

## Теоретико-методологические основы исследования устойчивого развития энергетики

А. Д. Матюшенко<sup>1</sup>,

Т. Г. Зорина<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет,

<sup>2</sup>Институт энергетики Национальной академии наук Беларуси,  
Республика Беларусь

**Аннотация.** Актуальность исследования обусловлена необходимостью концептуального осмысления процессов трансформации энергетических систем в контексте глобальных целей устойчивого развития. Энергетика, являясь основой функционирования экономики, одновременно выступает ключевым источником антропогенного воздействия на окружающую среду, что порождает внутреннее противоречие между экономическими, социальными и экологическими факторами её развития. Постановка проблемы заключается в разобщенности понятийного аппарата, используемого для описания желаемого состояния энергетической системы, её диагностики и путей трансформации, что затрудняет формирование целостной теоретической основы для исследований в данной области. Цель работы состоит в теоретико-методологическом обосновании взаимосвязи трёх ключевых концепций – устойчивого энергетического развития, энергетической трилеммы и энергетического перехода, а также разработке на этой основе интегрированной концептуальной модели. Методы исследования включают системный и сравнительный анализ научной литературы, синтез теоретических подходов, метод концептуального моделирования. Полученные результаты: систематизированы и уточнены определения исследуемых категорий; выявлена внутренняя структура и противоречия устойчивого энергетического развития; обоснована роль энергетической трилеммы как инструмента операционализации и диагностики; проанализирована многоуровневая природа энергетического перехода; разработана авторская концептуальная схема, устанавливающая логическую связь «целевой ориентир – диагностический инструмент – механизм реализации», а также систематизирующая таблица, соотносящая компоненты устойчивого развития с измерениями трилеммы, типами трансформации и конкретными инструментами энергетической политики. Предложенная модель создаёт теоретическую основу для последующей оценки вклада возобновляемых источников энергии в устойчивое развитие национальной экономики.

**Ключевые слова:** устойчивое энергетическое развитие, энергетическая трилемма, энергетический переход, энергетический сектор, энергетическая безопасность, энергетическая справедливость, экологическая устойчивость.

**Информация о статье:** поступила 7 апреля 2026 года.

## Theoretical and methodological foundations for the study of sustainable development in the energy sector

Angelina D. Matsiushenka,

Tatsiana G. Zoryna

<sup>1</sup>Belarusian State University,

<sup>2</sup>Institute of Power Engineering, National Academy of Sciences of Belarus,  
Republic of Belarus

**Abstract.** The relevance of this study stems from the need for a conceptual understanding of the transformation processes within energy systems in the context of the global sustainable development goals. The energy sector, being the foundation of the economy, is simultaneously a key source of human impact on the environment, which creates an inherent contradiction between the economic, social and environmental factors of its development. The problem lies in the fragmentation of the conceptual framework used to describe the desired state of the energy system, its diagnosis and pathways for transformation, which hinders the formation of a coherent theoretical basis for research in this field. The aim of this work is to provide a theoretical and methodological justification for the interrelationship between three key concepts – sustainable energy development, the energy trilemma and the energy transition – and to develop an integrated conceptual model on this basis. The research methods include a systematic and comparative analysis of the scientific literature, a synthesis of theoretical approaches, and conceptual modelling. The results obtained are as follows: the

definitions of the categories under study have been systematised and refined; the internal structure and contradictions of sustainable energy development have been identified; the role of the energy trilemma as a tool for operationalisation and diagnosis has been substantiated; the multi-level nature of the energy transition has been analysed. Original conceptual framework has been developed, establishing a logical link between 'target benchmark – diagnostic tool – implementation mechanism', as well as a systematic table correlating the components of sustainable development with the dimensions of the trilemma, types of transformation and specific energy policy instruments. The proposed model provides a theoretical basis for the subsequent assessment of the contribution of renewable energy sources to the sustainable development of the national economy.

**Keywords:** sustainable energy development, the energy trilemma, the energy transition, the energy sector, energy security, energy justice, environmental sustainability.

**Article info:** received April 7, 2026.

## Введение

Энергетический сектор играет системообразующую роль в достижении Целей устойчивого развития. Однако общая концепция устойчивого развития, будучи применённой к энергетике, требует дальнейшей конкретизации, учитывающей отраслевую специфику. Это обусловлено двойственной природой энергетики: с одной стороны, она является фундаментальной основой функционирования экономики и обеспечения качества жизни населения, с другой – одним из основных источников антропогенного воздействия на окружающую среду, прежде всего в части выбросов парниковых газов (Iddrisu and Bhattacharyya, 2015; Munasinghe, 2009).

В современной научной литературе устойчивое энергетическое развитие (УЭР) определяется как процесс использования энергетических ресурсов для нужд человечества таким образом, который делает общее развитие более устойчивым. Как подчеркивают И. Иддису и С. Бхаттачарья, УЭР представляет собой критически важный компонент достижения Целей устойчивого развития (особенно ЦУР 7 и 13), направленный на поддержание экономического и социального прогресса при одновременной защите окружающей среды и смягчении последствий изменения климата (Iddrisu and Bhattacharyya, 2015).

Более развернутое определение предлагает М. Мунасингхе, автор методологии «устойчивая экономика/устойчивое развитие» (sustainomics): устойчивое энергетическое развитие предполагает такое использование энергетических ресурсов, которое удовлетворяет потребности настоящего поколения в доступных и надежных энергетических услугах, не подрывая способность будущих поколений удовлетворять свои собственные энергетические потребности (Munasinghe, 2009).

В этом определении отчетливо прослеживается преемственность с классической формулировкой комиссии Брундтланд (Mensah, 2019), что представляет собой отраслевую конкретизацию общей концепции устойчивого развития.

Значительный вклад в развитие теоретических положений применительно к национальным условиям вносит белорусская научная школа. Т. Г. Зорина предлагает рассматривать устойчивое энергетическое развитие как улучшение саморегулирующейся системы энергоснабжения и энергопотребления, обеспечивающей энергетическую безопасность, одинаково доступное удовлетворение энергетических потребностей и стремлений всех слоев общества к сохранению окружающей среды (Зорина, 2022).

Ценность данного определения для настоящего исследования заключается в нескольких аспектах. Во-первых, оно органично синтезирует три классических компонента устойчивого развития – экономический (через категорию «энергетическая безопасность»), социальный (доступность энергии для всех слоев) и экологический (сохранение окружающей среды), что коррелирует с изложенной выше концепцией энергетической трилеммы. Во-вторых, акцент на «саморегулирующейся системе» и процессе «улучшения» подчеркивает динамический характер УЭР, требующий постоянного мониторинга и адаптации управленческих решений. В-третьих, для комплексной оценки исследователь предлагает трехуровневый подход – государство, отрасли, предприятия (Зорина, 2015), что позволяет, в рамках данного исследования, сфокусироваться на макроэкономическом уровне – оценке вклада ВИЭ в устойчивое развитие национальной экономики в целом.

Ключевая особенность УЭР заключается в необходимости одновременного учета трех взаимосвязанных и часто противоречивых групп требований, образующих его внутреннюю структуру:

1. Экономическая эффективность УЭР предполагает обеспечение результативности энергетического сектора, его способности функционировать и развиваться без дотационной нагрузки на бюджет, привлечения инвестиций в модернизацию инфраструктуры и внедрение инновационных технологий. Важнейшим индикатором здесь выступает снижение энергоемкости ВВП, то есть достижение эффекта декарблинга (Shirazi, 2025; Munasinghe, 2009).

