

20. Dmitrieva I.A., Milesenko L.P., Begun O.V., Berezhnaya A.V. Information Modernization of the General Theory of Environmental Safety Ensuring, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. III International Scientific Conference*. Krasnoyarsk, 2021, pp. 12072.
21. Alamiy Kh.S., Zargaryan E.V., Zargaryan Yu.A. Model' prognozirovaniya transportnogo potoka na osnove neyronnykh setey dlya predskazaniya trafika na dorogakh [A traffic flow prediction model based on neural networks for predicting traffic on the roads], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2021, No. 6 (223), pp 124-132.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Ю.А. Кравченко.

Аламир Хайдер Сагбан Хуссейн – Южный федеральный университет, e-mail: alamiy@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; кафедра систем автоматического управления; аспирант.

Заргарян Елена Валерьевна – e-mail: ezargaryan@sfedu.ru; кафедра систем автоматического управления; к.т.н.; доцент.

Заргарян Юрий Артурович – e-mail: yazargaryan@sfedu.ru; кафедра систем автоматического управления; к.т.н.; доцент.

Alamiy Haider Sagban Hussein – Southern Federal University, e-mail: alamiy@sfedu.ru; Taganrog, Russia; the department of automatic control systems; postgraduate student.

Zargaryan Elena Valerevna – e-mail: ezargaryan@sfedu.ru; the department of automatic control systems; cand. of eng. sc.; associate professor.

Zargaryan Yuri Arturovich – e-mail: yazargaryan@sfedu.ru; the department of automatic control systems; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 007.519.816

DOI 10.18522/2311-3103-2023-2-186-200

С.И. Родзин, А.В. Боженюк, Ю.А. Кравченко, О.Н. Родзина

МЕТОДЫ НЕЧЕТКОГО МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ГРУППОВОГО ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ЗАДАЧ ЭВАКУАЦИИ ПРИ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ*

Целями данной статьи является анализ современного состояния исследований в области нечетких методов многокритериальной оптимизации, а также разработка операторов агрегации и алгоритмов, использующих нечеткое многокритериальное групповое принятие решений с применением интуиционистского отношения лингвистических предпочтений. Представлены наиболее известные нечеткие методы многокритериальной оптимизации: ELECTRE, PROMETHEE, VIKOR, TOPSIS, ANP, ANP, MACSBETH, DEMATEL, интеграл Шоке и DEA, рассмотрены их особенности, области применения и наиболее цитируемые статьи. Большинство реальных задач оптимизации могут иметь противоречивые цели. Также представлены метод нечеткого принятия многоцелевых решений FMODM для ситуаций, когда существуют неопределенности и неопределенность в некоторых целях и переменных, от которых они зависят; методы нечеткого многоцелевого линейного программирования FMOLP, нечеткого многопредметного целевого программирования FMOGP и нечеткие эвристические методы принятия решений. Рассмотрена проблема нечеткого многокритериального группового принятия решений при эвакуации с интуитивным отношением лингвистических предпочтений. Отмечено, что методы нечеткой логики особенно подходят для принятия решений об эвакуации, когда данных мало, знание причинно-следственных связей неточно, а наблюдения и критерии могут быть выражены в лингвистических качественных терминах. Представлены основные этапы группового принятия наилучшего решения среди альтернатив в нечеткой среде: объединение оценок экспертов; получение итоговой оценки для каждой альтернативы, представленной лингвистической переменной; ранжирование альтернатив; групповое принятие наиболее предпочтительного

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-71-10121, <https://rscf.ru/project/22-71-10121/> в Южном федеральном университете.

решения. Предлагается подход к групповому принятию решений с интуитивным отношением предпочтений на основе процедур агрегирования. Рассматривается групповая модель принятия решений и концепция нечеткого группового решения и лингвистические переменные, используемые при прогнозировании чрезвычайной ситуации и планировании эвакуации. Отмечается, что известные операторы упорядоченного взвешенного усреднения OWA, LOWA не учитывают веса экспертов. Определяется оператор Low, позволяющий учесть весовые значения экспертов, а также подход к определению нечеткого группового решения aFCS в качестве множества типа 2. Представлены алгоритмы для определения нечеткого группового многокритериального решения на основе aFCS.

Нечеткое множество; лингвистическая переменная; групповое лицо принимающее решение; многокритериальная проблема; оператор; агрегирование; эвакуация.

