Русскоязычный перевод статьи DOI: 10.3390/en16073185 *

Оценка влияния технологического развития и сценарное прогнозирование устойчивого развития топливно-энергетического комплекса

Ю.Л. ЖУКОВСКИЙ ✉, А.А. КОШЕНКОВА, В.А. ВОРОБЬЕВА, Д.Л. РАСПУТИН, Р.С. ПОЗДНЯКОВ
Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия
✉ *zhukovskiy_yul@pers.spmi.ru*

Ссылка для цитирования оригинальной статьи: Zhukovskiy, Y.; Koshenkova, A.; Vorobeva, V.; Rasputin, D.; Pozdnyakov, R. Assessment of the Impact of Technological Development and Scenario Forecasting of the Sustainable Development of the Fuel and Energy Complex. *Energies* 2023, 16, 3185. https://doi.org/10.3390/en16073185

Аннотация: Начало XXI века для топливно-энергетических комплексов большинства стран мира характеризуется как период активной реструктуризации и кардинальной смены приоритетов развития. Основой этих изменений является технологическое развитие. Технологии Индустрии 4.0 имеют особое значение для достижения максимальной оптимизации производственных процессов. В то же время они применимы для налаживания эффективного взаимодействия энергетического сектора с другими отраслями экономики. Авторы излагают подход к оценке состояния топливно-энергетического баланса страны через выделенные свойства: устойчивость, доступность, эффективность, адаптивность и надежность. В результате создана модель топливно-энергетического комплекса на примере Российской Федерации с учетом территориального и функционального деления страны. Методология основана на сценарном моделировании степени влияния внешних вызовов в совокупности с сопутствующим технологическим развитием. Математическая модель позволила спрогнозировать изменения свойств энергетической системы. Научная значимость работы заключается в применении последовательного гибридного подхода к моделированию для прогнозирования состояния топливно-энергетического баланса. Результаты исследования полезны при составлении сценариев как регионального, так и общенационального развития топливно-энергетического комплекса. Дальнейшее совершенствование модели должно включать расширение числа учитываемых отраслей и их взаимосвязей.

Ключевые слова: устойчивость; энергетическая стратегия; технологический спрос; энергетические сценарии; устойчивая энергетика; глобальные вызовы; Индустрия 4.0; развитие энергосистемы; сценарное моделирование.

Assessment of the Impact of Technological Development and Scenario Forecasting of the Sustainable Development of the Fuel and Energy Complex

Yuriy L. ZHUKOVSKIY ✉, Anastasia A. KOSHENKOVA, Valeriya A. VOROBEVA, Daniil L. RASPUTIN and Roman S. POZDNYAKOV
Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia
✉ *zhukovskiy_yul@pers.spmi.ru*

Abstract: The beginning of the 21st century for the fuel and energy complexes of most countries is characterized as a period of active restructuring and a fundamental shift in developmental priorities. The basis of these changes is technological development. Industry 4.0 technologies have particular importance in achieving maximum optimization of production processes. In the same way, they are applicable in establishing effective interaction between the energy sector and other sectors of the economy. The authors outline an approach to assessing the country's fuel and energy balance state through the selected properties: sustainability, accessibility, efficiency, adaptability and reliability. Hence, a model of the fuel and energy complex was created on the example of the Russian Federation, considering the country's territorial and functional division. The methodology is based on scenario modeling of the influence level of external challenges in conjunction with the accompanying technological development. The mathematical model allowed forecasting changes in the properties of the energy system. The scientific significance of the work lies in the application of a consistent hybrid modeling approach to forecast the state of the fuel and energy balance. The results of the study are useful in compiling scenarios for the regional and entire development of the fuel and energy complex. Further model improvements should include an expansion of the number of counted industries and their relations.

Keywords: scenario modeling; energy strategy; technological demand; energy scenarios; sustainable energy; global challenges; Industry 4.0; power system development; sustainability.

* Перевод подготовлен для повышения интереса русскоязычной аудитории к данной статье.

© 2023 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).
© Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II (перевод), 2024.

1. Введение

Рациональная и планомерная смена приоритетов в структуре топливно-энергетического баланса является гарантом устойчивого развития общества [1-3]. Являясь характеристикой совокупного топливно-энергетического комплекса (далее ТЭК), этот баланс под влиянием глобальных вызовов оказывается весьма уязвимым [4, 5]. К числу проблем авторы относят: рост потребления [6], изменение рынка [7-9], истощение/недостаток ресурсов [10-12], импортозамещение [13-18], научно-технический прогресс [19, 20], глобальное изменение климата [21, 22], растущие требования к качеству энергии и энергоэффективности [23], износ инфраструктуры [24-27].

Страны – участники мирового энергетического рынка – не должны игнорировать глобальные изменения [28]. К ним относится энергетический кризис, отчасти спровоцированный ускоренным развитием новых энергетических технологий [29-32] в странах с недостаточным уровнем технологического развития. В таких условиях отсутствие защитных механизмов в виде технологий может угрожать не только энергетической безопасности [33, 34], но и устойчивости всей экономической системы страны [35-37].

Противодействие этому не может происходить в изоляции, так как энергетика не способна долго существовать в отрыве от других сфер и внешнего влияния [38, 39]. В ответ на возникающие проблемы развиваются сквозные цифровые технологии и технологии Индустрии 4.0 [40-44], стимулирующие реструктуризацию энергетического сектора [45]. Авторы выделили семь блоков технологий, объединенных общими функциями или способами реализации: цифровые и информационные технологии, интеллектуальные сети, возобновляемые и нетрадиционные источники энергии, технологии хранения энергии, а также блок технологий промышленного производства [46, 47].

Оценка влияния технологического внедрения должна проводиться в масштабах всей страны. В данной статье оценка рассматривается на примере России, которая в 2021 году заняла третье место в мире по производству и потреблению энергии [48]. Основными энергоресурсами для первичного потребления в стране являются природный газ и нефть, на долю которых приходится 41,5 и 35,4 % соответственно [48]. Природный газ также является основным ресурсом для производства электроэнергии, на долю которого приходится 41,8 %. Ввиду разнообразия страны с точки зрения условий энергоснабжения и уровня регионального развития, анализ может быть проведен только с использованием комплексного подхода, который затем может быть применен к другим странам.

Под давлением масштабов и скорости глобальных изменений необходимо отслеживать и прогнозировать состояние ТЭК стран по системообразующим отраслям (нефть, газ и уголь, а также электрическая и тепловая энергия). Во многом именно они являются ключевыми факторами регионального развития. В данном исследовании виды выработки электроэнергии не рассматривались отдельно друг от друга, и все они включены в анализ. Однако их соотношение косвенно отражается в параметре стоимости электроэнергии (представлен в таблице A1 в Приложении A). Так, в регионах с высокой долей гидро- и атомной энергетики этот показатель ниже по сравнению с другими. Однако при применении данной методики к другим странам можно учитывать процент «зеленой» генерации (атомная, возобновляемая и гидроэнергетика) как еще один параметр (представлен в разделе 2.1.8).

Нефтяная промышленность – одна из ведущих отраслей российской экономики, нефтегазовые доходы которой ежегодно составляют почти 30 % федерального бюджета. В 2021 году экспорт сырой нефти и нефтепродуктов составил 36 % от общего объема российского экспорта [9]. Российская Федерация занимает шестое место в мире по доказанным запасам нефти, составляющим около 8,5 % от общемировых [16]. Нефть включена в перечень стратегических полезных ископаемых в соответствии со стратегией развития минерально-сырьевой базы до 2035 года, утвержденной постановлением Правительства РФ. По состоянию на январь 2021 года извлекаемые запасы нефти составляли 12 млрд тонн [9].

В настоящее время в России также не существует проблемы истощения запасов газа. В 2020 году прирост геологических запасов газа в стране составил 1,618 трлн м^3 и 54,4 млн т газового конденсата [25]. В то же время, в силу геополитической ситуации, Европа считает необходимым отказаться от российского трубопроводного газа. Это создает риск неопределенности не только для газового рынка, но и для энергетической безопасности и энергоснабжения потребителей в мире в целом. Следовательно, в течение 2021 года «Газпром» поставит в Европу менее 145 млрд м^3, что является самым низким результатом с 2016 года [26].

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

В 2021 году объем добычи угля в стране достиг 439 млн тонн [18]. В недрах России сосредоточена треть мировых запасов угля и пятая часть разведанных запасов, то есть 193,3 млрд тонн [49]. За последние два десятилетия добыча и экспорт этого вида топлива в Российской Федерации неуклонно росли, в среднем на 2,9 и 9,6 % в год соответственно [50]. Позиции российских угольных компаний конкурентоспособны с точки зрения себестоимости, что позволяет им пережить времена низких цен на рынке.

Согласно данным Министерства энергетики РФ и программе перспективного развития ЕЭС России на период с 2021 по 2027 год, в стране отмечается рост спроса на электроэнергию в период времени до 2027 года [15]. Основным вектором борьбы с изменением климата в данной отрасли является создание более природоохранных технологий и технологических процессов, которые будут сопровождаться снижением выбросов парниковых газов. Надежным курсом на декарбонизацию электроэнергетики в России станет постепенное внедрение все большего количества атомных электростанций и ВИЭ, заменяющих тепловые электростанции на угле и других видах ископаемого топлива.

Около 40 % электроэнергии в России вырабатывается из низкоуглеродных источников, включая АЭС и крупные гидроэлектростанции [23]. Всего на российских АЭС эксплуатируется 37 энергоблоков (включая два плавучих реактора атомных теплоэлектростанций) общей установленной мощностью более 29,5 ГВт [51]. Доля ВИЭ пока относительно невелика, но она постепенно растет. К 2050 году ее планируется увеличить до 12,5 % от общей генерации [52].

Российская теплоэнергетика развивалась в крайне суровых климатических условиях, в результате чего стала одной из крупнейших в мире, занимая первое место по протяженности тепловых сетей (183 000 км) и четвертое – по объему произведенной тепловой энергии [53]. Основными потребителями тепла являются промышленные предприятия и население, на долю которых приходится 49 и 39 % соответственно [14]. При этом доля промышленных объектов, потребляющих тепловую энергию, постепенно увеличивается, что свидетельствует о развитии экономики страны и ее промышленных комплексов.

Понимание исходных условий в стране помогает определить ее деление на функциональные территориальные единицы. В предлагаемом подходе к оценке авторами проведено зонирование рассматриваемой территории на семь локальных топливно-энергетических комплексов (далее ЛТЭК) в соответствии с территориальным делением на ЕЭСР (единые энергетические системы России [54]), как показано на рисунке 1. Энергетические системы соотносятся с преобладающими в них отраслями, на основе чего можно определить степень влияния внешних факторов.