2. Социальная значимость УЭР ориентирована на обеспечение всеобщего доступа к современным энергетическим услугам по приемлемым ценам (энергетическая бедность является серьезным барьером для развития человеческого потенциала), а также на учет социальных последствий трансформации энергетики, включая вопросы «справедливого перехода» (just transition) для работников, занятых в традиционных отраслях топливно-энергетического комплекса (Heffron and McCauley, 2014; Heffron, McCauley and Sovacool, 2015).

3. Экологическая ответственность УЭР направлена на минимизацию негативного воздействия энергетики на окружающую среду на всех стадиях жизненного цикла – от добычи ресурсов до генерации, передачи и утилизации отходов. Ключевыми приоритетами выступают снижение выбросов парниковых газов (декарбонизация), сокращение загрязнения воздуха и воды, а также рациональное использование земельных и водных ресурсов (Iddrisu and Bhattacharyya, 2015; Кочинян, 2025).

Три описанные составляющие устойчивого энергетического развития не просто дополняют друг друга, но зачастую и противоречат одна другой. Так, активный переход на возобновляемые источники энергии требует крупных инвестиций, что может привести к росту тарифов для потребителей и снижению ценовой доступности энергии. Именно эта внутренняя конфликтность целей делает необходимой разработку специальных инструментов оценки, позволяющих находить баланс. Таким инструментом, к рассмотрению которого мы переходим, выступает концепция энергетической трилеммы.

В современной научной литературе устойчивое энергетическое развитие всё чаще понимается не как статичное состояние, а как динамический процесс –

своего рода «дорожная карта» движения к новой энергетической реальности (Munasinghe, 2009; Verbong and Geels, 2007). Обобщая подходы М. Мунасингхе, И. Иддису и результаты современных исследований энергетического перехода (Shirazi, 2025), можно определить УЭР как процесс, направленный на достижение энергетической безопасности и, как следствие, экономического процветания и социальной стабильности.

Переходный характер устойчивого энергетического развития проявляется в нескольких аспектах (Ferdous and Barman, 2025; Carmon et al., 2025; Cherp et al., 2018):

- технологический переход: замещение ископаемых видов топлива низкоуглеродными источниками (возобновляемые источники энергии, атомная энергетика), внедрение систем накопления энергии, развитие «умных» сетей (smart grids), повышение энергоэффективности во всех секторах экономики;
- институциональный переход: адаптация законодательства и рыночных механизмов к новым условиям, включая внедрение углеродного регулирования, механизмов поддержки «зеленой» энергетики и стимулирование инвестиций в устойчивые энергетические проекты;
- социокультурный переход: изменение моделей поведения потребителей, рост энергосбережения, вовлечение граждан и местных сообществ в производство энергии (развитие энергетических сообществ и просьюмеризма).

Для трансформации концепции устойчивого энергетического развития (УЭР) из теоретической абстракции в действенный инструмент управления необходима ее операционализация – разработка системы показателей (индикаторов) и соответствующего оценочного инструментария, позволяющих измерять прогресс и выявлять дисбалансы (Iddrisu and Bhattacharyya, 2015; Heffron, McCauley and Sovacool, 2015).

Таким образом, несмотря на наличие обширной литературы по каждой из рассматриваемых концепций, их взаимосвязь остается недостаточно проработанной. Цель настоящей статьи – теоретико-методологическое обоснование взаимосвязи трёх ключевых концепций: устойчивого энергетического развития, энергетической трилеммы и энергетического перехода, и разработка на этой основе интегрированной концептуальной модели.

## Методы и средства исследований

Теоретико-методологическую основу исследования составили фундаментальные положения теорий устой-

чивого развития, институциональной экономики и эволюционной теории технологических изменений. В работе использован комплекс методов научного познания:

а) системный анализ – для рассмотрения энергетической системы как сложного многоуровневого объекта;

б) сравнительный анализ – для сопоставления различных подходов к определению ключевых понятий;

в) метод синтеза – для интеграции концепций устойчивого энергетического развития, энергетической трилеммы и энергетического перехода в единую теоретическую схему;

г) метод концептуального моделирования – для визуализации взаимосвязей между исследуемыми категориями;

д) метод систематизации – для построения классификационной таблицы, в которой соотнесены компоненты устойчивого развития с типами трансформации и инструментами энергетической политики.

Информационную базу составили научные публикации в рецензируемых журналах, индексируемых в международных базах данных (Scopus, Web of Science), материалы международных организаций (Мировой энергетический совет, ООН), а также работы белорусских исследователей по проблемам устойчивого развития энергетики.

В рамках исследования был проведён анализ существующих методических подходов к оценке устойчивого развития энергетики, разработанных международными организациями. Многие из этих подходов были разработаны такими организациями, как ОЭСР, МАГАТЭ и Европейское агентство по окружающей среде. К наиболее известным из них относятся:

– PSR (Pressure-State-Response) – модель «давление – состояние – реакция», которая была разработана в 1970-е годы для оценки воздействия на окружающую среду. Она отражает давление, оказываемое энергетическим сектором на природу, изменения состояния окружающей среды и меры, принятые для решения возникших проблем.

– DSR (Driving Force-State-Response) – модель «движущая сила – состояние – реакция», предложенная Комиссией ООН по устойчивому развитию. В отличие от абстрактного понятия «давления», здесь акцент делается на конкретных движущих силах изменений: экономический рост, рост населения, технологические изменения.

– DPSIR (Driving Force-Pressure-State-Impact-Response) – расширенная модель «движущая сила – давление – состояние – воздействие – реакция», используемая Европейским агентством по охране окружающей среды. Ее дополняет компонент «воздействие», который позволяет оценить последствия изменений состояния окружающей среды для здоровья человека, экосистем и экономики.

Параллельно с созданием методических подходов осуществлялась разработка систем индикаторов. МАГАТЭ совместно с другими международными организациями был разработан и апробирован в 15 странах «комплект индикаторов устойчивого энергетического развития» (Iddrisu and Bhattacharyya, 2015), включающий:

– экономические индикаторы (энергоёмкость, доля импорта в энергобалансе, диверсификация источников);

– социальные индикаторы (доля домохозяйств, не имеющих доступа к электричеству, доля дохода, расходуемая на энергоуслуги, занятость в энергетическом секторе);

– экологические индикаторы (выбросы парниковых газов, загрязнение воздуха, использование земель под энергетическую инфраструктуру).

Анализ этих подходов позволил обосновать выбор концепции энергетической трилеммы как наиболее адекватного инструмента для интегральной диагностики устойчивости энергетической системы.

### Результаты исследований

Устойчивое энергетическое развитие как комплексная целевая установка, объединяющая экономические, социальные и экологические требования, нуждается в операционализации – переводе теоретических положений на язык измеримых параметров. Такой инструмент должен позволять диагностировать текущее состояние энергетической системы и оценивать степень её приближения к устойчивому состоянию. Одним из наиболее признанных подходов к решению этой задачи в мировой науке выступает концепция энергетической трилеммы.