S.I. Rodzin, A.V. Bozhenyuk, Y.A Kravchenko, O.N. Rodzina

METHODS OF FUZZY MULTICRITERIA GROUP DECISION-MAKING FOR EVACUATION TASKS IN EMERGENCY SITUATIONS

The purpose of this article is to analyze the current state of research in the field of fuzzy multicriteria optimization methods, as well as the development of aggregation operators and algorithms using fuzzy multicriteria group decision-making using an intuitionistic attitude of linguistic preferences. The most well-known fuzzy methods of multicriteria optimization are presented: ELECTRE, PROMETHEE, VIKOR, TOPSIS, AHP, ANP, MACBETH, DEMATEL, Shoke integral and DEA, their features, applications and the most cited articles are considered. Most real optimization problems may have conflicting goals. The method of fuzzy multi-purpose decision-making FMODM is also presented for situations where there are inaccuracies and uncertainty in some goals and variables on which they depend; methods of fuzzy multi-purpose linear programming FMOLP, fuzzy multi-objective target programming FMOGP and fuzzy heuristic decision-making methods. The problem of fuzzy multicriteria group decision-making during evacuation with an intuitive relation of linguistic preferences is considered. It is noted that fuzzy logic methods are particularly suitable for making evacuation decisions when there is little data, knowledge of cause-and-effect relationships is inaccurate, and observations and criteria can be expressed in linguistic qualitative terms. The main stages of group making the best decision among alternatives in a fuzzy environment are presented: combining expert assessments; obtaining a final assessment for each alternative represented by a linguistic variable; ranking alternatives; group making the most preferred decision. An approach to group decision-making with an intuitive preference relationship based on aggregation procedures is proposed. The group model of decision-making and the concept of fuzzy group decision and linguistic variables used in predicting an emergency situation and planning evacuation are considered. It is noted that the well-known operators of ordered weighted averaging OWA, LOWA do not take into account the weights of experts. The Low operator is defined, which allows taking into account the weight values of experts, as well as an approach to determining a fuzzy group solution of aFCS as a type 2 set. Algorithms for determining a fuzzy group multicriteria solution based on aFCS are presented.

Fuzzy set; linguistic variable; group decision maker; multi-criteria problem; operator; aggregation; evacuation.

Введение. Реальные проблемы принятия решений, как правило, слишком сложны и плохо структурированы, чтобы оценивать их оптимальность с помощью одного критерия. В одной задаче может быть установлено несколько критериев оптимальности. Одновременное рассмотрение нескольких критериев приводит к многокритериальной задаче принятия решений [1].

Проблемы, в которых лицо, принимающее решение (ЛПР), должно оценить конечный набор альтернатив, чтобы выбрать наиболее подходящую и ранжировать их от наилучшей к худшей, называются дискретными проблемами многокритериальной оптимизации (ДМО), а проблемы, в которых существует бесконечный набор альтернатив, называются непрерывными проблемами многокритериальной оптимизации (НМО).

Нечеткие методы многокритериальной оптимизации используются для оценки альтернатив либо индивидуальным ЛПР, либо группой ЛПР в условиях нечеткости и неопределенности. В этом случае соответствие альтернатив критериям и весовые коэффициенты важности критериев оцениваются с использованием лингвистических переменных [2]. Значениями лингвистической переменной являются слова или предложения на естественном или искусственном языке [3]. Для решения задач ДМО и НМО при нечетких условиях было предложено несколько методов, а теория нечетких множеств была расширена за счет разработки новых типов нечетких множеств, таких как нестационарные нечеткие множества, интуиционистские нечеткие множества, нечеткие мультимножества, колеблющиеся нечеткие множества [3, 4].

Целями данной статьи является анализ современного состояния области исследований нечетких методов многокритериальной оптимизации, а также разработка операторов агрегации и алгоритмов, использующих нечеткое многокритериальное групповое принятие решений с применением интуиционистского отношения лингвистических предпочтений.

Современные методы и подходы к решению проблем многокритериального и многоцелевого принятия решения в нечетких условиях. Для задач ДМО наиболее известными нечеткими методами многокритериальной оптимизации являются нечеткие методы *ELECTRE*, *PROMETHEE*, *VIKOR*, *TOPSIS*, *ANP* и *DEMATEL*. Рассмотрим подробнее их особенности, области применения и публикационную активность.

Нечеткий метод ELECTRE. Принцип работы семейства методов *ELECTRE* состоит в следующем. Для каждой пары альтернативных решений выдвигается предположение (гипотеза) о том, что одна альтернатива лучше другой. Методы *ELECTRE* строят одно или несколько четких или нечетких отношений превосходства. Затем для каждой пары альтернатив находятся два индекса: индекс согласия (величина, подтверждающая предположение о превосходстве одной альтернативы над другой) и индекс несогласия (величина, опровергающая это предположение). На основе анализа этих индексов выбирается одна или несколько лучших альтернатив ("ядро" альтернатив) [1]. Библиография по нечеткому методу *ELECTRE* в базе *Scopus* содержит свыше 1100 публикаций по нескольким предметным областям. Больше всего статей по нечетким методам на основе *ELECTRE* публикуется в журналах *Expert Systems with Applications*, *Fuzzy Sets and Systems* и *European Journal of Operational Research*. Наиболее цитируемой статьей о нечетких методах *ELECTRE* является [5].

