

Научная статья

Original article

УДК 330.15

doi: https://doi.org/10.55186/2413046X_2026_11_8_117

edn: HXYPHB

**МЕТОДОЛОГИЧЕСКАЯ ФРАГМЕНТАРНОСТЬ ИССЛЕДОВАНИЙ
ВИЭ: КОМПЛЕКСНЫЙ ФРЕЙМВОРК ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ
METHODOLOGICAL FRAGMENTATION OF RES STUDIES: A
COMPREHENSIVE SUSTAINABILITY ASSESSMENT FRAMEWORK**



Горячко Мария Дмитриевна, кандидат географических наук, доцент, заместитель заведующего кафедрой по учебной работе, заведующая научно-исследовательской лабораторией регионального анализа и политической географии, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, E-mail: mgoryachko@yandex.ru

Иванов Андрей Юрьевич, аспирант кафедры региональной экономики и природопользования, Государственный университет по землеустройству, Москва, E-mail: andrey_ivanov-2001@mail.ru

Goryachko Maria Dmitrievna, candidate of geographical sciences, associate professor, deputy head of the department for academic affairs, head of the research laboratory of regional analysis and political geography, Lomonosov Moscow State University, Moscow, E-mail: mgoryachko@yandex.ru

Ivanov Andrey Yurievich, postgraduate student of the department of regional economics and nature management, State University of Land Use Planning, Moscow, E-mail: andrey_ivanov-2001@mail.ru

Аннотация. В статье критически анализируется методологическая разобщённость современных исследований возобновляемых источников

энергии (ВИЭ). Показано, что существующие подходы, как правило, сосредоточены на одном из аспектов — технологическом, экономическом или экологическом — без учёта системных взаимосвязей. На основе обзора литературы выявлены три системных недостатка: неполнота оценки жизненного цикла (преобладание эксплуатационной фазы, игнорирование добычи сырья и утилизации); фрагментарность учёта экологических, экономических и технологических факторов (ограничение прямыми выбросами CO₂, недоучёт косвенных эффектов и динамики рынка); недостаток интеграции количественных и качественных методов (социальные и качественные экологические изменения остаются за рамками). Отдельно рассмотрена проблема игнорирования межотраслевых эффектов, в частности взаимодействия ВИЭ с аграрным землепользованием; показаны возможности агровольтаики для снятия конфликта за землю и повышения совокупной продуктивности, включая рост влажности почвы и урожайности. Предложен междисциплинарный фреймворк, синтезирующий оценку жизненного цикла (LCA), системный анализ и качественные методы. Фреймворк включает четыре блока — технологический, экологический, экономический и социально-ландшафтный; для агровольтаических проектов дополнительно предусмотрены показатели водозффективности, совокупного дохода с 1 га и Land Equivalent Ratio (LER). Показатели нормализуются и агрегируются в интегральный индекс устойчивости; для валидации экономического блока может использоваться Data Envelopment Analysis (DEA). Научная новизна заключается в конкретных процедурах стыковки количественных и качественных данных, а также в акценте на адаптацию к региональным условиям. Фреймворк может применяться при обосновании региональных энергетических стратегий, в том числе в условиях ограниченности данных и высокой значимости локальных факторов, для сравнения разных типов ВИЭ и гибридных схем.