Концепция энергетической трилеммы была разработана Мировым энергетическим советом совместно с консалтинговой компанией Oliver Wyman Group в начале 2010-х годов как ответ на растущую сложность управления энергетическими системами в условиях глобальных вызовов (Heffron and McCauley, 2014). Как отмечается в методологических документах WEC, необходимость раз-

работки данной концепции была обусловлена фундаментальным противоречием: энергетическая политика любого государства вынуждена одновременно преследовать три цели, которые зачастую вступают в конфликт друг с другом.

С 2010 года Мировой энергетический совет ежегодно публикует индекс энергетической трилеммы, который ранжирует страны по степени их успешности в достижении баланса между тремя ключевыми измерениями. К настоящему времени индекс охватывает более 120 стран, что делает его одним из наиболее репрезентативных инструментов сравнительного анализа в глобальном масштабе. Методология индекса постоянно совершенствуется, отражая изменения в понимании устойчивости энергетических систем и появление новых вызовов.

Энергетическая трилемма включает три взаимосвязанных, но потенциально конфликтующих измерения, каждое из которых представляет собой самостоятельную ценность и цель энергетической политики (Heffron and McCauley, 2014; Sovacool and Mukherjee, 2011).

## 1. Энергетическая безопасность

Данное измерение характеризует способность государства обеспечивать надежное и бесперебойное снабжение энергией по доступным ценам в краткосрочной и долгосрочной перспективе. В рамках методологии WEC энергетическая безопасность оценивается по следующим группам показателей:

- надежность инфраструктуры: эффективность работы генерирующих мощностей, уровень потерь при передаче и распределении, частота и продолжительность перебоев в энергоснабжении;
- диверсификация: степень разнообразия первичных источников энергии (доля различных видов топлива в энергобалансе) и поставщиков, что снижает риски, связанные с зависимостью от одного источника или маршрута поставок;
- устойчивость к внешним шокам: способность системы противостоять природным катаклизмам, техногенным авариям и геополитическим кризисам;
- степень самообеспеченности: доля собственных энергоресурсов в общем потреблении, уровень зависимости от импорта.

Как подчеркивают Б. К. Совакул и И. Мукарджи (Sovacool and Mukherjee, 2011), а также ряд других исследователей (Heffron, McCauley and Sovacool, 2015), для стран с высокой долей импорта энергоресурсов

(к числу которых относится и Беларусь) обеспечение энергетической безопасности является критическим приоритетом, требующим постоянного мониторинга и превентивных мер.

## 2. Энергетическая справедливость

Второе измерение трилеммы фокусируется на социальных аспектах энергетики, а именно на доступности энергии для всех слоев населения. Энергетическая справедливость оценивается через призму трех ключевых аспектов:

- физическая доступность: наличие развитой инфраструктуры, обеспечивающей подключение к сетям всех домохозяйств и предприятий; в глобальном масштабе данный показатель остается актуальным для развивающихся стран, где миллионы людей не имеют доступа к электричеству;
- ценовая доступность: доля доходов домохозяйств, расходуемая на оплату энергетических услуг (электроэнергия, отопление, топливо); высокие тарифы могут приводить к энергетической бедности, когда домохозяйства вынуждены ограничивать потребление энергии в ущерб качеству жизни;
- качество энергоснабжения: стабильность напряжения, отсутствие перебоев, соответствие параметров энергии установленным стандартам.

Следует подчеркнуть, что обеспечение энергетической справедливости не сводится исключительно к субсидированию тарифов, что может исказить рыночные сигналы и сдерживать инвестиции (Heffron, McCauley and Sovacool, 2015). Речь идет о создании системы, которая обеспечит баланс между социальной защитой уязвимых групп населения и экономической эффективностью.

## 3. Экологическая устойчивость

Третий аспект этой трилеммы отражает масштаб воздействия энергетического сектора на климат и окружающую среду. В соответствии с методологией Всемирного энергетического совета (WEC) этот элемент оценивается на основе следующих критериев:

- декарбонизация – объем выбросов парниковых газов ( $\text{CO}_2$  и других) в пересчете на единицу произведенной энергии, тенденции изменений, а также степень соответствия национальных обязательств климатическим целям, установленным в Парижском соглашении;
- эффективность использования ресурсов – общая и детальная потребность экономики в энергии, а также уровень потерь, возникающих при преобразовании и транспортировке энергии;

- доля источников с низким уровнем выбросов углекислого газа – доля возобновляемой энергии и атомной энергии в общем объеме производства;

- воздействие на экосистемы – загрязнение воздуха, воды и почвы, вызванное добычей, транспортировкой и сжиганием топлива, а также вопросы, связанные с управлением отходами.

На основе описанных трех измерений Мировой энергетический совет рассчитывает интегральный индекс энергетической трилеммы, который позволяет проводить сравнительный анализ стран и отслеживать динамику изменений во времени. Методология расчета индекса включает следующие этапы (Heffron and McCauley, 2014).

На первом этапе по каждому из трех измерений рассчитываются субиндексы на основе набора количественных показателей. Источниками данных выступают международные статистические базы (Международное энергетическое агентство, Всемирный банк, национальная статистика стран), а также экспертные оценки.

На втором этапе производится нормализация показателей для приведения их к сопоставимому виду. Используется метод *min-max* нормализации, позволяющий преобразовать значения различных шкал в единый диапазон от 0 до 100.

На третьем этапе субиндексы агрегируются в итоговый индекс. Важной методологической особенностью является то, что итоговый рейтинг строится не только на основе среднего арифметического трех компонентов, но и с учетом сбалансированности. Страна может иметь высокие показатели по двум измерениям, но низкие по третьему – итоговый рейтинг будет учитывать этот дисбаланс как негативный фактор, поскольку устойчивое развитие требует гармоничного прогресса по всем направлениям. Практическое применение рассмотренной методики сопряжено с объективными трудностями, связанными со сбором репрезентативных данных по ряду количественных параметров.

Наиболее остро эта проблема проявляется в странах с рыночной экономикой, где открытая статистика по некоторым показателям отсутствует. В частности, к числу таких параметров относятся уровень потерь в электрических сетях и доля доходов населения, направляемая на оплату энергетических услуг. Недостаточная полнота исходной информации способна существенно исказить результаты расчета субиндексов – обстоятельство, значимое и для Республики Беларусь.

Теоретическая значимость концепции энергетической трилеммы заключается в том, что она выявляет фундаментальный конфликт, присущий трём ключевым целям энергетической политики. Эмпирические наблюдения свидетельствуют: улучшение позиций по одному из измерений нередко достигается за счёт ухудшения показателей по двум другим, что объективно порождает необходимость поиска баланса между разнонаправленными приоритетами.

В научной литературе устоялось несколько классических примеров подобных противоречий (Heffron and McCauley, 2014; Heffron, McCauley and Sovacool, 2015).

Первое из них – противоречие между экологической устойчивостью и энергетической справедливостью. Форсированное развитие возобновляемой энергетики требует масштабных инвестиций и субсидий, что в ряде случаев приводит к повышению тарифов для конечных потребителей и снижению ценовой доступности энергии. Особую остроту эта проблема приобретает в странах с высоким уровнем энергетической бедности.

