

Сценарное моделирование устойчивого развития энергоснабжения в Арктике

Ю.Л. ЖУКОВСКИЙ, П.С. ЦВЕТКОВ ✉, А.Д. БУЛДЫСКО, Я.М. МАЛЬКОВА, А.Д. СТОЯНОВА, А.А. КОШЕНКОВА

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

✉ pscvetkov@yandex.ru

Ссылка для цитирования оригинальной статьи: 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. <https://doi.org/10.3390/resources10120124>

Аннотация: XXI век характеризуется не только масштабными преобразованиями, но и скоростью, с которой они происходят. Трансформации – политические, экономические, социальные, технологические, экологические, правовые – во взаимодействии друг с другом всегда являлись катализатором реакций в обществе. Сфера энергоснабжения, как и многие другие, чрезвычайно подвержена внешнему воздействию таких факторов. В значительной степени это относится и к удаленным (особенно с позиции энергоснабжения) регионам. Авторы излагают подход к обоснованию развития энергетической инфраструктуры Арктики на основе анализа спроса на количество потребляемой энергии и источников энергии с учетом мировых тенденций. Методология основана на сценарном моделировании технологического спроса. Она базируется на изучении специфических потребностей потребителей, имеющихся технологий и выявленных рисков. В работе предложены сценарии развития и представлена модель, учитывающая их. Результаты моделирования показывают, что во всех сценариях до 50 % энергобаланса в 2035 году будет занимать газ, но при этом возрастет роль безуглеродных источников энергии. Математическая модель позволила спрогнозировать спрос на виды энергии со стороны отдельных типов потребителей, что дает возможность определить вектор развития и стимулирования отдельных видов ресурсов для производства энергии в Арктике. Модель позволяет учитывать не только рост, но и снижение спроса для отдельных видов потребителей при различных сценариях. Кроме того, авторы прогнозы, благодаря дальнейшей модернизации энергетического сектора в Арктическом регионе, могут способствовать созданию предпосылок, стимулирующих и выгодных для роста инвестиций в устойчивые источники энергии для обеспечения потребителей. Научная значимость работы заключается в применении последовательного гибридного модельного подхода к прогнозированию спроса на энергоресурсы в Арктическом регионе. Результаты исследования полезны при разработке сценария развития региона с учетом Целей устойчивого развития, а также при определении направлений стимулирования развития технологий и энергетической инфраструктуры.

Ключевые слова: ЦУР; Арктика; энергоснабжение; сценарное моделирование; технологический спрос; энергетические сценарии; устойчивая энергетика; водород; возобновляемые источники энергии; устойчивость.

Scenario Modeling of Sustainable Development of Energy Supply in the Arctic

Yuriy L. ZHUKOVSKIY, Pavel S. TSVETKOV ✉, Aleksandra D. BULDYSKO, Yana M. MALKOVA, Antonina D. STOIANOVA and Anastasia A KOSHENKOVA

Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

✉ pscvetkov@yandex.ru

Abstract: The 21st century is characterized not only by large-scale transformations but also by the speed with which they occur. Transformations – political, economic, social, technological, environmental, and legal-in synergy have always been a catalyst for reactions in society. The field of energy supply, like many others, is extremely susceptible to the external influence of such factors. To a large extent, this applies to remote (especially from the position of energy supply) regions. The authors outline an approach to justifying the development of the Arctic energy infrastructure through an analysis of the demand for the amount of energy consumed and energy sources, taking into account global trends. The methodology is based on scenario modeling of technological demand. It is based on a study of the specific needs of consumers, available technologies, and identified risks. The paper proposes development scenarios and presents a model that takes them into account. Modeling results show that in all scenarios, up to 50% of the energy balance in 2035 will take gas, but the role of carbon-free energy sources will increase. The mathematical model allowed forecasting the demand for energy types by certain types of consumers, which makes it possible to determine the vector of development and stimulation of certain types of resources for energy production in the Arctic. The model enables considering not only the growth but also the decline in demand for certain types of consumers under different scenarios. In addition, authors' forecasts, through further modernization of the energy sector in the Arctic region, can contribute to the creation of prerequisites that will be stimulating and profitable for the growth of investment in sustainable energy sources to supply consumers. The scientific significance of the work lies in the application of a consistent hybrid modeling approach to forecasting demand for energy resources in the Arctic region. The results of the study are useful in drafting a scenario of regional development, taking into account the Sustainable Development Goals, as well as identifying areas of technology and energy infrastructure stimulation.

Keywords: SDG-goals; Arctic; energy supply; scenario modeling; technological demand; energy scenarios; sustainable energy; hydrogen; renewable energy sources; sustainability.

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

© 2021 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

Совокупность внешних факторов (политических, экономических, социальных, технологических, экологических и правовых) привела к возникновению и, как следствие, обострению глобальных проблем [1-4]. Среди них – перенаселение и урбанизация, децентрализация мира, экологические и климатические изменения, рост потребления энергии и ресурсов. Промедление в решении этих глобальных проблем подрывает устойчивость и безопасность развития всего человечества. Ответом на эти вызовы как для России, так и для всего мира может стать Арктика [5, 6].

Арктике посвящено достаточно много исследований, этот регион и его особенности всегда привлекали научное сообщество, большое внимание уделяется социальной составляющей. В последнее время этот регион привлекает еще большее внимание в связи с изменением климата и появлением новых возможностей, как предсказуемых, так и непредсказуемых [7].

Арктическая зона обладает потенциалом ресурсной базы углеводородов, который составляет около 13 млрд. т нефти и 86 трлн. м³ газа. Их освоение является как драйвером прогресса экономического сектора, так и спасательным кругом для осуществления энергетического перехода [7]. Ценность региона подкрепляется статусом гаранта национальной безопасности страны и культурной значимостью коренных народов Севера [6]. Ошибки, допущенные при освоении потенциала Арктики, могут обернуться как экологической катастрофой, так и экономическим крахом – цена неверных решений в несколько раз выше [8,9]. Поэтому наше исследование развивает и дополняет сделанное ранее прогнозирование с целью снижения рисков принятия решений по освоению и концентрации внимания на ресурсах, рычагах и стимулах для необходимого развития. По результатам анализа научных работ в области прогнозирования спроса на качество в связи с ростом конкретных потребителей было выявлено, что исследования направлены на получение энергии в определенных условиях и в краткосрочной перспективе. Многие исследователи прибегают к статистическим методам и методам машинного обучения. В [10] используется метод смешанного целочисленного программирования, который позволяет определить состояние и уровень мощности всех генераторов для максимизации прибыли газовой компании. В работе [11] для прогнозирования ресурсов солнечной и ветровой энергии применяется машинное моделирование на основе опорных векторов. В работе [12] предложена поддерживаемая профилем типовой нагрузки конволюционная нейронная сеть для прогнозирования электрической нагрузки на уровне завода. В работе [13] прогноз потребления природного газа основан на методе декомпозиции путем объединения трех различных компонентов: временного ряда, основанного на тренде, сезонного компонента, основанного на модели линейного контура, и транзитивного компонента для оценки суточных колебаний с использованием объясняющих переменных.

В области исследований, посвященных непосредственно прогнозированию роста арктического региона и спроса в Арктике, выявлено небольшое количество работ. Так, в работе [14] исследовалось применение статистических моделей и нейронных сетей для прогнозирования спроса на энергию для двух населенных пунктов. Конечно, в связи с экологической повесткой дня внимание уделяется возобновляемым источникам энергии. В работе [15] с помощью эконометрического моделирования оценивается потенциальное влияние возобновляемых источников в Арктике на устойчивость региона.

Таким образом, не выявлено потенциальных моделей, которые могли бы осуществлять стратегическое прогнозирование по рискам и позволяли бы выделять соответствующий набор ресурсов в соответствии с потребителями. В связи с целями достижения углеродной нейтральности спрос на углеводороды как источник электроэнергии не прогнозируется. Мероприятия по реагированию на спрос направлены на оптимизацию графика нагрузки и снижение затрат, но не учитывают особенности потребителей и не ориентированы на долгосрочную перспективу. В работах, посвященных прогнозированию роста спроса на электроэнергию, не рассматривается региональный потенциал с точки зрения развития туризма, науки, оказания медицинских услуг и др.

Предлагаемое нами исследование основано на росте потребителей с учетом их качественных характеристик, с учетом мнений экспертов, с учетом анализа взаимосвязей и построения роста спроса на электроэнергию, энергию и виды энергии как единой структуры. Это позволит заблаговременно подготовить энергетическую инфраструктуру и провести долгосрочную оценку динамики углеродного следа и изменения климата при сохранении экологической устойчивости региона и его энергообеспечения.

В исследовании не только предложен прогноз спроса на энергию в различных сценарных условиях, но и выявлена структура этого спроса со стороны потребителя и виды энергии, которые обеспечат устойчивое энергоснабжение в Арктике.

Комплексный подход в оценке потребностей потребителей энергии позволит постепенно нивелировать закономерно возникающие риски. Необходимо создать прочный фундамент для обеспечения освоения ресурсов, несмотря на особую специфику региона. Основой для этого должна стать инфраструктура с новой логикой функционирования, взаимодействия и устойчивого развития в рамках нарастающей цифровизации и перехода к Индустрии 4.0.

В условиях истощения континентальной ресурсной базы и с учетом потенциала Арктической зоны по запасам, усиленного созданием транспортно-логистических узлов и военно-политическим аспектом, разведка и освоение Арктической зоны становятся стратегически важным и экономически выгодным шагом [16, 17]. Следовательно, необходимо обеспечить развитие перспективных территорий, поддержание и модернизацию существующей, зачастую устаревшей инфраструктуры, создание комфортных условий для проживания людей.

Непременным условием развития региона является надежное бесперебойное энергоснабжение территорий, соответствующее мировым тенденциям и требованиям устойчивости [18]. Прогресс в области энергоснабжения в АЗРФ определяется мировым уровнем развития энергетики, где существенное влияние оказывает происходящий энергетический переход и цифровая трансформация энергетики. Это отражено в концепции 5D, которая раскрывает направление современных тенденций и трендов и на основе которой проводится анализ текущих путей возможного развития, представленный на рис. 1.

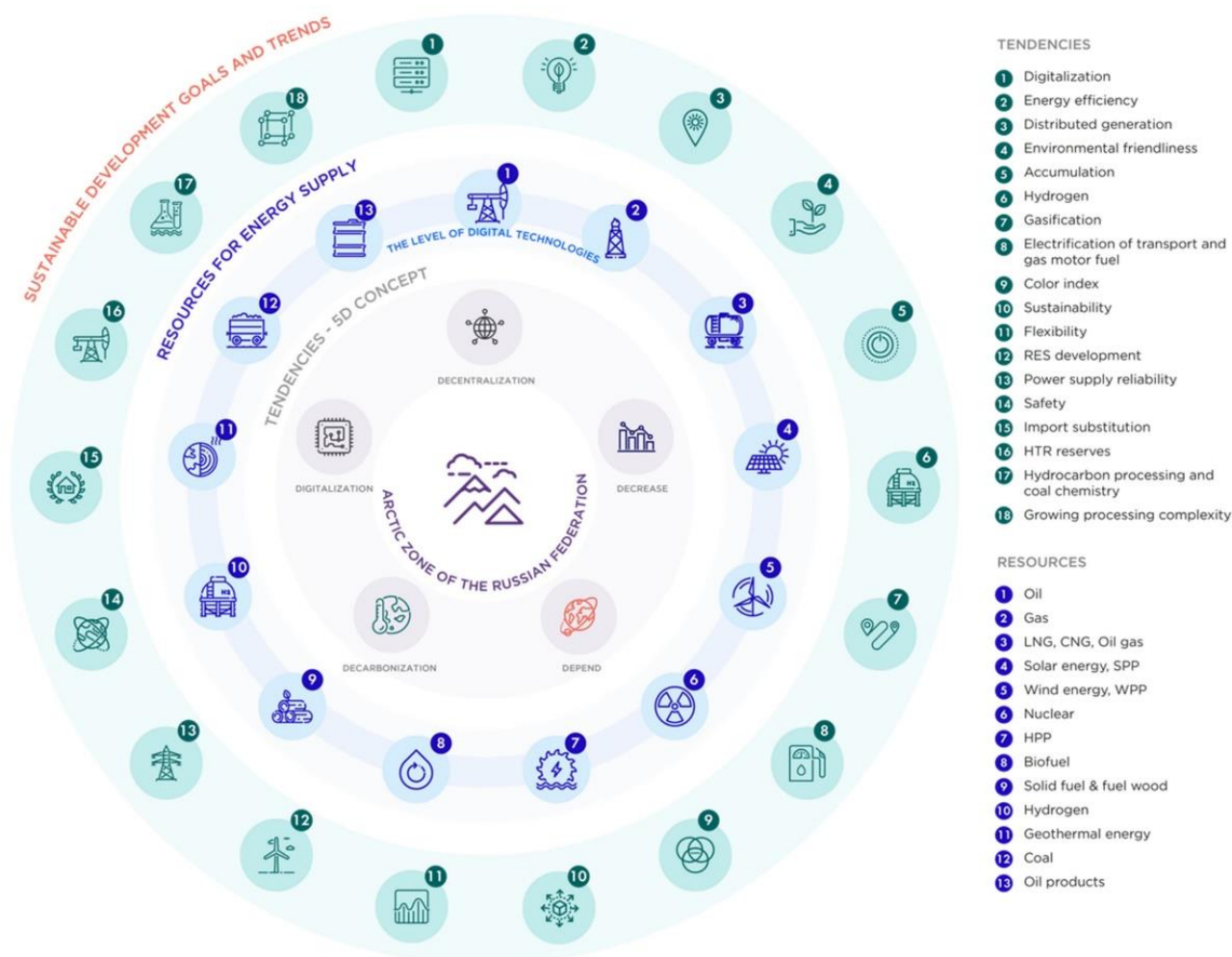


Рис. 1. Взаимосвязь целей устойчивого развития, технологических тенденций и трендов, а также рассматриваемых ресурсов для энергообеспечения российской Арктики

Дигитализация – цифровизация – меняет работу энергосистемы, появляется новое понимание использования электроэнергии, производства и поставок электроэнергии, функционирования потребителей и систем производства, транспортировки, распределения и хранения энергии.