Abstract. The article critically analyses the methodological fragmentation of contemporary renewable energy sources (RES) research. It is shown that existing approaches tend to focus on a single aspect — technological, economic, or environmental — without accounting for systemic interconnections. Based on a literature review, three systemic shortcomings are identified: incompleteness of life cycle assessment (dominance of the operational phase, ignoring raw material extraction and disposal); fragmentation in accounting for environmental, economic, and technological factors (limitation to direct CO₂ emissions, underestimation of indirect effects and market dynamics); and insufficient integration of quantitative and qualitative methods (social and qualitative environmental changes remain outside the framework). The problem of ignoring cross-sectoral effects, in particular the interaction of RES with agricultural land use, is considered separately; the potential of agrivoltaics to reduce land-use conflicts and increase total productivity is shown, including increased soil moisture and crop yields. An interdisciplinary framework is proposed that synthesises life cycle assessment (LCA), systems analysis, and qualitative methods. The framework includes four blocks — technological, environmental, economic, and social-landscape; for agrivoltaic projects, additional indicators of water efficiency, total income per hectare, and Land Equivalent Ratio (LER) are provided. Indicators are normalised and aggregated into an integral sustainability index; Data Envelopment Analysis (DEA) can be used to validate the economic block. The scientific novelty lies in specific procedures for linking quantitative and qualitative data, as well as in the emphasis on adaptation to regional conditions. The framework can be used to support regional energy strategy development, including under conditions of limited data and high importance of local factors, for comparing different types of RES and hybrid schemes.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, методология, системный анализ, оценка жизненного цикла, междисциплинарность, энергетический переход

Keywords: renewable energy sources, methodology, systems analysis, life cycle assessment, interdisciplinarity, energy transition

Введение

Глобальный энергетический переход после Парижского соглашения 2015 года требует не только наращивания мощностей ВИЭ, но и адекватных методов оценки их долгосрочных эффектов [6]. Как показывает анализ литературы, практика исследований пока отстаёт от этой задачи. Одна из главных причин — методологическая фрагментарность. Редким, но показательным исключением является работа китайских учёных С. Gao, S. Zhu, N. An и др. (2021). Они не ограничились каким-то одним аспектом, а выполнили комплексное сравнение ветровой, солнечной и биоэнергетической генерации, объединив оценку жизненного цикла (LCA) и экологический след. Это позволило получить сопоставимые количественные метрики: ветроэнергетика продемонстрировала потребление энергии всего 6,80 кДж/кВт·ч и наименьшие выбросы CO₂, SO₂, NO_x и CO — тем самым работа наглядно показывает, как преодолевается фрагментарность [15]. Вместе с тем даже у такого подхода есть принципиальные ограничения, на которые указывает Е. Mariutti (2025) в обзоре углеродного следа фотомодулей, произведённых в Китае: процессные LCA (PLCA) сильно зависят от качества исходных данных, динамических изменений окружающей среды и субъективных методологических выборов, что требует повышения прозрачности и стандартизации оценок [17].

Таким образом, единичные комплексные работы демонстрируют желаемое направление, но проблемы воспроизводимости и охвата остаются нерешёнными. В массе же публикаций по-прежнему изучается только экономика, или только выбросы CO₂, или только надёжность оборудования, а полноценные междисциплинарные исследования, связывающие экологические, технологические и социальные последствия, редки.

Экономический блок исследований также характеризуется методологическим разбросом. Мета-анализ Norgren и Stankeviciene (2024), охвативший 105 статей из Web of Science и 97 статей из Scopus, выявил большое разнообразие применяемых подходов анализа «зелёных» инвестиций: анализ среды функционирования (DEA), стохастический граничный анализ, анализ временных рядов, а также скоринговые и многокритериальные методы. При этом DEA признан наиболее надёжным инструментом оценки эффективности «зелёных» инвестиций в ВИЭ, а ключевыми исследовательскими кластерами выступают зелёные финансы, экологическая экономика и инвестиционная эффективность [18]. В российской науке экономические аспекты ВИЭ разрабатываются Гриневой Н.В. и Францовым В.Е. (2024), которые предложили методику оптимизации применения ВИЭ в экономике на основе сравнительного анализа экономической эффективности альтернативных источников энергии для регионов РФ [1].

Особенно остро методологическая фрагментарность ощущается при попытке сравнить разные типы ВИЭ (солнечную, ветровую, гидро-) или оценить их применимость в конкретных российских регионах.

Поэтому, на наш взгляд, **актуальность** предлагаемой работы как раз и состоит в том, чтобы попытаться этот методологический разрыв устранить. Нужен инструмент, который реально можно использовать при обосновании энергетической политики — на уровне регионов, с учётом их специфики.