Второе – противоречие между экологической устойчивостью и энергетической безопасностью. Высокая доля солнечной и ветровой генераций, зависящих от природно-климатических условий, создаёт риски для надёжности энергоснабжения. Минимизация этих рисков требует создания дорогостоящих систем накопления энергии и поддержания резервных мощностей, зачастую на основе ископаемого топлива.

Третье – противоречие между энергетической безопасностью и справедливостью. Стремление к полной энергетической независимости может стимулировать развитие собственных, но экономически неэффективных генерирующих мощностей. Следствием становится рост издержек в секторе, что в конечном счёте ложится дополнительной нагрузкой на потребителей.

Наряду с широким признанием и востребованностью в научной среде, концепция энергетической трилеммы имеет ряд ограничений, которые необходимо учитывать при её использовании в исследовательских целях (Cherp et al., 2018).

Одно из них связано с неизбежным абстрагированием от множества факторов. Сведение сложной совокупности параметров к трём интегрированным измерениям упрощает аналитическую картину, оставляя за рамками модели такие значимые аспекты, как институциональная структура энергетического сектора, политические условия и технологическая специфика отдельных стран.

Другое ограничение касается качества исходных данных. Расчёт индекса трилеммы базируется на официальной статистике, методики сбора которой различаются по странам, равно как и степень полноты и достоверности предоставляемой информации. Для государств с формирующейся экономикой проблема наличия репрезентативных данных сохраняет высокую актуальность.

Существенным остаётся и вопрос о весовых коэффициентах. Агрегирование трёх субиндексов в единый показатель неизбежно предполагает присвоение весов, что вносит элемент субъективности. Различные исследовательские коллективы и организации применяют неодинаковые схемы взвешивания, что напрямую влияет на итоговые рейтинговые оценки.

Кроме того, применяемые в большинстве случаев подходы моделируют взаимосвязи между измерениями как линейные, так и статичные, тогда как реальные энергетические системы характеризуются сложными обратными связями и динамическими эффектами, которые подобное упрощение не всегда позволяет учесть.

Таким образом, энергетическая трилемма не просто фиксирует три желаемых состояния энергетической системы, но и демонстрирует неизбежность компромиссов, с которыми сталкиваются субъекты принятия решений. Задача энергетической политики в этом контексте состоит не в максимизации какого-либо одного показателя, а в поиске оптимального баланса, учитывающего национальные приоритеты, ресурсные ограничения и долгосрочные ориентиры устойчивого развития.

При этом она находится в прямом соответствии с тремя компонентами устойчивого развития: энергетическая безопасность коррелирует с экономической стабильностью, энергетическая справедливость – с социальной стабильностью, а экологическая устойчивость – с экологической стабильностью. Тем самым трилемма выступает инструментом операционализации концепции УЭР, переводя её абстрактные категории в измеримые параметры.

Если устойчивое энергетическое развитие задаёт целевые ориентиры, а энергетическая трилемма служит инструментом диагностики, то энергетический переход представляет собой процессуальное измерение – совокупность изменений, посредством которых осуществляется движение к желаемому состоянию энергетической системы. В современной научной литературе энергетический переход рассматривается как транс-

формация социотехнической системы – совокупности технологий, институтов, практик и культурных норм, связанных с энергообеспечением общества (Ferdous and Barman, 2025; Cherp et al., 2018).

Анализ определений позволяет выделить два ключевых аспекта. Чешско-канадский исследователь Вацлав Смил рассматривает энергетический переход как изменение структуры потребления первичной энергии и постепенный переход от текущей системы энергоснабжения к новой. По его утверждению, энергетические переходы всегда были постепенными и долгосрочными процессами, и переход от углеродных к безуглеродным источникам энергии не станет исключением (Smil, 2016). Смил подчёркивает инерционность энергетических систем: даже при наличии технологических и политических стимулов смена доминирующего источника энергии занимает десятилетия (Матюшенко, 2025).

Иной взгляд предлагает Жан-Батист Фрессоз, который считает энергетический переход скорее политическим, нежели историческим или экономическим процессом. Согласно его трактовке, в человеческой цивилизации не произошло полной смены основных источников энергии – новые энергоносители лишь добавляются к существующим, начиная использоваться в больших масштабах, но старые полностью не исчезают (Fressoz, 2014). Эта позиция созвучна идее о том, что энергопереход – не линейная замена, а накопление и реструктуризация энергетического портфеля.

П. О'Коннор предложил расширенное определение, согласно которому энергетический переход представляет собой набор весьма значительных изменений в структуре энергопотребления общества, способных затронуть многие аспекты энергетической системы: источники энергии, энергоносители, преобразователи энергии и конечные энергетические услуги (O'Connor and Cleveland, 2014). Данный подход акцентирует системность преобразований: переход не сводится к замене одного топлива другим, а охватывает всю технологическую и институциональную инфраструктуру.

Обобщая рассмотренные подходы, можно выделить два ключевых аспекта энергетического перехода: во-первых, это структурные изменения в энергобалансе (Смил, О'Коннор), во-вторых, это политически и социально обусловленный процесс, в рамках которого новые источники не столько замещают старые, сколько добавляются к ним (Фрессоз).

Сложность определения энергетического перехода усугубляется неравномерной и долгосрочной динамикой мировой экономики. Как отмечается в литературе, процесс замены источников энергии растягивается во времени, и внешне он может восприниматься не как замещение, а как прирост: традиционное биотопливо по-прежнему присутствует в энергобалансе, но его доля неуклонно снижается – с 98,28 % в 1800 году до 6,3 % в 2021 году, тогда как потребление угля, достигнув пика, затем уступило место нефти и газу [Макаров и Митрова, 2019].

В прогнозных исследованиях встречается количественный критерий: энергопереходом можно считать 10-процентное сокращение доли рынка определённого энергоресурса за десятилетие [Макаров и Митрова, 2019]. Данный критерий удобен для операционализации, однако он не отражает качественных изменений в институциональной и социальной сферах.

Для понимания глубинных механизмов энергетического перехода необходимо обратиться к теоретическим разработкам в области исследований переходов. Ключевой вклад в данное направление внесли работы голландской школы (Р. Кемп, Й. Шот, Ф. Геелс), предложившие многоуровневую перспективу (multi-level perspective – MLP) анализа переходов [Ferdous and Barman, 2025].

Согласно данному подходу, любой технологический переход (включая энергетический) представляет собой результат взаимодействия трех уровней:

1. Ниши – пространства, где возникают радикальные инновации, защищенные от рыночного давления (исследовательские лаборатории, стартапы, пилотные проекты). Именно в нишах вызревают технологии ВИЭ, системы накопления, «умные» сети.

2. Режимы – устоявшиеся практики, технологии, правила и институты, образующие доминирующую конфигурацию энергетической системы (например, централизованное энергоснабжение на базе ископаемого топлива, сложившиеся рынки, нормативная база).

3. Ландшафты – внешняя макросреда, включающая макроэкономические тренды, политические кризисы, климатические изменения, культурные сдвиги, которые создают давление на существующий режим и открывают «окна возможностей» для нишевых инноваций.

Энергетический переход происходит тогда, когда давление со стороны ландшафта (например, осознание климатической угрозы и международные обязатель-

ства) дестабилизирует существующий режим, создавая условия для процесса инноваций, вызревших в нишах [Ferdous and Barman, 2025; Cherp et al., 2018]. Данная модель позволяет объяснить, почему переходы носят долгосрочный и нелинейный характер: для прорыва новой энергетической технологии требуется одновременное созревание нескольких факторов на разных уровнях.

