

ОЦЕНКА СПОСОБОВ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЛУОСТРОВА ЯМАЛ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОГО МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО АНАЛИЗА¹

Аннотация. Важнейшим условием полноценного вовлечения вновь осваиваемой территории является обеспечение ее полезной энергией. Для территорий нового освоения, таких как полуостров Ямал, существуют различные энергетические альтернативы. В настоящей статье на основе известных базовых подходов разработана процедура формализации анализа альтернатив на основе преимущественно качественной исходной информации. На предпроектной стадии приходится действовать в условиях ограниченной и нечеткой информации, сконцентрированной в основном в экспертном опыте. Для решения задачи отобраны шесть критериев для экспертных оценок. Их обработка проведена с использованием нечетких моделей многокритериального выбора на основе нечеткого многокритериального анализа вариантов, позволяющих формализовать логические рассуждения с расплывчатыми или неточными утверждениями. Поскольку в таких условиях отсутствует достаточный для конструирования нечетких множеств набор измеримых свойств, успешно выполнена формализация лингвистических оценок интуитивных или логических попарных сравнений с использованием схемы Беллмана – Заде, шкалы Саати и построения функций принадлежности. Искомое нечеткое множество получено нахождением собственного вектора и наибольшего собственного числа для матрицы попарных сравнений. Логика выбора варианта строится по максиминному критерию, дополненному методом матрицы уступок, позволяющим различить альтернативы при получении одинаковых или близких их оценок. В результате исследования выявлена приоритетность диверсификации первичных энергоносителей для обеспечения полезной энергией потребителей Ямала. Таким диверсифицирующим выбором энергоисточника, согласно проведенному модельному эксперименту, оказалось предпочтение атомной энергии. На втором месте по предпочтительности – газотурбинные технологии, существенно опережающие ветроэнергетические источники. Замыкают ряд по предпочтительности дизель-генераторные установки. Таким образом, результаты моделирования в нечеткой среде хорошо коррелируются с объясняющими факторами выбора. Включение метода нечетких множеств с преобразованием лингвистических оценок в количественные в модельно-методический аппарат многокритериального выбора возможно и в отношении комбинированных вариантов. Результаты работы могут быть использованы при подготовке комплексных стратегий и схем размещения отрасли специализации и ее энергетической инфраструктуры для удаленных арктических территорий.

Ключевые слова: предпроектные исследования, многокритериальный анализ, нечеткие множества, шкала Саати, экспертные оценки, инфраструктура арктических территорий нового освоения, энергоисточники

Благодарность

Работа выполнена соответствии с планом научных исследований Института экономики УрО РАН на 2022 год.

Для цитирования: Петров М.Б., Серков Л.А., Кожов К.Б. (2022). Оценка способов энергообеспечения полуострова Ямал на основе нечеткого многокритериального анализа. *Экономика региона*, 18, 4. С. 1209-1222. <https://doi.org/10.17059/ekon.reg.2022-4-17>.

¹ © Петров М. Б., Серков Л. А., Кожов К. Б. Текст. 2022.

Mikhail B. Petrov ^{a)}  , Leonid A. Serkov ^{b)} , Konstantin B. Kozhov ^{c)} 

Institute of Economics of the Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russian Federation

Assessment of Energy Supply to the Yamal Peninsula Based on Fuzzy Multicriteria Analysis

Abstract. Provision of useful energy is the most important condition for realising the potential of underdeveloped regions. For new development areas, including the Yamal Peninsula, there are various energy alternatives. Based on well-known basic approaches, the article presents a procedure for formalising the analysis of alternatives mostly using qualitative initial data. At the pre-project stage, only limited and fuzzy information (predominantly in the form of expert opinions) is accessible. To achieve the set goal, six criteria for expert assessment were selected and further processed using fuzzy multicriteria decision-making models based on fuzzy multicriteria analysis of alternatives in order to formalise logical reasoning with vague or imprecise statements. Due to insufficient measurements for constructing fuzzy sets, linguistic estimates of intuitive or logical pairwise comparisons were formalised using the Bellman–Zadeh model, the Saaty scale and the construction of membership functions. The fuzzy set was obtained by finding the eigenvector and the largest eigenvalue for the pairwise comparison matrix. Implementation of the maximin criterion along with the concession matrix allowed us to distinguish between alternatives when obtaining the same or similar estimates. As a result, the study showed the priority of diversification of primary energy source to provide useful energy to consumers in Yamal. According to the model, the most preferable source is atomic energy. In second place are gas turbine technologies, which are significantly ahead of wind energy sources. Diesel generators are considered the least favourable. Thus, the results of fuzzy modelling correspond with the explanatory factors of choice. The fuzzy set method with the transformation of linguistic estimates into quantitative ones can also be included in the apparatus of multicriteria selection with respect to combined options. The research findings can be used to prepare comprehensive strategies and schemes for location of industries and the energy infrastructure in remote Arctic territories.

Keywords: pre-project research, multicriteria analysis, fuzzy sets, Saaty scale, expert opinions, infrastructure of new development areas in the Arctic, energy sources

Acknowledgments

The article has been prepared in accordance with the plan of the Institute of Economics of the Ural Branch of RAS for 2022.

For citation: Petrov, M. B., Serkov, L. A. & Kozhov, K. B. (2022). Assessment of Energy Supply to the Yamal Peninsula Based on Fuzzy Multicriteria Analysis. *Ekonomika regiona / Economy of regions*, 18(4), 1209-1222, <https://doi.org/10.17059/ekon.reg.2022-4-17>.

Введение

Полуостров Ямал в настоящее время — наиболее интересный для крупных проектов арктический полуостров, что вызвано сочетанием его нескольких фундаментальных особенностей. Это перспективнейший и богатейший нефтегазовыми ресурсами участок суши и шельфа вокруг, географически находящийся в продолжение на север Урала, а значит, относящийся к наиболее западной (сравнительно теплой) части вновь осваиваемого арктического побережья России. Ямал — наиболее северный выступ суши в уральском секторе Арктики, который становится исторически следующим после побережья Баренцева моря входом в Северный Ледовитый океан. Таким образом, на этой территории сходятся различные предпосылки для концентрированного крупномасштабного развития (Лаженцев,

2018; Лексин, 2017; Жуков, 2021; Петров, 2021). Такая концентрация означает пространственный, геостратегический характер развития, через этот район пересекаются направления «север — юг» и «запад — восток», которые со временем станут большими транспортными коридорами, расширяющими на АЗРФ решетчатую структуру транспортной сети. Кроме того, вокруг Ямала будут появляться порты различного назначения. Возможность их создания там обеспечена строительством новейшего ледокольного флота для потребностей Северного морского пути (СМП). Строящиеся арктические порты будут иметь различное назначение, в том числе для перевалки грузов, в первую очередь, нефтегазовых, а также для обеспечения навигации по СМП и каботажного сообщения вдоль осваиваемых участков побережья.

В основе пространственного развития новых территорий лежит создание базовых транспортных и энергетических инфраструктурных объектов. Данная статья посвящена качественной оценке возможных приоритетных путей энергообеспечения таких территорий. Речь идет о формировании методического подхода к отбору способов обеспечения электрической энергией возникающих и растущих потребителей в экстремальных условиях АЗРФ, учитывающем множественность критериев принятия предпроектных решений. Каждый из рассматриваемых здесь способов энергообеспечения основан на использовании того или иного первичного энергоресурса из доступного для условий Ямала набора.

Актуальность такого подхода определяется двумя моментами. Во-первых, территория, о которой идет речь, богата добываемым здесь природным газом, однако научно-технический прогресс в энергетике создает альтернативы, с которыми нужно соотносить традиционные решения, ориентированные в основном на использование газа. Во-вторых, современный период характеризуется возрастанием турбулентности, резко обостряющей проблемные ситуации, которые требуют скорых и новых по содержанию решений.