Отдельно стоит сказать об агровольтаике (agrivoltaics). Это совместное использование земель под сельское хозяйство и солнечную генерацию. Данный подход, как мы полагаем, позволяет снять традиционный конфликт между энергетикой и аграрным сектором из-за земли. Определение даётся, например, в работе Dupraz et al. (2011): агровольтаическая система — это когда солнечные панели и сельхозкультуры размещаются на одной территории. Авторы специально подчёркивают, что цель — повысить

продуктивность земли за счёт объединения двух видов производства [12]. Более того, модельные расчёты Barron-Gafford et al. (2019) показывают очень существенный прирост совокупной продуктивности. Приведём их слова: «These preliminary results indicate that agrivoltaic systems may be very efficient: a 35–73% increase of global land productivity was predicted» (перевод: «Эти предварительные результаты говорят о том, что агровольтаические системы могут быть очень эффективными: прогнозируется рост общей продуктивности земли на 35–73%») [9, р. 2725]. Таким образом, включение агровольтаики в аналитический фреймворк позволяет напрямую связать энергопереход с задачами устойчивого развития аграрного сектора.

Научная новизна. В отличие от большинства публикаций, где междисциплинарность лишь декларируется, предлагаемый фреймворк содержит конкретные процедуры стыковки количественных (LCA, экономические показатели) и качественных (экспертные оценки, социальные факторы) данных. Также новым является акцент на адаптацию к региональным условиям, что демонстрируется на примерах из российской практики.

Цель исследования — разработка унифицированного аналитического фреймворка для комплексной оценки устойчивости ВИЭ-проектов. Для этого решались следующие задачи:

1. Выявить основные методологические ограничения существующих подходов (на основе обзора литературы).
2. Сформулировать принципы междисциплинарного синтеза — системного анализа, LCA и качественных методов.
3. Построить унифицированную процедуру оценки жизненного цикла, применимую к разным типам ВИЭ.
4. Апробировать фреймворк на примерах солнечной и ветровой генерации, проанализировав полученные результаты.

Методы. Использовались системный анализ и мета-анализ публикаций (в том числе по стандартам ISO 14040–14044). Исследование проводилось в Москве в 2026 году.

Эволюция теоретических основ и системный подход к ВИЭ

Исторически использование возобновляемой энергии началось с водяных и ветряных мельниц в доиндустриальную эпоху — это были локальные решения без теоретического обоснования. Промышленные революции переключили внимание на ископаемое топливо, затормозив развитие ВИЭ, однако параллельно совершенствовались гидротурбины и фотоэлементы. Современная концепция ВИЭ оформилась после нефтяных кризисов 1970-х годов, а затем экологические кризисы конца XX века и доклад «Наше общее будущее» (1987) придали ей нормативный импульс [7].

На наш взгляд, именно системный анализ - наиболее адекватная методологическая база для дальнейшей оценки ВИЭ. Он требует рассматривать ВИЭ как совокупность технических, экономических и экологических компонент, анализировать их взаимодействия, входы и выходы, обратные связи. Это позволяет выявлять компромиссы между разными критериями. Междисциплинарность здесь ключевая: инженерные, экономические и экологические методы должны согласовываться по терминологии и единицам измерения.

В качестве иллюстрации можно взять работу [2]. Там для оценки эффективности системы использовали модель, где входными переменными выступали объём инвестиций, тариф и операционные затраты, а выходными — мощность и среднегодовая выработка. Такая модель, по сути, показывает, как экономические параметры и производственные показатели можно свести воедино. Для практики планирования (да и для выработки политики) это важно. Но, конечно, подобные модели нужно проверять — хотя бы через анализ чувствительности.

Методологические ограничения существующих исследований

Если обобщить изученную литературу, то вырисовываются три системных недостатка.