Исследования, основанные на нечетком *ELECTRE*, включают работы, в которых предлагаются новые подходы или модификации существующих подходов [6]. Например, сравниваются четкий и нечеткий методы *ELECTRE* для решения задачи выбора поставщика и предлагается новый нечеткий метод *ELECTRE*. В [6] представлен интервальный нечеткий метод *ELECTRE*, направленный на решение задач с различными весами критериев. Другая группа работ использует существующие подходы для решения конкретных прикладных задач. Например, в [7] рассматривается задача экспертного отбора персонала по десяти критериям с помощью нечеткого метода *ELECTRE*. Еще одна группа работ представляет различные гибридные нечеткие методы принятия решений *ELECTRE*. Так в [8] предлагается методология оценки качества веб-сайта электронного банкинга, основанная на гибридном нечетком подходе *ANP-ELECTRE*. В данном методе веса критериев генерируются с помощью нечеткого метода анализа *ANP*. Далее, нечеткий метод *ELECTRE* используется для оценки уровня качества веб-сайтов.

В [9] разработан интуиционистский нечеткий метод *ELECTRE* для решения многокритериальных задач принятия решений. В нем используются интуиционистские нечеткие множества Атанасова (*A-IFS*) в условиях недостатка информации для решения проблем. Оценки альтернатив по каждому критерию и веса каждого критерия берутся в качестве лингвистических переменных, характеризующих интуиционистскими нечеткими множествами. В [10] разработан основанный на нечетком *ELECTRE* метод ранжирования для многокритериального группового принятия решений в среде интервальных нечетких множеств.

Нечеткий метод PROMETHEE. Семейство методов *PROMETHEE* представлено в [11] разработан нечеткий метод *PROMETHEE* для задач использования альтернативной энергии. В других работах этот метод применяется для оценки эко-технологии, для решения производственных проблем, а также для задачи выбора оборудования. Наиболее цитируемой статьей о нечетком методе *PROMETHEE* является [11]. Больше всего статей по данному методу публикуется в журналах *Expert Systems with Applications*, *International Journal of Production Research* и *European Journal of Operational Research*.

Нечеткий метод VIKOR. Метод *VIKOR*, разработанный в [12], представляет собой метод многокритериальной оптимизации, критерии которого являются ортогональными и имеют разные единицы измерения. Компромиссное решение определяется по степени “близости” к идеальному решению путем взаимных уступок. В [13] предлагает расширение метода *VIKOR* для поиска нечеткого компромиссного решения, причем критерии и их веса являются нечеткими множествами. В [14] решается многокритериальная проблема ранжирования рисков в мегапроектах. Имеются примеры гибридизации метода *VIKOR* и *AHR*: веса критериев определяются с помощью нечеткого метода *AHP*, а затем альтернативы ранжируются с помощью нечеткого *VIKOR*. В целом число статей, индексированных в *Scopus* и посвященных нечеткому *VIKOR*, включает свыше 900 публикаций по самым различным предметным областям. Больше всего статей, посвященных *VIKOR*, публикуется в журналах *Expert Systems with Applications*, *Applied Mathematical Modelling* и *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*. Области приложения нечеткого *VIKOR* весьма разнообразны: управление бизнесом, сельское хозяйство, энергетика материаловедение и медицина. Однако наиболее широкое применение метод получил в области информатики и инженерии. Наиболее цитируемой статьей о нечетком *VIKOR* является [15].

Больше всего статей по нечетким методам на основе *VIKOR* публикуется в журналах *Expert Systems with Applications*, *Applied Mathematical Modelling* и *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*.

Нечеткий метод TOPSIS. В [16] разработан нечеткий метод *TOPSIS*. Основная идея метода состоит в том, чтобы выбрать альтернативу, которая имеет наименьшее расстояние от положительного идеального решения и наибольшее расстояние от отрицательного идеального решения. Для этого вычисляется индекс сходства (или коэффициент относительной близости). Индекс сходства показывает расстояние до положительного идеального решения и до отрицательного идеального решения. После этого выбирается решение с максимальным значением относительной близости, которое учитывает как близость с положительным идеальным решением, так и удаленность от отрицательного идеального решения. Число статей, индексированных в *Scopus* и посвященных нечеткому *TOPSIS* включает свыше 4000 публикаций в различных предметных областях. В [17] модифицируется метод *TOPSIS*, используя теорию возможностей. Оценки ЛПР производятся с помощью треугольных нечетких чисел (TFN). Интегрированный коэффициент относительной близости каждой альтернативы вычисляется с помощью матрицы вероятностных средних значений и

матрицы вероятностных стандартных отклонений. В других исследованиях нечеткий метод TOPSIS успешно используется для ранжирования поставщиков экологически чистого сырья для электронной компании, для оценки финансовых показателей компаний контейнерных перевозок, для оценки финансовых показателей банков, а также гибридный метод ANP-TOPSIS – для оценки банков, для оценки качества обслуживания авиакомпании. Больше всего статей по нечетким методам на основе TOPSIS публикуется в журналах *Expert Systems with Applications*, *Applied Soft Computing Journal* и *Applied Mathematical Modelling*. Области приложения нечеткого метода TOPSIS включают инженерию, информатику, менеджмент, эконометрику и финансы, социальные науки, сельское хозяйство, энергетику, биохимию и астрономию. Наиболее цитируемой статьей о нечетком TOPSIS является [18].