В силу этого необходимые на первых этапах предпроектной фазы качественный анализ и оценка, которые всегда проводятся в условиях неполной информации, должны проходить в более широком контексте, учитывающем нетрадиционные технологические возможности, которые в состоянии обеспечить промышленность России. Поэтому в статье использована методика нечеткого многокритериального анализа альтернативных способов энергообеспечения Ямала с целью выбора лучшего варианта из расширенного круга альтернатив (Моделирование состояния..., 2004).

В статье поставлены и решены две задачи:

1) проверка гипотезы о возможности использования экспертных оценок для систематизации нечеткой и малодостоверной информации в целях многокритериального приоритетного выбора типа энергоисточника;

2) проверка интуитивного предпочтения энергообеспечения на основе газа как основного топлива для энергетики Ямала в связи с тем, что Ямал — газодобывающий регион, где на пионерном этапе освоения территорий традиционно использовались газотурбинные электростанции (ГТЭС).

Предполагаемые возможные способы энергообеспечения потребителей Ямала основаны

на четырех видах энергоресурсов: природный газ, дизельное топливо, энергия ветра и атомная энергия. Газ добывается на месторождениях Ямала и имеет общенациональное значение и в больших объемах экспортируется, в том числе в виде сжиженного природного газа (СПГ). При этом возрастает его альтернативная ценность в качестве химического сырья. Однако рост добычи и время эксплуатации ранее введенных месторождений ведут и к росту остаточных ресурсов низконапорного газа, эффективного для местной энергетики. Этот известный факт и лежит в основе интуитивного предположения о самой высокой эффективности газового варианта.

Дизельное топливо — традиционно первый при новом освоении ресурс, имеющий много ограничений для его последующего применения как энергоресурса в возрастающих масштабах (зависимость от северного завоза, экологическое загрязнение, рост относительной стоимости).

В прибрежной зоне Ямала сосредоточен значительный ветропотенциал. Попытки его задействования в производстве электроэнергии в значительных масштабах стали предприниматься в мире и обусловлены стремлением снизить углеродный след и освоить зеленые технологии. Однако еще не отработаны технические решения по предотвращению обледенения конструктивных элементов ветроэнергетических установок. Но при этом нарастают установленные ветроэнергетические мощности в различных регионах страны, пока в зонах теплого и умеренного климата, где не возникает значимых обледенений.

Атомная энергия введена в число первичных энергоисточников для расширения числа вариантов для экспертной оценки, поскольку в стране наряду с крупными атомными энергоблоками на АЭС активно создаются все новые способы ее использования для различных нужд, в том числе с относительно небольшими мощностями, в частности, для Арктики.

Сравниваемые в исследовании способы энергообеспечения не предполагают сочетания в одном способе двух и более видов первичных энергоресурсов в целях наиболее яркого отражения в используемом методе их специфических особенностей, а также возможности масштабирования. Пока на Ямале работают лишь маломощные установки и на газе, и на дизельном топливе, и даже на ветре. Нет пока лишь атомных энергоустановок. Их введение в наше сравнение связано с ключевой гипотезой о долговременном росте электропо-

требления Ямала, которая сейчас подтверждается ускоренным развитием производства и транспортировки СПГ, в том числе на экспорт. В перспективе будет здесь создано производство водорода и синтез-газа для дальнейшей переработки в диметиловый эфир и другой продукции газохимии. Поэтому ориентировочный масштаб установленной мощности одного энергообъекта, мы полагаем, порядка 100 МВт. При этом маломощные ветрогенераторы могут быть объединены в ветропарки, а столь же маломощные дизельные энергоустановки — в «дизельные парки». Для резервирования таких мощностей обычно используется электрическая сеть, через которую новые установки могут быть включены в энергосистему. Таким образом, рассматриваемые способы, вводимые в модель, находятся в равных условиях. Следовательно, корректен многокритериальный анализ вариантов.

Среди критериев, по которым предлагалось экспертам дать свои оценки значились эксплуатационные издержки, потребность в инвестициях на капитальные вложения, экологичность, энергобезопасность, требования к внешней инфраструктуре и технологическая перспективность.

Инвестиции часто оказываются лимитирующим фактором при выборе решений, рассматриваемые способы могут быть неравноценны с точки зрения концентрации инвестиционных вложений.

Очевидным представляется критерий минимизации эксплуатационных издержек. Среди рассматриваемых способов представлены как такие, где текущие затраты совсем малы, так и те, для которых они значительны.

Требования к внешней инфраструктуре учитывают различия способов с позиции организации полного жизненного цикла объектов, транспортных схем, критичных для удаленного и малоосвоенного региона.

Энергобезопасность — императив надежного и бесперебойного энергоснабжения, тем более для условий АЗРФ.

Экологичность связывается с особой уязвимостью природы Крайнего Севера и введением в рассмотрение возобновляемого источника энергии.

Критерий технологической перспективности учитывает ценность наращиваемого принятием того или иного способа ресурсно-технологического потенциала национальной экономики.

Таким образом, эти шесть критериев были отобраны для экспертных оценок.

Степень проработанности проблемы

Обоснование развития электроэнергетики включает много стадий, на каждой из которых уточняются решения, полученные на предыдущих стадиях. Неизменным атрибутом этого процесса выступает необходимость рассмотрения и оценки многих факторов в условиях сценарной неопределенности будущего (Волькенау, 2005; Волков, 2006; Макаров, 2020).

Подготовка основополагающих решений в сфере развития энергетики, каким является и рассматриваемый здесь вопрос о выборе способов энергообеспечения особых территорий, всегда сопровождалась применением широкого арсенала методов системного анализа, исследования операций, математической статистики и других фундаментальных дисциплин (Мелентьев, 1983). Вынужденная пауза в ходе интенсивного процесса развития систем, вызванная рыночной эйфорией 1990-х — 2000-х гг., несколько снизила интерес отрасли к этим системным методам в силу ослабления системных свойств электроэнергетики в этот период. При этом не возникло потребности в каких-то принципиально новых методах поддержки принятия решений, поскольку оказались утраченными масштаб и системность этих решений. Там, где те или иные сравнительно локальные решения требовали серьезного моделирования, успешно применялись адаптированные подходы и инструментарий к отраслевому развитию.

В это же время процессы обоснования энергетических проектов сопровождались усилением внимания к вопросам учета неопределенности и рисков (Домников, 2014; Инновационная электроэнергетика..., 2017; Обоснование развития..., 2015; Пизенгольц, 2022).

Новой доминантой выбора вариантов стала множественность несопадающих интересов стейкхолдеров. Эпицентр проектных инициатив понизился до микроуровня, а значит, пошли в ход преимущественно методы оптимизации экономических результатов компаний, а также методы имитации различных структур рыночного предложения и спроса (Робинсон, 1986). Проведенная в начале этого пути реструктуризация ЕЭС как раз и имела своей целью развитие конкурентных отношений взамен естественной монополии электроэнергетики. Критерием успеха такого процесса должно было стать снижение цен и тарифов на тепловую и электрическую энергию

(Кутовой, 2000). Однако на практике этого не произошло, и со временем нарастает интерес к методам системного анализа. Между тем, остается практически нерешенным ключевой вопрос о новом механизме управления развитием.