1. Неполнота оценки жизненного цикла. Большинство подходов зациклены на эксплуатационной фазе: КИУМ, выработка и т.п. А вот добыча сырья, производство компонентов, утилизация — это либо вообще за рамками, либо схематично, «пунктиром». Особенно заметны пробелы в учёте редкоземельных металлов, которые используются в производстве ветрогенераторов и солнечных панелей.
2. Фрагментарность учёта экологических, экономических и технологических факторов. Экологические оценки часто ограничиваются прямыми выбросами CO₂, игнорируя косвенные эффекты (например, транспорт сырья, изменение ландшафтов, миграцию птиц). Экономические модели не учитывают долгосрочных эффектов масштабирования и динамики рынка энергоносителей. Технологические прогнозы, в свою очередь, недооценивают скорость коммерциализации смежных решений (накопление энергии, умные сети). Это создаёт разрыв между теоретическим потенциалом и практической реализацией.
3. Недостаток интеграции количественных и качественных методов. Преобладание количественных показателей (мощность, объёмы генерации) приводит к перекосу: социальные последствия (занятость, восприятие населением) и качественные экологические изменения (биоразнообразие, ландшафт) практически не учитываются. Социологические опросы и экспертные интервью носят эпизодический характер, не привязаны к этапам жизненного цикла. Это снижает практическую ценность исследований.

Отдельной проблемой является игнорирование межотраслевых эффектов, в частности взаимодействия ВИЭ с аграрным землепользованием. В большинстве LCA- и экономических исследований земля рассматривается как нейтральный ресурс без альтернативной стоимости

сельскохозяйственного производства. Между тем агровольтаические исследования демонстрируют иную картину. Barron-Gafford et al. (2019) отмечают, что при совместном размещении культур и панелей совокупное производство плодов было в три раза для перца чилтепин и в два раза выше для томата черри». Кроме того, агровольтаика снижает водную нагрузку: «soil moisture remained ~15% greater (3.2% volumetric units) than in the control setting» («влажность почвы оставалась примерно на 15% выше (на 3,2 процентных пункта по объёму), чем в контрольном варианте») при орошении раз в два дня [9]. Это указывает на необходимость включения агроэкологических показателей (урожайность, водоэффективность, микроклиматические эффекты) в комплексную модель оценки устойчивости ВИЭ-проектов при агровольтаике.

Предлагаемый междисциплинарный фреймворк

Для каждого типа ВИЭ мы строим четыре блока: технологический, экологический, экономический и социально-ландшафтный. Возьмём для примера солнечную станцию на 10 МВт, условно размещённую в южном регионе России.

В технологический блок включаем установленную мощность, деградацию фотоэлементов (за 25 лет набегает 15–20% потерь) и КИУМ с уточнением по местной инсоляции. Экологический блок — это полный углеродный след: от добычи кварца до захоронения панели, плюс водопотребление на производстве. Экономический блок считаем через LCOE, но не в одной точке, а с варьированием ставки дисконта (возьмём диапазон 5–15%, чтобы учесть риски). И наконец, социально-ландшафтный блок: сколько земли отчуждено (га на мегаватт), сколько рабочих мест создано (последнее — по данным опросов населения и администраций).

Затем показатели нормализуются и визуализируются в виде радиальной диаграммы («лепестковой»), что наглядно выявляет сильные стороны и скрытые компромиссы.

Математическое моделирование (линейное программирование, имитационное, стохастическое) позволяет учитывать сезонную изменчивость и неопределённости. Геоинформационные системы (ГИС) используются для пространственного анализа оптимального размещения объектов с учётом рельефа, инсоляции, ветрового потенциала. Комбинирование спутниковых данных и нейросетевых алгоритмов повышает точность оценки ресурсов. Адаптация моделей к изменению климата и ценовой динамике обеспечивается через сценарный анализ.