Декарбонизация связана с изменением климата и обеспечением первичным топливом, электрификацией и энергосбережением и приносит экономические, экологические и социальные выгоды.

Децентрализация связана с изменением логики роста энергетических систем и тенденций распределения энергопотребления в сторону увеличения числа небольших энергетических и экономических узлов, что стимулирует инновации от хранения энергии до интеллектуальных систем управления на основе баз данных.

Доверительность – зависимость – это растущая информационная и технологическая зависимость производства, транспортировки и использования различных видов энергии друг от друга [19]. Интеграция электричества, газа, воды, тепла, холода и взаимодействие со всеми участниками топливно-энергетического комплекса [20].

Декремент – снижение – обозначило тенденцию к сокращению потребления не только энергии, но и всех видов ресурсов и материалов, уменьшению количества отходов, все большему вовлечению их в переработку [21]. Этой тенденции способствуют качественное изменение поведения потребителей и новые технологии производства, позволяющие индивидуализировать продукцию [22].

В свою очередь, каждому тренду соответствует определенный набор технологических тенденций в энергообеспечении. С учетом сложившихся тенденций в энергообеспечении формируется определенный набор необходимых энергоресурсов для развития региона [23, 24]. Таким образом, можно оценить потребность в энергоресурсах для того или иного инвестиционного проекта. Учитывая необходимость устойчивого развития Арктического региона [25], развитие технологий в области возобновляемой энергетики и достижение углеродной нейтральности является приоритетным направлением. Однако для снижения доли традиционного углеводородного сырья необходимо правильно спланировать развитие спроса на энергию и бережное отношение к окружающей среде в краткосрочной перспективе до 2035 года [26].

2. Материалы и методы

Предлагаемая в статье модель основана на методе Дельфи. Метод Дельфи предназначен для оценки совокупного мнения экспертов по сложным проблемам, возможным последствиям и эффективности использования затратных мероприятий. Структурированное мнение группы экспертов в сравнении с мнением одного специалиста является инструментом для дальнейшего и более точного прогнозирования [18, 19, 27–29].

Следуя базовой структуре Дельфи, авторы разработали анкету, на прохождение которой было отведено 1,5 недели для 60 экспертов: сотрудников компаний и вузов минерально-сырьевого и топливно-энергетического комплексов. Целью опроса было определение приоритетного набора топливных ресурсов для отдельных потребителей с учетом политических, экономических, социальных, технологических, экологических и правовых рисков использования каждого ресурса. Риски оценивались по девятибалльной шкале, где 1 – минимальное влияние риска; 9 – максимальное влияние риска. Также при моделировании учитывалось влияние внешних факторов на основе сценарного прогнозирования [18, 30, 31]. Принимая во внимание, что во многих работах отмечается важность оценки рисков при сценарном прогнозировании на основе экспертных оценок, в наших сценариях мы обязательно учитывали:

- технологии и направления их развития, представляющие первостепенный интерес;
- анализ текущего состояния и перспектив развития энергетического сектора в Арктике;
- комплексный анализ глобальных факторов, влияющих на развитие потребителей [32, 33];
- учет при моделировании экспертных оценок, основанных на результатах опроса профильных экспертов.

Исследование было разделено на три этапа, которые представлены на рис. 2. Методология исследования включает следующие этапы: сначала проводится обзор региона – современного состояния энергосистемы и энергетической инфраструктуры, изучение ресурсной базы, топливно-энергетического баланса, сопутствующих проблем, в том числе климатических. Затем исследование делится на

технологическое моделирование спроса и сценарное моделирование. В технологическом разделе определяется перечень основных потребителей, выделяются существующие и перспективные центры энергетических нагрузок. На основе анализа тенденций и трендов определяются требования к каждому типу потребителей с точки зрения категории надежности, требуемой установленной мощности, мобильности, сезонности и «углеродного следа». Аналогично проводится оценка возможных ресурсов по технико-экономическим критериям и выбросам CO₂. При сценарном моделировании генерируются сценарии, в соответствии с условиями которых и по результатам опроса экспертов будет изменяться спрос на энергопотребление, а также вероятность удовлетворения спроса на различные виды ресурсов.

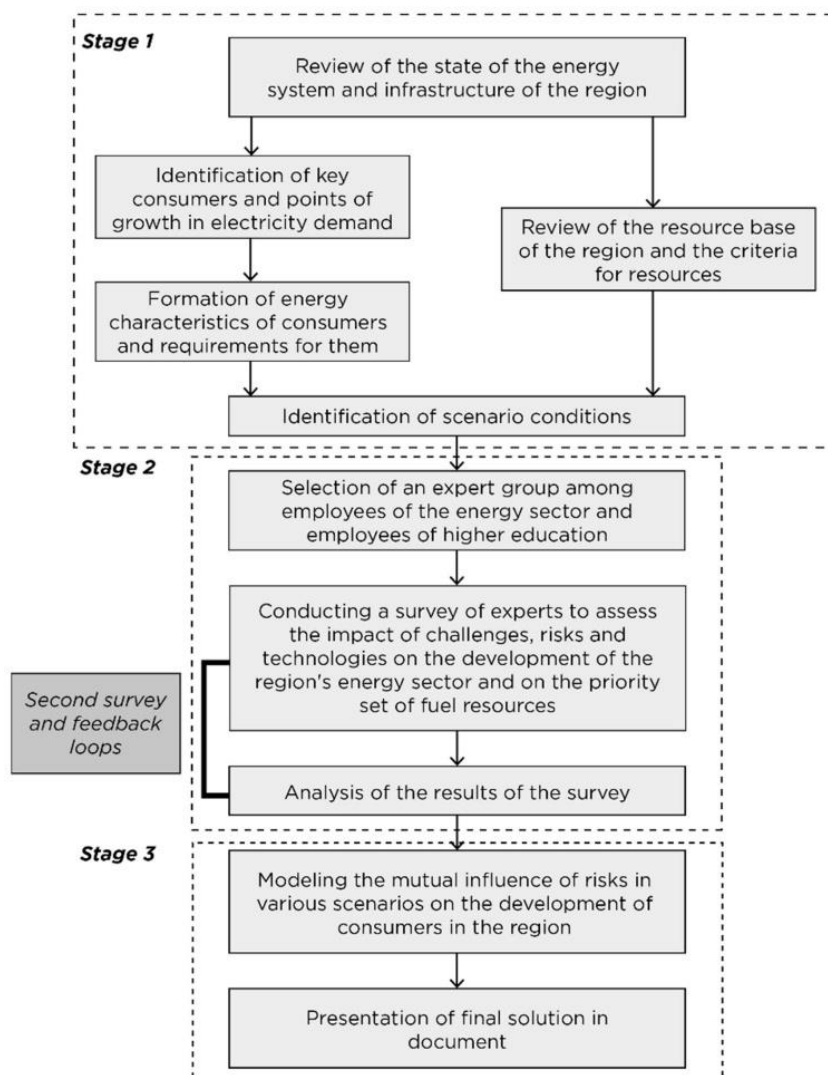


Рис. 2. Методология исследования

2.1. Анализ потенциала развития Арктики

Российская Арктика (АЗРФ) – географическая территория в составе Российской Федерации, расположенная за Полярным кругом. В ее состав входят Мурманская и Архангельская области, Республика Коми и Якутия, Красноярский край, Ненецкий, Чукотский, Ямало-Ненецкий автономные округа, Беломорский, Кемский и Лоухский районы Карелии, а также земли и острова, расположенные в Северном Ледовитом океане, и некоторые улусы Якутии [34].

В ходе исследования были выделены следующие типы перспективных потребителей для территории Арктики – они же являются опорными точками и точками роста (потребительскими агломерациями), на которых будет строиться дальнейшее развитие территории:

- 1) военные базы;
- 2) месторождения углеводородов и редкоземельных металлов;

- 3) населенные пункты (моногорода);
- 4) научно-исследовательские базы;
- 5) логистические кластеры, хабы;
- 6) медицинские базы;
- 7) сельскохозяйственные комплексы;
- 8) туристические базы;
- 9) центры обработки данных (ЦОД).

В исследовании проанализирован потенциал развития всех этих типов потребителей, но в окончательном варианте работы авторы формулируют выводы только по некоторым из них.

Месторождения углеводородов и редкоземельных металлов. Масштабы ресурсного потенциала Арктики оцениваются следующим образом: около 70 % всех неразведанных запасов газа в Арктике находится в ведении Российской Федерации [35]; в арктических районах страны расположены месторождения стратегических и редкоземельных металлов – около 10 % мировых запасов никеля, 19 % металлов платиновой группы (МПП), 10 % титана, более 3 % цинка, кобальта, золота и серебра; крупнейшие месторождения угля и алмазов [36]. Следует отметить, что 70 % нефтяных ресурсов Арктики сосредоточено в шельфовых зонах, а большинство разведанных месторождений трудноизвлекаемы. Кроме того, по оценкам, до 25 % запасов углеводородов залегает под океаническими толщами на хребте Ломоносова [37].

В настоящее время в энергетическом балансе материковой части Арктики значительное преимущество имеют уголь и нефтепродукты, что негативно сказывается на хрупкой экосистеме региона [38]. Существенную роль в снижении негативного воздействия и повышении добавленной стоимости продукции будут играть такие технологии, как «чистый уголь» и внедрение цифровых инструментов во всей цепочке поставок. Газовый и газоконденсатный потенциал может занять нишу газохимического производства и обеспечить выпуск и экспорт сжиженного природного газа (СПГ) и водорода, что позволит не только восполнить потери экспорта в связи с ускоряющимся падением спроса на нефть, но и обеспечить новые инвестиционные и возвратные потоки [39].

Моноотраслевые города. Освоение природного потенциала Арктики требует, прежде всего, огромного количества квалифицированных специалистов, однако реальные условия жизни [40] приводят к миграционному оттоку населения. Разница в социально-экономической ситуации обусловлена высокой диверсификацией экономики моногородов и зависимостью от предприятий и подчеркивается разделением городов Арктической зоны на категории [16, 41-43].

Логистические кластеры. Одним из важнейших векторов развития транспортной отрасли Российской Федерации в Арктическом регионе является установление постоянного сообщения по Северному морскому пути (СМП) [44], что требует развития материковой инфраструктуры [45]. Арктическая зона также характеризуется развитой железнодорожной сетью; в настоящее время осуществляется финансирование проектов Северного широтного хода (СШХ), Северного широтного хода-2 и «Белкомур». Расчетный объем перевозок по Северному ходу составляет 23,9 млн. т различных грузов в год [46]. Авиационная инфраструктура Арктической зоны в настоящее время представлена более чем 160 аэропортами и аэродромами.

Места пересечения воздушных, железнодорожных и водных узлов являются так называемыми транспортными узлами. В комплексном освоении и развитии Арктической зоны они приобретают огромное значение в связи с тенденцией формирования агломераций вблизи таких кластеров, транспортной доступностью и имеющейся инфраструктурой. В работе были выделены следующие узлы: пять уже существующих в настоящее время в Мурманске, Архангельске, Сабетте, Владивостоке, Дудинке и три планируемых к строительству в Усть-Луге, Тикси, Корсакове.

2.2. Энергетические характеристики потребителей энергии в Арктике

Учитывая ресурсный потенциал Арктики в условиях постепенного истощения континентальной базы, создание транспортно-логистических узлов, способных придать новый импульс развитию мировой торговли, а также военно-политический аспект, развитие и освоение Арктической зоны приобретают новый стратегический и экономический импульс [47].

Освоение Арктики – последовательный и многоступенчатый процесс. Необходимо обеспечить развитие перспективных районов, поддержание и модернизацию существующей инфраструктуры, создание комфортных условий для жизни населения [48]. Удаленность от основных промышленных центров страны создает необходимость строительства большой сети железных и автомобильных дорог: во-первых, для поддержания высокого уровня добычи полезных ископаемых, во-вторых, для снабжения арктических районов [49, 50].

Непременным условием развития региона является надежное бесперебойное энергоснабжение существующих и перспективных потребителей в соответствии с мировыми тенденциями и требованиями. Арктические государства сталкиваются с рядом общих проблем в этой области, среди которых удаленность от центральных энергетических сетей, использование дорогостоящего дизельного топлива для выработки энергии, высокий уровень тарифов на энергоуслуги, а также специфика жизни малочисленных коренных народов.

Условия Арктики требуют разработки доступных, надежных и простых в эксплуатации технологий, способных обеспечить энергией удаленные районы в условиях обледенения, повышенной влажности и критически низких температур с использованием экологически чистых энергоносителей.