Нечеткий метод ANP. Метод аналитической иерархии (АНП) первоначально был предложен Т. Саати как структурированный подход, используемый для принятия решений в сложных задачах. АНП организует критерии принятия решений в виде иерархии и ставит перед собой цели количественной оценки приоритетов для множества альтернатив на основе парных сравнений ЛПР. АНП также предполагает согласованность сравнения альтернатив и обладает способностью обнаруживать и учитывать несоответствия, присущие процессу принятия решений. Однако в тех случаях, когда ЛПР не могут выразить свои оценки четкими числами, можно использовать нечеткую логику, которая обеспечивает учет неопределенностей, связанных с особенностями когнитивных процессов человека. Были предложены различные нечеткие расширения метода АНП с помощью различных шкал, содержащих треугольные, трапециевидные и четкие числа [19]. Нечеткие методы АНП использовались для задачи выбора поставщиков в сфере розничной торговли, размещения объектов [14]. Ведущими журналами, опубликовавшими исследования, основанные на нечетком методе АНП, являются *Expert Systems with Applications*, *Computer Integrated Manufacturing Systems*, *International Journal of Production Research*, *European Journal of Operational Research*, а также *Fuzzy Sets and Systems*. Исследования, основанные на нечетком АНП, можно разделить на следующие группы. Первая группа посвящена разработке новых нечетких методологий АНП или модифицирует существующие подходы. В частности, предлагается стохастический метод АНП, модель нелинейного программирования для поддержания согласованности оценок, расширение до интуиционистской нечеткости [21]. Чтобы применить метод при групповом принятии решений, для агрегирования матричной оценки решения используется интуитивное нечеткое взвешенное усреднение (IFWA). Вторая группа исследований использует существующие подходы в конкретной проблемной области. Например, нечеткий метод АНП используется в индустрии туризма для определения основных факторов, побуждающих круизные линии выбирать конкретные порты захода, для оценки систем хранения водорода с учетом веса, объема, стоимости и энергоэффективности системы, для оптимальной сегментации МРТ-изображений в системе медицинской диагностики [22, 23]. Третья группа работ посвящена гибридизации различных многокритериальных методов с нечетким АНП. Например, в [24] интегрируются метод *Delphi* и нечеткий АНП для определения факторов, влияющих на коммерциализацию новых технологических продуктов. В целом, нечеткий метод АНП был использован в различных областях: инженерии, информатике, экологии, управлении бизнесом, принятии решений в энергетике, сельском хозяйстве, материаловедении. Наиболее цитируемой статьей является [25].

Нечеткий метод ANP. Нечеткий метод АНП (Т. Саати) является обобщением метода АНП [26]. Здесь также используются попарные сравнения, однако факторы не являются независимыми друг от друга. Этапы метода АНП включают структу-

рирование, моделирование и анализ. Этап структурирования состоит в постановке задачи и определении критериев принятия решений. На этапе моделирования экспертам задаются вопросы, основанные на попарных сравнениях, для выяснения предпочтений. Этап анализа включает в себя вычисление групповых предпочтений и определение приоритетов. Исследования, основанные на нечетком ANP, можно разделить на следующие группы. Первая группа включает работы, в которых модифицируются существующие подходы [27]. Вторая группа исследований использует существующие подходы в конкретной проблемной области. Например, в [28] используют нечеткий метод ANP для оценки производительности производственных систем с учетом критериев качества, технического обслуживания и затрат. Нечеткий ANP также применялся для отбора подходящих кандидатов для продвижения по службе. Третья группа объединяет различные методы принятия решений и разрабатывает гибридные методы. Так в [29] разрабатывается гибридная модель, которая сочетает в себе нечеткие методы ANP и VIKOR для выбора концепции городской логистики. Больше всего статей по нечетким методам на основе нечеткого ANP публикуется в журналах *Expert Systems with Applications*, *Computers and Industrial Engineering*, *International Journal of Production Research*, *Applied Mathematical Modelling*. Наиболее цитируемой статьей является [27].

Нечеткий метод MACBETH реализует многокритериальный интерактивный подход к принятию решений. Метод позволяет ЛПР оценивать альтернативы путем качественных сравнений относительно различий в их предпочтении при многокритериальном анализе. Отличие MACBETH от других многокритериальных нечетких методов заключается в том, что для работы метода необходимы только качественные оценки о разнице в предпочтении между парами решений, чтобы генерировать числовые оценки для вариантов решений по каждому критерию и взвешивать критерии. Публикации по базе Scopus статей по нечеткому методу MACBETH включают около 200 работ. Например, в [30] оценивались альтернативные источники возобновляемой энергии в условиях неопределенности. Метод MACBETH пока не был расширен до версий с использованием интуиционистских нечетких множеств.

Метод DEMATEL является одним из лучших инструментов для выявления причинно-следственных связей между критериями оценки решений [31]. Он основан на орграфах, которые связывают множество причин и множество следствий. Метод DEMATEL использовался для определения факторов, влияющих на выбор лучших поставщиков, для оценки эффективности их работы и принятию решений при выборе поставщика. В [29] разрабатывается гибридная модель, сочетающая методы DEMATEL, ANP и VIKOR. Литература по нечеткому методу DEMATEL по базе SCOPUS включает около 600 публикаций по всем областям. Наиболее цитируемой является статья [32].

