратного увеличения мощностей, %	20,70	22,31	53,86	29,65
Снижение стоимости за период, %	63,60	66,07	61,09	65,45
Солнечная энергетика за период 2010–2024 гг.				
Темпы роста установленной мощности, раз	1025,09	2966,78	5,00	60,54
Снижение стоимости капитальных вложений в результате двукратного увеличения мощностей, %	17,99	19,05	57,89	24,42
Снижение стоимости за период, %	86,24	91,27	86,56	80,94
Ветровая энергетика за период 2015–2024 гг.				
Темпы роста установленной мощности, раз	3,68	1,92	1,54	2,10
Снижение стоимости капитальных вложений в результате двукратного увеличения мощностей, %	27,64	28,24	42,24	26,13
Снижение стоимости за период, %	45,58	26,82	28,96	27,70
Ветровая энергетика за период 2010–2024 гг.				
Темпы роста установленной мощности, раз	16,26	3,65	2,37	3,90
Снижение стоимости капитальных вложений в результате двукратного увеличения мощностей, %	16,46	17,96	32,11	26,26
Снижение стоимости за период, %	51,51	30,92	38,28	44,99
Аккумуляторные батареи (в мире в целом) за период 2015–2024 гг.				
Темпы роста установленной мощности, раз	6,72			
Снижение стоимости капитальных вложений в результате двукратного увеличения мощностей, %	26,69			
Снижение стоимости за период, %	87,59			
Аккумуляторные батареи (в мире в целом) за период 2010–2024 гг.				
Темпы роста установленной мощности, раз	10,94			
Снижение стоимости капитальных вложений в результате двукратного увеличения мощностей, %	21,14			
Снижение стоимости за период, %	92,55			

Источник. Авторская разработка на основе данных IRENA.

2024 г. демонстрирует Индия (более 90%), а ветровой энергетики – Китай (более 50%).

В целом, в условиях современной глобализированной экономики эффект снижения стоимости технологий достаточно быстро распространяется на весь мир. Поэтому несмотря на институциональные и региональные различия, абсолютные темпы снижения стоимости безуглеродных технологий (включая технологии аккумуляторных батарей) характерны для всех регионов, хотя уровень снижения может различаться. Следовательно, данная тенденция может быть положена в оценки положительной неопределенности.

В табл. 3 и 4 представлен расчет ВНД в современных условиях и с учетом эффекта кривой обучения для наиболее распространенных ископаемых источников электроэнергии (природный газ и уголь) и безуглеродных источников с наибольшим потенциалом для роста. С целью сопоставимости оценка проводилась в расчете на 1 кВт мощности исходя из доступной экономической и технической информации на основе усредненных значений. Для определения доходов была принята единая для всех источников генерации цена 90 долл. США за 1 МВт · ч[7], хотя диапазон колебаний ее величины во времени и пространстве может быть очень значительным. Также, как указывалось выше, равная цена для всех источников не всегда отвечает условиям современных рынков электроэнергии, которые предполагают более низкие цены для нерегулярных возобновляемых технологий.

Важным аспектом оценки нерегулярных технологий является необходимость учета инвестиций в инфраструктуру пере-

[7] IEA. Real-Time Electricity Tracker. URL: https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/real-time-electricity-tracker?from=2026-4-28&to=2026-5-28&category=price

Таблица 3

Сравнительная оценка ВНД для базовых технологий получения электроэнергии в расчете на 1 кВт мощности

Технология	Капвложения, долл.	Полезная мощность, %	Операционные расходы		Срок службы, лет	ВНД (IRR_m), %
			постоянные, долл. в год	переменные, долл./МВт·ч		
Солнечные панели	710	17	7,2	0	35	17,56
Солнечные панели + батарея	1478	25	14,0	0	35	11,92
Ветровая наземная	1040	34	32,0	0	30	20,67
Ветровая оффшорная	2850	43	82,0	0	30	7,76
Геотермальная	4045	80	15.5	17,0	25	10,10
Природный газ	1100	90	21,3	34,0	30	32,81
Уголь	2100	80	42,0	57,0	60	8,24
Атомная энергия	4800	90	150,0	13,0	70	7,53