Рис. 1. Карта влияния внешних факторов на топливно-энергетический комплекс России

Рис. 1 частично отражает указанную взаимосвязь. Так, на теплоэнергетику Северо-Западного ЛТЭКа влияют рост потребления и износ инфраструктуры в результате внешних факторов, а в электроэнергетике, помимо прочего, на первый план выходит необходимость импортозамещения. При выборе технологий, необходимых для развития в рамках 4D-трендов, рационально отталкиваться от выделяющихся внешних факторов.

Для того чтобы учесть более локальный уровень отраслевых предприятий и объединить предыдущие тренды [55-57], авторы расширили 3D-концепцию четвертой составляющей [58-62].

Таким образом, 4D-тенденции одновременно включают в себя:

Дигитализация (цифровизация) – тенденция к изменению подходов к бизнес-процессам на основе внедрения цифровых технологий;

Декарбонизация – тенденция к переходу на «низкоуглеродную» энергетику за счет рационализации использования источников энергии;

Децентрализация – тенденция к увеличению числа небольших экономических узлов энергоснабжения;

Декрементирование – тенденция к сокращению потребления всех видов ресурсов и материалов, а также количества образующихся отходов.

Рассматривая состояние энергетических систем в комплексе внешних факторов и последующего технологического развития (с учетом его текущего уровня), можно оценить перспективное состояние ЛТЭК. Таким образом, при сценарном прогнозировании авторы исходили из всего комплекса влияющих внешних факторов – от локальных уровней с постепенным расширением до масштабов страны.

Несмотря на большое количество статей по сценарному прогнозированию развития ТЭК РФ, их авторы не учитывают региональные особенности и их влияние на общий топливно-энергетический баланс [53, 63]. Например, в работе [64] рассмотрены методологические основы моделирования долгосрочного развития Дальневосточного региона, однако целевые показатели требуют актуализации и не являются универсальными. Кроме того, в ряде статей [65, 66] затруднено масштабирование результатов. В свою очередь, прогнозирование развития на основе интеллектуальных алгоритмов опирается на анализ предыдущих изменений, что затрудняет интеграцию со сценариями [67-69].

Использование зарубежных моделей в прогнозировании на территории Российской Федерации нецелесообразна в связи с использованием статистических данных ЕС и ряда стран [70]. Потенциал использования моделей для США невелик, несмотря на схожее районирование двух стран. Это связано с ориентацией американских моделей на специфику США, в связи с чем векторы развития не просто отличаются друг от друга, но и, в современных условиях, характеризуются более высокими темпами изменений.

Авторы предлагают принципиально новую методику оценки влияния внедрения промышленных технологий в стране, основанную на ее разделении на более мелкие образования по определенным критериям. Предлагаемое исследование основано на учете исходного состояния ЛТЭК, прогнозировании степени влияния различных факторов, учете мнений экспертов и проведении итоговой комплексной прогнозной оценки. Данный процесс позволит заранее оценить объективные функции регионов. В свою очередь, это приведет к улучшению финансирования территорий с недостаточной поддержкой для развития ТЭК в рамках устойчивого развития. Такая последующая связь с региональным развитием и комплексность учета влияющих факторов делают подход авторов актуальным и эффективным.

2. Материалы и методы

Исследование было разделено на пять этапов, которые представлены на рисунке 2. Методология исследования включает следующие этапы: сначала был проведен обзор ЛТЭК с целью определения его текущего состояния по выбранным свойствам и индикативным параметрам. Затем на основе экспертного мнения была проведена оценка влияния внешних факторов воздействия (вызовов) на различных временных интервалах по трем сценариям. Далее, при проведении опроса специалистов в области ТЭК, была выявлена зависимость между развитием технологий и изменением свойств энергетических систем. Результатом этих действий стало прогнозирование величины изменения свойств по сценариям во временны́х интервалах. Таким образом, на последнем

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

этапе было учтено влияние как глобальных вызовов, так и процесса технологического развития. При этом за основу было взято текущее состояние ТЭК и топливно-энергетического баланса внутри страны [71], а также доля влияния отраслей по регионам. Она распределялась на основе нормированной оценки конкретных отраслевых параметров.



Рис. 2. Методология исследования

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Анализ результатов экспертного опроса основан на методе Дельфи, который чрезвычайно распространен в сценарном прогнозировании в энергетике и позволяет обобщить индивидуальные мнения экспертов [72, 73]. Аналогичный метод применим и к стратегическому планированию. Влияние внешних факторов учитывалось по аналогии со статьями [74, 75].

2.1. Анализ исходного состояния энергетических систем

Для проведения сценарного анализа развития топливно-энергетического комплекса необходимо задать отправную точку – исходное состояние энергосистемы. Рассматривать перспективы развития сразу в масштабах страны сложно, не показательно и нецелесообразно.

Российская Федерация обладает обширными территориями и крупными месторождениями полезных ископаемых. Кроме того, она объединяет несколько часовых и климатических зон. Для наиболее точного прогнозирования, с учетом зональной специфики, энергосистема страны была разделена на 7 ЛТЭК: Центральный, Южный, Северо-Западный, Средневолжский, Уральский, Сибирский и Восточный. Это деление представлено на рисунке 3 вместе с основными транспортными магистралями, центрами переработки и добычи ресурсов.

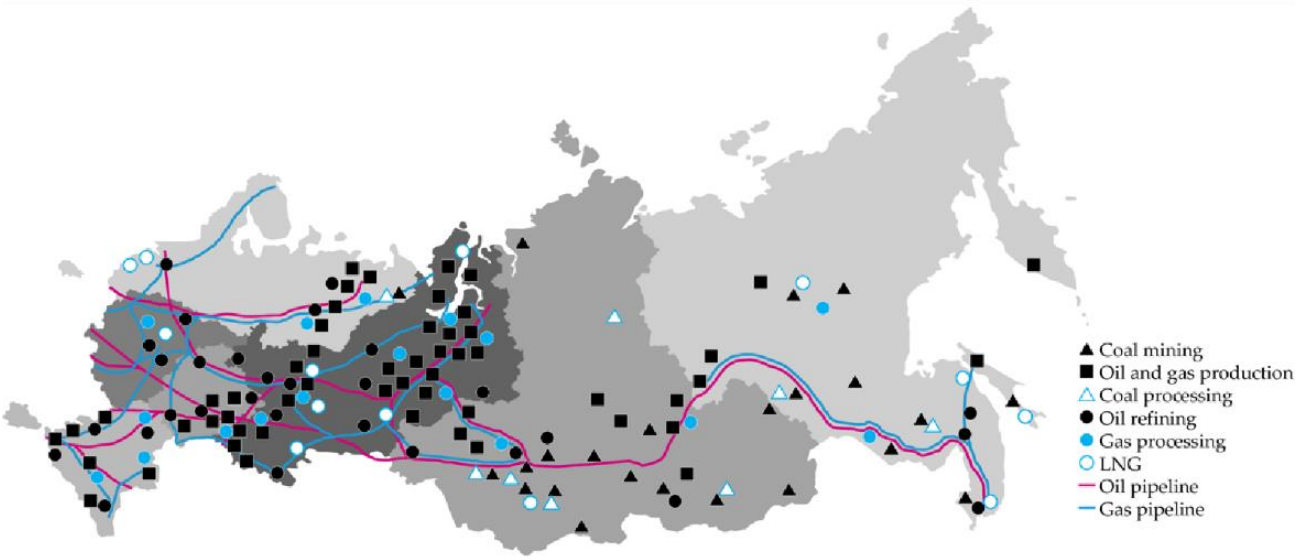


Рис. 3. Зональное распределение топливно-энергетического комплекса Российской Федерации

ЛТЭК – это замкнутый территориальный контур, объединяющий основные отрасли энергетики: нефтяную, газовую и угольную, а также электро- и теплоэнергетику. При этом в каждом энергетическом комплексе есть своя доминирующая отрасль или даже несколько. Для каждого ТЭК характерна целевая функция, определяющая зоны его развития и локальные проблемы, что в дальнейшем позволяет выявить потенциал для внедрения и использования рассматриваемых технологических блоков.

2.1.1. Современное состояние Центрального ЛТЭК

В этом регионе нет значительных запасов традиционных ресурсов, но через него проходят важнейшие транспортные пути для поставок ископаемого топлива за рубеж. Территория ЛТЭК является местом концентрации управленческого слоя большинства сфер ТЭК. Расположение на пересечении основного международного потребителя и территориальной зоны добычи ресурсов определяет важность логистики. Современные условия заставляют менеджеров переориентировать поставки, а также оптимизировать их с целью повышения эффективности, надежности и экологичности. Энергия, потребляемая в регионе, расходуется в основном на бытовые нужды. Довольно большая доля электроэнергии в регионе вырабатывается на атомных электростанциях – около 42,8 % на 2021 год [52]. Теплоснабжение в зимние и осенние месяцы играет важную роль в обеспечении комфортных условий проживания.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

2.1.2. Современное состояние Южного ЛТЭК

Южный ЛТЭК характеризуется отсутствием какой-либо значимой связи с угольной промышленностью по сравнению с другими. Основное внимание в регионе уделяется транспортировке и переработке нефти и газа. Потребление энергии и тепла осуществляется в основном для непромышленных нужд, но оно ниже по сравнению с другими регионами из-за различных климатических условий и размеров охватываемых территорий. Налаживание торговых отношений с Казахстаном и другими странами СНГ, несмотря на масштабные глобальные изменения, может стать стабильным драйвером для развития перерабатывающих мощностей региона. Важную роль в производстве электроэнергии в регионе играют атомная и гидроэнергетика, на долю которых приходится 28,8 и 18,2 % соответственно [52]. На долю ВИЭ приходится 4,1 % от общего объема выработки, но они продолжают быстро расти в регионе.

2.1.3. Современное состояние Северо-Западного ЛТЭК

Теоретическая возможность увеличения добычи ресурсов в этом регионе крайне маловероятна и связана со значительными затратами, несмотря на большие запасы (например, в Печорском угольном бассейне). В то же время бюджет отдельных районов, в том числе Ненецкого автономного округа, зависит от небольших объемов добычи в масштабах страны. Как и Центральный ФО, этот регион можно назвать логистическим центром, где берут начало два скандинавских газовых потока и Балтийская трубопроводная система для транспортировки нефти. Это второй из важнейших деловых центров и центральный пункт управления морской логистикой. Некоторое время основная роль ТЭК отводилась газовой промышленности, но есть потенциал и для угольной отрасли. Потребление энергии и тепла достаточно велико из-за суровых климатических условий и потребностей отдельно стоящих крупных городов. Доля электроэнергии, вырабатываемой в этом регионе на атомных электростанциях, составляет 34,9 % [52].

2.1.4. Современное состояние Средневолжского ЛТЭК

В связи с небольшими запасами, основной акцент по значимости в ТЭК данного ЛТЭК делается не на добычу, а на переработку и последующую транспортировку по железной дороге. Дальнейшее развитие региона может осуществляться на примере Оренбургского газоперерабатывающего завода, который наращивает свои мощности в условиях санкций. Угольная промышленность имеет большое значение для региона в связи с активной транспортировкой промежуточной и конечной продукции. Потребление электрической и тепловой энергии держится на уровне Центрального и Северо-Западного ФО из-за концентрации отдельных производств, а не необходимости обеспечивать население. На долю атомных электростанций приходится 29,9 % выработки электроэнергии, на долю гидроэлектростанций – 18,5 % [52].