В результате исследований были выявлены следующие особенности потребителей: особенность электроснабжения военных баз – необходимость независимости друг от друга, источники энергии, работающие автономно по специальной группе первой категории надежности и бесперебойности электроприемников. При электроснабжении военных баз не обязательно учитывать его экологическую и экономическую эффективность. В структуре генерирующих мощностей моногородов имеется большое количество котельных и дизель-генераторных источников. Наблюдается низкая эффективность теплоэнергетических сетей и их значительный износ. Арктический регион обладает большим потенциалом в использовании нетрадиционных возобновляемых источников энергии [51]. Наибольшим потенциалом в Мурманской области обладает ветровая энергия, которая может быть использована для создания систем хранения энергии (Power-to-X) [52]. Технология хранения энергии является решением проблемы взаимосвязи энергетических секторов [53]. Парогазовые турбинные установки (ПГУ) благодаря своему высокому КПД часто используются в распределенной генерации для получения электрической и тепловой энергии. Технология преобразования электроэнергии в тепло (в данном случае Power-to-Heat) с помощью тепловых насосов или тепловых стержней является инновационным экологически чистым способом отопления зданий и даже обеспечения промышленных предприятий технологическим теплом. В Архангельской области активно развивается индустрия экологически приоритетного топлива – сжиженного природного газа. Создание эффективной системы поддержки развития малой энергетики, раскрытие плавающих атомных электростанций, повышение эффективности использования местных ресурсов станет отправной точкой социально-экономического развития Северо-Запада России. В настоящее время научные станции оснащены в основном дизельными электростанциями. Для наземных научных станций энергетические характеристики варьируются в зависимости от вида деятельности и направленности исследований. Перспективным является использование биотоплива в качестве ресурса для энергообеспечения сельскохозяйственных комплексов, получаемого в результате выращивания определенных культур или жизнедеятельности животных. В свою очередь, переход на использование биотоплива займет длительное время, поэтому на первых этапах целесообразно использовать ветродизельные установки, которые уже эксплуатируются в Мурманской области [54]. Энергоснабжение центров обработки данных характеризуется надежностью и бесперебойностью работы. Большая часть энергии расходуется на охлаждение и работу оборудования, расположенного в ЦОДах. В настоящее время большинство ЦОДов питаются от дизель-генераторов, в то время как крупные ИТ-компании следуют тенденциям и используют возобновляемые источники энергии [55].

2.3. Требования к потребителям энергии

Для каждого из выделенных типов потребителей были сформированы требования к энергоснабжению. Для удобства восприятия, анализа и применения в математической модели выбранные требования сведены в табл. 1.

Требования к потребителям

Тип потребителя	Категория надежности	Требуемая $P_{уст}$	Углеродный след	Мобильность	Сезонность, месяц
Логистический хаб	Первая	Большая	Регламент по снижению (международный рынок)	Стационарная	0-12
Санчасть Больница	Вторая Первая особая	Малая Малая	Добровольные соглашения	Мобильная Стационарная	0-12 12
Научные базы	Вторая	Малая	Регламент по снижению	Переменная мобильность	0-12
Агрокомплексы	Первая (вторая)	Средняя	Добровольные соглашения	Стационарная	0-12
Военные базы	Первая особая	Большая / средняя	Нет требований по уменьшению	Стационарная / мобильная	12
ЦОДы	Первая особая	Большая	Добровольные соглашения	Стационарная / мобильная	12
Моногорода	Третья	Средняя	Регламент по снижению	Стационарная	12
Горнонефтегазо-промышленное предприятие	Зависит от сырья. Первая, первая особая, вторая [44, 45]	Большая	Регламент по снижению	Стационарная / мобильная	12
Туристические базы	Третья	Малая	Регламент по снижению	Переменная мобильность	0-4

Переход к качественным характеристикам обусловлен задачей неявного сопоставления требований потребителей и критериев к источникам энергии: мы прибегли к этому методу, чтобы экспертам было проще сравнивать ресурс и потребителя и оценивать весовые коэффициенты их связи. Кроме того, в связи с большим разбросом значений установленной мощности мы решили присвоить таким параметрам, как «мощность», качественные характеристики. Если у вас есть близкие значения установленной мощности сравниваемых потребителей, то, возможно, вам будет удобнее перейти к количественным характеристикам. Каждая из представленных авторами качественных характеристик присуща определенному первичному ресурсу. Метод с их использованием подчеркивает влияние характеристик на выбор потребителей, обусловленный их специфическими требованиями к первичным ресурсам. Использование этой связи при анализе совместимости ресурса с требованием потребителя отличает наш метод от других.

2.4. Ресурсы для энергоснабжения потребителей

Основными энергетическими ресурсами во всех регионах Арктической зоны являются ископаемые: природный газ, уголь, дизельное топливо, мазут, бензин, керосин, попутный нефтяной газ (ПНГ), кокс, торф, горючие сланцы. В структуре топливно-энергетического баланса (ТЭБ) российской Арктики ведущее место занимают такие ресурсы, как природный газ, уголь и нефтепродукты.

Природный газ. Приоритет в использовании этого ресурса отдается западным регионам Арктической зоны (Ямало-Ненецкий автономный округ, Республика Коми, Архангельская область, Республика Карелия, Мурманская область), где развита инфраструктура местных и магистральных газопроводных сетей. ЯНАО и Республика Коми являются поставщиками газа для других западных регионов, упомянутых выше. Таймыро-Туруханская зона (Красноярский край) является самой «зеленой» из всех зон, где 60 % установленной мощности приходится на газ, а остальные 40 % – на энергию водного потока.

Уголь. Этот ресурс широко распространен в тех арктических регионах, где ведется непосредственная добыча, например, в Чукотском АО. В других регионах Арктической зоны уголь, как правило, транспортируется.

Нефтепродукты. Мазут и дизельное топливо поставляются на территорию Арктики в полном объеме. В структуре топливно-энергетического баланса Мурманской области и Республики Карелия они занимают значительную долю.

В энергообеспечении Мурманской области и Чукотского АО значительную роль играет ядерное топливо. Дальнейшее развитие атомной энергетики в Арктике перспективно благодаря

плавающим атомным электростанциям. Энергия водных потоков используется в энергетическом балансе Мурманской области, а Республика Карелия имеет потенциал для развития гидроэнергетики. Попутный нефтяной газ используется в энергетических районах, где ведется добыча нефти. В районах с преобладанием деревообрабатывающей промышленности используется древесина и твердые бытовые отходы. В настоящее время возобновляемые источники энергии не вносят существенного вклада в топливно-энергетический баланс потребителей Арктики.

Необходимо отметить важную роль СПГ на ресурсном рынке. Учитывая ресурсный потенциал Восточной Арктики – месторождения золота, олова, меди, удаленные от топливных баз, – необходимо иметь ресурс, позволяющий наращивать необходимые мощности в условиях требований снижения углеродного следа. Учитывая курс на газификацию арктического региона и развитие основного транспортного маршрута – СМП, СПГ имеет перспективы в ближайшее десятилетие занять лидирующие позиции не только на внешнем рынке ресурсов, но и на внутреннем.

Водород является потенциальным ресурсом, который в 2035-2050 годах, при разработке соответствующих технологий и накоплении достаточного опыта его использования, может занять значительные позиции.

Критерии ресурсов. Все ресурсы, потребляемые в регионе или перспективные с точки зрения использования для энергообеспечения, сведены в табл. 2. Они оцениваются по критериям, среди которых есть экономические и экологические: капитальные затраты на строительство генерирующей установки на базе выбранного ресурса (CAPEX), средняя приведенная стоимость электроэнергии за жизненный цикл ресурса (LCOE), чистая приведенная стоимость строительства и эксплуатации генерирующей установки на данном ресурсе (NPV), а также выбросы, выраженные в эквиваленте CO₂. Экономические показатели являются одними из важнейших оцениваемых параметров электротехнических комплексов, как правило, они выступают в качестве критериев оптимизации [58]. Приведены количественные показатели по критериям, которые отражают в балльном выражении минимальный (1 балл) и максимальный (5 баллов) уровень по выбранному критерию.

Таблица 2

Критерии для ресурсов

Ресурс	Критерии			
	CAPEX	CO ₂	LCOE	NPV
Мазут	4	5	1	2
Газ	5	3	2	5
Уголь	4	5	3	3
СПГ и КПП	5	2	2	4
Атомные	5	2	4	5
ARES	4	2	3	4
Попутный нефтяной газ	4	4	3	4
Дизельное топливо	4	5	3	3
Водород	5	2	3	4

Все топливные ресурсы (кроме твердого топлива и ресурсов) на стадии реализации требуют значительных капитальных затрат, но получение энергии из них влечет за собой последствия для биосферы, обусловленные иным набором процессов и характером их возникновения. Таким образом, получение конечного продукта за счет энергии ветра, солнца, воды и земли менее разрушительно для окружающей среды с точки зрения нарушений и загрязнений из-за отсутствия транспортных процессов и добычи ресурсов [59]. Возобновляемые источники энергии используются локально и не являются «транспортными».

Углеводороды и уголь являются наиболее емкими видами топлива по количеству технологических процессов и требуют развитой транспортной инфраструктуры. Водородное топливо –

возможная альтернатива ископаемому топливу, которую стоит рассматривать как источник чистой энергии и средство ее хранения для потребителей Арктики при разработке технологий производства, хранения, транспортировки и потребления водорода. В свою очередь, природный газ имеет большой потенциал с точки зрения экспортных ресурсов в страны ЕС и АТР за счет развития технологий производства СПГ.

Следует также отметить возможность снижения рисков поставок СПГ в другие страны за счет использования водородной энергетики, развитие которой в целом способствует снижению глобальной зависимости от газа. Нефтепродукты являются вездесущим и широко используемым топливом для всех типов потребителей.

Атомная энергия также применима для многих потребителей, является экологически чистой за счет минимальных выбросов CO₂ и удобна с точки зрения долгосрочного использования ядерного топлива, которое завозится из других регионов России.

В качестве примера можно привести оценки для нефтепродуктов: выбросы CO₂ на 2020 год в мире составили более 12 млрд. т, или 30 % от общего объема выбросов, соответственно, авторы присвоили максимальную оценку в 5 баллов [60]. LCOE для дизельных установок варьируется в зависимости от технических характеристик и цен на топливо. В среднем LCOE для небольших установок составляет около \$50/МВт·ч, а для солнечных батарей – более \$150/МВт·ч, поэтому средняя оценка – 3 балла [61, 62]. CAPEX для нефтяных месторождений продолжает расти из-за растущих опасений по поводу ESG и давления на инвесторов [63, 64].

В результате анализа обзорных и аналитических статей был определен перечень основных глобальных технологических трендов и связанных с ними технологий [65–70]. Существование каждого тренда подтверждается примерами из практики российских и зарубежных компаний.

На фоне глобальных целей по снижению углеродного следа большинства отраслей промышленности компании стремятся внедрять ВИЭ и возобновляемую энергетику, комбинируя их с традиционными источниками под управлением ИТ-технологий. Хранение произведенной энергии – не менее актуальный вопрос, который решается компаниями на уровне технологий в борьбе за первенство в создании новых хранилищ [71]. Цифровизация, внедрение микросетки, активно-адаптивных сетей – ряд дополнительных технологических трендов, обусловленных глобальной повесткой дня.

В настоящее время компания «Хевел» строит автономную гибридную электростанцию общей мощностью 2,5 МВт в поселке Тура. Ветроэлектростанция Хайвинд Шотландия, построенная совместно компаниями Эквинор и Масдар, работает в водах Шотландии. Суммарная мощность всех ветроустановок составляет 30 МВт, коэффициент использования мощности – 50 %. На примере ВИЭ и компаний ВИЭ следует выделить развитие водородной энергетики и транспорта: водородные газовые турбины Эйрбас, водородные топливные элементы Альстом [72]. В течение 6 лет ЦКБ «Рубин» готовит проект «Айсберг», который предусматривает разработку подводных добычных комплексов северных месторождений. Работы включают разработку специализированных буровых установок, добычных станций, средств управления технологическими процессами и энергосберегающего оборудования.

Госкорпорация «Росатом» разработала ряд малых атомных электростанций (МАТЭС), предназначенных для эксплуатации в удаленных районах Арктики. Среди них есть как транспортабельные комплексы, так и комплексы, предназначенные для работы на шельфе, поэтому представлены энергоблоки мощностью от 1 до >100 МВт [73]. Суровые условия Арктики в целом способствуют развитию автономных технологий, а также технологий дистанционного управления. Уже сегодня существует большое количество российских и зарубежных проектов в области беспилотных технологий, летательных и подводных аппаратов дистанционного управления для нужд транспорта, строительства, научных исследований и нефтегазовой отрасли. Холдинговая компания «Вертолеты России» разработала многофункциональный беспилотный вертолет VRT-300 для освоения Арктики и СМП, способный осуществлять грузоперевозки, экологический мониторинг, поисково-спасательные операции, а также диагностику оборудования и дорожной инфраструктуры. Концерн «Калашников», ЦКБ «Лазурит» и другие также занимаются разработкой беспилотных летательных аппаратов.

2.5. Разработка сценариев

Методологический подход в исследовании основан на нескольких прогнозных сценариях, которые разбиты на последовательность временных интервалов 2020-2025; 2025-2030; 2030-2035. Планирование или сценарный анализ – это консолидированный и структурированный процесс создания будущих возможностей, которые имеют социально-экономические, экологические и технологические последствия.

Сценарное планирование основывалось на анализе внешней среды Арктики, после чего были определены основные факторы, влияющие на развитие потребителей, спрос на электроэнергию и мощности. В результате анализа внешней среды был составлен перечень факторов макросреды, оказывающих наибольшее влияние на развитие потребителей в Арктике в рассматриваемый период.