Начиная со времени структурного реформирования электроэнергетики претерпела радикальную трансформацию сама методология обоснования развития отрасли. До реформирования развитие систем обосновывалось и реализовывалось в масштабах единой энергетической системы России (ЕЭС). На это работала подсистема организаций по управлению развитием. В результате перехода от государственно-плановой системы к рынку, приватизации электростанций, сгруппированных в генерирующие компании (оптовые (ОГК) и территориальные (ТГК)), она оказалась разрушенной. Предполагалось, что на ее место придет новый механизм разработки проектных инициатив, выдвижения вариантов их воплощения, их сравнения по заданию заказчика, последующего технического проектирования, выбора генподрядчика, строительства и монтажа, пуска и наладки готового объекта энергетики, сдачи заказчику с использованием конкурсных процедур. Однако на деле нет надежных механизмов возникновения реализуемых проектных инициатив и их заказчиков по энергогенерирующему комплексу. Кроме того, неясен механизм координации проектов генерирующих мощностей между собой, а значит, отсутствует возможность оптимизации и комплексного развития. В этих условиях затруднены предпроектные масштабные обоснования, и даже после введения обязательной подготовки региональными органами власти ежегодных схем и программ перспективного развития электроэнергетики (СИПРЭ) отсутствует действенный механизм их воплощения. Таким образом, инициатива создания новых генерирующих мощностей была отдана ОГК и ТГК. ОГК создавались в форме АО, преимущественно с частным, в том числе иностранным, капиталом. Для их стимулирования к этому вводились ограниченные во времени специальные режимы и процедуры, в частности заключение договоров о предоставлении мощности (ДПМ). Генерирующие компании получили выход на оптовый рынок электроэнергии и мощности (ОРЭМ), и механизм ДПМ гарантировал им возврат капиталовложений в обновление основных производственных фондов при реконструкции и новом строительстве электростанций.

Управление системами отечественной энергетики традиционно сопоставлялось с управлением энергетикой США, где выбор вариантов развития основывается на интегрированном планировании ресурсов, которое и в России может быть востребованным в обстановке конфликтности интересов стейкхолдеров с целью обеспечения выигрыша всех заинтересованных сторон (Yeh, 2017).

В условиях либерализации и дерегулирования существенно возрастает неопределенность, которая является атрибутом любых перспективных решений. Но если краткосрочная неопределенность преодолевается путем учета рисков на основе, в частности, метода статистических испытаний, то долгосрочная, свойственная объекту исследования данной статьи, требует иных, преимущественно непараметрических методов (Samanlioglu, 2017; Vovo, 2007). Долгосрочная неопределенность предполагает оценку решений в рамках сценариев как совокупности независимых от субъектов принятия решения обстоятельств. Такими экзогенными обстоятельствами в нашем случае выступают тенденции роста электропотребления, особенности ценообразования на первичные энергоресурсы, технологические прогнозы в отношении оборудования и др. Для решения поставленной в статье задачи используется метод, основанный на нечеткой логике (Limbu, 2007; Hu Zhaoguang, 2002; Sasaki, 1999).

Методика исследования

Для решения поставленной задачи в статье использовался подход на основе нечетких моделей многокритериального выбора, который сформировал основу для более систематического и рационального принятия решений в ситуации, когда необходимо учитывать несколько критериев. Этот подход основан на работах Беллмана — Заде (Беллман, 1976).

Данный метод включает в себя процедуру нечеткого многокритериального анализа вариантов и предназначен для формализации логических рассуждений с расплывчатыми или неточными утверждениями.

Объектной частью нечеткой логики являются нечеткие множества, с помощью которых описывается неопределенность и нечеткость. Формально нечеткое множество Θ является упорядоченной парой $\langle X, \mu_{\Theta}(x) \rangle$, где x является элементом носителя исходного множества X , а $\mu_{\Theta}(x)$ — степень принадлежности, которая ставит с помощью функции принадлежности в соответствие каждому из элементов $x \in X$

некоторое действительное число из интервала $[0,1]$ (Штовба, 2007; Леоненков, 2005).

Так как в исследуемой задаче отсутствуют измеримые свойства, необходимые для конструирования нечетких множеств, в рамках подхода Беллмана — Заде используется метод интуитивных или логических попарных сравнений, которые формируют симметричную диагональную матрицу с взаимно обратными элементами. В этом случае получение нечеткого множества сводится к нахождению собственного вектора w , которому соответствует наибольшее собственное значение матрицы попарных сравнений λ_{\max} , являющееся решением уравнения:

$$\begin{aligned} A \cdot w &= \lambda_{\max} \cdot w, \quad w = (w_1, w_2, \dots, w_n), \\ w_1 + w_2 + \dots + w_n &= 1, \end{aligned} \quad (1)$$

где n — число элементов нечеткого множества.

Заметим, что ранее описываемый подход на основе нечеткой модели многокритериального выбора использовался авторами предлагаемой статьи в работе (Петров и др., 2022) при выборе приоритетных проектов развития транспортной сети. Поэтому подробно и поэтапно процедура нечеткого многокритериального анализа описана в данной публикации и в следующем разделе. Следует отметить, что при выборе определенного варианта проекта должна быть соблюдена определенная последовательность выбора вариантов. В цитируемой работе (Петров, et al., 2022) при выборе различных вариантов проектов развития транспортной сети использовался максиминный подход, который не может различать довольно близкие альтернативные варианты проектов или просто выдает одинаковые оценки альтернатив. Поэтому в предлагаемой статье максиминный подход дополнен методом матрицы уступок (Чернов, 2001), позволяющим, с одной стороны, подтвердить оценки максиминного подхода, а с другой стороны, при одинаковых или близких оценках альтернатив различить их. Подробное описание этого метода также представлено в следующем разделе. Дополнение максиминного подхода методом матрицы уступок является методической новизной работы.

Отметим также, что процедура нечеткого многокритериального анализа широко используется при оценке эффективности бренд-проектов (Штовба, 2007), инвестиционных проектов выбора продуктовых и производственных программ (Mahjouri, 2017; Zimmer, 2017; Alaqeel, 2018).

Результаты исследования и их обсуждение

Экспериментальная часть исследования построена на привлечении большой группы экспертов — научных работников и практиков в сфере различных вопросов энергетического обеспечения территорий и имеющих значительный опыт в проектировании, строительстве, эксплуатации энергетических объектов (в том числе в северных и арктических регионах), изготовлении основного энергетического оборудования, экономической оценке последствий реализации энергетических проектов. Таким образом, разнаправленность специализаций круга экспертов соответствует многокритериальности изучаемой проблемы. В результате был сформирован экспертный пул из 56 специалистов в этих столь различных вопросах. При этом учитывались разные уровни их квалификации и статусности через коэффициенты значимости в диапазоне от 0,3 до 1. Каждый из них ответил на вопросы о ранжировании критериев, ранжировании способов энергообеспечения Ямала, бинарного упорядочения способов и степени предпочтительности в каждой из пар способов, выраженной в лингвистических оценках. При обработке этих ответов нами была применена шкала Саати (табл. 1) и построены средневзвешенные бинарные отношения и ранги по критериям (табл. 2).

Предполагаемые возможные способы энергообеспечения потребителей Ямала основаны на следующих видах энергоресурсов: природный газ, дизельное топливо, энергия ветра и атомная энергия. Поэтому множество вариантов энергообеспечения (проектов), которые подлежат многокритериальному анализу, включает четыре элемента $\mathbf{P} = \{P_1, P_2, \dots, P_4\}$, где элемент P_1 соответствует ветроэлектростанциям, P_2 — газотурбинным электростанциям, P_3 — дизельным электростанциям, P_4 — плавучим атомным электростанциям.

Оценка различных вариантов энергообеспечения включает в себя множество из шести критериальных элементов. Элемент G_1 соответствует потребности в инвестициях на капитальные вложения в проект, G_2 — эксплуатационным издержкам, G_3 — экологичности проекта, G_4 — технологической перспективности проекта, G_5 — энергобезопасности проекта, G_6 — требованиям к внешней инфраструктуре проекта.