Для агровольтаических проектов экономический и экологический блоки должны учитывать интегральный показатель Land Equivalent Ratio (LER). Dupraz et al. (2011) определяют его следующим образом: «If LER > 1, the AV system is more effective than the pattern of separate crops and PV arrays for the same land area» («Если LER > 1, агровольтаическая система более эффективна, чем раздельное размещение сельхозкультур и фотоэлектрических установок на той же площади») [12, p. 2729].

В моделировании авторы получили исключительно высокие значения: «The predicted Land Equivalent Ratios (LERs) of agrivoltaic systems are impressive» («Прогнозируемые коэффициенты эквивалентности землепользования (LER) агровольтаических систем впечатляют») [12, p. 2730], при этом «a 1.7 LER value would mean that a 100 ha farm would produce as much electricity and food crops as a 170 ha farm with separate productions» («значение LER = 1,7 означало бы, что ферма площадью 100 га производила бы столько же электроэнергии и продовольственных культур, сколько ферма площадью 170 га при раздельном производстве») [15, p. 2730].

Формализованная матрица показателей устойчивости ВИЭ-проектов

Для устранения методологической неопределённости предлагается матричная модель оценки, позволяющая сопоставлять проекты по унифицированной системе критериев. Матрица (составлена авторами) имеет вид:

Таблица 1. Матрица показателей устойчивости ВИЭ-проектов

Блок	Показатель	Единица измерения	Источник данных	Метод расчета
Технологический	КИУМ	%	эксплуатационные данные	факт/модель
	Деградация	% за 25 лет	техпаспорт	линейная аппроксимация
Экологический	Углеродный след	г CO ₂ -экв/кВт·ч	LCA	ISO 14040
	Водопотребление	л/кВт·ч	LCA	инвентаризация
Экономический	LCOE	руб./кВт·ч	финмодель	дисконтирование
	Капвложения	руб./МВт	проектная документация	прямой расчёт
Социально-ландшафтный	Землеёмкость	га/МВт	ГИС	пространственный анализ
	Рабочие места	чел./МВт	опросы, статистика	экспертная оценка
Для проектов с с агровольтаикой:				
Экологический (для агровольтаики)	Водоэффективность	% изменения	данные агрометеонаблюдений; полевые измерения орошения; агротехническая отчётность	метод анализа водной продуктивности (Water Use Efficiency Assessment)
Экономический (для агровольтаики)	Совокупный доход с 1 га (энергия + агропродукция)	руб./га	рыночные цены на электроэнергию; статистика аграрной продукции; финансовая модель проекта	интегральная экономическая оценка комбинированного землепользования с использованием метода дисконтированных денежных потоков (Discounted Cash

				Flow)
Социально-ландшафтный (для агровольтаики)	LER (Land Equivalent Ratio)	безразмерный	полевые агрономические измерения урожайности; данные выработки СЭС; проектная документация	метод сравнительной оценки продуктивности земли (Land Productivity Assessment)

Дополнительная валидация экономического блока может проводиться с использованием метода Data Envelopment Analysis (DEA), признанного одним из наиболее надёжных инструментов оценки эффективности «зелёных» инвестиций (Norgren, Stankeviciene, 2024 [18]). В данном случае входными переменными выступают капитальные вложения и операционные затраты, выходными — установленная мощность и объём генерации. Это позволяет сопоставить проекты по относительной эффективности и проверить согласованность результатов интегрального индекса.

Все показатели нормализуются по формуле:

$$X_{norm} = \frac{X_i - X_{min}}{X_{max} - X_{min}}$$

где X_i — значение показателя для проекта, X_{min} , X_{max} — граничные значения в выборке сравнения.

Итоговый интегральный индекс устойчивости рассчитывается как взвешенная сумма:

$$I = \sum w_i X_{norm,i}$$

где веса w_i определяются экспертным методом либо на основе анализа чувствительности. Агрегирование нормализованных показателей посредством взвешивания соответствует практике построения составных индикаторов устойчивости в рамках многокритериального анализа (MCDA),

где взвешивание используется для отражения относительной значимости отдельных критериев. [14].