2.1.5. Современное состояние Уральского ЛТЭК

Наряду с Сибирским ЛТЭК, в этом районе сосредоточена большая часть производственных мощностей (за исключением угольной промышленности). Расположение на пересечении транспортных путей и между регионами с основными запасами и внутренними потребителями энергоресурсов обусловливает региональную зависимость от транспортной инфраструктуры. Наибольшее значение для ЛТЭК имеет нефтяная промышленность. Однако строительство «Силы Сибири-2» может спровоцировать переход от нефтяной к газовой промышленности. Потребление энергии и тепла распределено по территории неравномерно, где выделяются отдельные регионы с чрезвычайно высокими потребностями из-за наличия производственных мощностей. Целевая функция этого региона – обеспечение бесперебойной транспортировки и производства. Даже в условиях санкционного давления и реструктуризации рынка состояние региона стабильно.

2.1.6. Современное состояние Сибирского ЛТЭК

Сибирский ЛТЭК является лидером по запасам в большинстве отраслей. Здесь представлена практически вся цепочка от добычи до переработки ресурсов для обеспечения других регионов. Развитие ЛТЭК с позиции делового центра нецелесообразно из-за особенностей климатических условий и удаленности от центров потребления страны. Отрасли ТЭК в регионе равнозначны. Энергия и тепло в основном расходуются на производство в достаточно больших объемах в силу климатических условий. В то же время необходимо обеспечить определенный уровень энергетической безопасности для снабжения системообразующих предприятий. С точки зрения производства

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

электроэнергии ключевую роль в регионе играют гидроэлектростанции, на долю которых приходится 59,4 % от общего объема [52]. Несмотря на ориентацию региона на добычу ресурсов, в рамках целевой функции было предусмотрено сохранение территорий в качестве природных резерватов в связи со степенью деградации лесов на фоне изменения климата.

2.1.7. Современное состояние Восточного ЛТЭК

На фоне рыночных изменений этот регион может развиваться наиболее динамично среди других. В основном он является местом переработки (в наибольшей степени в угольной промышленности) и транспортными маршрутами ресурсов в Азию. Развита и переработка газа, например, на Амурском газоперерабатывающем заводе. Основой регионального ТЭК является газовая промышленность и ее транспортировка по «Силе Сибири» и газопроводу Сахалин-Хабаровск-Владивосток в страны АТР. Для ЛТЭК характерна зависимость от критических климатических изменений и сезонных катаклизмов (наводнения и т. д.), что влияет на уровень целевой надежности тепло- и электроснабжения. Для производства электроэнергии активно используются гидроэлектростанции, вырабатывающие 41 % электроэнергии в регионе [52]. Функциональное назначение региона – логистическое и промышленное.

2.1.8. Определение и оценка свойств ЛТЭК

Качественного выражения состояния ЛТЭК недостаточно для сценарного прогнозирования. Поэтому необходимо было определить количественные параметры по отраслям. Для оценки устойчивого развития энергосистемы каждый ЛТЭК рассматривается через пять свойств T_i, где:

устойчивость T_1 – способность ТЭК сохранять свое текущее состояние под воздействием внешних глобальных вызовов;

доступность T_2 – состояние ТЭК, при котором она обладает необходимым количеством ресурсов, готовых к использованию потребителями повсеместно и в любое время;

эффективность T_3 – способность ТЭК достигать ожидаемого результата при минимальных затратах ресурсов и энергии;

адаптивность T_4 – способность ТЭК адаптироваться к внешним воздействующим факторам;

надежность T_5 – способность ТЭК поддерживать свою работоспособность в заданных условиях.

Для осуществления сценарного прогнозирования исходное состояние каждого ЛТЭК оценивалось по этим пяти свойствам. Каждому свойству соответствовало определенное количество параметров P_n (от 2 до 4, в зависимости от отрасли и наличия информации).

Параметры различаются единицами измерения, что обуславливает некорректность их сравнения без дополнительных действий. Кроме того, большие значения параметров в некоторых случаях свидетельствовали о бедности развития объектов, а не наоборот.

Поэтому, чтобы соотнести эти значения друг с другом в свойствах, они были нормированы по формуле (1) в диапазоне [0;1], где 0-параметр слабо развит, 1-параметр сильно развит в ЛТЭК.

$$X' = \frac{(x - X_{min})}{(X_{max} - X_{min})}, \quad (1)$$

где X' – нормированное значение; x – инициальное значение; X_{max} – максимальное значение в медианном интервале; X_{min} – минимальное значение в медианном интервале.

Сумма нормированных параметров по свойствам является коэффициентом, значение которого отражает исходное и дальнейшее состояние энергосистем после анализа полученных данных.

В таблице 1 приведены суммарные значения параметров для ЛТЭК (где «ЭЭ» – электроэнергия, а «ТЭ» – теплоэнергия). В качестве примера для газовой отрасли Центрального ЛТЭК авторы привели выбранные параметры по свойству T_1 (устойчивость): объем сетевого газа, доступный для среднемесячной зарплаты жителей региона, в $м^3$ (нормированное значение равно 1) и протяженность построенных газопроводов в м (нормированное значение равно 0,98).

Полученная суммарная стоимость газовой отрасли Центрального ЛТЭК в пересчете на имущество T_1 (1,98) превышает все остальные. Это свидетельствует о высокой степени устойчивости газовой отрасли в центральном регионе. Аналогичным образом можно провести первичный анализ для других регионов и отраслей.

Полный перечень параметров без разделения по ЛТЭК представлен в Приложении А, таблица А1.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

2.2. Анализ влияния внешних вызовов на ЛТЭК

Внешнее воздействие на ТЭК подразделяется на вызовы пяти различных направлений: технологические ($К_1$), экономические ($К_2$), экологические ($К_3$), политические ($К_4$) и законодательные ($К_5$). Оценка степени влияния каждого вызова в соответствии с критериями для трех временных периодов (2020-2025, 2025-2030, 2030-2035+) проводилась по трем сценариям: негативному, нейтральному и позитивному. Оценка влияния идет от значений критериев для страны в целом к значениям критериев для отраслей.

Таблица 1

Суммарное значение параметров ЛТЭК

$Т_i$	ЛТЭК	Уголь	Газ	Нефть	ЭЭ	ТЭ
$Т_1$	Центральный	–	1,98	0,21	1,22	1,71
	Южный	–	0,99	2,90	0,87	0,29
	Северо–Западный	1,00	1,31	2,47	1,18	0,51
	Средневолжский	–	0,73	1,53	1,02	2,00
	Уральский	–	1,22	1,93	1,50	0,51
	Сибирский	2,00	1,08	0,33	0,75	0,49
	Восточный	0,13	0,00	1,65	1,00	0,22
$Т_2$	Центральный	0,02	0,00	0,32	1,00	1,54
	Южный	0,71	0,40	0,68	0,46	1,54
	Северо–Западный	0,40	1,14	1,11	0,22	1,54
	Средневолжский	0,03	0,00	1,08	0,75	1,54
	Уральский	0,06	3,11	3,35	0,85	0,68
	Сибирский	1,40	1,21	1,83	1,15	1,00
	Восточный	1,02	0,08	0,23	–	1,07
$Т_3$	Центральный	–	0,13	1,39	1,62	2,70
	Южный	0,00	0,99	0,36	0,76	1,61
	Северо–Западный	0,20	1,03	0,59	1,19	2,21
	Средневолжский	–	1,00	1,06	1,58	2,53
	Уральский	0,24	1,91	2,85	1,00	1,85
	Сибирский	2,20	0,03	1,04	0,63	1,65
	Восточный	0,21	0,38	0,12	0,02	0,00
$Т_4$	Центральный	–	1,37	0,00	1,00	2,00
	Южный	0,11	1,05	0,94	0,73	0,96
	Северо–Западный	0,15	1,05	0,13	1,43	1,14
	Средневолжский	–	1,18	0,35	0,71	1,19
	Уральский	0,00	0,68	0,66	0,43	1,53
	Сибирский	2,00	0,00	1,29	0,29	0,75
	Восточный	0,00	0,38	1,85	0,53	0,62
$Т_5$	Центральный	0,00	0,18	1,92	1,69	0,55
	Южный	1,00	1,35	1,97	0,90	1,08
	Северо–Западный	0,86	0,45	1,62	1,78	1,55
	Средневолжский	0,00	0,30	0,89	1,75	0,00
	Уральский	0,00	0,42	0,67	2,30	1,68
	Сибирский	1,04	1,14	1,32	1,59	1,32
	Восточный	1,87	1,00	1,33	–	1,90

Например, в качестве первого шага было сделано предположение, что в период 2020-2025 годов, согласно негативному сценарию по экономическому критерию $К_2$, экономический кризис в Российской Федерации окажет серьезное влияние на устойчивость ТЭК. По нейтральному сценарию за тот же период времени произойдет сокращение производственных мощностей и отток

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

персонала. В свою очередь, согласно позитивному сценарию, кризис будет преодолен за счет переориентации на внутренний рынок при налаживании новых внешнеэкономических связей.

Вызовы по пяти критериям оказывают влияние на свойства: оно может быть как положительным, так и отрицательным, что зависит от степени влияния. Например, экономическая нестабильность (критерий K_2) при любых сценариях и периодах времени в разной степени негативно влияет на устойчивость (свойство T_1) ТЭК РФ. В то же время законодательные изменения (K_5) положительно влияют на адаптивность ТЭК страны (T_4) в тех же условиях и по тому же сценарию.

Оценка влияния критериев K_z на свойства T_i изначально проводилась в диапазоне [–1; 1], где –1 – сильное отрицательное влияние, 0 – отсутствие влияния, 1 – сильное положительное влияние. В качестве примера авторы в таблице 2 приводят результаты первоначальной оценки для нейтрального сценария за три временны́х периода.