Обработка экспертных мнений относительно четырех вариантов проектов по шести критериям проведена на основе шкалы оценки преимуществ (Саати, 1993). Таким образом,

Таблица 1
Оценка преимуществ вариантов по шкале Саати
Table 1

Assessment of the benefits of alternatives

№	Вид преимущества	Оценка
1	Нет преимущества	1
2	Слабое преимущество	3
3	Существенное преимущество	5
4	Абсолютное преимущество	7

Таблица 2
Парные сравнения вариантов проектов по шкале Саати
Table 2

Pairwise comparisons of project options on the Saaty scale

№	Варианты	Лучший вариант	Преимущество	Оценка
G_1				
1	1-2	1	Существенно	5
2	1-3	3	Абсолютно	1/7
3	1-4	1	Существенно	5
4	2-3	2 = 3	Нет	1
5	2-4	2	Существенно	5
6	3-4	3	Существенно	5
G_2				
1	1-2	1	Существенно	5
2	1-3	1	Существенно	5
3	1-4	1	Существенно	5
4	2-3	2	Абсолютно	7
5	2-4	4	Слабо	1/3
6	3-4	4	Абсолютно	1/7
G_3				
1	1-2	1	Существенно	5
2	1-3	1	Абсолютно	7
3	1-4	1 = 4	Нет	1
4	2-3	2	Существенно	5
5	2-4	4	Существенно	1/5
6	3-4	4	Абсолютно	1/7
G_4				
1	1-2	1	Существенно	5
2	1-3	1	Абсолютно	7
3	1-4	4	Слабо	1/3
4	2-3	2	Слабо	3
5	2-4	4	Существенно	1/5
6	3-4	4	Абсолютно	1/7
G_5				
1	1-2	2	Слабо	1/3
2	1-3	3	Существенно	1/5
3	1-4	4	Абсолютно	1/7
4	2-3	3	Слабо	1/3
5	2-4	4	Существенно	1/5
6	3-4	4	Существенно	1/5
G_6				
1	1-2	1	Существенно	5
2	1-3	1	Слабо	3
3	1-4	4	Слабо	1/3
4	2-3	3	Слабо	1/3
5	2-4	4	Абсолютно	1/7
6	3-4	4	Существенно	1/5

в таблицу 2 занесены обработанные по Саати средневзвешенные экспертные оценки.

Обработанным экспертным данным соответствуют следующие матрицы парных сравнений размерностью 4×4 для каждого критерия (записанные в строковой форме):

$$A(G_1) = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 1/7 & 5; \\ 1/5 & 1 & 1 & 5; \\ 7 & 1 & 1 & 5; \\ 1/5 & 1/5 & 1/5 & 1 \end{bmatrix},$$

$$A(G_2) = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 5 & 5; \\ 1/5 & 1 & 7 & 1/3; \\ 1/5 & 1/7 & 1 & 1/7; \\ 1/5 & 3 & 7 & 1 \end{bmatrix},$$

$$A(G_3) = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 7 & 1; \\ 1/5 & 1 & 5 & 1/5; \\ 1/7 & 1/5 & 1 & 1/7; \\ 1 & 5 & 7 & 1 \end{bmatrix},$$

$$A(G_4) = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 7 & 1/3; \\ 1/5 & 1 & 3 & 1/5; \\ 1/7 & 1/3 & 1 & 1/7; \\ 3 & 5 & 7 & 1 \end{bmatrix},$$

$$A(G_5) = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 1/5 & 1/7; \\ 3 & 1 & 1/3 & 1/5; \\ 5 & 3 & 1 & 1/5; \\ 7 & 5 & 5 & 1 \end{bmatrix},$$

$$A(G_6) = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 3 & 1/3; \\ 1/5 & 1 & 1/3 & 1/7; \\ 1/3 & 3 & 1 & 1/5; \\ 3 & 7 & 5 & 1 \end{bmatrix}.$$

В приведенных матрицах все элементы соответствуют требованиям метода по условиям диагональности и обратной симметричности матриц. На основании уравнения (1) получаем нечеткие множества всех критериев:

$$\tilde{G}_1 = \{0.27 \ 0.18 \ 0.51 \ 0.04\},$$

$P_1 \ P_2 \ P_3 \ P_4$

$$\tilde{G}_2 = \{0.58 \ 0.14 \ 0.05 \ 0.23\},$$

$P_1 \ P_2 \ P_3 \ P_4$

$$\tilde{G}_3 = \{0.42 \ 0.12 \ 0.04 \ 0.42\},$$

$P_1 \ P_2 \ P_3 \ P_4$

$$\tilde{G}_4 = \{0.31 \ 0.09 \ 0.05 \ 0.55\},$$

$P_1 \ P_2 \ P_3 \ P_4$

$$\tilde{G}_5 = \{0.05 \ 0.11 \ 0.22 \ 0.62\},$$

$P_1 \ P_2 \ P_3 \ P_4$

$$\tilde{G}_6 = \{0.26 \ 0.06 \ 0.11 \ 0.57\}.$$

$P_1 \ P_2 \ P_3 \ P_4$

Далее эти нечеткие множества преобразованы с целью учета в них относительной важности критериев оценки вариантов энергообеспечения. Так как у нас 6 критериев, упорядоченных каждым из экспертов по убыванию значимости, имеем шестибальную шкалу. В та-

Таблица 3
 Ранжирование критериев по их значимости
 Table 3
 Ranking criteria according to their significance

№	Критерий	Ранг
1	Капиталовложения	3
2	Издержки	1
3	Экология	4
4	Технология	6
5	Энергобезопасность	5
6	Внешняя инфраструктура	2

блице 3 приведены обработанные средневзвешенные ранги.

Приведенным в таблице 3 оценкам критериев соответствует следующая матрица парных сравнений размерностью 6×6 :

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 3/4 & 1/2 & 3/5 & 3/2; \\ 1/3 & 1 & 1/4 & 1/6 & 1/5 & 1/2; \\ 4/3 & 4 & 1 & 4/6 & 4/5 & 2; \\ 2 & 6 & 6/4 & 1 & 6/5 & 3; \\ 5/3 & 5 & 5/4 & 5/6 & 1 & 5/2; \\ 2/3 & 2 & 1/2 & 1/3 & 2/5 & 1]. \end{bmatrix}$$

Этой матрице соответствуют следующие нормализованные степени относительной важности критериев, полученные из уравнения (1):

$$\begin{aligned} a_1 &= 0.1429; \\ a_2 &= 0.0476; \\ a_3 &= 0.1905; \\ a_4 &= 0.2857; \\ a_5 &= 0.2385; \\ a_6 &= 0.0952, \end{aligned}$$

где a_1, a_2, \dots, a_6 — степени относительной важности критериев $G = \{G_1, G_2, \dots, G_6\}$. Для получения итоговых нечетких множеств критериев с учетом их важности необходимо каждый элемент этих множеств возвести в степень с показателем, равным степени относительной важности критериев (Awasthi, 2018; Khorasani, 2018).

$$\begin{aligned} \tilde{G}_1^{a_1} &= \{0.8325 \quad 0.7866 \quad 0.9100 \quad 0.6372\}, \\ &\quad P_1 \quad P_2 \quad P_3 \quad P_4 \\ \tilde{G}_2^{a_2} &= \{0.9731 \quad 0.9064 \quad 0.8609 \quad 0.9292\}, \\ &\quad P_1 \quad P_2 \quad P_3 \quad P_4 \\ \tilde{G}_3^{a_3} &= \{0.8480 \quad 0.6684 \quad 0.5425 \quad 0.8480\}, \\ &\quad P_1 \quad P_2 \quad P_3 \quad P_4 \\ \tilde{G}_4^{a_4} &= \{0.7120 \quad 0.4974 \quad 0.4105 \quad 0.8408\}, \\ &\quad P_1 \quad P_2 \quad P_3 \quad P_4 \\ \tilde{G}_5^{a_5} &= \{0.4873 \quad 0.5888 \quad 0.6953 \quad 0.8916\}, \\ &\quad P_1 \quad P_2 \quad P_3 \quad P_4 \\ \tilde{G}_6^{a_6} &= \{0.8740 \quad 0.7548 \quad 0.8019 \quad 0.9453\}, \\ &\quad P_1 \quad P_2 \quad P_3 \quad P_4 \end{aligned}$$

Для выбора наилучшего по множеству критериев варианта энергообеспечения, как отмечалось в методическом разделе, предвзительно применяется максиминный подход (Nazari, 2018), заключающийся в минимизации нечетких множеств по каждому критерию для каждого варианта и последующей максимизации полученного нечеткого множества для выбора наиболее лучшего варианта.