Перспективы применения

По нашему мнению, предложенный фреймворк вполне применим не только к солнечной и ветровой генерации, но и к другим типам ВИЭ — например, к биоэнергетике или геотермальным установкам. Также его можно адаптировать для гибридных схем и систем накопления энергии. В практическом плане он может стать основой для поддержки управленческих решений, особенно при разработке региональных энергетических стратегий. Это актуально для ситуаций, когда данных мало, а локальные факторы (климат, инфраструктура, социальные настроения) играют большую роль.

Основные выводы

Если кратко резюмировать, то получается следующее. Во-первых, в современных исследованиях ВИЭ явно не хватает целостности: полный жизненный цикл учитывается редко, косвенные экологические эффекты и социальная составляющая часто остаются за скобками. Во-вторых, предложенный нами междисциплинарный подход — системный анализ плюс LCA плюс качественные методы — позволяет увидеть скрытые компромиссы, которые при узких методиках не заметны. В-третьих, разработанная матрица показателей с нормализацией даёт возможность сравнивать разные типы ВИЭ и разные регионы на единой основе.

Список источников

1. Гринева Н.В., Францов В.Е. Оптимизация применения возобновляемых источников энергии в экономике // Инновации и инвестиции. 2024. № 2. С. 361–365.
2. Комаров П.И., Новиков А.П. Оценка экономической эффективности станций, использующих возобновляемые источники энергии // Управленческий учет. 2023. № 6. С. 367–371.

3. Кронгауз Д.Э., Тормозаков К.Л. С ветром не споря: особенности развития ветровой энергетики // Энергия: экономика, техника, экология. 2024. № 3. С. 36–40.
4. Машарипову С. Перспективы развития возобновляемых источников энергии в условиях перехода к «зеленой» экономике // Pedagogical international research journal. 2025. № 1. С. 52–56.
5. Панкова Л.Н. Возобновляемые источники энергии как тренд развития глобальной экономики // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2021. № 9. С. 145–151.
6. Парижское соглашение к Рамочной конвенции ООН об изменении климата: принято 12 дек. 2015 г.; вступило в силу 4 нояб. 2016 г. URL: https://unfccc.int/sites/default/files/russian_paris_agreement.pdf (дата обращения: 05.05.2026).
7. Юргенс И.Ю., Ромов Р.Б. Комиссия Брунтланн и концепция устойчивого развития в истории СССР/России 1980–1990-х гг. // Власть. 2023. № 6. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/komissiya-bruntlann-i-kontseptsiya-ustoychivogo-razvitiya-v-istorii-sssr-rossii-1980-1990-h-gg> (дата обращения: 01.05.2026).
8. Aasa O.P., Phoya S., Monko R.J. et al. A theory-based decision support framework for energy transition: Pluralized perspective // Frontiers in Sustainability. 2026. No. 6. P. 1–5.
9. Barron-Gafford G.A., Pavao-Zuckerman M.A., Minor R.L. et al. Agrivoltaics provide mutual benefits across the food–energy–water nexus in drylands // Nature Sustainability. 2019. Vol. 2. P. 848–855. DOI: 10.1038/s41893-019-0364-5.
10. Dei G., Mignacca B., Locatelli G., Trucco P. Tackling new research questions in energy transition: The system of provision approach // Applied Energy. 2025. Vol. 393. Art. 125991. DOI: 10.1016/j.apenergy.2025.125991.
11. Del Duca V., Ponsiglione C., Primario S., Strazzullo S. Towards economic, environmental, and societal sustainable world: Reviewing the interplay of

methodologies, variables, and impacts in energy transition models // Journal of Cleaner Production. 2024. Vol. 479. Art. 144074. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.144074.

12. Dupraz C., Marrou H., Talbot G., Dufour L., Nogier A., Ferard Y. Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes // Renewable Energy. 2011. Vol. 36. No. 10. P. 2725–2732. DOI: 10.1016/j.renene.2011.03.005.