В развитии мировой энергетики принято выделять четыре глобальных энергетических перехода. С позиции MLP-подхода каждый из них может быть интерпретирован как результат давления ландшафтных факторов (промышленная революция, открытие новых месторождений, климатическая повестка) на существующий энергетический режим [Smil, 2016; Макаров и Митрова, 2019; Еремин, 2023].

Первый энергетический переход (1840–1900 гг.) – от древесины к углю – был следствием промышленной революции и распространения парового двигателя. Доля угля в мировом энергобалансе выросла с 5 % в 1840 году до 50 % в 1900 году, тогда как доля биотоплива (дров) существенно сократилась.

Второй энергетический переход (1915–1975 гг.) – увеличение доли нефти. Спустя более полувека после открытия первого месторождения нефти в 1859 году, в 1960-х годах нефть вытеснила уголь с позиции основного энергоносителя, чему способствовало развитие двигателей внутреннего сгорания и нефтехимии.

Третий энергетический переход (1930–2017 гг.) – расширение использования природного газа. Доля газа в энергобалансе возросла с 3 % в 1930 году до 23 % в 2017 году за счёт частичного вытеснения как угля, так и нефти. Газовая генерация обеспечила более высокую эффективность и меньшее загрязнение окружающей среды по сравнению с угольной.

Четвёртый энергетический переход (2017 г. – настоящее время) – переход к возобновляемым источникам энергии (ветровой, солнечной, приливной и др.). Принципиальное отличие текущего этапа от предыдущих заключается в том, что главной движущей силой выступает не экономическая привлекательность новых источников (хотя она также повышается), а качественно иной фактор – необходимость декарбонизации и борьбы с глобальным изменением климата.

Для теоретического анализа и практического управления энергетическим переходом целесообразно выделить три фундаментальных измерения, образующих его внутреннюю структуру [Ferdous and Barman, 2025; Cherp

et al., 2018; Verbong and Geels, 2007):

1. Технологическая трансформация охватывает сдвиги в способах производства, передачи, распределения и потребления энергии. Она включает развитие возобновляемых источников энергии, систем накопления, «умных» сетей, цифровизацию, повышение энергоэффективности, электрификацию транспорта и промышленности. Именно технологические инновации создают физическую основу для снижения углеродоёмкости экономики.

2. Социокультурная трансформация отражает изменения в поведении, ценностях и ожиданиях людей, а также в социальной структуре. Ключевые аспекты: принятие новых технологий обществом, изменение моделей потребления (энергосбережение, осознанный выбор), вовлечение граждан в производство энергии, а также вопросы справедливого перехода – защиты занятости и доходов работников традиционных отраслей ТЭК.

3. Институционально-политическая трансформация касается изменений в формальных и неформальных правилах, регулирующих энергетику. Сюда относятся международные климатические соглашения (Парижское соглашение), национальные стратегии, законодательство, рыночные механизмы (углеродное ценообразование, зелёные сертификаты), система субсидий и налогов, а также государственное планирование и поддержка инноваций.

Данные измерения находятся в тесной взаимосвязи: технологические инновации требуют институционального оформления и общественного признания; институциональные изменения могут стимулировать или блокировать технологическое развитие; социокультурные сдвиги создают спрос на новые технологии и легитимизируют реформы.

Современный этап характеризуется противоречивыми тенденциями. С одной стороны, наблюдается стремительный рост мощностей ВИЭ, увеличение числа автономных энергоисточников, разработка новых технологий (плавающие солнечные электростанции, офшорная ветроэнергетика, зелёный водород). С другой стороны, сохраняется высокая зависимость мировой экономики от ископаемого топлива. Как отмечается в прогнозах, доля угля может сократиться с 39 % в 2015 году до 29–19 % к 2040 году, доля природного газа, напротив, способна возрасти с 23 % до 27 % и более (Макаров и Митрова, 2019). Во многих странах продолжают строить угольные электростанции, что свидетельствует о не-

товности крупнейших энергетических стран к полному отказу от ископаемых источников. Это подтверждает тезис Фрессоза о том, что новые источники не замещают старые, а добавляются к ним (Fressoz, 2014).

Нельзя обойти стороной и экологические риски, которые несёт в себе сам энергопереход. Создание крупных генерирующих мощностей на базе солнечной и ветровой энергии способно заметно повлиять на местные экосистемы и климат: например, меняется альбедо земной поверхности, возникает дополнительная нагрузка на популяции птиц. К тому же производство оборудования для возобновляемой энергетики связано с добычей редкоземельных металлов, что формирует новый вид ресурсной нагрузки.

Со временем, когда запасы ископаемого топлива будут исчерпываться, всё большее значение приобретут низкоуглеродные энергоносители – биоэнергетика, «зелёный» водород, а также технологии улавливания и хранения углерода (CCS) (Макаров и Митрова, 2019). Но для их широкого внедрения потребуются серьёзные инвестиции и создание соответствующей инфраструктуры.

Если посмотреть на три ключевых понятия, лежащих в основе этой статьи, между ними прослеживается внутренняя логика. Исходным пунктом здесь выступает устойчивое энергетическое развитие – это своего рода целевой ориентир, желаемая модель энергосистемы, которая на длительную перспективу способна сочетать экономическую эффективность, социальную справедливость и экологическую безопасность. Оценить, насколько реальное состояние приближается к этой модели, позволяет энергетическая трилемма: она переводит абстрактные категории устойчивого развития в три конкретных измеримых параметра – энергетическую безопасность, энергетическую справедливость и экологическую устойчивость. Индекс трилеммы не только фиксирует текущую ситуацию, но и показывает, есть ли дисбаланс между этими тремя измерениями. А сам дисбаланс, равно как и необходимость двигаться к целям устойчивого развития, запускает энергетический переход – комплекс изменений технологического, институционально-политического и социокультурного характера, которые напрямую влияют на параметры трилеммы.

Все три категории связаны между собой как цель, способ её оценки и инструмент достижения (рисунок 1). Меры, принимаемые в рамках энергоперехода, меняют показатели трилеммы; обновлённые данные трилеммы дают возможность оценить результативность этих мер