Операция минимизации критериев заключается в пересечении приведенных выше итоговых нечетких множеств критериев для каждого варианта. В результате получаем следующее нечеткое множество

$$\tilde{G}_{\min} = \{0.49 \quad 0.50 \quad 0.41 \quad 0.63\}, \\ P_1 \quad P_2 \quad P_3 \quad P_4$$

Анализируя полученное обычным максиминным подходом итоговое нечеткое множество можно сделать вывод о преимуществе четвертого варианта проекта в сравнении с остальными вариантами, то есть о преимуществе проекта, связанного с плавучими атомными электростанциями. Этот вариант проекта лучше других соответствует всем критериям. Но, как мы видим, оценки первого и второго вариантов практически совпадают и нельзя сказать о преимуществе любого из них над другим. Поэтому следует применить метод матриц уступок.

Для построения матриц уступок необходимо составить матрицу из нечетких множеств, показывающих, насколько полно варианты проектов $P = \{P_1, P_2, \dots, P_4\}$ отвечают критериям $G = \{G_1, G_2, \dots, G_6\}$. Эта матрица составляется из итоговых нечетких множеств критериев с учетом их важности (элементы этой матрицы округлены до второго знака после запятой). Столбцам матрицы соответствуют критерии проектов, а строкам — варианты проектов:

$$P = \begin{pmatrix} 0.83 & 0.97 & 0.85 & 0.71 & 0.48 & 0.87 \\ 0.79 & 0.91 & 0.67 & 0.50 & 0.59 & 0.75 \\ 0.91 & 0.86 & 0.54 & 0.41 & 0.70 & 0.80 \\ 0.63 & 0.93 & 0.85 & 0.84 & 0.89 & 0.95 \end{pmatrix}.$$

На основе матрицы P составляются четыре матрицы¹, соответствующие четырем альтернативным вариантам проектов. В каждой из этих матриц строка, соответствующая определенному варианту проекта, оставляется без изменений, а элементы остальных строк определяются как разность $r_{\max} - r_{ij}$, где r_{\max} —

¹ Ввиду ограниченного формата публикации матрицы не приводятся.

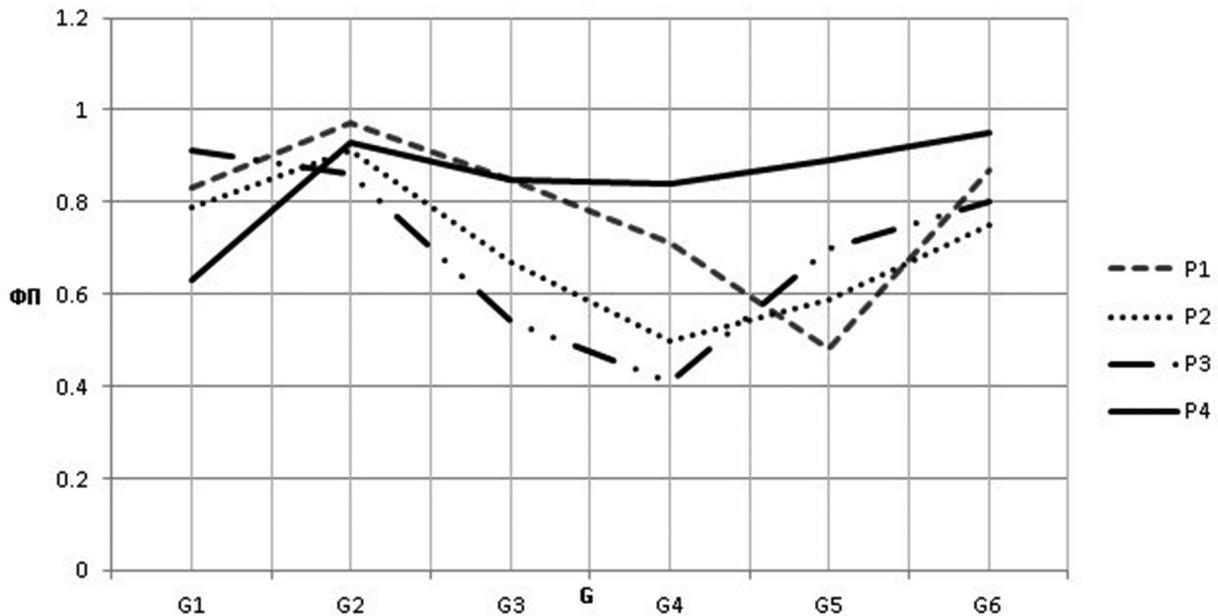


Рис. Функции принадлежности (ФП) вариантов проектов $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$ с учетом важности критериев $G = \{G_1, G_2, \dots, G_n\}$
Fig. Membership functions of project options $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$ taking into account the significance of criteria $G = \{G_1, G_2, \dots, G_n\}$

максимальное значение элемента в строке. Эти матрицы и являются матрицами уступок, а строки с элементами в виде разностей являются строками уступок в пользу строки, соответствующей данному варианту проекта.

Как уже отмечалось, оценки первого и второго вариантов практически совпадают и нельзя сказать о преимуществе каждого из них над другим. Применим метод матриц уступок к этим двум вариантам проектов. Для этого найдем минимальное значение по каждому из критериев для матриц уступок, соответствующих первой и второй альтернативе. Затем максимизируем эти минимальные значения и находим лучшую альтернативу (с большим значением). Применение метода матриц уступок позволило сделать вывод о преимуществе второго варианта проекта в сравнении с первым, так как для второго варианта проекта уровень уступок по критериям оказался больше (0.47 против 0.31).

Сравнение исследуемых вариантов проектов с учетом их важности в виде функций принадлежности представлено на рисунке. Из приведенного рисунка следует, что расстояние между вариантами проектов по наиболее важным критериям G_4, G_5 и остальными критериями намного существеннее, чем расстояние между проектами по малозначительным критериям вариантов проектов G_1, G_2, G_6 , что подтверждает правильность полученных выводов.

Таким образом, в качестве результата эксперимента получена следующая последовательность типов энергоисточников по первич-

ным энергоносителям для энергообеспечения вновь осваиваемых территорий на Ямале в порядке убывания их приоритетности: 1) плавучие атомные электростанции (ПАТЭС), 2) газотурбинные электростанции (ГТЭС), 3) ветроэлектростанции (ВЭС), 4) дизельные электростанции (ДЭС).

Наилучшим из рассматриваемых типов энергоустановки оказался вариант, реализуемый на базе плавучих атомных теплоэлектростанций (ПАТЭС). Таким образом, результаты эксперимента не совпали с нашим исходным интуитивным предположением о приоритетности газового варианта. Гипотеза, выдвинутая относительно приоритетного энергоисточника, не подтвердилась. Это неожиданный результат, который необходимо учитывать как более реальный, чем это могло казаться при традиционном взгляде на освоение Арктики как источника природных ресурсов.

Попробуем и мы дать интерпретацию причин выигрыша атомного варианта. Ясно, что они связаны с самыми новыми тенденциями в технологическом развитии страны.

Прежде всего, важным и достаточно новым обстоятельством стало то, что эксперты вывели технологический критерий на первое место по значимости. Действительно, предложенный здесь метод оправдан, в первую очередь, для наиболее полного отражения многокритериальности выбора, а технологический критерий — один из трудно формализуемых. Но без его рассмотрения многокритериальность в значительной мере теряет смысл.

Остальные, взятые здесь критерии можно ввести в расширенный экономический критерий (Мелентьев, 1983).

Исследование проведено в начале 2022 г., когда обострившееся международное противостояние с Западом перевело в открытую и явную форму необходимость восполнения российских компетенций в научно-технологической сфере. Наиболее успешный путь организации комплексного научно-технологического развития показывают государственные корпорации, в том числе ГК Росатом. Эта многопрофильная научно-техническая корпорация стала также и оператором Северного морского пути.