13. Fields N., Leonard A., Mutembei M., Nganga A., Martindale L., Bergman M., Kaoma M., Howells M., Brown E. Endogenous integration of qualitative factors into quantitative energy transition modelling for development // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2025. Vol. 220. DOI: 10.1016/j.rser.2025.115917.

14. Gan X., Fernandez I.C., Guo J., Wilson M., Zhao Y., Zhou B., Wu J. When to use what: Methods for weighting and aggregating sustainability indicators // Ecological Indicators. 2017. Vol. 81. P. 491–502. DOI: 10.1016/j.ecolind.2017.05.068.

15. Gao C., Zhu S., An N., Na H., You H., Gao C. Comprehensive comparison of multiple renewable power generation methods: A combination analysis of life cycle assessment and ecological footprint // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2021. Vol. 147. Art. 111255. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111255.

16. Hafner S., Gottschamer L., Kubli M., Pasqualino R., Beer U.S. Building the Bridge: How System Dynamics Models Operationalise Energy Transitions and Contribute towards Creating an Energy Policy Toolbox // Sustainability. 2024. Vol. 16. No. 19. Art. 8326. DOI: 10.3390/su16198326.

17. Mariutti E. The limits of the current consensus regarding the carbon footprint of photovoltaic modules manufactured in China: A review and case study // Energies. 2025. Vol. 18. No. 5. Art. 1178. DOI: 10.3390/en18051178.

18. Norgren E., Stankeviciene J. Systematic literature review on the methodological approaches of the efficiency of green investment in renewable energy-based development // Forum Scientiae Oeconomia. 2024. No. 4. P. 30–46.

19. Sovacool B.K., Hess D.J., Cantoni R. Energy transitions from the cradle to the grave: A meta-theoretical framework integrating responsible innovation, social practices, and energy justice // *Energy Research & Social Science*. 2021. Vol. 75. Art. 102027. DOI: 10.1016/j.erss.2021.102027.

References

1. Grineva, N.V. & Frantsov, V.E. (2024). Optimizatsiya primeneniya vozobnovlyaemykh istochnikov energii v ekonomike [Optimization of the use of renewable energy sources in the economy]. *Innovatsii i investitsii*, no 2, pp. 361–365.
2. Komarov, P.I. & Novikov, A.P. (2023). Otsenka ekonomicheskoi effektivnosti stantsii, ispol'zuyushchikh vozobnovlyaemye istochniki energii [Assessment of the economic efficiency of stations using renewable energy sources]. *Upravlencheskii uchët*, no 6, pp. 367–371.
3. Krongauz, D.E. & Tormozakov, K.L. (2024). S vetrom ne sporya: osobennosti razvitiya vetrovoi energetiki [Not arguing with the wind: features of wind energy development]. *Energiya: ekonomika, tekhnika, ekologiya*, no 3, pp. 36–40.
4. Masharipovu, S. (2025). Perspektivy razvitiya vozobnovlyaemykh istochnikov energii v usloviyakh perekhoda k «zelenoi» ekonomike [Prospects for the development of renewable energy sources in the transition to a green economy]. *Pedagogs International Research Journal*, no 1, pp. 52–56.
5. Pankova, L.N. (2021). Vozobnovlyaemye istochniki energii kak trend razvitiya global'noi ekonomiki [Renewable energy sources as a trend in the development of the global economy]. *Ekonomika: vchera, segodnya, zavtra*, no 9, pp. 145–151.
6. Parizhskoe soglasenie k Ramochnoi konventsii OON ob izmenenii klimata: prinyato 12 dekabrya 2015 g.; vstupilo v silu 4 noyabrya 2016 g. [Paris Agreement to the United Nations Framework Convention on Climate Change: adopted 12 December 2015; entered into force 4 November 2016]. Available at: https://unfccc.int/sites/default/files/russian_paris_agreement.pdf (accessed 05 May 2026).