Еще одним методом, используемым для нечетких задач принятия решений с несколькими атрибутами как способ измерения ожидаемой полезности неопределенного события, является интеграл Шоке (Choquet). В методе предлагается использовать оператор на основе интеграла Шоке для интервально-интуиционистских нечетких множеств. Этот оператор позволяет учитывать важность событий и корреляцию между ними [33].

Метод анализа охвата данных DEA применяется для определения эффективности принимаемых решений. В [34] разрабатывается нечеткий метод DEA для оценки производительности производственных систем, где входные и выходные данные могут быть нечеткими, предлагается методика, использующая метод DEA и нечеткие отношения предпочтений для оценки альтернатив принятия решений. В нем попарные оценки эффективности вычисляются с использованием DEA, затем эти оценки используются для построения отношения нечетких предпочтений и согласованного отношения нечетких предпочтений.

В многоцелевых задачах принятия решений необходимо одновременно оптимизировать более одной целевой функции [35]. Такие методы как метод функции полезности, лексикографический метод, целевое программирование, алгоритмы, инспирированные природой, применяются, когда априорной информации о предпочтениях достаточно для получения всех Парето-оптимальных решений [36, 37–39].

Метод нечеткого принятия многоцелевых решений *FMODM* разработан для ситуаций, когда существуют неточности и неопределенность в некоторых целях и переменных, от которых они зависят [40]. Методу *FMODM* согласно базе данных *SCOPUS* посвящены свыше полторы тысячи статей. Исследования, основанные на *FMODM*, в основном, были опубликованы в журналах *International Journal of Production Research*, *European Journal of Operational Research*, *Expert Systems with Applications*, *Computers and Industrial Engineering*, *Fuzzy Sets and Systems*. Основными областями, в которых применялись методы *FMODM*, являются инженерия, информатика, энергетика, экология, материаловедение и биохимия.

Известны также методы нечеткого многоцелевого линейного программирования *FMOLP*, нечеткого многопредметного целевого программирования *FMOGP* и нечеткие эвристические методы принятия решений [41]. Для случая, когда ЛПР не может указать точное значение для каждой цели применяется метод *FMOGP*. Предметными областями, для которых наиболее часто используется *FMOGP*, являются информатика, математика, инженерия.

Большинство реальных задач оптимизации могут иметь противоречивые цели. Это приводит к отказу от поиска оптимального решения и рассмотрению "эффективного решения". Для решения этих сложных многоцелевых задач был разработан ряд нечетких эвристических методов [42]. Примерами являются эволюционные и роевые алгоритмы [43]. Исследования, посвященные разработке методов нечеткого принятия многоцелевых решений, чаще всего публикуются в журналах *Fuzzy Sets and Systems*, *Applied Soft Computing Journal*, and *Engineering Structures*. Предметными областями, для которых наиболее часто используются нечеткие эвристические методы принятия многоцелевых решений, являются инженерия, информатика, математика и энергетика.

В целом нечеткие методы *ELECTRE*, *PROMETHEE*, *VIKOR*, *TOPSIS*, *AHP*, *ANP*, *DEMATEL* и другие чаще всего применяются в таких предметных областях как инженерия, информатика, принятие решений, математика, экономика и менеджмент. Можно также заключить, что нечеткие методы *MADM* применимы в энергетике, фармацевтике, психологии, медицине, сельском хозяйстве и охране окружающей среды. Если судить по базе *SCOPUS*, то наблюдается экспоненциальный рост использования нечетких многокритериальных методов принятия решений для указанных предметных областей, причем наиболее используемыми методами являются методы нечеткого *AHP* и нечеткого *TOPSIS*.

Нечеткое многокритериальное групповое принятие решений при эвакуации с интуитивным отношением лингвистических предпочтений. Работ по применению нечеткой логики для поддержки принятия решений об эвакуации много [42]. Необходимость в массовой эвакуации возникает сравнительно редко, например, в случае крупных стихийных бедствий. Методы, основанные на статистике и численных подходах, чтобы быть хорошо откалиброванными, требуют многочисленных экспериментов. Детерминированные методы и подходы к оптимизации могут дать приемлемые результаты для конечномерных задач, но без учета неопределенностей. Поэтому нечеткая логика, имеющая дело с субъективной неопределенностью, оказывается более эффективной, чем использование только детерминированных, вероятностных или эвристических подходов. Кроме того, применение теории нечетких множеств и нечеткой логики к решению проблем эвакуации и ликвидации последствий стихийных бедствий позволяет включать в модель принятия ре-

шений данные, не поддающиеся количественной оценке, неполную и недоступную информацию, а также частично игнорируемые факты. Поэтому методы нечеткой логики, по-видимому, особенно подходят для принятия решений об эвакуации, когда данных мало, знание причинно-следственных связей неточно, а наблюдения и критерии могут быть выражены в лингвистических качественных терминах.