В качестве этого может рассматриваться российская плавучая атомная электростанция «Академик Ломоносов», эксплуатируемая в настоящее время в порту города Певек (Чукотский автономный округ) и являющаяся самой северной атомной электростанцией в мире (Родионова, 2017). Электростанция является высокотехнологичной и достаточно безопасной, что обеспечивается включенными в ее состав плавучего энергетического блока и гидротехнических сооружений. Высокая эффективность ПАТЭС по критерию внешней инфраструктуры обусловлена предложенной разработчиками проекта 20870 компоновки, включающей береговые площадки с сооружениями для выдачи потребителям производимой на станции тепловой и электрической энергии. Когенерация производимой на ПАТЭС энергии и надежность работы станции очень важна для работы в АЗРФ. Имеющиеся на станции технологии позволяют проводить работы по опреснению морской воды, что также повышает ее рейтинг по сравнению с другими рассматриваемыми в статье вариантами энергоисточников на полуострове Ямал. ПАТЭС в номинальном режиме выдает 60 МВт электрической мощности и 50 Гкал/ч тепловой энергии для нагрева теплофикационной воды, что достаточно для обеспечения нужд северного поселка с населением 100 тыс. чел., при этом нет загрязнения окружающей среды вредными выбросами в атмосферу как, например, от существующих дизельных электростанций на Ямале. Срок службы основного компонента ПАТЭС — плавучего энергетического блока (ПЭБ) составляет порядка 40 лет, ежегодное обслуживание осуществляется без вывода его из эксплуатации, что значительно уменьшает издержки по его эксплуатации по сравнению с другими энергоисточниками. По разработкам Росатома в перспективе предполагается

замена в ПЭБ реакторной установки КЛТ-40С на две модернизированные реакторные установки РИТМ-200, что позволит увеличить мощность станции до 100 МВт, а срок использования одной загрузки ядерным топливом до 10 лет, и это, несомненно, еще больше повысит эффективность данного варианта энергоисточника по сравнению с остальными.

Долговечность, надежность, технологичность эксплуатации, экологичность, возможность расширять проект дополнительными функциями обеспечивают уникальную ценность атомного варианта. Существенный недостаток — высокие капиталовложения, которые по полной стоимости строительства пилотного проекта составляли для Певека более 37 млрд руб. с учетом береговой инфраструктуры. Последующие проекты такого рода будут иметь меньшую реальную стоимость, так как возможен переход к малым сериям. К тому же это комплексное решение, где капитальные затраты также имеют комплексный характер, а эксплуатационные издержки не превышают аналогичных издержек по любому другому варианту. Таким образом, с учетом проектной долговременности эксплуатации атомный вариант может быть не худшим и по экономическому критерию.

Приступая к данной работе, мы полагали наиболее вероятным приоритетом для энергообеспечения Ямала газовый. Экспертная процедура поставила его лишь на второе место. Однако и оно достаточно приоритетно. В основе этого экономичность, доступность на Ямале первичного энергоносителя — природного газа, но на текущий момент мощные газовые турбины в основном импортные. В качестве прототипа российской турбины можно рассмотреть новую турбину ГТД-110М, которой будет оснащена ТЭС «Ударная» предприятием «Внешнеэкономическое объединение „Технопромэкспорт“», входящим в состав госкорпорации Ростех. Это первая отечественная газовая турбина большой мощности, она не имеет отечественных аналогов в классе 90–130 МВт и пока еще не запущена в серийное производство.

Ветроэлектростанции в шкале приоритетов заняли третье место. Проблемой для них является особо высокая неопределенность, зависимость от фактического наличия ветра, необходимость компоновки с накопителями, в итоге — пониженная надежность. Опыт сооружения и эксплуатации ветроэлектростанций в России имеется лишь на юге страны. Например, Кочубеевская ВЭС в Ставропольском крае. Это

ветропарк, состоящий из 84 ветроагрегатов 2,5 МВт единичной мощности. Для Арктики вариант осложняется как удорожанием строительной части, так и проблемой обледеневания. А главное, в ветроэнергетике Россия шла по догоняющему пути. Наше оборудование будет во многом копировать западные образцы, останется лишь наблюдать за ростом локализации, которая составляет пока порядка 60 %. Уход с нашего рынка западных компаний осложнит этот процесс и увеличит риски.

Наконец, дизельные источники со свойственным им низким КПД, малой единичной мощностью, неэкологичностью оказались на самых худших позициях. Выбор их для вновь осваиваемой арктической территории в качестве основного источника энергообеспечения, согласно результатам моделирования, нежелателен.

Таким образом, мы видим логическую согласованность результатов моделирования с объясняющими факторами и возможность применения метода для более сложных, в том числе комбинированных, вариантов. Шкалы Саати, переводящей лингвистические высказывания в количественную меру, оказалось достаточно для обеспечения чувствительности и адекватности полученных функций принадлежности.

Заключение

Задачей статьи являются обоснование расширенного круга источников первичной энергии для энергоснабжения вновь осваиваемых территорий на полуострове Ямал и коррекция представлений о значимости и приоритетности доступных вариантов решения. Для этого адаптирован метод формализации лингвистических переменных, отражающих эксперт-

ные предпочтения, выраженные в качественной форме.

Результатами исследования подтверждена гипотеза о возможности и целесообразности применения в составе многокритериальных обоснований формализации нечеткой логики, а реальный опыт ее применения отклонил гипотезу о приоритетности варианта, основанного на использовании основного энергетического ресурса, добываемого в больших объемах непосредственно на месте.

Сегодня снова возрастает актуальность системного подхода к развитию электроэнергетики, позволяющего принимать решения, эффективные с общегосударственных, а не только локальных или корпоративных позиций. Для этого необходимо использование методов теории принятия решений, основанных на многокритериальности решаемой задачи, а ввиду отсутствия измеримой доступной информации целесообразно применение подхода на основе нечеткой логики и оперирующего нечеткими множествами.

С помощью этих методов возможно нахождение альтернативных вариантов, удовлетворяющих различным интересам лиц, влияющих на принимаемые решения независимо от структурной организации системообразующих отраслей, одной из которых, несомненно, является энергетика.

Важный вывод проведенного нами исследования также и в том, что за счет включения дополнительного, но наиболее значимого технологического критерия, отражающего общегосударственный приоритет и состоящего в возможности получения ценных неэнергетических эффектов, обоснована диверсификация первичных энергоисточников для территории газодобывающей специализации.

Список источников

- Беллман Р., Заде Л. (1976). Принятие решений в расплывчатых условиях. В кн. *Вопросы анализа и процедуры принятия решений*. Москва, Мир. С.172-215.
- Волков Э. П., Баринев В. А. (2006). Методические принципы обоснования развития электроэнергетики России в условиях ее либерализации. *Известия РАН. Энергетика*, 6. С. 3-19.
- Волькенау И. М. (2005). Об управлении развитием ЕЭС России в новых условиях. *Энергетик*, 5. С. 16-19.
- Домников А. Ю., Чеботарева Г. С., Хоменко П. М. (2014). Риск-ориентированный подход к управлению капиталом энергетической компании. *Вестник УрФУ. Экономика и управление*. 6. С. 150-160.
- Жуков О. В., Череповицын А. Е. (2021). Глобальные тренды и целевые индикаторы экономического развития промышленных комплексов газодобычи в Арктике. *Север и рынок: формирование экономического порядка*. 4. С. 128-139. doi:10.37614/2220-802X.4.2021.74.010.
- Инновационная электроэнергетика — 21* (2017). В. М. Батенин, В. В. Бушуев, Н. И. Воропай и др. Москва, ИЦ «Энергия». 584 с.
- Кутовой Г. П. (2000). Концепция структурной реформы в электроэнергетике — конкурентный рынок в России. *Вестник ФЭК России*, 3. С. 16-19.
- Лаженцев В. Н. (2018) Социально-экономическое пространство и территориальное развитие Севера и Арктики России. *Экономика региона*. 14 (2). С. 353-365. doi 10.17059/2018-2-2