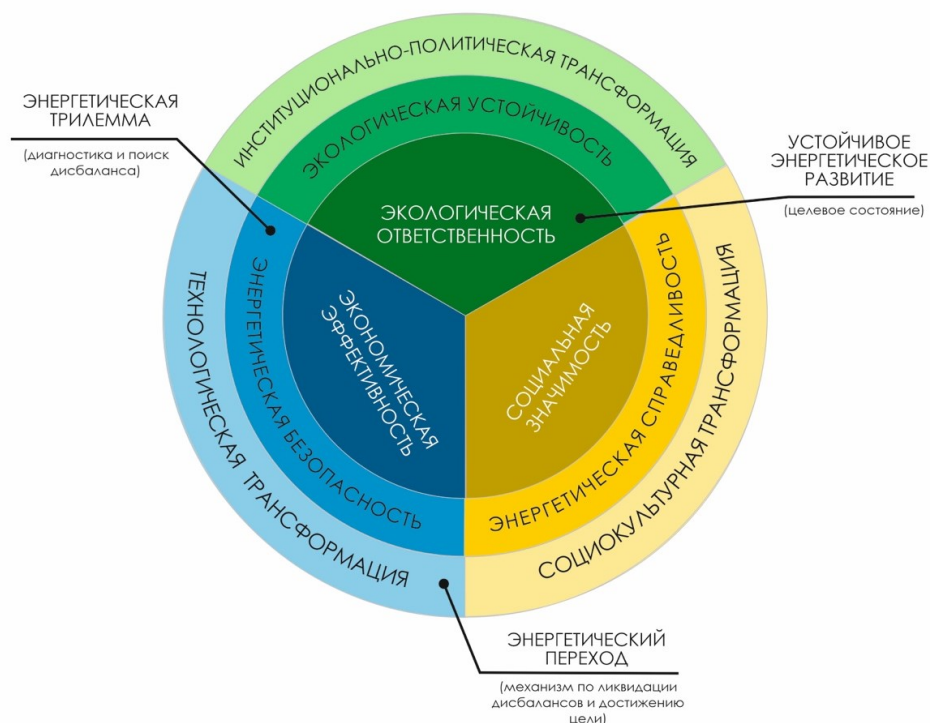


Рисунок 1 – Концептуальная схема взаимосвязи устойчивого энергетического развития, энергетической трилеммы и энергетического перехода  
 Figure 1 – A conceptual diagram illustrating the relationship between sustainable energy development, the energy trilemma and the energy transition

Источник: авторская разработка.

и, если нужно, скорректировать дальнейшее движение. А сам вектор устойчивого развития может уточняться по мере достижения промежуточных результатов и с учётом изменяющихся внешних условий. Получается, что целевое состояние (устойчивое энергетическое развитие), диагностика и поиск дисбалансов (энергетическая трилемма) и механизм по ликвидации дисбалансов и достижению цели (энергетический переход) находятся в постоянной взаимосвязи и образуют общую концептуальную основу исследования.

Представленная на рисунке концептуальная модель может быть детализирована через установление прямой связи между каждым видом устойчивости, соответствующим ему измерением энергетического перехода и конкретными инструментами реализации. Данная взаимосвязь систематизирована в таблице 1.

Как видно из таблицы 1, каждый из трёх видов устойчивости достигается не абстрактно, а через конкретный,

«закреплённый» за ним тип трансформационных процессов и вполне определённый набор инструментов. Экономическая устойчивость обеспечивается прежде всего через технологическую трансформацию: снижение энергоёмкости ВВП (эффект декарбонизации), диверсификация источников генерации за счёт развития атомной и возобновляемой энергетики, модернизация сетевой инфраструктуры и цифровизация создают материальную основу для повышения конкурентоспособности и энергетической безопасности.

Социальная устойчивость напрямую зависит от социокультурной трансформации. Сохранение доступных цен (особенно для уязвимых групп населения), программы переквалификации работников традиционного энергетического сектора в рамках концепции «справедливой трансформации», вовлечение граждан в производство энергии и изменение культуры потребления в сторону энергосбережения – все эти меры обес-

Таблица 1 – Систематизация взаимосвязей устойчивого энергетического развития, энергетической трилеммы и энергетического перехода

Table 1 – Classification of the interrelationships between sustainable energy development, the energy trilemma and the energy transition

| Компонент устойчивого энергетического развития (целевое состояние)                  | Соответствующее измерение трилеммы (диагностика и поиск дисбалансов)                         | Измерение энергетического перехода (механизм по ликвидации дисбалансов и достижению цели) | Конкретные проявления и инструменты                                                                                                                                                        |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Экономическая эффективность (эффективность, конкурентоспособность, инновационность) | Энергетическая безопасность (надёжность снабжения, диверсификация, независимость от импорта) | Технологическая трансформация (развитие инфраструктуры, новые технологии)                 | 1) Снижение энергоёмкости<br>2) ВВП (декарбонизация)<br>3) Диверсификация источников (АЭС, ВИЭ)<br>4) Развитие сетей и цифровизация (smart grids)<br>5) Внедрение инновационных технологий |
| Социальная значимость (доступность энергии, справедливость, качество жизни)         | Энергетическая справедливость (физическая и ценовая доступность, защита уязвимых групп)      | Социокультурная трансформация (изменение поведения, вовлечение общества)                  | 1) Доступные тарифы и адресная поддержка<br>2) Программы переобучения («справедливый переход»)<br>3) Вовлечение граждан (просьюмеризм)<br>4) Изменение культуры потребления                |
| Экологическая ответственность (снижение выбросов, сохранение экосистем)             | Экологическая устойчивость (декарбонизация, доля ВИЭ, углеродоёмкость)                       | Институционально-политическая трансформация (нормативная база, регулирование)             | 1) Углеродное регулирование и налоги<br>2) «Зелёные» тарифы и поддержка ВИЭ<br>3) Экологические стандарты и законы<br>4) Выполнение Парижских соглашений                                   |

Источник: авторская разработка.

печивают общественное признание и легитимизацию энергетической трансформации.

Устойчивое развитие окружающей среды достигается посредством институциональных и политических преобразований. Именно изменения формальных правил – норм, касающихся выбросов углекислого газа, «зелёные» тарифы, экологические стандарты, законодательство в области возобновляемых источников энергии и обращения с отходами, а также выполнение международных обязательств (Парижское соглашение), создают нормативную базу, способствующую

декарбонизации и снижению нагрузки на экосистемы.

## Анализ полученных результатов

Предлагаемая интегрированная концептуальная модель отличается своей научной новизной, поскольку впервые чётко выявляет системные связи между тремя ключевыми категориями: постановка целей (устойчивое энергетическое развитие), диагностика (энергетическая трилемма) и механизм реализации (энергетическая трансформация).

В отличие от существующих фрагментарных подходов, рассматривающих эти концепции изолированно

(Iddrisu and Bhattacharyya, 2015; Heffron and McCauley, 2014; Ferdous and Barman, 2025), разработанная модель демонстрирует их логическое единство и взаимное влияние.

Сопоставление с известными данными подтверждает адекватность модели. Так, выделенные в таблице 1 соответствия между компонентами устойчивости и типами трансформации согласуются с выводами А. Черпа с соавторами (Cherp et al., 2018) о необходимости интеграции технологических, социальных и политических перспектив при анализе энергетических переходов. Обоснование роли трилеммы как операционализирующего звена развивает идеи Р. Хеффона и др. (Heffron, McCauley and Sovacool, 2015) о необходимости измеримых индикаторов для разрешения конфликтов в энергетической политике.

Вместе с тем, модель имеет определённые ограничения. Во-первых, она носит концептуальный характер и требует эмпирической верификации на страновых данных, в том числе для Республики Беларусь. Во-вторых, при практическом применении индекса трилеммы сохраняются проблемы, связанные с доступностью и сопоставимостью статистической информации, на что указывают разработчики методологии (Heffron and McCauley, 2014). В-третьих, весовые коэффициенты при агрегировании субиндексов неизбежно содержат элемент субъективности, что может влиять на итоговые оценки.