На основе метода «мозгового штурма» были выделены наиболее значимые факторы и оптимизированы с помощью диаграмм причинно-следственных связей. В результате были отобраны наиболее значимые и независимые факторы. Метод «мозгового штурма» зарекомендовал себя как эффективный способ генерации творческих и эффективных идей при решении нестандартных и сложных задач, требующих привлечения специалистов разных специальностей. Метод широко известен и применим, в том числе при решении научных и инженерных задач [74-76]. Представленная в данной статье научная работа предполагает комплексное изучение и привлечение специалистов и молодых ученых из различных областей ТЭК и МСК, что обуславливает необходимость организации работы, в том числе методом мозгового штурма. На основе этого метода с помощью диаграмм причинно-следственных связей были выявлены и оптимизированы наиболее значимые факторы.

На этапе прогнозирования было сгенерировано несколько вариантов различных сценарных исходов. Целью объединения наиболее значимых факторов было установление взаимозависимости между прогнозируемыми исходами рассматриваемых факторов и написанием сценариев.

В сценариях (табл. 3) объединены различные факторы. Например, такие как рост мировой экономики, политические факторы, экологические проблемы, технологическое развитие, которые иллюстрируют взаимосвязь между основными движущими силами. Сценарные движущие силы включают в себя различные типы факторов, некоторые из них, например, пандемия COVID-19, возникают спонтанно. Другие представляют собой устойчивые тенденции, такие как цифровизация, декарбонизация, децентрализация, зависимость и сокращение. Современная политика компаний и правительств учитывает необходимость достижения целей устойчивого развития. Таким образом, ЦУР также становятся одним из важнейших факторов сценарного планирования.

Таблица 3

Описание сценариев

Название	2025	2030	2035
Негативный «Холодная угроза»	1. Развитие и мутация вирусов – отсутствие возможности финансового преодоления гонки вакцинации; 2. Снижение потребления энергии на 5 % ежегодно; 3. Цена на нефть 50-60 долл./барр; 4. Комплекс мер поддержки новых месторождений на уровне 20 % на прибыль и 15 % налог на добычу полезных ископаемых; 5. Отсутствие прозрачного регулирования и определенности в ТЭК и МСК; 6. Отсутствие международных инвестиций в проекты развития Арктики.	1. Сокращение индустрии офлайн культуры и массовых мероприятий; 2. Минимум потребления энергии и услуг; 3. Высокая волатильность цен на энергоресурсы – отсутствие инвестиций в проекты по освоению новых месторождений; 4. Цена на нефть 40-55 долл./барр; 5. Отсутствие возможности выхода продукции на внешние рынки ввиду санкционного давления; 6. Мировая торговля сокращается на 3-5 % ежегодно.	1. Энергетическая бедность стран; 2. Отсутствие каких-либо инвестиций в энергетическую инфраструктуру, и их последующий отток; 3. Нарастание рисков техногенных аварий и отсутствие средств на ликвидацию природных катаклизмов; 4. Цена на нефть 40-50 долл./барр; 5. Нарастание социальной напряженности; 6. Низкий уровень инноваций, образования и культуры.

Название	2025	2030	2035
Нейтральный «Северный изгой»	1. Сдерживание коронавирусной инфекции без значительных карантинных ограничений; 2. Рост потребления электроэнергии увеличивается на 40 %; 3. Энергоемкость ВВП не изменяется, рост удельного потребления на душу населения на 1 %; 4. Экспортные ограничения – нестабильность поставок полезных ископаемых и энергии; 5. Стабилизация потребления энергии на прежнем уровне без учета экологической и климатической ситуации; 6. Увеличение мировой энергии на 1-3 % ежегодно.	1. Отсутствие прежнего уровня международной торговли ресурсами из-за гонки импортозамещений; 2. Невозможность фиксации углеродного следа; 3. Занятие и удержание лидерских позиций в создании международных транспортно-логистических систем, освоении и использовании Арктики является невозможным; 4. Максимум цены на нефть – 55–65 долл./барр; 5. Углеродный след энергетических ресурсов не является ориентиром при энергообеспечении потребителей; 6. Возникновение конфликтов из-за нехватки ресурсов ввиду изменения климата; 7. Нарастивание военного потенциала.	1. Развитие территорий осуществляется за счет ориентации на внутренний рынок; 2. Прирост инвестиций в НИОКР составляет до 8 %; 3. Угроза освоения арктических территорий из-за катаклизмов, вызванных глобальным потеплением; 4. Комплекс мер поддержки новых месторождений на уровне 10 % налог на прибыль и 10 % налог на добычу полезных ископаемых.
Позитивный «Пробуждение энергии»	1. Нивелирование негативных последствий кризиса и карантинных мер; 2. Восстановление нарушенной цепочки поставок энергии, материалов и товаров; 3. Устойчивое развитие ТЭК и МСК в Арктике на основе цифровых технологий [56, 57]; 4. Цена на нефть – 70+ долл./барр на всем сценарии; 5. Обновление основных фондов в энергетике и в сетевой инфраструктуре; 6. Рост мировой торговли на 3–5 % ежегодно; 7. Комплекс мер поддержки на уровне 0-3 % налог на прибыль и 4-5 % налог на добычу полезных ископаемых.	1. Формирование и развитие точек роста, ориентируемых на экологию и социальную сферу; 2. Рост спроса на новые технологии и оборудование в Арктике; 3. Инфраструктурные и законодательные возможности размещения предприятий в АЗРФ для малого и среднего бизнеса; 4. Прозрачность и открытость для потребителей внутреннего и внешних рынков за счет цифровых технологий; 5. Научно-технический прорыв на глобальном уровне за счет цифровой интеграции заинтересованных сторон; 6. Появление окна возможностей для компаний, поставляющих технологии; 7. Увеличение инвестиций в НИОКР до 20 % относительно 2021 за счет появления венчурного капитала.	1. Скоординированное развитие Арктики за счет международного планирования, финансирования и нормативно-правовой базы; 2. Цифровая трансформация в управлении жизненным циклом энергетических и минерально-сырьевых ресурсов Арктики; 3. Появление цифровых производств, умных фабрик и высокотехнологичных пространств, функционирование которых осуществляется за счет платформенных решений; 4. Устойчивость и надежность энергоснабжения арктических потребителей за счет новых подходов к обеспечению потребителей ресурсами; 5. Инновационное перерождение ТЭК и МСК Арктики в высокотехнологичную и эффективную инфраструктуру, обеспечивающую количественный и качественный рост Российской экономики.

Методика разработки и результаты опроса. Для формирования сценариев развития электроэнергетики и энергоснабжения потребителей Арктики был проведен опрос на основе экспертных оценок. Опрос был разработан с целью получения экспертных данных для прогноза развития энергетике Арктики и приоритетного набора топливных ресурсов на три временных интервалах: 2020-2025, 2025-2030, 2030-2035, с учетом политических, экономических, социальных, технологических, экологических и правовых рисков использования каждого ресурса в арктической зоне. Риски оценивались по девятибалльной шкале, где 1 – минимальное влияние риска; 9 – максимальное влияние риска. Была проведена экспертная оценка развития типов потребителей и спроса на энергоресурсы.

Для каждого региона Арктической зоны характерен свой набор топливных ресурсов, который на данный момент обусловлен наличием месторождений углеводородов или угля и развитой транспортной инфраструктурой ресурсов.

Поскольку углеводороды и уголь занимают приоритетные позиции в структуре топливно-энергетического баланса региона, было принято решение разделить Арктическую зону на три группы по принадлежности углеводородов (газа, нефти и нефтепродуктов) и угля к этим территориям:

- I. Регионы, где ископаемые ресурсы преимущественно «привозные», т.е. Мурманская область, Республика Карелия, Архангельская область, Республика Коми.
- II. Регионы, где ископаемые ресурсы являются «местными», т.е. добываются в данных регионах – Республика Карелия, Ямало-Ненецкий АО.
- III. Регионы, где ископаемые ресурсы являются как «местными», так и «привозными» – «смешанные», т.е. Красноярский край, Якутия, Чукотский АО.

На рисунке 3 представлена карта топливно-энергетического баланса Арктического региона.

Срок проведения исследования составил 1 месяц. Экспертная группа была подобрана из различных структур, научных и общественных школ. За это время в опросе приняли участие 64 человека: сотрудники 5 учебных заведений, сотрудники 5 компаний минерально-сырьевого комплекса, сотрудники 7 компаний топливно-энергетического комплекса.

Таким образом, прогнозирование развития энергетического сектора основано на опросе большого числа профессиональных работников и преподавателей специализированных учреждений, близких к данной тематике. В результате проведенного исследования были определены основные потребители и наиболее востребованные ресурсы для энергообеспечения.

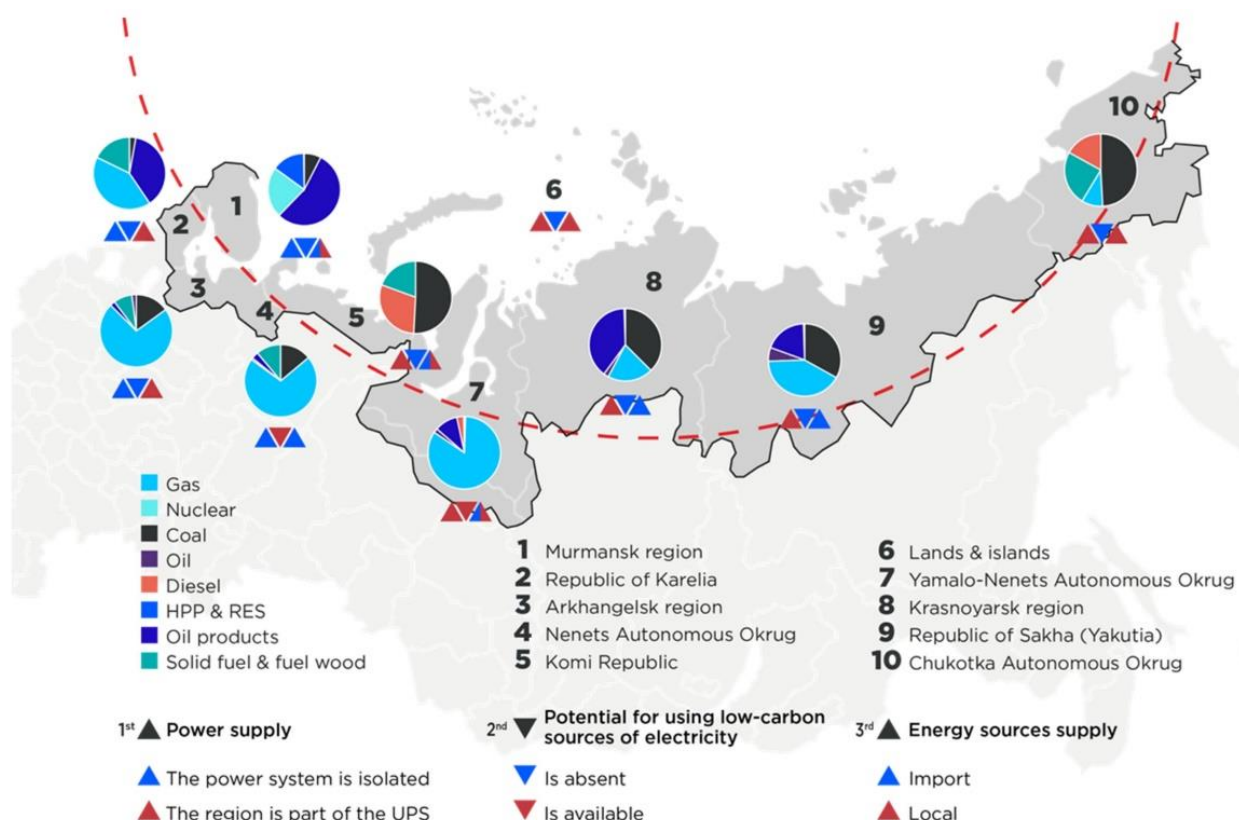


Рис. 3. Структура топливно-энергетического баланса Арктического региона

Была проведена сложная поэтапная работа: от оценки текущей ситуации в энергетике Арктики до выбора метода исследования, концепции анкеты и экспертов, анализа данных и их использования для прогнозирования по различным сценариям.

На рисунке 4 представлена обобщенная методика построения математической модели сценарного прогнозирования.