- Лексин В. Н., Порфирьев Б. Н. (2017). Социально-экономические приоритеты устойчивого развития Арктического макрорегиона России. *Экономика региона*, 13 (4). С. 985-1004. doi 10.17059/2017-4-2
- Леоненков А. (2005). *Нечеткое моделирование в среде Matlab и fuzzyTECH*. Санкт-Петербург, БХВ-Петербург. 719 с.
- Мелентьев Л. А. (1983). *Системные исследования в энергетике*. Москва, Наука, 456 с.
- Моделирование состояния и прогнозирование развития региональных экономических и энергетических систем (2004). Э. Г. Альбрехт и др.; под ред. А. И. Татаркина, А. А. Макарова. Москва, ЗАО «Издательство «Экономика». 462 с.
- Обоснование развития электроэнергетических систем: Методология, модели, методы, их использование (2015). Отв. ред. Н. И. Воропай. Новосибирск, Наука.
- Петров М. Б., Серков Л. А., Кожов К. Б. (2021). Анализ пространственных особенностей регионального электропотребления в РФ. *Прикладная эконометрика*, 61 (1). С. 5-27. DOI: 10.22394/1993-7601-2021-61-5-27
- Петров М. Б., Серков Л. А., Кожов К. Б. (2022). Выбор приоритетных проектов развития транспортной сети на основе нечеткой логики. *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*, 86 (2). С. 161-175.
- Пизенгольц В. М., Кануш А. Д. (2022). Особенности реструктуризации предприятий энергетической отрасли. *Проблемы теории и практики управления*. 1. С. 136-150. DOI: 10.46486/0234-4505-2022-01-137-151.
- Робинсон Дж. (1986) *Экономическая теория несовершенной конкуренции*. Москва, Прогресс. 450 с.
- Родионова В. Г. (2017). Экономика и технологии плавучих атомных теплоэлектростанций: ПАТЭС «Академик Ломоносов». *Гуманитарный вестник*, 10. <http://dx.doi.org/10.18698/2306-8477-2017-10-475>.
- Саати Т. (1993). Принятие решений. *Метод анализа иерархий*. Москва, Радио и связь. 314 с.
- Чернов В. Г. (2001). Анализ продуктовых профилей при нечетких оценках соответствия. Приборы и системы. *Управление, контроль, диагностика*, 10. С. 61-66.
- Штовба С. (2007). *Проектирование нечетких систем средствами Matlab*. Москва, Горячая линия — Телеком. 285 с.
- Alaqeel, T. & Suryanarayanan, S. (2018). A fuzzy Analytic Hierarchy Process algorithm to prioritize Smart Grid technologies for the Saudi electricity infrastructure. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 13, 122-133.
- Awasthi, A., Govindan, K. & Gold, S. (2018). Multi-tier sustainable global supplier selection using a fuzzy AHP-VIKOR based approach. *International Journal of Production Economics*, 195, 106-117.
- Bovo, C., Delfanti, M., Merlo, M. & Pasquadibisceglie, M. S. (2007). Coordination of Transmission Network and New Power Plants. In: *2007 IEEE Lausanne Power Tech* (pp. 1356-1361). Lausanne, Switzerland.
- Hu, Zh. (2002). Study on Methodology of Generation Expansion Planning for Power Restructuring. In: *Power Con'2002* (pp. 388-392). Kunming, China.
- Khorasani, S. (2018). Green supplier evaluation by using the integrated Fuzzy AHP model and Fuzzy Copras. *Process Integration and Optimization for Sustainability*, 2, 17-25.
- Limbu, T. R., Saha, T. K. & McDonald, J. D. F. (2007). Cost / Benefit Analysis of Generation Investments Considering System Constraints. In: *2007 Power Engineering Society General Meeting* (pp. 268-275). Tampa, Florida.
- Mahjouri, M., Ishak, M., Torabian, A., Manaf, L., Halimoon, N. & Ghodduji, J. (2017). Optimal selection of Iron and Steel wastewater treatment technology using integrated multi-criteria decision-making techniques and fuzzy logic. *Process Safety and Environmental Protection*, 107, 54-68.
- Makarov, A. A. (2020). 50 Years of Systems Analysis of Energy Development in the USSR and Russia. *Energy Systems Research*, 3(2), 43-49. DOI: 10.38028/esr.2020.02.0006
- Nazari, S., Fallah, M., Kazemipoor, H. & Salehipour, A. (2018). A fuzzy inference- fuzzy analytic hierarchy process-based clinical decision support system for diagnosis of heart diseases. *Expert Systems with Applications*, 95, 261-271.
- Samanlioglu, F. & Ayag, Z. (2017). A fuzzy AHP-PROMETHEE II approach for evaluation of solar power plant location alternatives in Turkey. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 33, 859-871.
- Sasaki, H., Kubokawa, J., Yorino, N. & Sugiyama, K. (1999). Multi-Area Generation Expansion Planning by Means of Multi-Objective Fuzzy Linear Programming. In: *13th PSCC* (pp. 762-769). Trondheim, Norway.
- Yeh, C. (2017). Existence of interval, triangular, and trapezoidal approximations of fuzzy numbers under a general condition. *Fuzzy Sets and Systems*, 310, 1-13.
- Zimmer, K., Fröhling, M., Breun, P. & Schultmann, F. (2017). Assessing social risks of global supply chains: A quantitative analytical approach and its application to supplier selection in the German automotive industry. *Journal of Cleaner Production*, 149, 96-109.

References

- Alaqeel, T. & Suryanarayanan, S. (2018). A fuzzy Analytic Hierarchy Process algorithm to prioritize Smart Grid technologies for the Saudi electricity infrastructure. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 13, 122-133.
- Awasthi, A., Govindan, K. & Gold, S. (2018). Multi-tier sustainable global supplier selection using a fuzzy AHP-VIKOR based approach. *International Journal of Production Economics*, 195, 106-117.
- Batenin, V. M., Bushuev, V. V. & Voropai, N. I. (Eds.). (2017). *Innovatsionnaya elektroenergetika — 21 [Innovation of electric power industry — 21]*. Moscow: Energiya Publishing Center, 584. (In Russ.)