Названные ограничения не отменяют того, что рассмотренная модель задаёт направление для дальнейшей исследовательской работы. Её ценность – в возможности перейти от разрозненного описания отдельных элементов энергетической динамики к более целостному анализу. Так, с её помощью можно оценить, какой вклад вносят возобновляемые источники энергии в параметры энергетической безопасности, социальной справедливости и экологической устойчивости применительно к национальной экономике.

### Выводы

Устойчивое энергетическое развитие, энергетическая трилемма и энергетический переход – эти три понятия не существуют изолированно друг от друга. Вместе они образуют взаимосвязанную систему, через которую удобно описывать трансформацию энергетики в контексте глобальных целей устойчивого развития. Если устойчивое энергетическое развитие задаёт желаемую траекторию (своего рода вектор движения), то

трилемма выступает инструментом, позволяющим замерить текущее состояние и выявить возникающие диспропорции. Энергетический переход, в свою очередь, – это процесс, через который задуманные изменения реализуются на практике.

В основе внутренней структуры устойчивого энергетического развития лежат три измерения – экономическая эффективность, социальная значимость и экологическая ответственность. Между ними нередко возникают противоречия, что требует поиска сбалансированных решений и разработки специальных измерительных инструментов. Энергетическая трилемма как раз фиксирует эти противоречия (между безопасностью, справедливостью и экологической устойчивостью) и переводит абстрактные категории в плоскость конкретных показателей, пригодных для диагностики.

Важно подчеркнуть, что энергетический переход носит комплексный характер. Он не сводится к простой замене технологий – изменения охватывают также социокультурную и институционально-политическую сферы. Многоуровневая перспектива (ниши – режимы – ландшафты) позволяет объяснить, почему подобные процессы растянуты во времени, развиваются нелинейно и требуют синхронизации инноваций в технологической и институциональной областях.

Предложенная в рамках исследования схема взаимосвязей (рисунок 1, таблица 1) даёт возможность выстроить сквозную логику: от целеполагания через диагностику к механизмам реализации и конкретным инструментам. Такой подход может служить теоретической базой для изучения того, как отдельные направления энергетической политики, например, развитие возобновляемой энергетики, влияют на достижение целей устойчивого развития.

Дальнейшую работу предполагается выстроить вокруг операционализации разработанной модели применительно к Республике Беларусь. Это означает, с одной стороны, адаптацию методики расчёта индекса энергетической трилеммы с учётом доступности статистических данных и национальной специфики, а с другой – количественную оценку вклада возобновляемых источников энергии в параметры энергетической безопасности, справедливости и экологической устойчивости.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Еремин, В.В. (2023). Четвертый энергетический переход – барьеры и пути преодоления. *Экономика. Налоги. Право*, vol. 16, № 3, С. 35–45.
- Зорина, Т.Г. (2015). Устойчивое развитие энергетики: сущность и методические подходы к оценке. *Современные технологии управления*, Т. 1, № 49, С. 26–31.
- Зорина, Т.Г. (2022). Влияние экономических, технологических, социальных и экологических факторов на развитие энергетики в Республике Беларусь. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*, Т. 3, С. 56–64.
- Кочинян, Н.С. (2025). Зелёная экономика: эконометрический анализ в контексте энергетической безопасности и целей устойчивого развития. *Сборник научных статей РЭУ*, Т. 2, № 13. DOI: 10.61546/25792679-2025.213-prue-08.
- Макаров, А.А. и Митрова, Т.А. (ред.) (2019). «Прогноз развития энергетики мира и России 2019», [Online], URL: [https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO\\_EneC\\_Forecast\\_2019-02\\_Rus.pdf](https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC_Forecast_2019-02_Rus.pdf) (дата обращения: 15.02.2026).
- Матюшенко, А.Д. (2025). Энергетический переход: понятие, историческое становление, опыт использования в странах – членах ЕАЭС и перспективы его развития. *Устойчивое развитие энергетики Республики Беларусь: состояние и перспективы : сборник докладов III Международной научной конференции, Минск, 01–04 октября 2024 года*. Минск: Беларуская навука, С. 305–321.
- Carmon, O., Teschner, N., Zemah-Shamir, S. and Parag, Y. (2025). Evaluating energy security in decentralized systems: Review and new index. *Energy Strategy Reviews*, vol. 60, 101754. DOI: 10.1016/j.esr.2025.101754.
- Cherp, A., Vinichenko, V., Jewell, J., Brutschin, E. and Sovacool, B. (2018). Integrating techno-economic, socio-technical and political perspectives on national energy transitions: A meta-theoretical framework. *Energy Research & Social Science*, vol. 37, pp. 175–190. DOI: 10.1016/j.erss.2017.09.015.
- Ferdous, Z. and Barman, S.C. (2025). A Systematic Review of Sustainable Renewable Energy Applications, Procedures, Challenges, and Limitations. *Research Square*, preprint (Version 1). DOI: 10.21203/rs.3.rs-5740831/v1.
- Fressoz, J.-B. (2014). Pour une histoire désorientée de l'énergie. *25èmes Journées Scientifiques de l'Environnement. L'économie verte en question*, pp. 1–12. [Online], URL: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00956441> [Accessed: 15.02.2026].
- Gari, S.R., Newton, A. and Icely, J.D. (2015). A review of the application and evolution of the DPSIR framework with an emphasis on coastal social-ecological systems. *Ocean & Coastal Management*, vol. 103, pp. 63–77. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2014.11.013.
- Heffron, R.J. and McCauley, D. (2014). Achieving sustainable supply chains through energy justice. *Applied Energy*, vol. 123, pp. 435–437. DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.12.034.
- Heffron, R.J., McCauley, D. and Sovacool, B.K. (2015). Resolving society's energy trilemma through the Energy Justice Metric. *Energy Policy*, vol. 87, pp. 168–176. DOI: 10.1016/j.enpol.2015.08.033.
- Iddrisu, I. and Bhattacharyya, S.C. (2015). Sustainable Energy Development Index: A Multi-Dimensional Indicator for Measuring Sustainable Energy Development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 50, pp. 513–530. DOI: 10.1016/j.rser.2015.05.032.
- Mensah, J. (2019). Sustainable development: Meaning, history, principles, pillars, and implications for human action: Literature review. *Cogent Social Sciences*, vol. 5, no. 1, 1653531. DOI: 10.1080/23311886.2019.1653531.
- Munasinghe, M. (2009). Energy-sector applications. In *Sustainable Development in Practice: Sustainability Methodology and Applications*. Cambridge: Cambridge University Press, pp. 313–354.
- O'Connor, P.A. and Cleveland, C.J. (2014). U.S. Energy Transitions 1780–2010. *Energies*, vol. 7, no. 12, pp. 7955–7993. DOI: 10.3390/en7127955.
- Shirazi, M. (2025). Dynamic policy pathfinding for balanced growth of energy trilemma: Evidence from the world's large energy-consuming economies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 214, 115493. DOI: 10.1016/j.rser.2025.115493.

- Smil, V. (2016). *Energy Transitions: Global and National Perspectives*. 2nd ed. Santa Barbara: Praeger, USA.
- Sovacool, B.K. and Mukherjee, I. (2011). Conceptualizing and measuring energy security: A synthesized approach. *Energy*, vol. 36, no. 8, pp. 5343–5355. DOI: 10.1016/j.energy.2011.06.043.
- Verbong, G. and Geels, F.W. (2007). The ongoing energy transition: Lessons from a socio-technical, multi-level analysis of the Dutch electricity system (1960–2004). *Energy Policy*, vol. 35, no. 2, pp. 1025–1037. DOI: 10.1016/j.enpol.2006.02.010.