7. Yurgens, I.Yu. & Romov, R.B. (2023). Komissiya Bruntlann i kontseptsiya ustoichivogo razvitiya v istorii SSSR/Rossii 1980–1990-kh gg. [The Brundtland Commission and the concept of sustainable development in the history of the USSR/Russia in the 1980–1990s]. Vlast', no 6. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/komissiya-bruntlann-i-kontseptsiya-ustoychivogo-razvitiya-v-istorii-sssr-rossii-1980-1990-h-gg> (accessed 01 May 2026).
8. Aasa, O.P., Phoya, S., Monko, R.J. et al. (2026). A theory-based decision support framework for energy transition: Pluralized perspective. *Frontiers in Sustainability*, no 6, pp. 1–5.
9. Barron-Gafford, G.A., Pavao-Zuckerman, M.A., Minor, R.L. et al. (2019). Agrivoltaics provide mutual benefits across the food–energy–water nexus in drylands. *Nature Sustainability*, vol. 2, pp. 848–855. doi:10.1038/s41893-019-0364-5
10. Dei, G., Mignacca, B., Locatelli, G. & Trucco, P. (2025). Tackling new research questions in energy transition: The system of provision approach. *Applied Energy*, vol. 393, art. 125991. doi:10.1016/j.apenergy.2025.125991
11. Del Duca, V., Ponsiglione, C., Primario, S. & Strazzullo, S. (2024). Towards economic, environmental, and societal sustainable world: Reviewing the interplay of methodologies, variables, and impacts in energy transition models. *Journal of Cleaner Production*, vol. 479, art. 144074. doi:10.1016/j.jclepro.2024.144074
12. Dupraz, C., Marrou, H., Talbot, G., Dufour, L., Nogier, A. & Ferard, Y. (2011). Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes. *Renewable Energy*, vol. 36, no 10, pp. 2725–2732. doi:10.1016/j.renene.2011.03.005
13. Fields, N., Leonard, A., Mutembei, M., Nganga, A., Martindale, L., Bergman, M., Kaoma, M., Howells, M. & Brown, E. (2025). Endogenous integration of qualitative factors into quantitative energy transition modelling for development.

Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 220.
doi:10.1016/j.rser.2025.115917

14. Gan, X., Fernandez, I.C., Guo, J., Wilson, M., Zhao, Y., Zhou, B. & Wu, J. (2017). When to use what: Methods for weighting and aggregating sustainability indicators. Ecological Indicators, vol. 81, pp. 491–502. doi:10.1016/j.ecolind.2017.05.068

15. Gao, C., Zhu, S., An, N., Na, H., You, H. & Gao, C. (2021). Comprehensive comparison of multiple renewable power generation methods: A combination analysis of life cycle assessment and ecological footprint. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 147, art. 111255. doi:10.1016/j.rser.2021.111255

16. Hafner, S., Gottschamer, L., Kubli, M., Pasqualino, R. & Beer, U.S. (2024). Building the bridge: How system dynamics models operationalise energy transitions and contribute towards creating an energy policy toolbox. Sustainability, vol. 16, no 19, art. 8326. doi:10.3390/su16198326

17. Mariutti, E. (2025). The limits of the current consensus regarding the carbon footprint of photovoltaic modules manufactured in China: A review and case study. Energies, vol. 18, no 5, art. 1178. doi:10.3390/en18051178

18. Norgren, E. & Stankeviciene, J. (2024). Systematic literature review on the methodological approaches of the efficiency of green investment in renewable energy-based development. Forum Scientiae Oeconomia, no 4, pp. 30–46.

19. Sovacool, B.K., Hess, D.J. & Cantoni, R. (2021). Energy transitions from the cradle to the grave: A meta-theoretical framework integrating responsible innovation, social practices, and energy justice. Energy Research & Social Science, vol. 75, art. 102027. doi:10.1016/j.erss.2021.102027

© Горячко М.Д., Иванов А.Ю., 2026. Московский экономический журнал,
2026, № 8.