Источник. Авторская разработка на основе данных из открытых источников: Lazard (2025). Levelized Cost of Energy. June 2025. URL: https://www.lazard.com/news-announcements/lazard-releases-2025-levelized-cost-of-energyplus-report-pr/; International Energy Agency (2025). World Energy Outlook 2025. URL https://iea.blob.core.windows.net/assets/81980a53-9716-47f1-904e-b92a2c4d2ea4/WorldEnergyOutlook2025.pdf; IRENA (2025). Renewable Power Generation Costs in 2024. International Renewable Energy Agency. Abu Dhabi. URL: https://www.irena.org/Publications/2025/Jun/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2024

Таблица 4

Оценка положительной неопределенности u_p на основе эффекта кривой обучения

Технология	Прогнозное значение через 10 лет		$ВНД^{+10}$, %	IRR_{nm}, %	u_p, %
	Капвложения, долл./кВт	Полезная мощность, %			
Солнечные панели	355	18	35,46	18,73	1,17
Солнечные панели + батарея	734	26	24,72	13,69	1,77
Ветровая наземная	936	37	24,94	21,02	0,35
Ветровая оффшорная	1710	48	15,87	10,05	2,29
Геотермальная	3034	80	13,73	11,18	1,08
Природный газ	1100	90	32,81	32,81	0,00
Уголь	2100	80	8,24	8,24	0,00
Атомная энергия	4320	90	8,21	7,88	0,35

Источник. Авторская разработка.

дачи и накопления энергии. Относительная величина таких инвестиций растет с увеличением доли возобновляемой генерации (Henrekson, Sandström, Stenkula, 2026). Для демонстрации учета фактора нерегулярности в расчетах предложен вариант комбинирования солнечных панелей с аккумулятором мощностью 4 КВт·ч, что позволяет увеличить длительность периода поставки электроэнергии и уровень использования мощности соответственно. Хотя на практике дополнительные инвестиции, связанные со стабилизационной инфраструктурой, могут быть еще выше.

Полученные результаты показывают, что в современных условиях с большой вероятностью производство электроэнергии на основе природного газа будет более привлекательно с финансовой точки зрения по сравнению с безуглеродными источниками, хотя для каждого конкретного проекта оценка может существенно отличаться в зависимости от стоимости топлива, других экономических и технических характеристик. При этом большинство возобновляемых технологий получения электричества на сегодняшний день в среднем более эффективны, чем угольная энергетика. Хотя

дополнительные инвестиции в создание аккумуляторных накопителей снижают доходность первых, многие из них все равно остаются конкурентоспособными по сравнению с последними.

Оценка влияния эффекта кривой обучения с учетом проведенного анализа трендов снижения стоимости и развития технологий, а также прогнозной информации МЭА для 2035 г. построена на следующих предпосылках:

• эффект кривой обучения может привести к снижению как капитальных, так и операционных затрат. Учитывая, что для большинства безуглеродных технологий операционные затраты сравнительно незначительны, а для тепловой генерации главным образом зависят от рыночных цен на энергоносители, для оценки учитывается эффект только от снижения капитальных расходов, а также эффект от увеличения степени использования мощности;

• фактический размер будущей экономии, достигнутой за счет эффекта кривой обучения, зависит от масштабов распространения технологии. Чем быстрее будут наращиваться новые производственные мощности, тем вероятнее большее снижение стоимости. В свою очередь, абсолютный эффект от уменьшения затрат будет определяться количеством установленных по сниженной стоимости мощностей. Не затрагивая вопрос прогнозирования масштабов будущего использования различных технологий, при оценке снижения затрат принято, что 1 кВт установленной мощности влияет на 1кВт будущей, хотя это может стать причиной занижения эффекта;

• для оценки влияния эффекта кривой обучения на будущие технико-экономические параметры технологии с учетом характера прогноза МЭА был принят период 10 лет[8].

Представленные в табл. 4 результаты оценки доходности для различных технологий получения электричества с учетом гипотетических изменений капитальных затрат и полезной мощности (остальные параметры остаются прежними) под влиянием эффекта кривой обучения через 10 лет ($ВНД^{+10}$) показывают, что наибольший рост эффективности ожидается для солнечных панелей, оффшорных ветровых установок, а также аккумуляторных батарей. Незначительный прогресс возможен в атомной энергетике. В то же время угольная и газовая генерация, по оценкам специалистов, достигли предела эффективности, более того, их финансовый потенциал может быть под угрозой в результате роста цен на ископаемое топливо. Особенно это касается угольной энергетики.