Таблица 2

Оценка свойств с помощью сценарных критериев для нейтрального сценария

Нейтральный сценарий, 2020–2025					
T_i	**K_1**	**K_2**	**K_3**	**K_4**	**K_5**
T_1, устойчивость	−0,8	−0,5	−0,7	−0,9	0,7
T_2, доступность	−0,5	−0,6	−0,1	−0,9	0,3
T_3, эффективность	−0,4	−0,5	−0,2	−0,5	0,2
T_4, адаптивность	0,6	−0,9	−0,3	−0,8	0,9
T_5, надежность	0,2	−0,5	−0,2	−0,6	0,6
Нейтральный сценарий, 2035–2030					
T_i	**K_1**	**K_2**	**K_3**	**K_4**	**K_5**
T_1, устойчивость	−0,8	−0,4	−0,8	−0,7	0,5
T_2, доступность	−0,5	−0,7	−0,2	−0,8	0,3
T_3, эффективность	−0,7	−0,6	−0,2	−0,5	0,1
T_4, адаптивность	0,4	−0,9	−0,4	−0,8	0,8
T_5, надежность	0,2	−0,5	−0,1	−0,5	0,5
Нейтральный сценарий, 2030–2035+					
T_i	**K_1**	**K_2**	**K_3**	**K_4**	**K_5**
T_1, устойчивость	−0,6	−0,3	−0,6	−0,5	0,5
T_2, доступность	−0,4	−0,5	−0,3	−0,7	0,3
T_3, эффективность	−0,4	−0,7	−0,1	−0,5	0,3
T_4, адаптивность	0,5	−0,6	−0,3	−0,6	0,7
T_5, надежность	0,1	−0,3	−0,1	−0,5	0,4

Для полученных значений требовалось нормирование, так как степень влияния зависела, в том числе, от количества и веса найденных параметров P_n в рамках свойств T_i. Она проводилась в диапазоне [-n; +n] (где n – количество параметров P_n свойства T_i) по формуле (2):

$$X' = (x - X_{min}) \cdot \frac{O}{2} + O_{min}, \quad (2)$$

где X' – нормированное значение (табл. 3); x – начальное значение (табл. 2); X_{min} – минимальное значение в медианном диапазоне; O – интервальный диапазон параметров ($2P_n$); O_{min} – минимальное значение в интервальном диапазоне параметров.

Разделение на ЛТЭК на этом этапе не проводилось: вместо этого на данном этапе анализа применялись отрасли. Например, для газовой отрасли, рассмотренной в разделе 2.1.8, были определены два параметра P_n для свойства T_1 (устойчивость). Исходя из этого, во всех сценариях была проведена нормализация свойства T_i по критерию K_z в диапазоне [-2; 2]. Результаты нормализации представлены в таблице 3.

Рассмотрев данный пример, авторы пришли к выводу, что геополитическая ситуация оказывает наибольшую степень негативного влияния (критерий K_4) на доступность (свойство T_2) в газовой отрасли по нейтральному сценарию в первом из трех временных периодов. В то же время

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

законодательные особенности (K_5), напротив, оказывают положительное влияние на адаптивность (свойство T_4). Подобные выводы по аналогии можно сделать и для других отраслей, временных интервалов и сценарных условий.

Полученные авторами значения были усреднены для дальнейшего использования в комплексной оценке влияния внешних вызовов на ТЭК. Результаты представлены на рисунке 4 для всех сценариев (где «=» – нейтральный сценарий, «–» – негативный сценарий, «+» – позитивный сценарий) за три временных периода (2020-2025, 2025-2030, 2030-2035+). Группировка по временным интервалам на графике для негативного и позитивного сценариев аналогична базовой.

Таблица 3

Нормированные оценки свойств в рамках сценарных критериев для нейтрального сценария развития газовой отрасли

Нейтральный сценарий, 2020–2025						
T_i	**K_1**	**K_2**	**K_3**	**K_4**	**K_5**	**Медианное значение**
T_1, [−2;2]	−1,6	−1	−1,4	−1,8	1,4	−0,88
T_2, [−4;4]	−2	−2,4	−0,4	−3,6	1,2	−1,44
T_3, [−2;2]	−0,8	−1	−0,4	−1	0,4	−0,56
T_4, [−2;2]	1,2	−1,8	−0,6	−1,6	1,8	−0,2
T_5, [−2;2]	0,4	−1	−0,4	−1,2	1,2	−0,2
Нейтральный сценарий, 2025–2030						
T_i	**K_1**	**K_2**	**K_3**	**K_4**	**K_5**	**Медианное значение**
T_1, [−2;2]	−1,6	−0,8	−1,6	−1,4	1	−0,88
T_2, [−4;4]	−2	−2,8	−0,8	−3,2	1,2	−1,52
T_3, [−2;2]	−1,4	−1,2	−0,4	−1	0,2	−0,76
T_4, [−2;2]	0,8	−1,8	−0,8	−1,6	1,6	−0,36
T_5, [−2;2]	0,4	−1	−0,2	−1	1	−0,16
Нейтральный сценарий, 2030–2035+						
T_i	**K_1**	**K_2**	**K_3**	**K_4**	**K_5**	**Медианное значение**
T_1, [−2;2]	−1,2	−0,6	−1,2	−1	1	−0,6
T_2, [−4;4]	−1,6	−2	−1,2	−2,8	1,2	−1,28
T_3, [−2;2]	−0,8	−1,4	−0,2	−1	0,6	−0,56
T_4, [−2;2]	1	−1,2	−0,6	−1,2	1,4	−0,12
T_5, [−2;2]	0,2	−0,6	−0,2	−1	0,8	−0,16

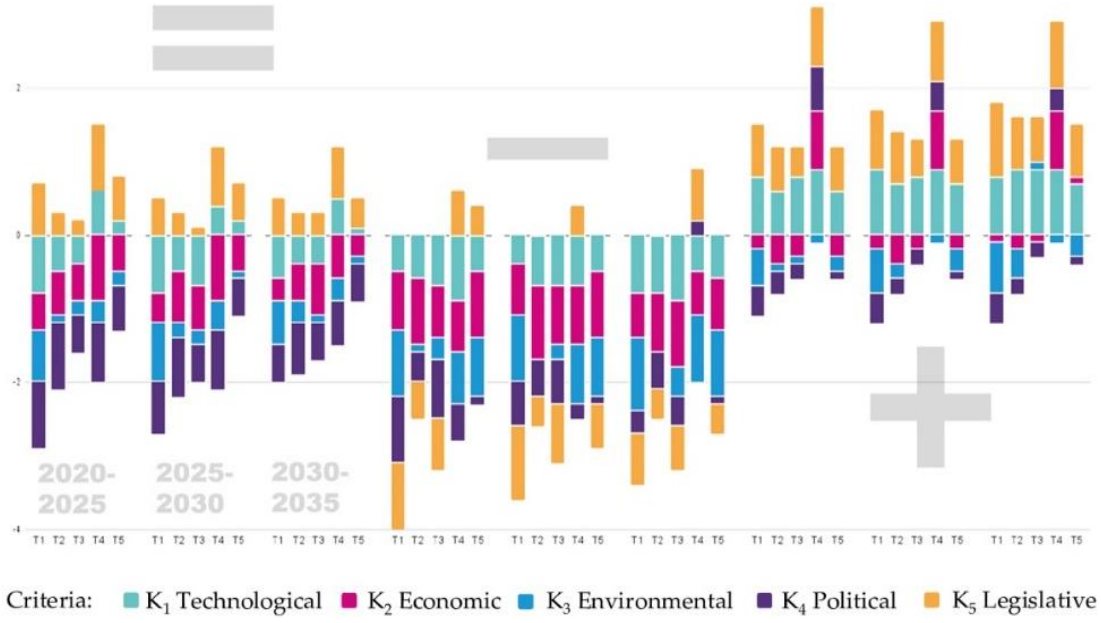


Рис. 4. Влияние внешних вызовов в сценариях на временной период сценарного прогнозирования 2020-2035+

2.3. Анализ влияния технологического развития на свойства в ЛТЭК

Для определения степени влияния технологического развития на изменение свойств T_i в энергетических отраслях на трех временных периодах (2022-2025, 2025-2030, 2030-2035+) был сформирован опрос по каждому ЛТЭК. Степень этого влияния, по результатам опроса, оценивалась по шкале от -10 до 10 с дискретностью 1, где значения отражают:

-10 – максимальная деградация технологического развития и, как следствие, ухудшение значений свойств энергетической отрасли;

0 – отсутствие изменений в значениях свойств отрасли;

10 – максимальное технологическое развитие и, как следствие, улучшение значений свойств энергетической отрасли.

Продолжительность опроса составила 2 недели. Отбор экспертной группы осуществлялся из структур, связанных с научной и образовательной деятельностью, а также из компаний топливно-энергетического комплекса. За это время в опросе приняли участие 47 человек, в том числе сотрудники 12 учебных заведений и представители 10 отраслевых компаний. Данная выборка респондентов была сформирована таким образом, чтобы опереться на мнение ведущих экспертов и преподавателей учебных заведений, близких к рассматриваемой тематике. По результатам была выявлена степень трансформации свойств каждого ЛТЭК и ее направление.

Итоговая оценка шла от локального уровня к глобальному. Сначала она проводилась для ЛТЭК по отраслям на трех временных интервалах, после чего было получено медианное значение. Разделение сценариев на этом этапе не проводилось.

Согласно формуле (3), были определены медианные значения, характеризующие поведение свойств на заданных временных интервалах.

$$Me = x_{Me} + i_{Me} \cdot \frac{\frac{\sum f}{2} - S_{Me-1}}{f_{Me}}, \quad (3)$$

где M_e – среднее значение; x_{Me} – нижняя граница медианного интервала; i_{Me} – средняя ширина интервала; $\sum f$ – число всех значений; S_{Me-1} – предсредняя кумулятивная частота; f_{Me} – количество наблюдений в медианном интервале.

В качестве примера в табл. 4 приведены полученные значения влияния технологического развития газовой отрасли на устойчивость (свойство T_1) для ЛТЭК и страны в целом (медианные значения).

Таблица 4

Сводка первичных и вторичных данных опроса по свойству устойчивости (T1) в газовой промышленности

Период	Центральный ЛТЭК	Южный ЛТЭК	Северо-Западный ЛТЭК	Средневолжский ЛТЭК	Уральский ЛТЭК	Сибирский ЛТЭК	Восточный ЛТЭК	Медианное значение
2022–2025	−2	−2	1	−3	2	2	2	0
2025–2030	1	−2	2	0	2	2	2	1
2030–2035+	1	1	4	2	3	3	4	2,5

На основании данных, полученных от экспертов, можно сделать вывод, что влияние технологического развития на устойчивость (T_1) газовой отрасли страны будет постепенно возрастать (даже несмотря на небольшой начальный вес на уровнях ЛТЭК). Наибольшее итоговое значение прогнозируется для устойчивости Уральского и Восточного ЛТЭК, а большее изменение свойства по сравнению с начальным выявлено для Центрального и Южного ЛТЭК и Средневолжском ЛТЭК.

При оценке важно (как и на предыдущих этапах) соотнести полученные результаты с количеством выбранных параметров P_n в рамках свойств T_i. Для этого была проведена нормализация по формуле (2), где медианные значения пересчитывались в диапазон значений, количественно равный числу параметров.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

На основании этого первичные данные были переведены в другую шкалу измерения, результат которой представлен в таблице 5 для приведенного ранее примера (свойство устойчивости (T_1) газовой промышленности). Такая нормализация была необходима для дальнейшей оценки суммарного влияния как внешних вызовов, так и технологического развития на ЛТЭК.