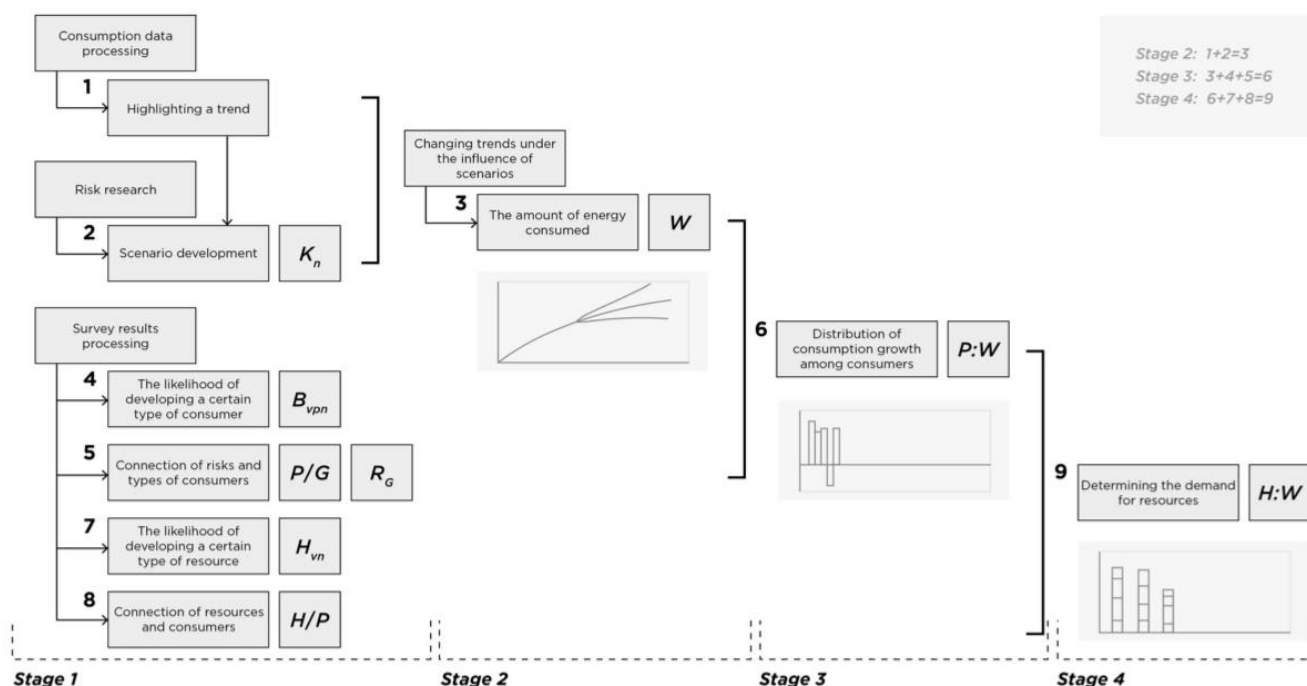


Рис. 4. Методика построения математической модели сценарного прогнозирования

- Шаг 1. Расчет обобщенного коэффициента влияния риска K_n для каждого из сформированных сценариев на основе анализа рисков и выявленных тенденций потребления, полученных в результате обработки данных о потреблении электроэнергии за период 2010-2020 гг.
- Шаг 2. Расчет кумулятивного влияния риска на развитие потребителей Арктики. Расчет энергопотребления W по трем сценариям на разных временных интервалах на основе оценки влияния глобальных вызовов на тенденции потребления.
- Шаг 3. Расчет энергопотребления и распределения по типам потребителей на основе расчета базового вектора вероятности развития определенного типа потребителя B_{vpn} и результатов расчета суммарных весовых коэффициентов связи между рисками и типами арктических потребителей R_g .
- Шаг 4. Расчет распределения спроса на ресурсы между типами потребителей на основе расчета базового вектора вероятности увеличения спроса на ресурсы H_{vpn} и матрицы связи весовых коэффициентов потребителей с ресурсами.

2.6. Математическая модель сценарного прогнозирования

Для формализации и установления численных значений взаимного влияния рисков в различных сценариях на развитие потребителей Арктики были использованы матрицы взаимодействия, составленные участниками исследования [79]. Применение метода матриц взаимодействия позволяет выявить степень взаимного влияния факторов рассматриваемой совокупности и спрогнозировать их поведение в будущем. После анализа и обработки результатов опроса экспертной группы риски были расположены на плоскости (рис. 5) в соответствии со следующими осями:

- K_s – ось ординат, сила влияния рисков на развитие арктических потребителей; принимает значения от -1 до 1 (сила уменьшается/увеличивается).
- K_d – ось абсцисс, влияние рисков на скорость изменения численности потребителей; принимает значения от -1 до 1 (тормозит/ускоряет).
- S характеризует размер пузырьков, отражающий значимость соответствующего риска для роста энергопотребления в Арктике; принимает значения от 0 до 1 .

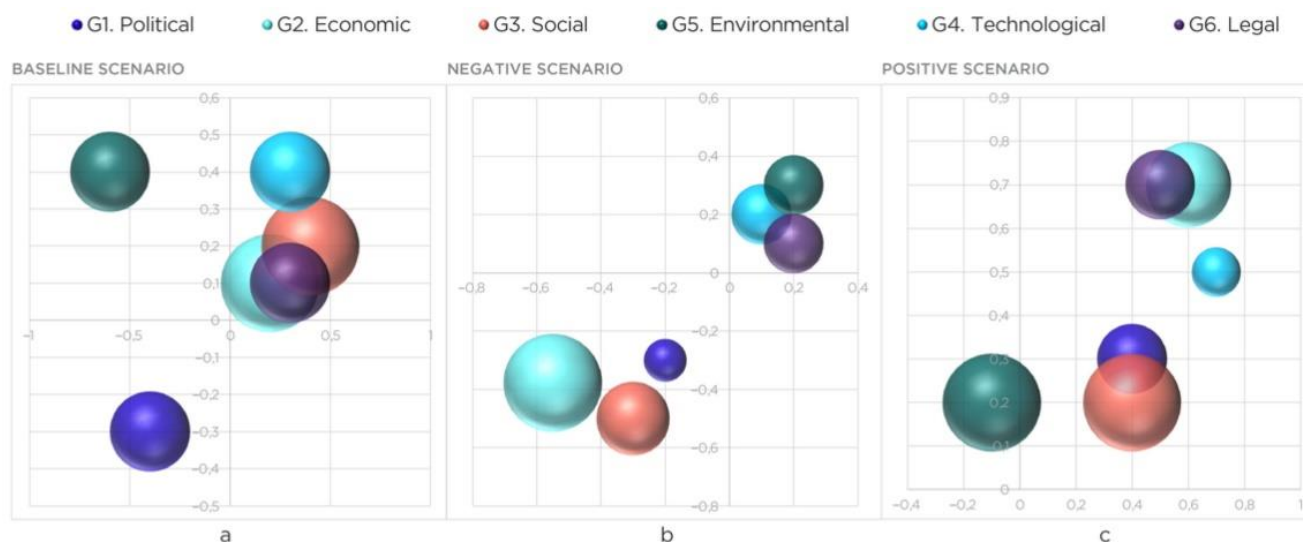


Рис. 5. Результаты анализа PESTEL-рисков при различных сценариях:
(а) нейтральный сценарий с $K = 0,095$; (б) негативный сценарий с $K = 0,21$; (в) позитивный сценарий с $K = 0,585$

Оценка рисков зависит от сценария. В ходе «мозгового штурма» было проанализировано, как риски будут проявляться в негативном, нейтральном и позитивном сценариях.

Важно отметить, что мы предлагаем методику и демонстрируем подходы к ее реализации. При реализации методики в дальнейшем результаты будут зависеть от экспертной группы; в этом случае прогноз будет корректироваться не с точки зрения используемых методов, а с точки зрения экспертного мнения. Коллектив авторов допускает такую зависимость, поскольку исследование посвящено стратегическому планированию, и необходимо использовать знания экспертов. Сценарные условия, предложенные авторами, основаны на изучении рисков и их последствий, а также на предположениях о развитии тех или иных рисков в худшую или лучшую сторону, что описано в табл. 3. Оценка и применение данного подхода основывались на литературных данных, однако конкретные оценки в работах всегда различны, так как формируются на основе различных сценариев. Мы же предлагаем конкретную последовательность действий, позволяющую более полно оценить будущие потребности и разработать их устойчивое обеспечение.

Следует также подчеркнуть, что матрица является динамической; с течением времени возможна переоценка рисков, поскольку они не статичны по своей природе, а претерпевают изменения на всем рассматриваемом в исследовании временном интервале.

На основе данных матрицы взаимодействия каждая группа рисков (политические, экономические, социальные, технологические, экологические, правовые риски) представлена в виде обобщенного коэффициента влияния K_n , который получен по формуле (1)

$$K_n = \frac{(K_s + K_d)S}{2}. \quad (1)$$

На основе этих матриц взаимодействия каждый из сценариев может быть представлен в виде обобщенного коэффициента влияния K_n .

По результатам анализа и расчетов для каждого из сценариев может быть найден итоговый обобщенный коэффициент влияния (K_n), который определяет итоговую степень значимости трех показателей каждой группы рисков для развития потребителей Арктики и, соответственно, роста энергопотребления и спроса на строительство энергетических источников и энергетической инфраструктуры.

Результаты расчетов обобщенных коэффициентов влияния групп рисков и сценариев представлены в табл. 4 и на рис. 5.

Таблица 4

Значения обобщенных коэффициентов влияния K_n .

Группа рисков	K_n (нейтральный сценарий)	K_n (негативный сценарий)	K_n (позитивный сценарий)
G1. Политические	-0,07	-0,025	0,07
G2. Экономические	0,045	-0,25	0,195
G3. Социальные	0,09	-0,12	0,12
G4. Технологические	0,07	0,03	0,06
G5. Экологические	-0,08	0,05	0,02
G6. Правовые	0,04	0,03	0,12
Суммарный	0,095	-0,285	0,585

2.6.1. Прогноз развития типов потребителей

Следующим этапом исследования является оценка влияния глобальных вызовов на развитие различных типов потребителей в Арктике с целью дальнейшего прогнозирования спроса на энергию со стороны различных потребителей с учетом взаимного влияния глобальных вызовов.

Всего было выделено девять типов потребителей P1-P9 (табл. 5).

Таблица 5

Символическое обозначение потребителей Арктики

Тип заказчика	P
Военные базы	P1
Месторождения углеводородов	P2
Поселки (моногорода)	P3
Научно-исследовательские базы	P4
Логистические кластеры	P5
Медицинские базы	P6
Сельскохозяйственные комплексы	P7
Туристические центры	P8
Центры обработки данных (ЦОД)	P9

На основе опроса было определено влияние групп рисков на развитие потребителей для различных временных диапазонов. Одновременно была проведена обработка вопросов о влиянии рисков на различных временных интервалах. Коэффициенты принимают значения от 0 до 1 с шагом 0,01. С учетом диапазонов были выделены три эффекта: 0,3 характеризует слабый эффект; диапазон 0,3-0,6 соответствует условиям среднего эффекта; 0,61 находится в контексте сильного эффекта. Следует отметить, что эти значения усреднялись по всем экспертам, исключая наблюдения с неполной информацией об основных типах потребителей. Таким образом, были получены весовые коэффициенты, позволяющие оценить степень влияния риска на развитие потребителей энергии (табл. 6).

Таблица 6

Влияние рисков на развитие потребителей в 2020-2025 гг.

Тип заказчика	P	G1	G2	G3	G4	G5	G6	Кумулятивное воздействие риска R_{Σ}
Военные базы	P1	0,3	-0,2	0,07	0,1	0,01	-0,02	0,0433
Месторождения углеводородов	P2	-0,28	0,17	0,11	0,14	-0,4	0,11	-0,043
Поселки (моногорода)	P3	0,01	-0,32	-0,21	0,12	-0,4	0,04	-0,127
Научно-исследовательские базы	P4	0,05	0,18	0,04	0,03	0,2	0,09	0,098
Логистические кластеры	P5	-0,3	0,12	-0,1	0,2	-0,08	0,3	0,023
Медицинские базы	P6	0,07	0,16	-0,3	0,01	-0,1	0,06	-0,016
Сельскохозяйственные комплексы	P7	0,06	0,15	0,11	0,07	-0,22	0,05	0,036
Туристические центры	P8	-0,4	0,1	0,08	0,04	-0,06	0,04	-0,033
Центры обработки данных (ЦОД)	P9	0,31	0,15	0,25	0,2	-0,35	0,12	0,113
Всего								0,094

Далее суммарные весовые коэффициенты взаимосвязи между рисками и типами потребителей Арктики были сведены в таблицу 7.

Таблица 7

Суммарные весовые коэффициенты взаимосвязи между рисками и типами потребителей Арктики

	G1–G6 (2020–2025)	G1–G6 (2025–2030)	G1–G6 (2030–2035)	G1–G6 (2035+)
R_{Gj}	0,094	0,101	0,37	0,55

На основе итоговых весовых коэффициентов связи между рисками и типами потребителей, определяется прогноз спроса на электроэнергию для потребителей на различных временных диапозонах определен.

При этом используется значение базового вектора вероятности развития того или иного типа потребителей, полученное в результате опроса экспертов. Этот вектор нормируется внутренним образом по формуле (2):

$$B_{vpn} = \frac{B_{vpi}}{\sum_{i=1}^n B_{pi}} \cdot 100, \quad (2)$$

где B_{vpi} – базисный вектор вероятности развития вида потребителя; B_{vpn} – внутренняя нормировка базисного вектора вероятности развития вида потребителя.

Итоговый прогноз роста спроса на энергию для отдельных видов потребителей по годам с учетом сценариев рассчитывается по формуле (3):

$$W_{iyn} = \frac{W_f(t) \cdot (1 \pm K_n \cdot R_{Gj}) \cdot B_{vpn_i}}{100}, \quad (3)$$

где $W_f(t)$ – распределенный тренд потребления электроэнергии за период, предшествующий прогнозируемому. За основу были взяты имеющиеся данные о потреблении в период с 2010 по 2020 год на территории Арктики.

В табл. 8 приведены результаты расчетов спроса на энергию до 2025 года. Для других временных интервалов были проведены аналогичные расчеты.