Более точный прогноз требует учета планов отдельных государств в отношении развития тех или иных технологий, уточнения инновационного потенциала конкретного вида энергетики (в частности, новое поколение геотермальной энергетики характеризуется существенными изменениями технико-экономических параметров), природно-географических условий реализации энергетических проектов, оценки возможных институциональных изменений и их влияния на перспективы безуглеродной энергетики и пр. Вместе с тем целью представленных расчетов в первую очередь является сравнительный анализ инвестиционной привлекательности различных технологий получения энергии. Его результаты показывают, что в отличие от энергетики, основанной на ископаемом топливе, безуглеродная энергетика имеет значительный потенциал для ее повышения за счет эффекта кривой обучения. Основной проблемой для реализации данного потенциала является внешний характер самого эффекта, поскольку инвесторы, которые обеспечивают его достижение, с большой долей вероятности не станут его бенефициарами. Разрешение данного противоречия является важнейшим условием улучшения качества оценки и повышения инвестиционной привлекательности безуглеродной энергетики.

В табл. 4 представлена оценка IRR_{nm} для текущих инвестиций с учетом потенциального снижения капитальных затрат и увеличения полезной мощности ($ВНД^{+}$), т. е. при условии, что нерыночный эффект кривой обучения, который ожидается че-

[8] International Energy Agency (2025). World Energy Outlook 2025. URL: https://iea.blob.core.windows.net/assets/81980a53-9716-47f1-904e-b92a2c4d2ea4/WorldEnergyOutlook2025.pdf

рез 10 лет, трансформируется в денежный поток инвестора. Это позволяет рассчитать величину положительной неопределенности, обусловленную эффектом кривой обучения. Как можно увидеть, ее наибольшее значение характерно для солнечной энергетики с батареей и оффшорной ветроэнергетики, тогда как для энергетики, основанной на ископаемом топливе, равно нулю.

Оценка может корректироваться в зависимости от принятых предпосылок относительно источников и величины эффекта кривой обучения, времени его проявления, степени детализации природно-географических факторов и пр. Тем не менее, проведенный анализ показывает, что безуглеродная энергетика имеет достаточный потенциал, чтобы конкурировать с традиционными технологиями, основанными на использовании угля и природного газа. Более того, учет эффектов со стороны спроса, таких как снижение выбросов парниковых газов, еще больше повысит конкурентоспособность безуглеродных технологий, особенно по сравнению с угольной энергетикой.

Реализация указанного потенциала предполагает трансформацию положительной неопределенности в соответствующий денежный поток либо эквивалентное снижение стоимости финансирования проектов в сфере безуглеродной энергетики. Последний вариант, как было показано выше, в большей степени соответствует сложившимся институциональным условиям. В качестве источника снижения стоимости финансирования могут выступать различные формы господдержки, а также не связанные с государственным регулированием инструменты, такие как пониженная процентная ставка по зеленым кредитам и займам. В частности, на современном рынке капитала можно наблюдать такое явление, как гриниум (greenium), которое отражает разницу в стоимости зеленого и традиционного финансирования в связи с наличием экологически ориентированного спроса со стороны инвесторов (Alessi, Ossola, Panzica, 2021).

Включение положительной неопределенности в анализ инвестиционных проектов позволяет скорректировать их оценку с учетом потенциального эффекта, немонетизированного в сложившихся условиях, что, как правило, повышает сравнительную привлекательность безуглеродной энергетики. В то же время возможности финансирования последней определяются не только в сравнении с энергетикой, основанной на ископаемом топливе, но и относительно доступности и стоимости капитала на рынке в целом. В рамках логики современного финансового рынка инвестиционная привлекательность может оцениваться на основе сравнения ВНД с величиной средневзвешенной стоимости капитала или WACC (Weighted Average Cost of Capital). Последняя учитывает как цену заемного финансирования (например, процент по кредиту), так и собственных источников финансирования, в частности стоимость привлечения акционерного капитала (Berk, DeMarzo, 2017). По своей сути WACC является интегрированной характеристикой, которая выражает баланс рисков и инвестиционной привлекательности того или иного рынка (сферы деятельности).

На рис. 2 представлена сравнительная характеристика WACC в сфере солнечной и ветровой энергетики для Беларуси, рассмотренных ранее четырех стран (Китая, Индии, Германии, США) и Дании как страны с минимальной стоимостью капитала.

Как можно увидеть, стоимость финансирования проектов в области возобновляемой энергетики в Беларуси существенно выше, чем в остальных странах, а также выше, чем рассчитанные значения ВНД. Такая ситуация делает инвестиции в безуглеродные технологии абсолютно непривлекательными. В свою очередь, лидерство в области развития возобновляемой генерации таких стран, как Китай, Германия, Дания во многом обусловлено низкой величиной WACC, что делает это шаправление привлекательным для инвесторов, даже если показатели доходности для газовой генерации выше. Дальнейшее повышение эффективности безуглеродной энергетики, с одной стороны, и снижение стоимости финансирования – с другой, будет способствовать притоку инвестиций и динамичному развитию данной сферы.