Таблица 5

Нормированные результаты исследования свойства устойчивости (T1) в газовой промышленности

Период	ЛТЭК Центра	ЛТЭК Юга	ЛТЭК Северо-Запада	ЛТЭК Средней Волги	ЛТЭК Урала	ЛТЭК Сибири	ЛТЭК Востока
2022–2025	0,8	0,8	1,1	0,7	1,2	1,2	1,2
2025–2030	1,1	0,8	1,2	1	1,2	1,2	1,2
2030–2035+	1,1	1,1	1,4	1,2	1,3	1,3	1,4

2.4. Получение сценарных коэффициентов для разработки ТЭК по видам деятельности

Для прогнозирования состояния ЛТЭК необходима комплексная оценка. Влияние на энергетическую систему оказывают как внешние факторы, так и технологический прогресс. Эти области были оценены в предыдущих разделах. Результат суммирования представлен в таблице 6 на примере, аналогичном предыдущим разделам.

Таблица 6

Первичные данные и коэффициент устойчивости (T1) для газовой промышленности по нейтральному сценарию в период 2022-2025 гг.

ЛТЭК	Оценка исходного состояния	Усредненное влияние внешних вызовов	Влияние технологического развития	Суммарное значение	Нормированное суммарное значение
Центральный	1,98	–0,88	0,8	1,89	0,95
Южный	0,99	–0,88	0,8	0,91	0,45
Северо–Западный	1,31	–0,88	1,1	1,53	0,76
Средневолжский	0,73	–0,88	0,7	0,55	0,28
Уральский	1,22	–0,88	1,2	1,54	0,77
Сибирский	1,08	–0,88	1,2	1,39	0,69
Восточный	0,00	–0,88	1,2	0,32	0,16

За точку отсчета были приняты начальные значения свойств T_i, а во всех последующих итерациях проводилась нормировка на количество найденных параметров P_n. Таким образом, стало возможным суммировать результаты, полученные за каждый период времени в каждом сценарии, чтобы получить коэффициенты свойств. Далее полученное значение делилось на количество найденных параметров P_n, с помощью чего и проводилась нормализация.

3. Результаты и обсуждение

По результатам комплексной оценки перспектив развития ТЭК под влиянием глобальных вызовов и развития технологий были получены сценарные коэффициенты развития ТЭК для каждого из семи ЛТЭК. Полученные графики, показывающие степень развития основных отраслей энергетики по трем сценариям (негативному, нейтральному и позитивному) для выбранных временных интервалов (2020-2025, 2025-2030, 2030-2035), представлены на рисунках 5-11. На них разделение отраслей на нейтральный («=»), негативный («–») и позитивный («+») сценарии аналогично угольной промышленности.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

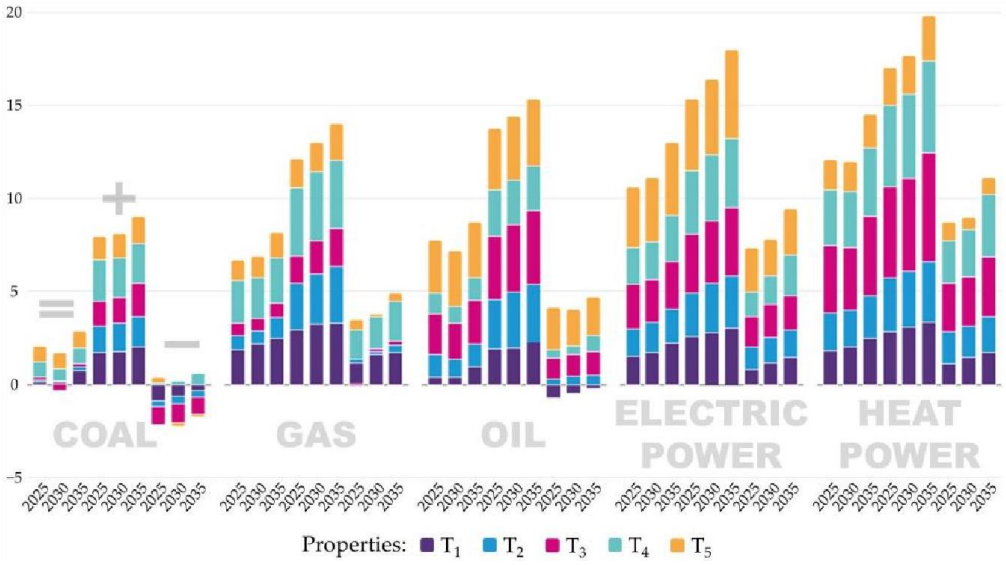


Рис. 5. Отраслевые сценарные коэффициенты развития свойств Центрального ЛТЭК на трех временных интервалах

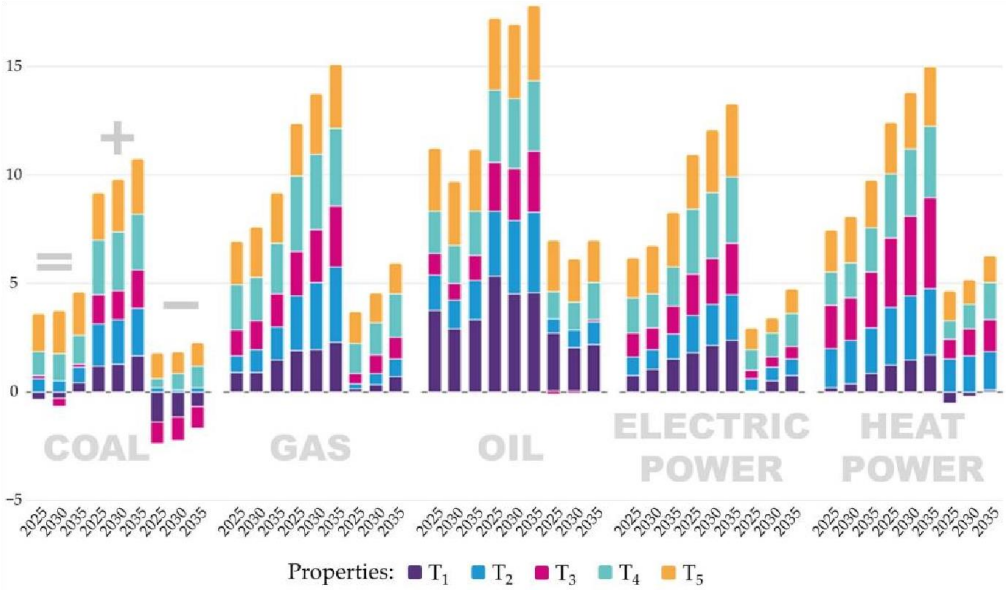


Рис. 6. Отраслевые сценарные коэффициенты развития свойств Южного ЛТЭК на трех временных интервалах



Рис. 7. Отраслевые сценарные коэффициенты развития свойств Северо-Западного ЛТЭК на трех временных интервалах

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0



Рис. 8. Отраслевые сценарные коэффициенты развития свойств Средневолжского ЛТЭК на трех временных интервалах

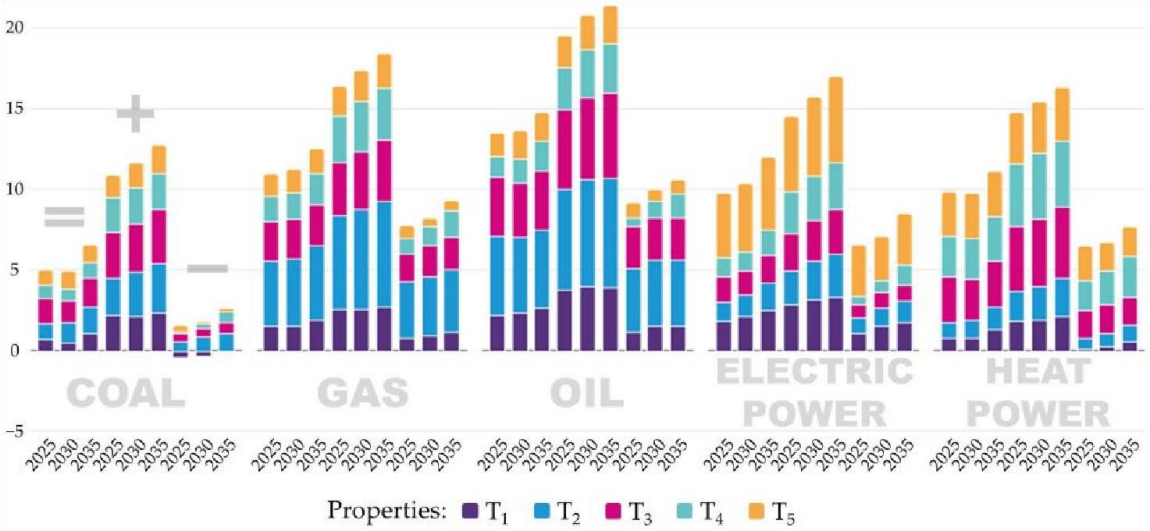


Рис. 9. Отраслевые сценарные коэффициенты развития свойств Уральского ЛТЭК на трех временных интервалах

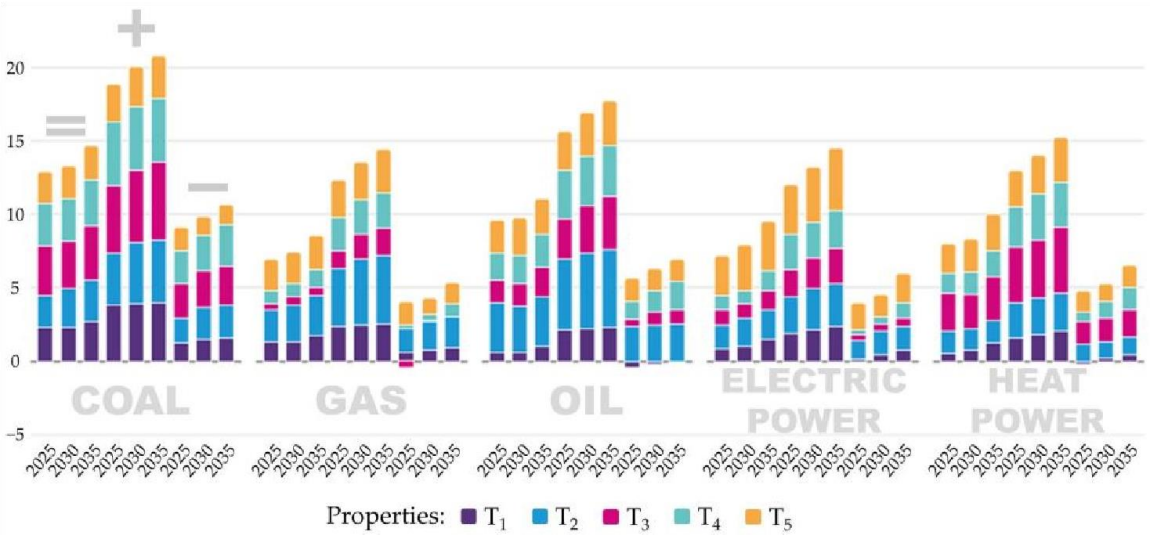


Рис. 10. Отраслевые сценарные коэффициенты развития свойств Сибирского ЛТЭК на трех временных интервалах

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0



Рис. 11. Отраслевые сценарные коэффициенты развития свойств Восточного ЛТЭК на трех временных интервалах

На всех диаграммах столбцы, представляющие сумму коэффициентов свойств T_i, разделены на пять групп по отраслям энергетики. Первые девять столбцов описывают угольную промышленность, следующие девять – газовую, далее следуют нефтяная, электрическая и тепловая энергетика. В каждой группе первые три столбца описывают полученные коэффициенты для нейтрального сценария, следующие три – для позитивного и последние 3 столбца – для негативного сценария.