Таблица 8

Прогноз энергопотребления по типам потребителей к 2025 году

Тип потребителя	P	Базовый вектор вероятности на основе опроса	Нейтральный сценарий (2020–2025), млрд кВт·ч	Негативный сценарий (2020–2025), млрд кВт·ч	Позитивный сценарий (2020–2025), млрд кВт·ч
Военные базы	P1	0,760606	5,041147651	4,849507195	5,288262977
Углеводородные месторождения	P2	0,912121	6,045359407	5,815543595	6,341700847
Населенные пункты (моногорода)	P3	0,693939	4,599291828	4,424448628	4,824747533
Научно-исследовательские базы	P4	0,657576	4,358284983	4,192603717	4,571926615
Логистические кластеры	P5	0,690909	4,579209581	4,405129813	4,803680861
Медицинские базы	P6	0,475758	3,153230877	3,033360036	3,307801171
Агрокомплексы	P7	0,409091	2,711375053	2,60830147	2,844285727
Туристические базы	P8	0,342424	2,26951923	2,183242903	2,380770283
Центры обработки данных (ЦОДы)	P9	0,457576	3,032724141	2,917434393	3,181387236
Всего			35,79014275	37,120479	36,59403675

На основе выражения, учитывающего изменение энергопотребления на временном интервале и нормированное суммарное влияние риска, было получено распределение прироста (снижения) энергопотребления по типам потребителей.

Таким образом, на данном этапе обосновано прогнозное развитие типов потребителей и связанное с ним сценарное изменение энергопотребления.

2.6.2. Прогноз развития потребления ресурсов

Для сценарного исследования были рассмотрены основные виды ресурсов: мазут, газ, уголь, СПГ и сжатый природный газ (СПГ), атомная, нетрадиционная и возобновляемая энергетика,путный нефтяной газ, водород Н1-Н9 (табл. 9).

Таблица 9

Символьное обозначение ресурсов

Тип ресурса	Н
Мазут	Н1
Газ	Н2
Уголь	Н3
СПГ и КПП	Н4
Атомные	Н5
АРЕС	Н6
ПНГ	Н7
Дизельное топливо	Н8
Водород	Н9

Потребности потребителей в энергии (табл. 1) определяют силу связи с видами ресурсов на основе их критериев (табл. 2). Таблица весовых коэффициентов составляется по результатам обработки оценки связи экспертами. По результатам анализа и сопоставления требований потребителей и характеристик видов ресурсов составляется матрица связей (табл. 10). Наибольшее значение свидетельствует о более целесообразном выборе и соответствии ресурса для обеспечения данного типа потребителей с учетом наиболее полного удовлетворения требований. Коэффициенты принимают значения от 0 до 1 с шагом 0,001 и, с учетом этого, варьируются как 0,001-0,3 – слабая связь; 0,301-0,6 – связь средней степени; 0,601-1 – сильная связь.

Таблица 10

Матрица связи весовых коэффициентов потребителей с ресурсами

Н/Р	Р1	Р2	Р3	Р4	Р5	Р6	Р7	Р8	Р9
Н1	0,86	0,5	0,55	0,57	0,1	0,3	0,1	0,1	0,1
Н2	0,8	0,94	0,87	0,65	0,87	0,67	0,67	0,77	0,64
Н3	0,86	0,76	0,56	0,45	0,58	0,34	0,22	0,1	0,1
Н4	0,89	0,3	0,67	0,34	0,56	0,34	0,78	0,82	0,34
Н5	0,67	0,92	0,45	0,34	0,87	0,32	0,45	0,34	0,89
Н6	0,76	0,56	0,78	0,88	0,45	0,67	0,78	0,89	0,68
Н7	0,3	0,8	0,5	0,4	0,76	0,45	0,65	0,43	0,78
Н8	0,89	0,32	0,45	0,54	0,23	0,34	0,21	0,2	0,12
Н9	0,78	0,56	0,67	0,45	0,67	0,56	0,78	0,67	0,9

В результате опроса экспертов было предложено проставить силу влияния и направление влияния рисков на развитие баз, затем оценка усреднялась и вносилась в соответствующую ячейку. Экспертные оценки, приведенные в анкете, обрабатывались стандартным способом, принятым для данного подхода [79].

Изменение спроса на отдельные виды потребителей в Арктике будет определять изменение спроса на энергоресурсы. Для этого на основе таблицы весовых коэффициентов связи между потребителями и ресурсами определялся прогноз спроса на энергию со стороны того или иного вида ресурсов.

Прогнозирование увеличения спроса на энергоресурсы (4) осуществлялось с учетом базового вектора вероятности увеличения спроса на ресурсы (H_{vi}) и его внутренней нормировки (H_{vn}). Этот вектор был получен на основе данных опроса. Затем моделировалась матрица связей потребителей

электроэнергии и ресурсов в виде нормированного вектора (L_{vn}), который корректирует прогноз спроса на отдельные виды ресурсов и отражает конкурентное распределение в результате сценарных условий, но не изменяет величину суммарного спроса.

$$H_i = \Delta W_{iynf}(t) \cdot \frac{H_{vin} \cdot L_{vin} \cdot 100}{\sum_{i=1}^n H_{vin} \cdot L_{vin}}, \quad (4)$$

где $\Delta W_{iynf}(t)$ - изменение энергопотребления с учетом сценарных условий в выделенном временном интервале.

В табл. 11 приведены результаты расчетов сценарного прогнозирования увеличения или уменьшения спроса на ресурсы во временном интервале 2020-2025 гг. Аналогичные расчеты были проведены и для других временных интервалов.

Таблица 11

Результаты расчетов сценарного прогнозирования спроса на ресурсы к 2025 году

Тип ресурса	Н	H_v Базовый вектор вероятности на основе опроса	H_{vn} Внутренняя нормализация базового вектора вероятности	L_{vn} Нормализация с учетом связи с типами потребителей	Нейтральный сценарий (2020-2025), млрд кВт·ч	Негативный сценарий (2020-2025), млрд кВт·ч	Позитивный сценарий (2020-2025), млрд кВт·ч
Мазут	Н1	0,760606	14,0853	7,038513	3,155958122	3,037160292	3,309144796
Газ	Н2	0,912121	16,89113	15,22798	8,18813799	7,879916847	8,585581042
Уголь	Н3	0,693939	12,85072	8,787074	3,594644762	3,459333716	3,769124795
СПГ и КПП	Н4	0,657576	12,17733	11,15538	4,324347858	4,161569039	4,534246863
Атом	Н5	0,690909	12,79461	11,62019	4,732867717	4,55471123	4,962595818
НВИЭ	Н6	0,475758	8,810333	14,27623	4,003962935	3,853244171	4,198310814
ПНГ	Н7	0,409091	7,575759	11,22178	2,706276212	2,604405488	2,83763583
Дизель	Н8	0,342424	6,341185	7,304117	1,47442394	1,418923088	1,545990828
Водород	Н9	0,457576	8,47363	13,36875	3,606155464	3,470411128	3,781194214
Всего			100 %	100 %	35,786775	34,439675	37,523825

3. Результаты и обсуждение

На рис. 6 представлены результаты прогноза энергопотребления потребителей Арктики на основе сценарных условий и рисков, где рассмотрены три сценария развития электропотребления и процесса изменения топливно-энергетического баланса в Арктике на период с 2021 по 2035 год.

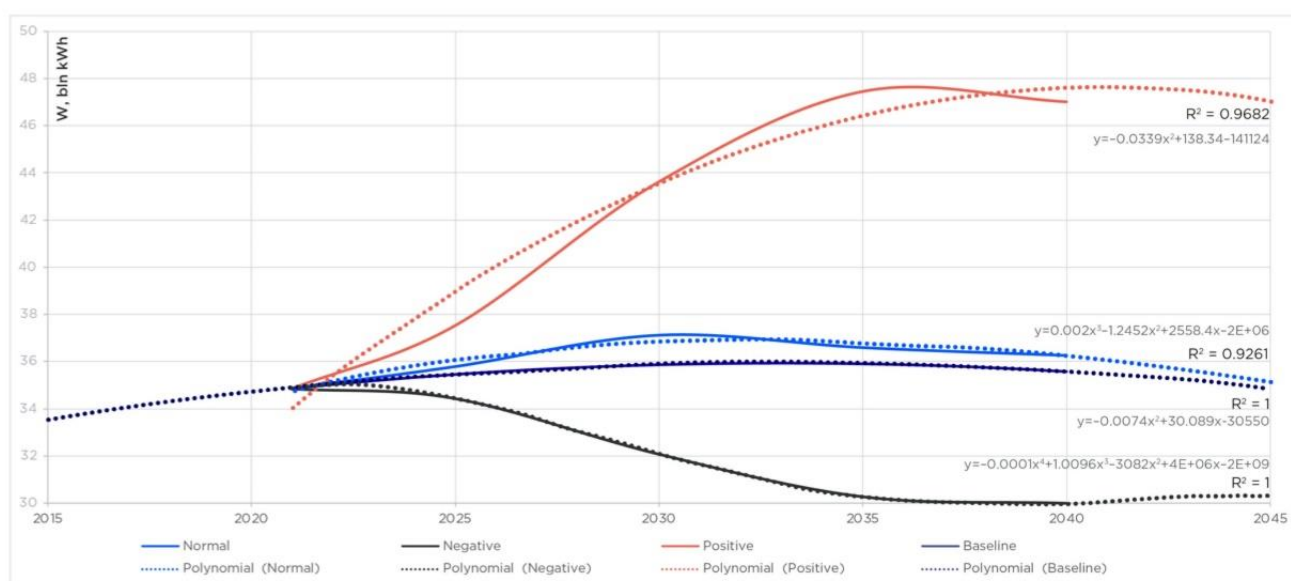


Рис. 6. Прогноз потребления энергии потребителями Арктики, млрд. кВт·ч

Значение R^2 – коэффициент детерминации – представляет собой разность между единицей и долей необъясненной дисперсии. Этот коэффициент применяется для определения степени соответствия между одной случайной переменной и многими другими. R^2 может быть рассчитан автоматически, например, с помощью стандартных средств MS Excel, что и было сделано авторами статьи.

Результаты рассчитанных коэффициентов детерминации свидетельствуют о том, что полученная математическая модель прогнозирования энергопотребления с использованием разработанного гибридного метода в достаточной степени соответствует данным из [80] и не противоречит им. Опора на имеющиеся данные об энергопотреблении потребителей в Арктике позволила провести начальные итерации настройки модели. В свою очередь, это позволило наложить на собранную базу данных влияние рисков, мигрирующих во времени.

На рис. 7 представлены результаты для распределения прогнозируемого прироста энергопотребления по типам потребителей, учитывающие изменение энергопотребления на временном интервале и нормированное суммарное влияние рисков. Полученные результаты показывают, что в нейтральном и позитивном сценариях прирост электроэнергии будет происходить в основном за счет центров обработки данных, месторождений углеводородов и логистических кластеров. Пик роста придется на 2030-е годы. По тем же сценариям будет наблюдаться вырождение поселений, основанных на промышленности. В рассматриваемый период, с 2021 по 2035 год, объем энергопотребления будет изменяться в основном за счет увеличения или уменьшения спроса на газ в зависимости от варианта сценария развития Арктической зоны. Высокий потенциал использования газа обусловлен большими запасами этого ресурса в Арктике и развитой инфраструктурой газопроводов на ее территории. Таким образом, природный газ будет занимать ведущее место в структуре топливно-энергетического баланса Арктики.

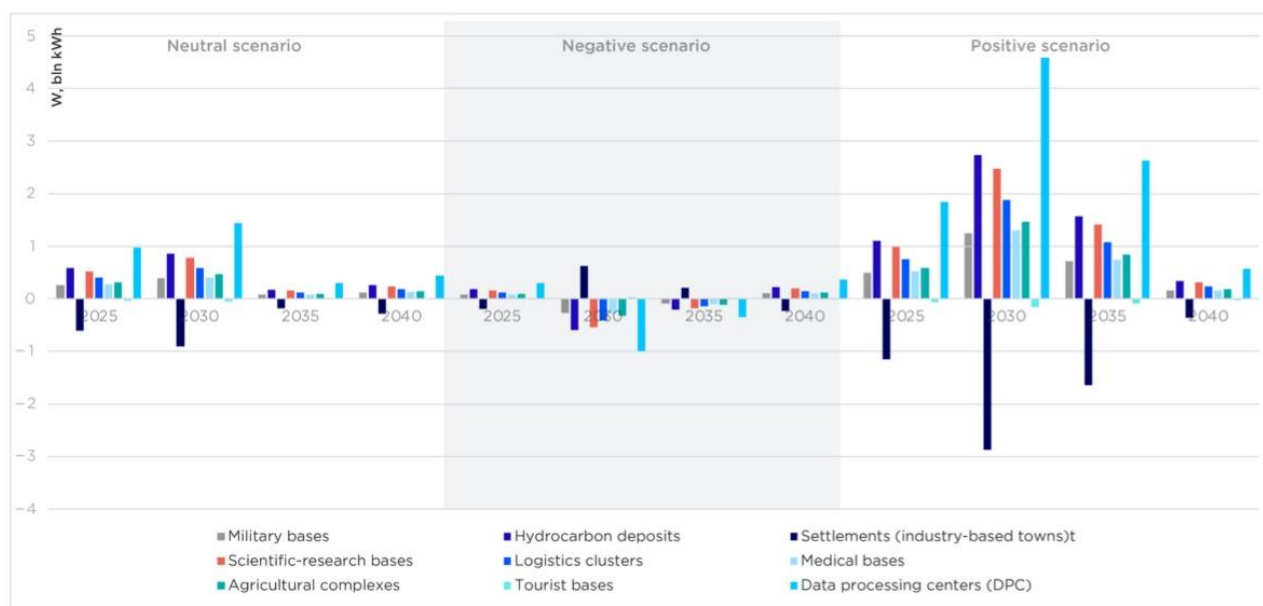


Рис. 7. Распределение прогнозируемого прироста энергопотребления по типам потребителей

Если принять позитивный сценарий развития как наилучший с точки зрения устойчивости, то достаточно большой вклад в увеличение энергопотребления внесут нетрадиционные источники энергии, такие как атомная и водородная энергетика. Использование атомной энергии в Арктике доказало свою состоятельность и эффективность в случае малых и плавучих атомных электростанций. Результаты прогноза указывают на развитие водородного топлива как нового перспективного источника энергии, которое планируется производить на базе Кольской АЭС в Мурманской области и Якутии, а также на пилотных площадках в Ямало-Ненецком автономном округе и на начало поставок СПГ в атомных танкерах в отдаленные арктические районы.