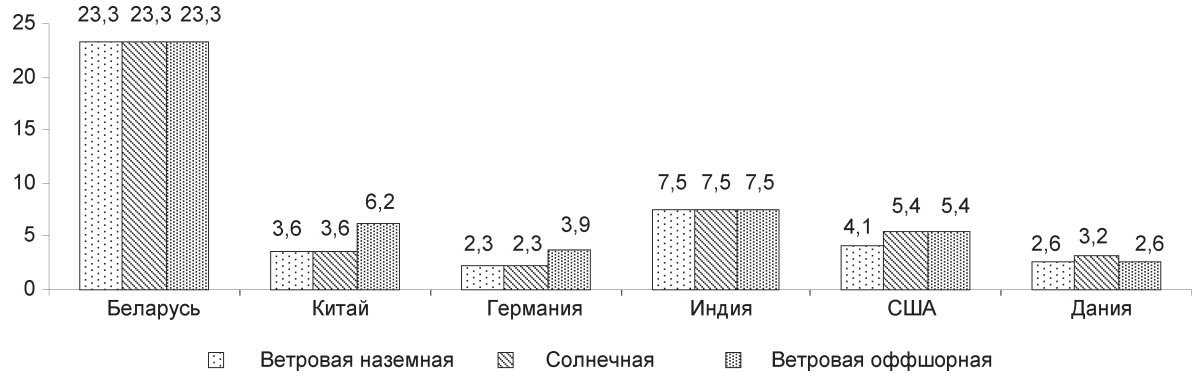


Рис. 2. Средневзвешенная стоимость капитала (WACC) по отдельным видам энергетики, %
Источник. Авторская разработка на основе данных IRENA.

Заключение

Инвестиции в безуглеродную энергетику являются важнейшим фактором зеленой трансформации экономики. Однако их коммерческий потенциал часто ограничен, поскольку традиционные подходы к финансовому анализу не учитывают ряд положительных внешних эффектов. Как показало проведенное исследование, включение последних в оценку может существенно повысить инвестиционную привлекательность ряда безуглеродных технологий получения энергии за счет снижения ставки дисконтирования. Хотя на современном этапе такие оценки характеризуются высокой неопределенностью, дальнейшее изучение нерыночных эффектов, как со стороны спроса, так и со стороны предложения, а также четкое определение возможностей и условий их монетизации позволит повысить уровень достоверности, что снизит риск принятия неэффективных инвестиционных решений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ (REFERENCES)

Зорина Т.Г. 2021. Трансформация энергетического комплекса Республики Беларусь: от энергобезопасности к концепции устойчивого развития. *Белорусский экономический журнал*. № 1. С. 27–40. [Zoryna T.G. 2021. Transformation of the Energy Sector of the Republic of Belarus: From Energy Security to the Concept of Sustainable Development. *Belorusskiy economicheskiy zhurnal*. No 1. PP. 27–40. (In Russ.)] DOI: 10.46782/1818-4510-2021-4-27-40

Зорина Т.Г., Юркевич О.И. 2024. Тарифная политика в электроэнергетике Республики Беларусь: состояние, направления совершенствования. *Белорусский экономический журнал*. № 4. С. 56–72. [Zoryna T.G., Yurkevich O.I. 2024. Tariff Policy in the Electric Power Industry of the Republic of Belarus: Status and Directions for Improvement. *Belorusskiy ekonomicheskiy zhurnal*. No 4. PP. 56–72. (In Russ.)] DOI: 10.46782/1818-4510-2024-4-56-72

Минажова С.А., Бекбаев А.Б., Кожагелди Б.Ж., Абитаева Р.Ш., Мынбаева З.Т. 2023. Обзор солнечной энергетики Германии и Казахстана: политика, текущее состояние и перспектива. *Труды университета*. № 3(92). С. 414–420. [Minazhova S.A., Bekbaev A.B., Kozhageldi B.Zh., Abitaeva R.Sh., Mynbaeva Z.T. 2023. Overview of Solar Energy in Germany and Kazakhstan: Policy, Current Status, and Prospects. *Trudy universiteta*. No 3(92). PP. 414–420. (In Russ.)] DOI: 10.52209/1609-1825-2023-3-414