Значимость вклада одного из пяти свойств в развитие конкретного энергетического сектора по выбранному сценарию на определенном временном интервале определяется долей соответствующего цвета в рассматриваемом столбце. Например, на развитие электроэнергетики ЦФО при нейтральном и позитивном сценариях на всех временных интервалах наибольшее влияние оказывает надежность (T_5).

Высокие значения полученных коэффициентов свойств указывают на потенциал роста уровня развития отрасли. Исходя из этого, практически линейный рост значений коэффициентов свойств в отраслях, наблюдаемый в некоторых случаях, отражает регионы, преобладающие по темпам их развития. Эти темпы связаны как с внешним фоном, так и с внутренним уровнем технологического развития.

Авторы определили, что наибольшее развитие в ЦФО во всех сценариях получила электро- и теплоэнергетика, что показано на рисунке 5. Наибольший вклад в это развитие в электроэнергетике вносит ее надежность T_5, а в теплоэнергетике – эффективность T_3. В теплоэнергетике большие потери происходят при передаче тепла, что является основной проблемой отрасли в условиях ее относительно высокого уровня развития в центральном регионе. Поэтому основным резервом для ее увеличения является повышение эффективности передачи и генерации тепла. В свою очередь, благодаря высоким показателям других свойств, основное развитие электроэнергетики в центральном регионе может произойти именно за счет повышения надежности.

Для угольной и нефтяной промышленности в негативном сценарии и (с точки зрения эффективности T_3) даже в нейтральном сценарии наблюдаются отрицательные значения коэффициентов некоторых свойств. Это свидетельствует о регрессе в угольной промышленности и замедлении развития нефтяной отрасли, отчасти из-за отсутствия крупных месторождений в центральном регионе.

Наиболее развитым энергетическим сектором Южного ЛТЭК во всех сценариях является нефтяная промышленность, в основном из-за ее устойчивого влияния T_1, что показано на рисунке 6. Однако этот случай нетипичен. Сначала, в период 2025-2030 годов, произойдет снижение уровня промышленного развития по сравнению с 2020-2025 годами. Затем, к 2030-2035 годам, начнется этап роста, отличающийся между сценариями только темпами.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Снижение уровня развития связано с тем, что в данном регионе нефтегазовая промышленность представлена в основном нефтеперерабатывающими мощностями и транспортом. В любом из сценариев на начальном этапе ожидается изменение транспортных цепочек и переориентация рынков, что временно вызывает замедление промышленного развития.

В негативном сценарии веса положительных и отрицательных значений коэффициентов собственности практически равны. Это является закономерным результатом низкой связи Южного ЛТЭК с угольной промышленностью в настоящее время. Такая корреляция указывает на необходимость рассмотрения устойчивости и адаптивности отрасли в качестве точек будущего роста.

В случае с Северо-Западным ЛТЭК все отрасли могут развиваться гармонично, и выделять среди них лидера нецелесообразно. В каждой из отраслей наибольший вклад вносят разные объекты, что обусловлено их спецификой. Эта взаимосвязь показана на рисунке 7. Угольная промышленность демонстрирует заметное отставание в случае реализации негативного сценария. Несмотря на потенциал развития добычи в Печорском угольном бассейне, возможности для этого в негативном сценарии не представлены. Основные усилия направлены на поддержание и развитие более приоритетных для жителей региона отраслей – тепло- и электроэнергетики.

Согласно результатам анализа, Северо-Западный ЛТЭК характеризуется поэтапными высокими темпами развития отраслей, что выражается в линейности увеличения вкладов коэффициентов свойств. В перспективе по уровню промышленного развития этот ЛТЭК может оказаться на одном уровне с Центральным ЛТЭК.

Для Средневолжского ЛТЭК характерно отсутствие явно лидирующей отрасли при примерно одинаковом уровне развития тепло- и электроэнергетики, а также нефтяной промышленности. При этом развитие нефтяной промышленности и электроэнергетики может происходить в равных пропорциях за счет всех свойств энергетических систем (рис. 8).

В этом регионе также нет крупных месторождений полезных ископаемых, но вдоль Волги расположено множество промышленных предприятий и производств. Это стимулирует развитие тепло- и электроэнергетики для обеспечения производства в положительном и нейтральном сценариях при увеличении объемов выпускаемой продукции. Развитие нефтяной промышленности в данном случае обусловлено изменением торговых связей в связи с транспортной ролью ЛТЭК.

Нефтяная промышленность является ведущей в Уральском ЛТЭК, развитию которой способствует повышение доступности T_2, что подтверждается рисунком 9. Устойчивость T_1 и эффективность T_3 этой отрасли также вносят значительный вклад в ее развитие в каждом из сценариев. Приоритет нефтяной отрасли связан с концентрацией на данной территории большой части нефтедобывающих мощностей. Кроме того, этот регион является транспортной магистралью для другого нефтедобывающего региона – Сибирского ЛТЭК. Исходя из этого, развитие его доступности будет обусловлено развитием технологий транспортировки и хранения нефти.

На территории Сибирского ЛТЭК наиболее сильное развитие может получить угольная промышленность (см. рис. 10). Совместный рост уровня стоимости всех объектов приводит к тому, что темпы развития этой отрасли становятся лидирующими во всех сценариях. В то же время газовая, тепловая и электроэнергетическая отрасли развиваются медленнее, чем в других регионах (за исключением Восточного ФО).

Этот регион является лидером по запасам и добыче полезных ископаемых практически во всех отраслях, но особое развитие может получить угольная промышленность из-за преобладания мощностей месторождений по сравнению с другими ЛТЭК. Более того, в отличие от нефтегазовой отрасли, где ее развитие может быть поддержано уральским ЛТЭК, для угольной промышленности такой возможности нет. Обширность территории Сибири, неравномерная плотность населения и суровые климатические условия тормозят развитие тепло- и электроэнергетики в этом ЛТЭК.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Восточный ЛТЭК характеризуется низким уровнем развития практически всех отраслей из-за удаленности от центральных регионов, низкой плотности населения и изолированной инфраструктуры. Наибольшее развитие во всех сценариях получат нефтяная и угольная отрасли, в основном за счет доступности T_2 и надежности T_5. Это наглядно показано на рисунке 11. Развитие угольной промышленности в Восточном ЛТЭК, однако, частично зависит от уровня добычи в Сибирском ЛТЭК.

Таким образом, моделирование влияния сценарных критериев, обусловленных глобальными вызовами в развитии отраслей, через свойства и оценку влияния технологического развития на их изменение позволит проследить взаимное влияние вызовов и технологического прогресса на структуру энергоснабжения. Это, в свою очередь, позволит определить проблемные точки развития и области, требующие инвестиций для поддержания целевых значений свойств энергосистем в долгосрочной перспективе.

4. Выводы

Влияние на структуру и развитие топливно-энергетического комплекса России происходит как от внешних факторов, так и от медленного технологического развития на фоне этого влияния. Будущее энергетической отрасли зависит от ее способности адаптироваться к быстро меняющимся условиям и оптимизировать внутренние процессы для удовлетворения потребностей.

Состояние энергетического сектора в целом складывается из локальных уровней регионального развития. Целевые функции этих точек роста зависят от их исходного состояния, определяемого территориальным расположением и рядом особенностей, включая плотность населения и развитие отдельных отраслей.

В данной статье предлагается подход к оценке состояния локальных топливно-энергетических комплексов (ЛТЭК) через специфические сквозные свойства отраслей, характеризуемые количественными параметрами. Оценивается влияние внешних воздействий (через вызовы) и технологического развития на эти свойства. Их сочетание влияет на исходное состояние ЛТЭК и делает возможным стратегическое планирование. Отраслевые свойства в рамках ЛТЭК, которые не были реализованы в достаточной степени, являются потенциальными точками эффективного регионального развития.

Использование представленной методологии позволяет найти слаборазвитые точки с высоким потенциалом для любой многокомпонентной энергосистемы. Предложенный подход учитывает различные аспекты развития, что позволяет принимать наиболее эффективные решения. Его результаты позволят создать надежное, гибкое и бесперебойное энергоснабжение потребителей с учетом мировых тенденций в энергетике и в соответствии с концепцией Индустрии 4.0. Аналогичные результаты могут быть получены и применены для любой энергосистемы с различным сочетанием первичных энергоресурсов, а также с любыми территориальными особенностями.

Планируемое дальнейшее совершенствование методологии позволит авторам рассматривать энергосистемы, состоящие из большего числа энергетических отраслей. В том числе ВИЭ и атомную энергетику (с учетом микрогенерации). Кроме того, интересным вопросом является учет в методологии сложных отношений между добычей и генерацией.

Вклад авторов: *концептуализация, А.К. и Ю.Ж.; методология, Р.П.; валидация, А.К.; формальный анализ, Д.Р., Р.П. и В.В.; исследование, В.В. и Д.Р.; написание – подготовка первоначального проекта, А.К., В.В. и Р.П.; написание – рецензирование и редактирование, Ю.Ж.; визуализация, Д.Р.; контроль, курирование данных Ю.Ж.; администрирование проекта, Ю.Ж. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.*

Финансирование: *данное исследование не получало внешнего финансирования.*

Заявление о доступности данных: *совместное использование данных не применимо. В этом исследовании не было создано или проанализировано никаких новых данных. Совместное использование данных не применимо к данной статье.*

Конфликты интересов: *авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Приложение А.

Таблица А1.