При положительном сценарии произойдет увеличение спроса на использование СПГ, хотя это увеличение не окажет существенного влияния на топливно-энергетический баланс Арктики. Следуя тенденции декарбонизации, продолжится развитие ВИЭ, однако прирост этих ресурсов несопоставим

по объему с другими рассматриваемыми ресурсами, поэтому он не отражен в результатах моделирования. Наибольший прирост энергопотребления будет достигнут в 2030 году за счет газа, что связано с планируемой газификацией регионов. Доля нефтепродуктов снизится и станет равной доле водородного топлива. Такая диверсификация ресурсного баланса позволит не нарушать чувствительную экосистему Арктики и обеспечит инновационный прорыв в российской энергетике, а также конкурентоспособность страны на рынке экологически чистых видов топлива.

Модель позволила учесть не только рост, но и падение отдельных типов потребителей при различных сценариях. Заметно увеличивается энергопотребление центров обработки данных, что связано с появлением новых стратегических и экономических объектов, которые появятся к 2025-2030 годам (снабжение СМП, СШХ, военные базы, научно-исследовательские базы). Аналогично будет расти спрос на месторождения углеводородов, поскольку Арктика обладает большим потенциалом природных ресурсов, которые уже эксплуатируются, а разработка и появление технологий, специализированных для арктических условий, будет иметь высокий спрос на потребление энергии. Инвестиции в СМП, СШХ, развитие портов, железных и автомобильных дорог также станут стимулом для увеличения энергопотребления логистических кластеров в Арктике. Модель наглядно демонстрирует падение спроса на энергию в моногородах. Это можно объяснить их низкой привлекательностью в текущем состоянии, а перспектив привлечения жителей для постоянного проживания в этих городах не наблюдается. Следовательно, можно сделать вывод, что моногорода с существующей инфраструктурой и экономикой – это тупик, а в Арктике такое развитие территорий неэффективно. На рис. 8 представлены результаты сценарного прогнозирования увеличения или уменьшения спроса на ресурсы на соответствующих временных интервалах.

Результаты показали, что спрос на водород со временем будет расти за счет лояльности и инвестиций в водород со стороны крупных компаний, а также появления инфраструктуры и исследовательских центров, адаптированных к водородному топливу. Также будет расти спрос на газ, ПНГ, СПГ и КПП в связи с дальнейшим разворачиванием транспортных кампаний по перевозке СПГ и КПП. Появление малых АЭС, а также перспектива и одобрение российским правительством плавающих АЭС станут шагом к удовлетворению растущего спроса на атомную энергию в Арктике. Спрос на нефтепродукты будет снижаться из-за рисков разливов, приводящих к крупным штрафам, санкциям и ограничениям, что снижает конкурентоспособность этих видов топлива (мазут, дизельное топливо) по сравнению с другими. В ближайшие 5-10 лет уголь по-прежнему будет востребован в качестве топлива для Арктики, но постепенно спрос на его использование начнет снижаться.

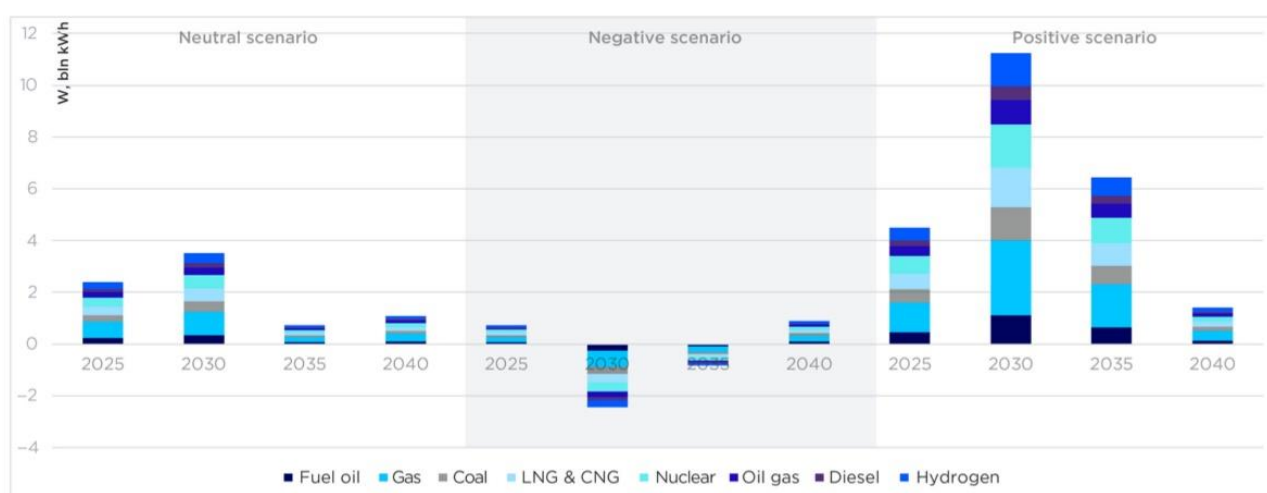


Рис. 8. Результаты прогнозирования спроса на ресурсы

Таким образом, сценарное моделирование влияния рисков, обусловленных глобальными вызовами, на развитие потребителей в Арктике и оценка изменения спроса на энергоресурсы позволят проследить взаимное влияние рисков с учетом сценарных условий на технологии энергоснабжения.

Это, в свою очередь, позволяет с помощью ресурсов определить ключевые технологии, необходимые для энергоснабжения потребителей Арктики с учетом всех требований эффективности при снижении негативного влияния на экологическую обстановку в регионе для достижения целей устойчивого развития.

4. Выводы

Энергоснабжение потребителей должно строиться на принципах надежности, доступности и гибкости. Наше исследование следует этим принципам и ориентируется на потребителя, учитывая его особенности и потребности. Энергоснабжение также зависит от наличия ресурсов, и наше исследование отвечает на этот вопрос, используя потенциал рассматриваемого региона. Процесс энергоснабжения в Арктическом регионе следует рассматривать как единую взаимосвязанную структуру, в которой различные типы потребителей и источники энергии находятся в взаимозависимости. Нами предложен подход к стратегическому планированию, основанный на классификации и анализе указанных переменных, учете мнения экспертов и сценарном моделировании факторов. Применение взаимосвязи между характеристиками потребителей и критериями ресурсов отличает наш метод от других. Мы понимаем, что при повторении данной методики авторы могут столкнуться с некоторыми ограничениями. Группы риска, выделенные в данном исследовании, применимы к выделенным зонам роста российской Арктики. Однако методика универсальна, что позволяет применять ее и в других исследованиях, где будут выделяться собственные группы риска и экспертная группа по конкретному запросу авторов. Среди ограничений следует также выделить то, что данный подход не учитывает ограничения, обусловленные наличием инфраструктуры, необходимой для создания условий обеспечения энергоснабжения тем или иным ресурсом в определенных регионах. Точное местоположение роста потребностей в настоящее время также не определяется этим методом, что не позволяет создать необходимые стимулы для развития на региональном уровне.

Также хотелось бы подчеркнуть, что исследование имеет большой потенциал для развития, среди ряда актуальных задач для дальнейшей работы можно выделить следующие: представление факторного анализа рисков, который позволит оценить динамику изменения рисков во времени, а также выделить группу наиболее значимых рисков и их взаимосвязь друг с другом; решение оптимизационной задачи – региональное оптимальное распределение ресурсов с наименьшими выбросами углекислого газа и финансовыми вложениями. Кроме того, перспективными являются исследования по ограничению использования различных ресурсов, особенно водорода.

Вклад авторов: концептуализация, А.Б. и Ю.М.; методология, Ю.М.; валидация, А.К.; формальный анализ, А.Б. и Ю.М.; исследование, А.С. и А.К.; написание – подготовка первоначального проекта, А.Б., А.К. и Ю.М.; написание-первоначальная подготовка проекта, Ю.З. и П.Ц.; рецензирование и редактирование, Ю.З. и П.Ц.; визуализация, А.Б. и Ю.З.; наблюдение, курирование данных, П.Ц.; администрирование проекта, Ю.З. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации, номер проекта НШ-2692.2020.5 «Моделирование эколого-сбалансированного и экономически устойчивого освоения углеводородных ресурсов Арктики».

Конфликты интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Cherepovitsyn, A.; Rutenko, E.; Solovyova, V. Sustainable Development of Oil and Gas Resources: A System of Environmental, Socio-Economic, and Innovation Indicators. *J. Mar. Sci. Eng.* 2021, 9, 1307. <http://doi.org/10.3390/jmse9111307>
2. Tsvetkov, P. Climate Policy Imbalance in the Energy Sector: Time to Focus on the Value of CO2 Utilization. *Energies* 2021, 14, 411. <http://doi.org/10.3390/en14020411>
3. Delakhova, A.M.; Grigoriev, E.P. Analysis of peculiarities of the food supply of the population of the northern regions. *Vector Econ.* 2021, 11, 244–248.
4. President of Russia. Decree of the President of the Russian Federation of October 26, 2020. “Strategy of Development of the Arctic Zone of the Russian Federation and Ensuring National Security for the Period Up to 2035”. Available online: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/45972> (accessed on 18 October 2021).
5. NAVY. Northern Fleet. Operational-Strategic Association of the Russian Navy. Available online: <https://flot.com/nowadays/structure/north/> (accessed on 18 October 2021).
6. TASS. ROSATOM Plans to Start Producing Hydrogen at Kola NPP in 2023. Available online: <https://rosatom.ru/journalist/smiabout-industry/rosenergoatom-planiruet-v-2023-godunachat-proizvodstvo-vodoroda-na-kolskoy-aes/> (accessed on 18 October 2021).