## REFERENCES

- Eremin, V.V. (2023). The fourth energy transition: barriers and ways to overcome them [Chetvertyj energeticheskiy perekhod – bar'ery i puti preodoleniya]. *Ekonomika. Nalogi. Pravo = Economics. Taxes. Law*, vol. 16, no. 3, pp. 35–45 [In Russian].
- Zorina, T.G. (2015). Sustainable development of the energy sector: essence and methodological approaches to assessment [Ustojchivoe razvitiye energetiki: sushchnost' i metodicheskie podhody k ocenke]. *Sovremennye tekhnologii upravleniya = Modern Management Technologies*, vol. 1, no. 49, pp. 26–31 [In Russian].
- Zorina, T.G. (2022). The influence of economic, technological, social and environmental factors on the development of the energy sector in the Republic of Belarus [Vliyaniye ekonomicheskikh, tekhnologicheskikh, social'nykh i ekologicheskikh faktorov na razvitiye energetiki v Respublike Belarus']. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekologiya = Journal of the Belarusian State University. Ecology*, vol. 3, pp. 56–64 [In Russian].
- Kochinyan, N.S. (2025). Green economy: econometric analysis in the context of energy security and sustainable development goals [Zelyonaya ekonomika: ekonometricheskii analiz v kontekste energeticheskoy bezopasnosti i tseyey ustoychivogo razvitiya]. *Sbornik nauchnykh statey REU = Collection of Scientific Articles of PRUE*, vol. 2, no. 13. DOI:10.61546/25792679-2025.2.13-prue-08 [In Russian].
- Makarov, A.A. and Mitrova, T.A. (eds.) (2019). *Prognoz razvitiya energetiki mira i Rossii 2019* [Forecast for the Development of the Global and Russian Energy Sectors 2019], [Online], URL: [https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO\\_EneC\\_Forecast\\_2019-02\\_Rus.pdf](https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC_Forecast_2019-02_Rus.pdf) (Accessed: 15.02.2026) [In Russian].
- Matsiushenka, A.D. (2025). The energy transition: concept, historical development, experience of implementation in EAEU member states and prospects for its development [Energeticheskiy perekhod: ponyatie, istoricheskoe stanovlenie, opyt ispol'zovaniya v stranah – chlenah EAES i perspektivy ego razvitiya]. *Cbornik dokladov III Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii, Minsk, 01–04 oktyabrya 2024 goda = Sustainable Development of the Energy Sector in the Republic of Belarus: Current State and Prospects: Proceedings of the 3rd International Scientific Conference, Minsk, October 1–4, 2024*. Minsk: Belaruskaya navuka, pp. 305–321 [In Russian].
- Carmon, O., Teschner, N., Zemah-Shamir, S. and Parag, Y. (2025). Evaluating energy security in decentralized systems: Review and new index. *Energy Strategy Reviews*, vol. 60, 101754. DOI: 10.1016/j.esr.2025.101754.
- Cherp, A., Vinichenko, V., Jewell, J., Brutschin, E. and Sovacool, B. (2018). Integrating techno-economic, socio-technical and political perspectives on national energy transitions: A meta-theoretical framework. *Energy Research & Social Science*, vol. 37, pp. 175–190. DOI: 10.1016/j.erss.2017.09.015.
- Ferdous, Z. and Barman, S.C. (2025). A systematic review of sustainable renewable energy applications, procedures, challenges, and limitations. *Research Square*, preprint (Version 1). DOI: 10.21203/rs.3.rs-5740831/v1.
- Fressoz, J.-B. (2014). Pour une histoire désorientée de l'énergie. *25èmes Journées Scientifiques de l'Environnement. L'économie verte en question*, pp. 1–12. [Online], URL: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00956441> (Accessed: 15.02.2026) [In French].
- Gari, S.R., Newton, A. and Icely, J.D. (2015). A review of the application and evolution of the DPSIR framework with an emphasis on coastal social-ecological systems. *Ocean & Coastal Management*, vol. 103, pp. 63–77. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2014.11.013.
- Heffron, R.J. and McCauley, D. (2014). Achieving sustainable supply chains through energy justice. *Applied Energy*, vol. 123, pp. 435–437. DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.12.034.

Heffron, R.J., McCauley, D. and Sovacool, B.K. (2015). Resolving society's energy trilemma through the energy justice metric. *Energy Policy*, vol. 87, pp. 168–176. DOI: 10.1016/j.enpol.2015.08.033.

Iddrisu, I. and Bhattacharyya, S.C. (2015). Sustainable energy development index: a multi-dimensional indicator for measuring sustainable energy development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 50, pp. 513–530. DOI: 10.1016/j.rser.2015.05.032.

Mensah, J. (2019). Sustainable development: Meaning, history, principles, pillars, and implications for human action: Literature review. *Cogent Social Sciences*, vol. 5, no. 1, 1653531. DOI: 10.1080/23311886.2019.1653531.

Munasinghe, M. (2009). Energy-sector applications. In *Sustainable Development in Practice: Sustainomics Methodology and Applications*. Cambridge: Cambridge University Press, pp. 313–354.

O'Connor, P.A. and Cleveland, C.J. (2014). U.S. Energy Transitions 1780–2010. *Energies*, vol. 7, no. 12, pp. 7955–7993. DOI: 10.3390/en7127955.

Shirazi, M. (2025). Dynamic policy pathfinding for balanced growth of energy trilemma: Evidence from the world's large energy-consuming economies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 214, 115493. DOI: 10.1016/j.rser.2025.115493.

Smil, V. (2016). *Energy transitions: global and national perspectives*. 2nd ed. Santa Barbara: Praeger, USA.

Sovacool, B.K. and Mukherjee, I. (2011). Conceptualizing and measuring energy security: A synthesized approach. *Energy*, vol. 36, no. 8, pp. 5343–5355. DOI: 10.1016/j.energy.2011.06.043.

Verborg, G. and Geels, F.W. (2007). The ongoing energy transition: Lessons from a socio-technical, multi-level analysis of the Dutch electricity system (1960–2004). *Energy Policy*, vol. 35, no. 2, pp. 1025–1037. DOI: 10.1016/j.enpol.2006.02.010.

## Информация об авторах

## Information about the authors

### Матюшенко Ангелина Дмитриевна

Аспирант кафедры аналитической экономики и эконометрики экономического факультета Белорусского государственного университета, Республика Беларусь.  
E-mail: admatyushenko@gmail.com

### Зорина Татьяна Геннадьевна

Доктор экономических наук, профессор, заведующий лабораторией «Устойчивое энергетическое развитие» Института энергетики Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь.  
E-mail: tanyazorina@ipe.by

### Angelina D. Matsiushenka

Graduate Student at the Department of Analytical Economics and Econometrics, Faculty of Economics, Belarusian State University, Republic of Belarus.  
E-mail: admatyushenko@gmail.com

### Tatsiana G. Zoryna

Doctor of Science [in Economics], Professor, Head of the Laboratory "Sustainable Energy Development", Institute of Power Engineering, National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus.  
E-mail: tanyazorina@ipe.by