Промышленные параметры объектов

T_i	**Угольная промышленность**	**Газовая промышленность**	**Нефтяная промышленность**	**Электроэнергетика**	**Теплоэнергетика**
	Параметры				
T_1 устойчивое развитие	Удельный объем выбросов CO_2-экв., миллион тонн	Количество сетевого газа, доступного для среднемесячной заработной платы, $м^3$	Прирост бюджетных мест, %	Доля импортозамещения, %	Финансовый баланс в секторе теплоснабжения, млрд руб.
	ПВПНИА, тысяч рублей.	Протяженность вновь построенного газопровода, км	Удельная норма выбросов SO_x, т/тыс. т сырья	Доля работников с высшим образованием, %	Отпуск тепла от источников, млн Гкал
	КЧТПРВ	–	Удельный выброс NO_x, т/тыс. т сырья	–	–
T_2 доступность	Разведанные запасы, миллиард тонн	Запасы свободного газа, млрд. $м^3$	Объемы разведанных запасов, миллион тонн	Стоимость электроэнергии, коп./кВт·ч	Доля затрат на топливо в отпуске тепла, %
	Содержание влаги в угле в пласте, %	Отношение легкоизвлекаемых запасов к общему количеству запасов, %	Протяженность нефтепроводов, км	Протяженность линий электропередач, тыс. км	Протяженность тепловых сетей, нуждающихся в замене, км
	Увеличение эксплуатационной длины железнодорожных путей, км	Количество уникальных месторождений	Доля в российских запасах, %	–	–
	–	Количество крупных месторождений	Доля трудноизвлекаемых запасов, %	Себестоимость электроэнергии, коп./кВт·ч	Доля затрат на топливо в отпуске тепловой энергии, %
T_3 эффективность	Теплотворная способность угля, МДж/кг	Уровень использования ПНГ, %	Глубина переработки, %	Отходы, %	Коэффициент использования установленной мощности тепловой энергии источников теплоснабжения в отопительный период, %
	Добыча коксующегося угля, миллион тонн	Объем переработки газа, $м^3$	Мощность переработки, миллион тонн	Форм-фактор	Потери тепловой энергии в тепловых и паровых сетях, %
	Объем переработки угля, тыс. т	–	Объем добычи нефти, миллион тонн	–	Удельный расход топлива на тепловую энергию, отпускаемую котельными, кг условных тонн/Гкал
T_4 адаптивность	Количество комплексно механизированных лав	Доля газифицированных территорий, %	Спрос на геологическую информации по фондам геологической информации, %	Расходы на НИОКР, млн руб.	Доля потребления газового топлива, %
	Экспорт, %	Количество автомобилей с возможностью использования природного газа в качестве моторного топлива	Доля высоковязкой нефти, %	Баланс перетоков электроэнергии, млн кВт·ч	Коэффициент ежегодной актуализации схем теплоснабжения муниципальных образований
T_5 надежность	Содержание серы, %	Объем активных хранилищ, млн $м^3$/год	Количество аварий на нефтехимических и нефтегазовых перерабатывающих предприятиях	ИСППРС	Количество пострадавших при авариях на тепловых сетях и объектах теплоснабжения, тыс. чел.
	Доля шахт с благоприятным газоопасным режимом, %	Степень истощения запасов свободного газа, %	Расчетные технологические потери нефти, т	СИЧПРС	Количество аварий на тепловых сетях и объектах теплоснабжения
	–	–	–	Резерв регулирования, % к максимуму	–

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

ЛИТЕРАТУРА

1. Chwilkowska-Kubala, A.; Malewska, K.; Mierzejewska, K. Digital transformation of energy sector enterprises in Poland. Rationale and practices. *Sci. Pap. Sil. Univ. Tech. Organ. Manag. Ser*. 2022, 162, 101–120. http://doi.org/10.29119/1641-3466.2022.162.5
2. Laroussi, I.; Huan, L.; Xiusheng, Z. How will the internet of energy (IoE) revolutionize the electricity sector? A techno-economic review. *Mater. Today Proc*. 2022, 72, 3297–3311. http://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.07.323
3. Álvaro, A.G.; Palomar, C.R.; de Almeida Guimarães, V.; Hedo, E.B.; Torre, R.M.; de Godos Crespo, I. Developmental Perspectives of the Biofuel-Based Economy. In *Biofuels in Circular Economy*; Springer: Singapore, 2022; pp. 133–156.
4. Shushpanov, I.; Suslov, K.; Ilyushin, P.; Sidorov, D.N. Towards the flexible distribution networks design using the reliability performance metric. *Energies* 2021, 14, 6193. http://doi.org/10.3390/en14196193
5. Metkin, D.M.; Medvedeva, L.V.; Nazarov, V.I. Problems of development of the technical basis of Russian oil and gas geophysics. *Miner. Resour. Russ. Econ. Manag*. 2020, 2, 39–48.
6. Enerdata. Oil Consumption by Region. Oil Consumption Statistics. Available online: https://yearbook.enerdata.ru/oil-products/world-oil-domestic-consumption-statistics.html (accessed on 3 January 2023).
7. Russian Federal Law from 06.12.2021 .390 “Federal Budget in 2022 and Planned Period from 2023 to 2024”. Available online: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_402647/ (accessed on 3 January 2023).
8. Philimonova, I.V.; Nemov, V.Y.; Provornaya, I.V. Export strategy of Russia. Structure and dynamics of oil and petroleum products supply from Russian Federation. *Oil Gas Vert*. 2020, 18, 8.
9. Governmental Analytical Center. Price shock and expectations on energy market. *Energy Bull*. 2021, 101, 16. Available online: https://e-cis.info/upload/iblock/6cb/6cba4ef9ca77529d78e16f80fe4a1574.pdf (accessed on 3 January 2023).
10. Krasnenkov, S.V. Hard-to-Recover Oil Reserves and Problems of Their Production. Available online: https://sst.ru/press/expertarticles/hard-to-recover-oil-reserves-and-problems-of-their-production/ (accessed on 3 January 2023).
11. Kusov, G.V. Analysis of technological decisions for the utilization of associated petroleum gas. *Sci. Tech. Technol*. 2020, 1, 158.
12. Central Dispatching Department of the Fuel and Energy Complex. World Reserves and Resources. Available online: https://www.cdu.ru/tek_russia/issue/2022/3/1002/ (accessed on 3 January 2023).
13. Ministry of Energy of Russian Federation. Import Substitution on the Power Engineering Industry. Available online: https://minenergo.gov.ru/node/5291 (accessed on 3 January 2023).
14. Innoprom. Import Substitution in Thermal Power Industry: Adaptation for New Conditions. Available online: https://expo.innoprom.com/business-program/business-program-2022/1253/ (accessed on 18 December 2022).
15. Rosseti. Import Substitution in Power Grid Complex of Russian Federation. Available online: https://www.rosseti.ru/investment/importozameshchenie/ (accessed on 18 December 2022).
16. Rosneft. Import Substitution and Localization. Available online: https://www.rosneft.ru/Development/sci_and_innov/Innovacionnaja_dejatelnost/Importozameshhenie_i_lokalizacija/? (accessed on 18 December 2022).
17. Krukov, Y.V. Import substitution of technologies and equipment in Russian energy. *All-Russ. Econ. J*. 2015, 3, 30–45. http://doi.org/10.1080/10611991.2017.1319186
18. Rozhkov, A.A.; Karpenko, S.M. Assessment of the level of import dependence of the coal industry in Russia and preparing of engineering personnel for import substitution of mining equipment. *Min. Ind*. 2020, 4, 24–36.
19. Governmental Order of the Russian Federation. Long-Term Program of the Development of LNG Production in Russian Federation. Available online: http://static.government.ru/media/files/l6DePkb3cDKTgzxbb6sdFc2npEPAd7SE.pdf (accessed on 20 December 2022).
20. Zakharov, D.Y.; Remishevskaya, K.V. Possibilities of blockchain technologies in gas industry on the example of material and technical resources management during well workover. *Gas Sci. Bull*. 2021, 2, 221–227.
21. Gayda, I.; Dobroslavskiy, N.; Lyashik, Y.; Daneeva, Y.; Melnikov, Y. *European Frontier Carbon Adjustment Mechanism – Key Issues and Impact on Russia*; Energy Center of the Moscow School of Management SKOLKOVO: Moscow, Russia, 2021.
22. Grushevenko, E.; Kapitonov, S.; Melnikov, Y.; Perdereau, A.; Sheveleva, N.; Siginevich, D. *Decarbonization of Oil and Gas Industry: World Experience and Russian Priorities*; Energy Center of the Moscow School of Management SKOLKOVO: Moscow, Russia, 2021.
23. Ministry of Economic Development of Russian Federation. State Report of Energy Savings and Energy Efficiency in the Russian Federation for 2020. Available online: https://www.economy.gov.ru/material/dokumenty/gosudarstvennyy_doklad_o_sostoyanii_energosberezheniya_i_povyshenii_energeticheskoy_effektivnosti_v_rf_za_2020_god.html (accessed on 20 December 2022).
24. Hannan, M.A.; Al-Shetwi, A.Q.; Begum, R.A.; Ker, P.J.; Rahman, S.A.; Mansor, M.; Mia, M.S.; Muttaqi, K.M.; Dong, Z.Y. Impact assessment of battery energy storage systems towards achieving sustainable development goals. *J. Energy Stor*. 2021, 42, 103040. http://doi.org/10.1016/j.est.2021.103040
25. Averin, D.A.; Semenova, D.V. Russian gas processing industry. *World Sci*. 2020, 12, 15–17.
26. Alifirova, E. General Schemes for the Development of the Oil and Gas Industries until 2035. Available online: https://neftegaz.ru/news/gosreg/680394-pravitelstvo-rf-utverdilo-genskhemy-razvitiya-gazovoy-i-neftyanoy-otrasley-do-2035-g/ (accessed on 13 December 2022).
27. Ministry of Energy of Russian Federation. Indicator of the Technical Condition of Electric Power Facilities (Physical Deterioration). Available online: https://minenergo.gov.ru/node/22444 (accessed on 3 January 2023).
28. Litvinenko, V.S.; Petrov, E.I.; Vasilevskaya, D.V.; Yakovenko, A.V.; Naumov, I.A.; Ratnikov, M.A. Accessing the role of the state in mineral resources management. *J. Min. Inst*. 2022, 259, 1–17.
29. Shklyarskiy, Y.E.; Batueva, D.E. Operation mode selection algorithm development of a wind-diesel power plant supply complex. *J. Min. Inst*. 2022, 253, 115–126. http://doi.org/10.31897/PMI.2022.7
30. Buslaev, G.; Tsvetkov, P.; Lavrik, A.; Kunshin, A.; Loseva, E.; Sidorov, D. Ensuring the sustainability of Arctic industrial facilities under conditions of global climate change. *Resources* 2021, 10, 128. http://doi.org/10.3390/resources10120128
31. Turysheva, A.; Voytyuk, I.; Guerra, D. Estimation of electricity generation by an electro-technical complex with photoelectric panels using statistical methods. *Symmetry* 2021, 13, 1278. http://doi.org/10.3390/sym13071278

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

32. Ustinov, D.A.; Shafhatov, E.R. Assessment of reliability indicators of combined systems of offshore wind turbines and wave energy converters. *Energies* 2022, 15, 9630. http://doi.org/10.3390/en15249630

33. Šarac, M.; Pavlovi´c, N.; Bacanin, N.; Al-Turjman, F.; Adamovi´c, S. Increasing privacy and security by integrating a blockchain secure interface into an IoT device security gateway architecture. *Energy Rep*. 2021, 7, 8075–8082. http://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.07.078