Групповое принятие наилучшего решения среди альтернатив в нечеткой среде включает четыре этапа: (1) объединение оценок экспертов; (2) получение итоговой оценки для каждой альтернативы, представленной лингвистической переменной; (3) ранжирование альтернатив; (4) групповое принятие наиболее предпочтительного решения. Использование лингвистических переменных при эвакуации делает суждения экспертов более надежными и информативными, нежели числовых оценок. Нечеткое коллективное решение (*Fuzzy Collective Solution, FCS*) широко используется для оценки и ранжирования альтернативных решений, представленных лингвистическими переменными.

Существующие алгоритмы для *FCS* являются инструментом для агрегирования группового принятия наилучших решений с интуитивно понятными отношениями предпочтений. Как известно, интуиционистское нечеткое множество (*Intuitionistic Fuzzy Set, IFS*) является расширением нечеткого множества Заде [44]. Для многих сложных проблем принятия решений использование *IFS* позволяет успешно моделировать неточные и неопределенные данные. В [45] авторы предложили интуитивное нечеткое ядро и консенсусного победителя в групповом принятии решений с интуитивными (индивидуальными и социальными) нечеткими отношениями предпочтений.

Мы предлагаем подход к групповому принятию решений с интуитивным отношением предпочтений на основе процедур агрегирования. Вначале рассмотрим групповую модель принятия решений и концепцию нечеткого группового решения, а затем представим операторы и вычислительные алгоритмы для нечеткого группового решения многокритериальной задачи.

Рассмотрим следующую модель в рамках лингвистических оценок. Предположим, что задан $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ – конечный набор альтернатив, имеется $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ – множество экспертов. Пусть, например, менеджер назначает вес $w(e_k) = w(k)$ для каждого эксперта, так что $0 \leq w(k) \leq 1$ и $\sum_k w(k) = 1$.

Пусть $S = \{s_t, t = 1, \dots, T\}$ – конечное и полностью упорядоченное множество лингвистических переменных. Предположим, что каждый эксперт $e_k \in E$ высказывает свое мнение по X посредством лингвистических предпочтений: $p_k: X \times X \rightarrow S$, где $p_k(i, j) = p_k(x_i, x_j) \in S$ представляет лингвистическую оценку степени предпочтения альтернативы x_i по сравнению с x_j . Например, при прогнозировании чрезвычайной ситуации и планировании эвакуации рассматриваются следующие значения лингвистических переменных S :

$$S = \{I, EU, VLC, SC, IM, MC, ML, EL, C\},$$

которые являются трапециевидными нечеткими числами на интервале $[0,1]$. В частности, пусть

- I – невозможно – $(0, 0, 0, 0)$;
- EU – крайне маловероятно – $(0.00, 0.01, 0.02, 0.07)$;
- VLC – очень низкая вероятность – $(0.04, 0.10, 0.18, 0.23)$;
- SC – малый шанс – $(0.17, 0.22, 0.36, 0.42)$;
- IM – это возможно – $(0.32, 0.41, 0.58, 0.65)$;
- MC – значимый шанс – $(0.58, 0.63, 0.80, 0.86)$;
- ML – очень вероятно – $(0.72, 0.78, 0.92, 0.97)$;
- EL – чрезвычайно вероятно – $(0.93, 0.98, 0.99, 1)$;
- C – бесспорно – $(1, 1, 1, 1)$;

В [46] был определен оператор упорядоченного взвешенного усреднения OWA, а в [47] – оператор LOWA, основанный на OWA и выпуклой комбинации лингвистических переменных. Однако при этом не учитывался вес экспертов. Таким образом, мы имеем дело с проблемой агрегирования, в которой веса экспертов неизвестны.

Пусть $a = \{a_1, \dots, a_m\}$ – набор лингвистических переменных для агрегирования, а b – связанный вектор упорядоченных переменных, равный $b = \{a_{im}, a_{i(m-1)}, \dots, a_{i1}\}$, такой, что $a_{im} \geq a_{i(m-1)} \geq \dots \geq a_{i1}$.

Определим оператор *Low* следующим образом:

$$Low(a, w) = C\{(w_{im}, a_{im}), (1 - w_{im}, Low(a', w'))\}, \quad (1)$$

где $w = [w_1, w_2, \dots, w_m]$ – вектор весов экспертов, причем $w_i \in [0, 1]$ и $\sum_i w_i = 1$, $a' = \{a_{i(m-1)}, \dots, a_{i1}\}$, $w' = \{w'_{i(m-1)}, \dots, w'_{i1}\}$, $w'_j = w_j / (1 - w_{im})$.

Здесь C – оператор, реализующий выпуклую комбинацию двух лингвистических переменных s_j , s_i , $j \geq i$ с $w_j > 0$, $w_i > 0$, $w_j + w_i = 1$, $C\{(w_j, s_j), (w_i, s_i)\} = s_k$, где $k = i + \text{round}(w_j (j - i))$, *round* – обычный оператор округления.

Построим многокритериальную модель принятия групповых решений.