Шушкевич А., Лопачук О., Лихтарович Е. 2025. Оценка потенциального влияния углеродного налога на экономику Республики Беларусь. *Банкаўскі веснік*. 2025. № 4. С. 27–42. [Shushkevich A., Lopatchouk O., Likhtarovich Ya. 2025. Assessment of the Potential Impact of the Carbon Tax on the Economy of the Republic of Belarus. *Bankauski vesnik*. No 4. PP. 27–42. (In Russ.)] URL: https://www.nbrb.by/bv/pdf/journals/741.pdf

Alessi L., Ossola E., Panzica R. 2021. What Greenium Matters in the Stock Market? The Role of Greenhouse Gas Emissions and Environmental Disclosures. *Journal of Financial Stability*. 54. 100869. DOI:10.1016/j.jfs.2021.100869

Berk J., DeMarzo P. 2017. Corporate Finance: Global Edition. 4th edition. Pearson Education. 1172 p.

Christophers B. 2024.The Price is Wrong: Why Capitalism Won't Save the Planet. New York: Verso Books. 432 p.

Daly H., Farley J. 2011. *Ecological Economics: Principles and Applications*. Washington, DC: Island Press. 509 p.

Henrekson M., Sandstrцm C., Stenkula M. 2026. *A Green Entrepreneurial State? Exploring the Pitfalls of Green Deals*. Springer Nature. 302 p.

Hoekstra A., Alkemade F. 2025. Using Learning Curves to Guide the Energy Transition with the Example of Heavy Electric Trucks. *npj. Sustainable Mobility and Transport*. 2(14). DOI:10.1038/s44333-025-00029-5

Kileber S., Parente V. 2024. A Meta-Analysis of Learning Curves to Improve Energy Policy: Lessons from the United States and Brazil. *Energy Research & Social Science*. Vol. 107. 103320. DOI:10.1016/j.erss.2023.103320

Lo D., Nyangchak N., Lin F. 2025. China and Renewables Capitalism in the Green Transition. *Development and Change*. Vol. 56(4–5). PP. 847–870. DOI:10.1111/dech.70019

Rodrigues-Pose A., Bartalucci F. 2024. The Green Transition and its Potential Territorial Discontents. *Cambridge Journal of Regions, Economy and Society*. Vol. 17 (2). PP. 339–358. DOI 10.1093/cjres/rsad039

Shiwei Y., Tingwei L., Xing H., Lancui L., Yi-Ming W. 2021. Determinants of Overcapacity in China's Renewable Energy Industry: Evidence from Wind, Photovoltaic, and Biomass Energy Enterprises. *Energy Economics*. Vol. 97. 105056. DOI: 10.1016/j.eneco.2020.105056

EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF INVESTMENTS IN CARBON-FREE ENERGY WITHIN THE CONTEXT OF THE GREEN ECONOMIC TRANSFORMATION

Ihar Dzeraviaha[1] (https://orcid.org/0000-0003-3170-0512)

Zhou Boyang[1]

[1] Belarusian State University (Minsk, Belarus).

Corresponding author: Zhou Boyang (zhouboyang113@gmail.com).

ABSTRACT. Increasing the share of carbon-free energy technologies in the total energy mix and the gradual replacement of fossil fuel-based energy are key conditions for the green transformation of the economy, requiring significant investment. This study examines an approach to assessing investments in carbon-free energy by accounting for positive externalities, which are viewed as a factor in reducing funding costs. Particular attention is paid to the learning curve effect. Its evaluation indicates that several carbon-free technologies possess substantial potential for cost reduction. Incorporating this potential into the financial analysis of carbon-free energy projects significantly enhances their investment attractiveness. Further research aimed at assessing non-monetized effects and identifying optimal tools for their transformation into financial outcomes will significantly reduce the risk of making inefficient investment decisions.

KEYWORDS: carbon-free energy, externalities, green investments, green transformation, financing risk, learning curve effect.

JEL-code: G30, Q42, Q54, Q55.

DOI: 10.46782/1818-4510-2026-3-28-41

Received 1.06.2026

In citation: Dzeraviaha I., Zhou Boyang. 2026. Evaluating the Effectiveness of Investments in Carbon-Free Energy within the Context of the Green Economic Transformation. *Belorusskiy ekonomicheskiy zhurnal*. No 3. PP. 28–41. DOI: 10.46782/1818-4510-2026-3-28-41 (In Russ.)