34. Barykin, S.E.; Smirnova, E.A.; Chzhao, D.; Kapustina, I.V.; Sergeev, S.M.; Mikhalchevsky, Y.Y.; Gubenko, A.V.; Kostin, G.A.; De La Poza Plaza, E.; Saychenko, L.; et al. Digital echelons and interfaces within value chains: End-to-end marketing and logistics integration. *Sustainability* 2021, 13, 13929. http://doi.org/10.3390/su132413929

35. Shklyarskiy, Y.; Dobush, I.; Jiménez Carrizosa, M.; Dobush, V.; Skamyin, A. Method for evaluation of the utility's and consumers' contribution to the current and voltage distortions at the PCC. *Energies* 2021, 14, 8416. http://doi.org/10.3390/en14248416

36. Filatova, I.; Nikolaichuk, L.; Zakaev, D.; Ilin, I. Public-private partnership as a tool of sustainable development in the oil-refining sector: Russian case. *Sustainability* 2021, 13, 5153. http://doi.org/10.3390/su13095153

37. Cherepovitsyn, A.E.; Tsvetkov, P.S.; Evseeva, O.O. Critical analysis of methodological approaches to assessing sustainability of arctic oil and gas projects. *J. Min. Inst*. 2021, 249, 463–478. http://doi.org/10.31897/PMI.2021.3.15

38. Chernova, A.D.; Alekseeva, T.V.; Aleksyutina, M.V.; Antonova, I.Y.; Voronina, A.I.; Jansugurova, J.S.; Dorohova, K.V.; Zentik, E.A.; Zinovyeva, Y.K.; Iytina, M.M.; et al. The State and Use of Mineral Resources of the Russian Federation in 2019: State report. Available online: https://www.mnr.gov.ru/docs/o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/gosudarstvennyy_doklad_o_sostyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/ (accessed on 15 December 2022).

39. Skorobogatov, V.A.; Sivkov, S.N.; Danilevskiy, S.A. Problems of resource support for natural gas production in Russia until 2050. *Gas Sci. Bull*. 2013, 5, 4–14.

40. Korolev, N.; Kozyaruk, A.; Morenov, V. Efficiency increase of energy systems in oil and gas industry by evaluation of electric drive lifecycle. *Energies* 2021, 14, 6074. http://doi.org/10.3390/en14196074

41. Litvinenko, V.S. Digital economy as a factor in the technological development of the mineral sector. *Nat. Resour. Res*. 2020, 29, 1521–1541. http://doi.org/10.1007/s11053-019-09568-4

42. Koteleva, N.; Valnev, V.; Frenkel, I. Investigation of the effectiveness of an augmented reality and a dynamic simulation system collaboration in oil pump maintenance. *Appl. Sci*. 2022, 12, 350. http://doi.org/10.3390/app12010350

43. Vasilyeva, N.V.; Boikov, A.V.; Erokhina, O.O.; Trifonov, A.Y. Automated digitalization of radial charts. *J. Min. Inst*. 2021, 247, 82–87. http://doi.org/10.31897/PMI.2021.1.9

44. Koteleva, N.; Khokhlov, S.; Frenkel, I. Digitalization in open-pit mining: A new approach in monitoring and control of rock fragmentation. *Appl. Sci*. 2021, 11, 10848. http://doi.org/10.3390/app112210848

45. Adu-Kankam, K.O.; Camarinha-Matos, L.M. Modelling "Delegated autonomy" in cognitive household digital twins. In Proceedings of the 2022 11th International Conference on Renewable Energy Research and Application (ICRERA), Istanbul, Turkey, 18–21 September 2022; pp. 192–199.

46. IEA. Energy Technology Perspectives. Available online: https://iea.blob.core.windows.net/assets/7f8aed40-89af-4348-be19-c8a67df0b9ea/Energy_Technology_Perspectives_2020_PDF.pdf (accessed on 5 January 2023).

47. McKinsey Digital. The Top Trends in Tech. Available online: https://www.mckinsey.com/business-functions/mckinsey-digital/our-insights/the-top-trends-in-tech (accessed on 5 January 2023).

48. U.S. Energy Information Administration. Independent Statistics and Analysis. Russia's Energy Overview 2021. Available online: https://www.eia.gov/international/analysis/country/RUS (accessed on 10 March 2023).

49. Federal Agency for Subsoil Use. Coal deposits in Russia in 2021. Available online: https://www.rosnedra.gov.ru/article/13233.html (accessed on 10 March 2023).

50. Ministry of Energy of Russian Federation. Coal Export. Available online: https://minenergo.gov.ru/node/437 (accessed on 21 March 2023).

51. Rosatom. Nuclear Power Industry in Russia in 2021. Available online: https://rosatom.ru/about-nuclear-industry/atomnayaotrasl-rossii/ (accessed on 21 March 2023).

52. FGC UES of Russia. Annual Report. 2020, Volume 473. Available online: https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/2021_07_02%20FSK_2020_RU.pdf (accessed on 21 March 2023).

53. Terenteva, A.S. Analysis of the main problems of district heating in Russia at the present stage. *Sci. Work Inst. Econ. Forecast. RAS* 2020, 18, 253–273.

54. Ministry of Energy of Russian Federation. Order from 26 February 2021 .88. Available online: https://minenergo.gov.ru/viewpdf/20706/156298 (accessed on 5 January 2023).

55. Niu, Y.; Lin, X.; Luo, H.; Zhang, J.; Lian, Y. Effects of Digitalization on Energy Efficiency: Evidence from Zhejiang Province in China. *Front. Energy Res*. 2022, 10, 707. http://doi.org/10.3389/fenrg.2022.847339

56. Ilyushin, P.V.; Shepovalova, O.V.; Filippov, S.P.; Nekrasov, A.A. The effect of complex load on the reliable operation of solar photovoltaic and wind power stations integrated into energy systems and into off-grid energy areas. *Energy Rep*. 2022, 8, 1515–1529. http://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.08.218

57. Walser, T.; Sauer, A. Typical load profile-supported convolutional neural network for short-term load forecasting in the industrial sector. *Energy* AI 2021, 5, 100104. http://doi.org/10.1016/j.egyai.2021.100104

58. Meshkov, A.A.; Kazanin, O.I.; Sidorenko, A.A. Improving the efficiency of the technology and organization of the longwall face move during the intensive flat-lying coal seams mining at the Kuzbass mines. *J. Min. Inst*. 2021, 249, 342–350. http://doi.org/10.31897/PMI.2021.3.3

59. Kazanin, O.I.; Meshkov, A.A.; Sidorenko, A.A. Promising directions of the development of the technological structure of coal mines. *Min. Inf. Analyt. Bull*. 2022, 6-1, 35–53. http://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_61_0_35

60. Sultanbekov, R.; Beloglazov, I.; Islamov, S.; Ong, M.C. Exploring of the incompatibility of marine residual fuel: A case study using machine learning methods. *Energies* 2021, 14, 8422. http://doi.org/10.3390/en14248422

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

61. Erashov, A.A.; Kamynin, K.V.E.; Krestovnikov, K.D.; Saveliev, A.I. Method for estimating the time of wireless transfer of energy resources between two robots. *Inform. Autom*. 2021, 20, 1279–1306. http://doi.org/10.15622/ia.20.6.4

62. Sychev, Y.A.; Zimin, R.Y. Improving the quality of electricity in the power supply systems of the mineral resource complex with hybrid filter-compensating devices. *J. Min. Inst*. 2021, 247, 132–140. http://doi.org/10.31897/PMI.2021.1.14

63. Demina, O.V. Thermal energy markets: Trends in spatial organization. *Spat. Econ*. 2016, 4–5, 33–60. http://doi.org/10.14530/se.2016.4.033-060

64. Gulidov, R.V. Experience in scenario modeling of the long-term development of the regional fuel and energy complex (on the example of the Far East). *Spat. Econ*. 2007, 3, 62–76. http://doi.org/10.14530/se.2007.3.062-076

65. Zhukovskiy, Y.; Tsvetkov, P.; Buldysko, A.; Malkova, Y.; Stoianova, A.; Koshenkova, A. Scenario modeling of sustainable development of energy supply in the Arctic. *Resources* 2021, 10, 124. http://doi.org/10.3390/resources10120124

66. Nikolaev, A.V.; Voth, S.; Kychkin, A.V. Application of the cybernetic approach to price-dependent demand response for underground mining enterprise electricity consumption. *J. Min. Inst*. 2022, 254, 1–10. http://doi.org/10.31897/PMI.2022.33

67. Morgoeva, A.D.; Morgoev, I.D.; Klyev, R.V.; Gavrina, O.A. Forecasting the consumption of electrical energy by an industrial enterprise using machine learning methods. *Bull. Tomsk. Polytech. Univ. Engi. Georesour*. 2022, 333, 115–125.

68. Senchilo, N.D.; Ustinov, D.A. Method for determining the optimal capacity of energy storage systems with a long-term forecast of power consumption. *Energies* 2021, 14, 7098. http://doi.org/10.3390/en14217098

69. Babanova, I.S.; Tokarev, I.S.; Abramovich, B.N.; Babyr, K.V. Electric consumption modes forecasting and management for gas industry enterprises based on Artificial Intelligence methods. In Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), Moscow, Russia, 26–29 January 2021; pp. 1382–1385.

70. Artyukhova, N.; Tiutiunyk, I.; Bogacki, S.; Wołowiec, T.; Dluhopolskyi, O.; Kovalenko, Y. Scenario modeling of energy policies for sustainable development. *Energies* 2022, 15, 7711. http://doi.org/10.3390/en15207711

71. Novikova, O.; Vladimirov, I.; Bugaeva, T. Expansion of the fuel and energy balance structure in Russia through the development of a closed-loop recycling. *Sustainability* 2021, 13, 4965. http://doi.org/10.3390/su13094965

72. Chen, K.; Ren, Z.; Mu, S.; Sun, T.Q.; Mu, R. Integrating the Delphi survey into scenario planning for China's renewable energy development strategy towards 2030. *Tech. Forecast. Soc. Chang*. 2020, 158, 120157. http://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120157

73. Wang, H.; Wang, M. Effects of technological innovation on energy efficiency in China: Evidence from dynamic panel of 284 cities. *Sci. Total Environ*. 2020, 709, 136172. http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136172

74. Appiah, M.K.; Anderson Akolaa, R.; Ayisi-Addo, A.K. Modeling the impact of macroenvironmental forces on investment in Renewable Energy Technologies in Ghana: The moderating role of Entrepreneurship orientation dimensions. *Cogent Econ. Financ*. 2022, 10, 2071387. http://doi.org/10.1080/23322039.2022.2071387

75. Shove, E. Time to rethink energy research. *Nat. Energy* 2021, 6, 118–120. http://doi.org/10.1038/s41560-020-00739-9

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0