Предположим, что задан конечный набор критериев: $C = \{C_1, C_2, \dots, C_L\}$. Каждый эксперт $e_k \in E$ высказывает свое мнение по множеству альтернатив X для каждого критерия посредством лингвистических предпочтений:

$$p_{kl}: X \times X \rightarrow S, \text{ где } p_{kl}(i, j) = p_{kl}(x_i, x_j) \in S, \quad (2)$$

которые представляют лингвистическую оценку степени предпочтения альтернативы x_i по сравнению с x_j . Более того, предположим, что заданы веса критериев $\{\beta_l, l = 1, 2, \dots, L\}$, такие, что $0 \leq \beta_l \leq 1$, $\sum_l \beta_l = 1$.

Будем считать, что для нашей модели выполняются следующие соотношения:

$$p_{kl}(i, i) = s_{T+1/2}, \forall i = 1, \dots, n, \quad (3)$$

$$p_{kl}(i, j) \geq s_{T+1/2}, \text{ для } p_{kl}(j, i) \leq s_{T+1/2}. \quad (4)$$

Пусть $\{P^k, k = 1, \dots, m\}$ – отношения лингвистических предпочтений. Для каждого (i, j) , $i = 1, \dots, n$, $j = 1, \dots, n$, и для каждого $s_t \in S$ положим

$$W_{i,j}[s_t] = \sum_k \{w(k): P^k(i, j) = s_t\}. \quad (5)$$

Выражение (5) представляет собой сумму индивидуальных весов экспертов, чтобы присвоить лингвистической переменной s_t в качестве значения предпочтения альтернативы x_i по сравнению с x_j .

Теперь необходимо наметить подход к определению нечеткого группового решения FCS и применить его для оценки и ранжирования множества альтернатив.

Подход к определению FCS аналогичен концепции агрегированных степеней доминирования альтернатив. Для каждой пары альтернатив (x_i, x_j) степень лингвистического доминирования определяется как

$$E(x_i, x_j) = Low(S, U), \quad (6)$$

где $U = [u_T, \dots, u_1]$, $u_t = W_{ij}[s_t]$, $t = 1, \dots, T$.

Тогда нечеткое групповое решение FCS представляет собой нечеткое множество на множестве альтернатив X :

$$FCS = \{fcs(x_1)/x_1, fcs(x_2)/x_2, \dots, fcs(x_n)/x_n\}, \quad (7)$$

где степень принадлежности альтернативы x_i рассчитывается следующим образом:

$$fcs(x_i) = Low(S, V),$$

где $V = [v_T, \dots, v_1]$, $t = 1, \dots, T$, $v_t = \#\{j: E(x_i, x_j) = s_t\} / (n - 1)$.

Предположим, что для каждого критерия C_l получено соответствующее нечеткое групповое решение FCS_l :

$$FCS_l = \{fcs_l(x_1)/x_1, \dots, fcs_l(x_n)/x_n\}, l = 1, \dots, L.$$

Тогда агрегированное нечеткое коллективное решение $aFCS$ представляет собой нечеткое множество на множестве альтернатив X :

$$aFCS = \{afcs(x_1)/x_1, afcs(x_2)/x_2, \dots, afcs(x_n)/x_n\}, \quad (8)$$

где степень принадлежности альтернативы x_i рассчитывается как

$$afcs(x_i) = Low(S, U_\beta), i = 1, \dots, n,$$

где $U_\beta = [u_{\beta_T}, \dots, u_{\beta_1}]$, $u_{\beta_T} = \sum_l \{\beta_l: fcs_l(x_i) = s_t\}, t = 1, \dots, T$.

Таким образом, $aFCS$ является нечетким множеством типа 2 на X .

Рассмотрим алгоритмы с использованием $aFCS$.

Алгоритм 1.

Шаг 1. Вычислить степень лингвистического доминирования E_l для каждого критерия C_l , используя множество предпочтений $\{p_{kl}, k = 1, \dots, m\}$ и весов $\{w(k): e_k \in E\}$:

$$E_l = [E_l(i, j)] = [E(x_i, x_j)], i, j = 1, \dots, n, \quad (9)$$

где $E_l(x_i, x_j) = Low(S, U_l)$, $U_l = [u_{lT}, \dots, u_{l1}]$,

$$u_{lt} = W_{ij}(s_t) = \sum_k \{w(k): p_{kl}(i, j) = s_t\}, t = 1, \dots, T.$$

Шаг 2. Используя (9), вычислить нечеткое групповое решение:

$$FCS_l = \{fcs_l(x_1)/x_1, fcs_l(x_2)/x_2, \dots, fcs_l(x_n)/x_n\}, l = 1, \dots, L. \quad (10)$$

Шаг 3. Используя (10) и веса $\{\beta_l, l = 1, \dots, L\}$, вычислить агрегированное нечеткое групповое решение $aFCS$:

$$aFCS = \{afcs(x_1)/x_1, afcs(x_2)/x_2, \dots, afcs(x_n)/x_n\}. \quad (11)$$

Шаг 4. Ранжировать множество альтернатив X в соответствии с (11):

$$X_t = \{x_i: afcs(x_i) = s_t\}, t = 1, \dots, T. \quad (12)$$

Решением будет являться подмножество

$$X_{t^*}, \text{ где } t^* = \max \{t: X_t \neq \emptyset, s_t \in S\}.$$

Алгоритм 2.