- Bellman, R. & Zadeh, L. (1976). Decision-making in a fuzzy environment. In: *Voprosy analiza i protsedury prinyatiya resheniy [Issues of analysis and decision-making procedures]* (pp. 172-215). Moscow: Peace. (In Russ.)
- Bovo, C., Delfanti, M., Merlo, M. & Pasquadibisceglie, M. S. (2007). Coordination of Transmission Network and New Power Plants. In: *2007 IEEE Lausanne Power Tech* (pp. 1356-1361). Lausanne, Switzerland.
- Chernov, V. G. (2001). Analysis of product profiles for fuzzy conformity assessments. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol, diagnostika [Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics]*, 10, 61-66. (In Russ.)
- Domnikov, A. Yu., Chebotareva, G. S. & Khomenko, P. M. (2014). A risk-based approach to capital management energy company. *Vestnik UrFU. Seriya ekonomika i upravlenie [Bulletin of UrFU. Economics and Management Series]*, 6, 150-160. (In Russ.)
- Hu, Zh. (2002). Study on Methodology of Generation Expansion Planning for Power Restructuring. In: *Power Con'2002* (pp. 388-392). Kunming, China.
- Khorasani, S. (2018). Green supplier evaluation by using the integrated Fuzzy AHP model and Fuzzy Copras. *Process Integration and Optimization for Sustainability*, 2, 17-25.
- Kutovoy, G. P. (2000). The concept of structural reform in the electric power industry — a competitive market in Russia. *Vestnik FEK Rossii [Vestnik of the FEC of Russia]*, 3, 16-19. (In Russ.)
- Lazhentsev, V. N. (2018). Socio-Economic Space and Territorial Development of the North and the Arctic of Russia. *Ekonomika regiona [Economy of Region]*, 14(2), 353-365. DOI: 10.17059/2018-2-2 (In Russ.)
- Leksin, V. N. & Profiryev, B. N. (2017). Socio-Economic Priorities of Sustainable Development of Russian Arctic Macro-Region. *Ekonomika regiona [Economy of Region]*, 13(4), 985-1004. DOI: 10.17059/2017-4-2. (In Russ.)
- Leonenkov, A. (2005). *Nechetkoe modelirovanie v srede Matlab i fuzzyTECH [Fuzzy modeling in Matlab and fuzzyTECH]*. Saint-Petersburg: BHV-Peterburg, 719. (In Russ.)
- Limbu, T. R., Saha, T. K. & McDonald, J. D. F. (2007). Cost / Benefit Analysis of Generation Investments Considering System Constraints. In: *2007 Power Engineering Society General Meeting* (pp. 268-275). Tampa, Florida.
- Mahjouri, M., Ishak, M., Torabian, A., Manaf, L., Halimoon, N. & Ghoddsi, J. (2017). Optimal selection of Iron and Steel wastewater treatment technology using integrated multi-criteria decision-making techniques and fuzzy logic. *Process Safety and Environmental Protection*, 107, 54-68.
- Makarov, A. A. (2020). 50 Years of Systems Analysis of Energy Development in the USSR and Russia. *Energy Systems Research*, 3(2), 43-49. DOI: 10.38028/esr.2020.02.0006.
- Melentev, L. A. (1984). *Sistemnye issledovaniya v energetike [System research in the energy sector]*. Moscow: Science, 456. (In Russ.)
- Nazari, S., Fallah, M., Kazempoor, H. & Salehipour, A. (2018). A fuzzy inference- fuzzy analytic hierarchy process-based clinical decision support system for diagnosis of heart diseases. *Expert Systems with Applications*, 95, 261-271.
- Petrov, M. B., Serkov L. A., Kozhov K. B. Analysis of the spatial features of regional power consumption in the Russian Federation. *Prikladnaya ekonometrika [Applied Econometrics]*, 61, 5-27. DOI: 10.22394/1993-7601-2021-61-5-27 (In Russ.)
- Petrov, M. B., Serkov, L. A. & Kozhov, K. B. (2022). Selection of priority projects for the development of the transport network based on fuzzy logic. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey*, 86(2), 161-175. (In Russ.)
- Pizengolts, V. M. & Kanush, A. D. (2022). Features of the restructuring of enterprises in the energy industry. *Problemy teorii i praktiki upravleniya [International journal of management theory and practice]*, 1, 136-150. (In Russ.)
- Robinson, J. (1986). *The economics of imperfect competition [Ekonomicheskaya teoriya nesovershennoy konkurentsii]*. Trans. Moscow: Progress, 450. (In Russ.)
- Rodionova, V. G. (2017). Economics and technology of floating nuclear thermal power plants: FNTPP “Academician Lomonosov”. *Gumanitarnyy vestnik [Humanitarian Bulletin]*, 10. DOI: 10.18698/2306-8477-2017-10-47 (In Russ.)
- Saaty, T. (1993). *The Analytic Hierarchy Process [Prinyatie resheniy. Metod analiza ierarkhiy]*. Trans. Moscow: Radio and Communications, 314. (In Russ.)
- Samanlioglu, F. & Ayag, Z. (2017). A fuzzy AHP-PROMETHEE II approach for evaluation of solar power plant location alternatives in Turkey. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 33, 859-871.
- Sasaki, H., Kubokawa, J., Yorino, N. & Sugiyama, K. (1999). Multi-Area Generation Expansion Planning by Means of Multi-Objective Fuzzy Linear Programming. In: *13th PSCC* (pp. 762-769). Trondheim, Norway.
- Shtovba, S. (2007). *Proektirovanie nechetkikh sistem sredstvami Matlab [Designing fuzzy systems using Matlab]*. Moscow: Hotline-Telecom, 285. (In Russ.)
- Tatarkin, A. I. & Makarov, A. A. (Eds.) (2004). *Modelirovanie sostoyaniya i prognozirovanie razvitiya regionalnykh ekonomicheskikh i energeticheskikh sistem [Modeling the state and forecasting the development of regional economic and energy systems]*. Moscow: CJSC «Publishing House «Economics», 462. (In Russ.)
- Volkenau, I. M. (2005). On managing the development of the UES of Russia in new conditions. *Energetik*, 5, 16-19. (In Russ.)
- Volkov, E. P. & Barinov, V. A. (2006). Decision making electric power industry development of Russia under conditions of its liberalization. *Izvestiya RAN. Energetika [Thermal Engineering]*, 6, 3-19. (In Russ.)
- Voropay, N. I. (Ed.). (2015). *Obosnovanie razvitiya elektroenergeticheskikh sistem: Metodologiya, modeli, metody, ikh ispolzovanie [Justification of the development of electric power systems: Methodology, models, methods, their use]*. Novosibirsk: Nauka. (In Russ.)

Yeh, C. (2017). Existence of interval, triangular, and trapezoidal approximations of fuzzy numbers under a general condition. *Fuzzy Sets and Systems*, 310, 1-13.

Zhukov, O. V. & Cherepovitsyn, A. E. (2021). Global trends and target indicators of economic development of industrial gas production complexes in the Arctic. *Sever i rynek: formirovanie ekonomicheskogo poryadka [The North and the Market: Forming the Economic Order]*, 4, 128-139. DOI: 10.37614/2220-802X.4.2021. (In Russ.)

Zimmer, K., Fröhling, M., Breun, P. & Schultmann, F. (2017). Assessing social risks of global supply chains: A quantitative analytical approach and its application to supplier selection in the German automotive industry. *Journal of Cleaner Production*, 149, 96-109.

Информация об авторах

Петров Михаил Борисович — доктор технических наук, кандидат экономических наук, доцент, руководитель Центра развития и размещения производительных сил, Институт экономики УрО РАН; Scopus Author ID: 55970815800; <https://orcid.org/0000-0002-3043-6302> (Российская Федерация, 620014, г. Екатеринбург, ул. Московская, 29; e-mail: petrov.kb@uiec.ru).

Серков Леонид Александрович — кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник Центра развития и размещения производительных сил, Институт экономики УрО РАН; Scopus Author ID: 57216791028; <http://orcid.org/0000-0002-3832-3978> (Российская Федерация, 620014, г. Екатеринбург, ул. Московская, 29; e-mail: serkov.la@uiec.ru).

Кожов Константин Борисович — кандидат технических наук, старший научный сотрудник Центра развития и размещения производительных сил, Институт экономики УрО РАН; Scopus Author ID: 57314621300; <https://orcid.org/0000-0003-3694-564X> (Российская Федерация, 620014, г. Екатеринбург, ул. Московская, 29; e-mail: kozhev.kb@uiec.ru).

About the authors

Mikhail B. Petrov — Dr. Sci. (Eng.), Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor, Head of the Center for Development and Location of Productive Forces, Institute of Economics of the Ural Branch of RAS; Scopus Author ID: 55970815800; <https://orcid.org/0000-0002-3043-6302> (29, Moskovskaya St., Ekaterinburg, 620014, Russian Federation; e-mail: petrov.kb@uiec.ru).

Leonid A. Serkov — Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Senior Research Associate of the Center for Development and Location of Productive Forces, Institute of Economics of the Ural Branch of RAS; Scopus Author ID: 57216791028; <http://orcid.org/0000-0002-3832-3978> (29, Moskovskaya St., Ekaterinburg, 620014, Russian Federation; e-mail: serkov.la@uiec.ru).

Konstantin B. Kozhov — Cand. Sci. (Engin.), Senior Research Associate of the Center for Development and Location of Productive Forces, Institute of Economics of the Ural Branch of the RAS; <https://orcid.org/0000-0003-3694-564X> (29, Moskovskaya St., Ekaterinburg, 620014, Russian Federation; e-mail: kozhev.kb@uiec.ru).

Дата поступления рукописи: 31.03.2022.

Прошла рецензирование: 25.05.2022.

Принято решение о публикации: 15.09.2022.

Received: 31 Mar 2022.

Reviewed: 25 May 2022.

Accepted: 15 Sep 2022.