7. Chan, F.T.; Stanislawczyk, K.; Sneekes, A.C.; Dvoretzky, A.; Gollasch, S.; Minchin, D.; David, M.; Jelmert, A.; Albrechtsen, J.; Bailey, S.A. Climate change opens new frontiers for marine species in the arctic: Current trends and future invasion risks. *Glob. Chang. Biol.* 2019, 25, 25–38. <http://doi.org/10.1111/gcb.14469> <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/30295388>
8. Tolvanen, A.; Eilu, P.; Juutinen, A.; Kangas, K.; Kivinen, M.; Markovaara-Koivisto, M.; Naskali, A.; Salokannel, V.; Tuulentie, S.; Similä, J. Mining in the arctic environment – A review from ecological, socioeconomic and legal perspectives. *J. Environ. Manag.* 2019, 233, 832–844. <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.124>
9. Treharne, R.; Bjerke, J.W.; Tømmervik, H.; Stendardi, L.; Phoenix, G.K. Arctic browning: Impacts of extreme climatic events on heathland ecosystem CO₂ fluxes. *Glob. Chang. Biol.* 2019, 25, 489–503. <http://doi.org/10.1111/gcb.14500>
10. Abahussain, M.M.; Christie, R.D. Optimal scheduling of a natural gas processing facility with Price-based Demand Response. In Proceedings of the 2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Vancouver, BC, Canada, 21–25 July 2013. <http://doi.org/10.1109/pesmg.2013.6672280>
11. Zendehboudi, A.; Baseer, M.; Saidur, R. Application of support vector machine models for forecasting solar and wind energy resources: A review. *J. Clean. Prod.* 2018, 199, 272–285. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.164>
12. 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>
13. Sánchez-Úbeda, E.F.; Berzosa, A. Modeling and forecasting industrial end-use natural gas consumption. *Energy Econ.* 2007, 29, 710–742. <http://doi.org/10.1016/j.eneco.2007.01.015>
14. Foldvik Eikeland, O.; Bianchi, F.M.; Apostoleris, H.; Hansen, M.; Chiou, Y.-C.; Chiesa, M. Predicting Energy Demand in Semi-Remote Arctic Locations. *Energies* 2021, 14, 798. <http://doi.org/10.3390/en14040798>
15. Brazovskaia, V.; Gutman, S.; Zaytsev, A. Potential Impact of Renewable Energy on the Sustainable Development of Russian Arctic Territories. *Energies* 2021, 14, 3691. <http://doi.org/10.3390/en14123691>
16. Selina, V.S.; Skufyina, T.P.; Bashmakova, E.P.; Toropushina, E.E. North and the Arctic in the new paradigm of world development: Current problems, trends, prospects. In *Scientific and Analytical Report*; KCN RAS: Apatity, Russia, 2016; p. 420.
17. Official Information Portal of the Republic of Sakha (Yakutia). Decree of the Head of the Republic of Sakha (Yakutia) “On the Strategy of Social and Economic Development of the Arctic Zone of the Republic of Sakha (Yakutia) for the Period Up to 2035” of August 14, 2020 y. № 1377. Available online: <https://www.sakha.gov.ru/news/front/view/id/3204989> (accessed on 19 October 2021).
18. Zhukovskiy, Y.L.; Batuyeva, D.E.; Buldysko, A.D.; Gil, B.; Starshaia, V.V. Fossil Energy in the Framework of Sustainable Development: Analysis of Prospects and Development of Forecast Scenarios. *Energies* 2021, 14, 5268. <http://doi.org/10.3390/en14175268>
19. National Research Council. *Hidden Costs of Energy: Unpriced Consequences of Energy Production and Use*; The National Academies Press: Washington, DC, USA, 2020. <http://doi.org/10.17226/12794>
20. Van der Roest, E.; Snip, L.; Fens, T.; van Wijk, A. Introducing Power-to-H₂: Combining renewable electricity with heat, water and hydrogen production, and storage in a neighborhood. *Appl. Energy* 2020, 257, 114024. <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114024>
21. Olkusi, T.; Suwała, W.; Wyrwa, A.; Zyśk, J.; Tora, B. Primary energy consumption in selected EU Countries compared to global trends. *Open Chem.* 2021, 19, 503–510. <http://doi.org/10.1515/chem-2021-0046>
22. IEA. Material Efficiency in Clean Energy Transitions. 2019. Available online: https://iea.blob.core.windows.net/assets/52cb5782-b6ed-4757-928fd6c3384d/Material_Efficiency_in_Clean_Energy_Transitions.pdf (accessed on 20 October 2021).
23. Tcvetkov, P. Small-scale LNG projects: Theoretical framework for interaction between stakeholders. *Energy Rep.* 2022, 8 (Suppl. 1), 928–933. <http://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.11.195>
24. Dvoynikov, M.; Buslaev, G.; Kunshin, A.; Sidorov, D.; Kraslawski, A.; Budovskaya, M. New Concepts of Hydrogen Production and Storage in Arctic Region. *Resources* 2021, 10, 3. <http://doi.org/10.3390/resources10010003>
25. Cherepovitsyn, A.; Evseyeva, O. Parameters of Sustainable Development: Case of Arctic Liquefied Natural Gas Projects. *Resources* 2021, 10, 1. <http://doi.org/10.3390/resources10010001>
26. Litvinenko, V. The Role of Hydrocarbons in the Global Energy Agenda: The Focus on Liquefied Natural Gas. *Resources* 2020, 9, 59. <http://doi.org/10.3390/resources9050059>
27. Worku, G.; Teferi, E.; Bantider, A.; Dile, Y.T. Prioritization of watershed management scenarios under climate change in the Jemma sub-basin of the Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *J. Hydrol. Reg. Stud.* 2020, 31, 100714. <http://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100714>
28. Jefferson, M. Scenario planning: Evidence to counter ‘Black box’ claims. *Technol. Forecast. Soc. Chang.* 2020, 158, 120156. <http://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120156>
29. Megan, M.G.; George, W. Delphi Method. *Wiley StatsRef Stat. Ref. Online* 2016, 1–6. <http://doi.org/10.1002/9781118445112.stat07879>
30. Linzenich, A.; Zaunbrecher, B.; Ziefle, M. “Risky transitions?” Risk perceptions, public concerns, and energy infrastructure in Germany. *Energy Res. Soc. Sci.* 2020, 68, 101554. <http://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101554>
31. Shove, E. Time to rethink energy research. *Nat. Energy* 2020, 6, 118–120. <http://doi.org/10.1038/s41560-020-00739-9>
32. Chen, K.; Ren, Z.; Mu, S.; Sun, T.; Mu, R. Integrating the delphi survey into scenario planning for China’s renewable energy development strategy towards 2030. *Technol. Forecast. Soc. Chang.* 2020, 158, 120157. <http://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120157>
33. Jones, A.W. Perceived barriers and policy solutions in clean energy infrastructure investment. *J. Clean. Prod.* 2015, 104, 297–304. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.072>
34. Cherepovitsyn, A.E.; Lipina, S.A.; Evseeva, O.O. Innovative approach to the development of mineral and raw material potential of the Arctic zone of Russia. *Notes Min. Inst.* 2018, 232, 438–444. <http://doi.org/10.31897/PMI.2018.4>
35. 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>
36. Volkov, A.V.; Bortnikov, N.S.; Lobanov, K.V.; Galyamov, A.L.; Chicherov, M.V. Deposits of strategic metals of the Arctic region. In Proceedings of the Fersman Scientific Session of the Institute of the KSC RAS 2019, Apatity, Russia, 7–10 April 2019; Volume 16, pp. 80–84. <http://doi.org/10.31241/FNS.2019.16.016>

37. Nikishin, A.M.; Petrov, E.I.; Cloetingh, S. Arctic Ocean Mega Project: Paper 3 – Mesozoic to Cenozoic geological evolution. *Earth-Sci. Rev.* 2021, 217, 103034. <http://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.103034>
38. Litvinenko, V.S.; Dvoynikov, M.V.; Trushko, V.L. Elaboration of a conceptual solution for the development of the Arctic shelf from seasonally flooded coastal areas. *Int. J. Min. Sci. Technol.* 2021, 1. <http://doi.org/10.1016/j.ijmst.2021.09.010>
39. Fedoseyev, S.V.; Tsvetkov, P.S. Key factors in public perception of carbon dioxide capture and disposal projects. *Proc. Min. Inst.* 2019, 237, 361–368. <http://doi.org/10.31897/pmi.2019.3.361>
40. GoArctic. The Arctic of Megaprojects: What's Changing in the Regions. Available online: <https://goarctic.ru/society/arktikamegaproektov-cto-menyaetsya-v-regionakh/> (accessed on 20 October 2021).
41. Chelnokova, I. The Arctic. Northern contradictions. *Kommersant* 2020, 224, 25.
42. Institute for Applied Political Solutions. Analytical Report “Single-Industry” Towns in the Arctic Zone of the Russian Federation: Problems and Opportunities for Development”. Available online: http://www.arcticandnorth.ru/Encyclopedia_Arctic/monogoroda_AZRF.pdf (accessed on 19 October 2021).
43. Ranking of Sustainable Development of the Regions of the Russian Arctic. Available online: <https://www.econ.msu.ru/sys/raw.php?o=73806&p=attachment> (accessed on 19 October 2021).
44. Khranchikhin, A.A. Military and political situation in the Arctic and possible prospects for its development. *Vestnik MSTU* 2014, 3, 606–615.
45. Government of Russia. Decree of the Government of Russian Federation from 24.05.2021 . 1338-p “On Equipping the Arctic Aviation Units of EMERCOM of Russia with Aviation Equipment”. Available online: <http://government.ru/news/42301/> (accessed on 20 October 2021).
46. Ministry of the Russian Federation for the Development of the Far East and the Arctic. Development of Distributed Geo-Nergy in FEFD and Arctic: The Profile Committee of the State Duma Supported the Proposals of FERC. Available online: <https://minvr.gov.ru/press-center/news/32116/> (accessed on 18 October 2021).
47. Young, R.O. Arctic Futures—Future Arctics? *Sustainability* 2021, 13, 9420. <http://doi.org/10.3390/su13169420>
48. Chanyasheva, A.; Kopp, P.; Romasheva, N.; Nikulina, A. Migration Attractiveness as a Factor in the Development of the Russian Arctic Mineral Resource Potential. *Resources* 2021, 10, 65. <http://doi.org/10.3390/resources10060065>
49. Carayannis, E.G.; Ilinova, A.; Cherepovitsyn, A. The Future of Energy and the Case of the Arctic Offshore: The Role of Strategic Management. *J. Mar. Sci. Eng.* 2021, 9, 134. <http://doi.org/10.3390/jmse9020134>
50. Chanyasheva, A.; Ilinova, A. The Future of Russian Arctic Oil and Gas Projects: Problems of Assessing the Prospects. *J. Mar. Sci. Eng.* 2021, 9, 528. <http://doi.org/10.3390/jmse9050528>
51. Corell, R.; Kim, J.D.; Kim, Y.H.; Moe, A.; VanderZwaag, D.L.; Young, O.R. (Eds.) Arctic Resource Development: Economics and Politics. In *The Arctic in World Affairs: A North-Pacific Dialogue on Global-Arctic Interactions*; Korea Maritime Institute: Busan, Korea; East-West Center KMI and EWC: Honolulu, HI, USA, 2019; pp. 205–224.
52. Sterner, M.; Specht, M. Power-to-Gas and Power-to-X—The History and Results of Developing a New Storage Concept. *Energies* 2021, 14, 6594. <http://doi.org/10.3390/en14206594>
53. Gurieff, N. Power-to-X Renewable Resource Ecosystems. *Sustainability* 2020, 12, 8554. <http://doi.org/10.3390/su12208554>
54. Roscongress. Healthcare in the Arctic: Results of Two Years and New Goals. Available online: <https://roscongress.org/news/zdravooхранenie-arktiki-itogi-dvuh-let-i-novye-tseli/> (accessed on 18 October 2021).
55. Roscongress. Arctic Tourism in Russia Has a Chance. Available online: <https://roscongress.org/materials/u-arkticheskogoturizma-v-rossii-poyavilsya-shans> (accessed on 17 October 2021).
56. 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>
57. Lavrenko, S.A.; Shishljannikov, D.I. Performance evaluation of heading-and-winning machines in the conditions of potash mines. *Appl. Sci.* 2021, 8, 3444. <http://doi.org/10.3390/app11083444>
58. Al-falahi Monaaf, D.A.; Jayasinghe, S.D.G.; Enshaei, H. A review on recent size optimization methodologies for standalone solar and wind hybrid renewable energy system. *Energy Convers. Manag.* 2017, 43, 252–274. <http://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.04.019>
59. Turyasheva, 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>
60. OurWorld in Data. CO₂ Emissions by Fuel. Available online: <https://ourworldindata.org/emissions-by-fuel> (accessed on 20 October 2021).
61. EIA. Levelized Costs of New Generation Resources in the Annual Energy Outlook 2021. Available online: https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/electricity_generation.pdf (accessed on 20 October 2021).
62. IEA. Projected Costs of Generating Electricity. Available online: https://www.oecd-neo.org/upload/docs/application/pdf/2020-12/egc-2020_2020-12-09_18-26-46_781.pdf (accessed on 20 October 2021).
63. Bloomberg. Cost of Capital Spikes for Fossil-Fuel Producers. Available online: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2021-11-09/cost-of-capital-widens-for-fossil-fuel-producers-green-insight> (accessed on 21 October 2021).
64. IEA. The Oil and Gas Industry in Energy Transitions. Available online: <https://www.iea.org/reports/the-oil-and-gas-industryin-energy-transitions> (accessed on 23 October 2021).
65. 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 20 October 2021).
66. Phebe, A.O.; Samuel, A.S. A review of renewable energy sources, sustainability issues and climate change mitigation. *Co-Gen Eng.* 2016, 3, 1–14. <http://doi.org/10.1080/23311916.2016.1167990>
67. Gartner. Emerging Technology Roadmap for Large Enterprises 2020–2022. Available online: <https://emtemp.gcom.cloud/ngw/globalassets/en/information-technology/documents/benchmarks/emerging-tech-roadmap-le-2020-2022.pdf> (accessed on 19 October 2021).
68. 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 20 October 2021).

69. BloombergNEF. New Energy Outlook 2021. Available online: <https://about.bnef.com/blog/getting-on-track-for-net-zero-by-2050-will-require-rapid-scaling-of-investment-in-the-energy-transition-over-the-next-ten-years/> (accessed on 20 October 2021).
70. Gartner. Top Strategic Technology Trends for 2021. Available online: <https://emtemp.gcom.cloud/ngw/globalassets/en/information-technology/documents/insights/top-tech-trends-ebook-2021.pdf> (accessed on 20 October 2021).
71. 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 Storage* 2021, 42, 103040. <http://doi.org/10.1016/j.est.2021.103040>
72. Hannan, M.A.; Faisal, M.; Ker, P.J.; Begum, R.A.; Dong, Z.Y.; Zhang, C. Review of optimal methods and algorithms for sizing energy storage systems to achieve decarbonization in microgrid applications. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2020, 131, 110022. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110022>
73. Tung, K.-K.; Zhou, J. Using data to attribute episodes of warming and cooling in instrumental records. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 2012, 110, 2058–2063. <http://doi.org/10.1073/pnas.1212471110> <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23345448>
74. Kohn, N.W.; Smith, S.M. Collaborative fixation: Effects of others' ideas on brainstorming. *Appl. Cogn. Psychol.* 2010, 25, 359–371. <http://doi.org/10.1002/acp.1699>
75. Anthony, J.; Gibson, A. *Sustainability in Engineering Design*; Academic Press: Waltham, MA, USA, 2014.
76. Al-Samarraie, H.; Hurmuzan, S. A review of brainstorming techniques in higher education. *Think. Ski. Creat.* 2018, 27, 78–91. <http://doi.org/10.1016/j.tsc.2017.12.002>
77. Vasilyeva, N.V.; Boikov, A.V.; Erokhina, O.O.; Trifonov, A.Y. Automated digitization of radial charts. *J. Min. Inst.* 2021, 247, 82–87. <http://doi.org/10.31897/PMI.2021.1.9>
78. Koteleva, N.; Buslaev, G.; Valnev, V.; Kunshin, A. Augmented Reality System and Maintenance of Oil Pumps. *Int. J. Eng.* 2020, 33, 1620–1628. <http://doi.org/10.5829/ije.2020.33.08b.20>
79. Shabalov, M.Y.; Zhukovskiy, Y.L.; Buldysko, A.D.; Gil, B.; Starshaia, V.V. The influence of technological changes in energy efficiency on the infrastructure deterioration in the energy sector. *Energy Rep.* 2021, 7, 2664–2680. <http://doi.org/10.1016/j.egy.2021.05.001>
80. Rosstat. Available online: <https://rosstat.gov.ru> (accessed on 20 October 2021).