Шаг 1. Вычислить степень лингвистического доминирования E_l для каждого критерия C_l , согласно (9):

$$E_l = [E_l(i, j)], i, j = 1, \dots, n, l = 1, \dots, L.$$

Шаг 2. Используя $\{E_l, l = 1, \dots, L\}$ и множество весов $\{\beta_l, l = 1, \dots, L\}$, вычислить общее групповое мнение:

$$Q = [q(i, j)] = [q(x_i, x_j)], i, j = 1, \dots, n, \quad (13)$$

где $q(x_i, x_j) = Low(S, U_q)$, $U_q = [u_{qT}, \dots, u_{q1}]$,

$$u_{qt} = W_{ij}^q(s_t) = \sum_l \{\beta_l: E_l(i, j) = s_t\}, t = 1, \dots, T.$$

Шаг 3. Вычислить нечеткое коллективное решение FCS_Q в соответствии с общим групповым мнением Q :

$$FCS_Q = \{fcs_Q(x_1)/x_1, fcs_Q(x_2)/x_2, \dots, fcs_Q(x_n)/x_n\}. \quad (14)$$

Шаг 4. Разбиваем множество альтернатив X на подмножества

$$X_t = \{x_i: fcs_Q(x_i) = s_t\}, t = 1, \dots, T \quad (15)$$

и выбрать решение, аналогично шагу 4 алгоритма 1.

Алгоритм 3.

Шаг 1. Вычислить *относительные степени доминирования* F^k для каждого эксперта e_k , используя множество предпочтений $\{p_{kl}, l = 1, \dots, L\}$ и весов $\{\beta_l, l = 1, \dots, L\}$, как

$$F^k = [F^k(i, j)] = [F^k(x_i, x_j)], i, j = 1, \dots, n, \quad (16)$$

где $F^k(x_i, x_j) = Low(S, U^k), U^k = [u_T^k, \dots, u_1^k]$,

$$u_t^k = \sum_l \{\beta_l: p_{kl}(i, j) = s_t\}, t = 1, \dots, T.$$

Шаг 2. С помощью F^k вычислить нечеткую оценку FE^k по мнению эксперта e_k :

$$FE^k = \{fe^k(x_1)/x_1, \dots, fe^k(x_n)/x_n\}, \quad (17)$$

где степень принадлежности альтернативы x_i рассчитывается как

$$fe^k(x_i) = Low(S, V_k), i = 1, \dots, n, \quad (18)$$

где $V_k = [v_T, \dots, v_1], v_t = |\{j: F^k(x_i, x_j) = s_t, j \neq i\}| / (n - 1), t = 1, \dots, T.$

Шаг 3. Вычислить согласно (8) агрегированную нечеткую оценку aFE на X , используя нечеткие оценки $\{FE^k, k=1, \dots, m\}$ и веса $\{w(k): e_k \in E\}$:

$$aFE = \{afe(x_1)/x_1, \dots, afe(x_n)/x_n\}. \quad (19)$$

Шаг 4. Разбиваем множество альтернатив X на подмножества

$$X_t = \{x_i: afe(x_i) = s_t\}, t = 1, \dots, T \quad (20)$$

и выбрать решение, аналогично шагу 4 алгоритма 1.

Заключение. Нечеткие методы *MADM* и *MODM* широко представлены в литературе, разработаны и успешно применяются во многих областях для решения многокритериальных задач при расплывчатых и неполных данных. Журналами, в которых чаще всего публикуются приложения и теоретические разработки по нечетким методам *MADM* и *MODM* являются *Expert Systems with Applications*, *Computer Integrated Manufacturing Systems*, *International Journal of Production Research*, *European Journal of Operational Research*, *Computers and Industrial Engineering*, and *Fuzzy Sets and Systems*, причем наблюдается тенденция к увеличению числа публикаций.

В статье представлен анализ проблемы принятия многокритериальных групповых решений при лингвистических оценках. Модель отношений лингвистических предпочтений является полезным инструментом для представления выбора лиц, принимающих решения. Разработаны операторы агрегации и алгоритмы, использующие нечеткое групповое решение. В перспективе планируется исследовать различные процедуры агрегирования в ситуациях с интуитивной нечеткой информацией о предпочтениях типа 2.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Петровский А.Б. Теория принятия решений. – М.: Издательский центр «Академия», 2009.
2. Заде Л.А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. – М.: Мир, 1976.
3. Garibaldi J.M., Jaroszewski M., Musikasuwan S. Nonstationary Fuzzy Sets // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. – 2008. – Vol. 16 (4). – P. 1072-1086.
4. Torra V. Hesitant fuzzy sets // Jour. Int. Intell. Syst. – 2010. – Vol. 25 (6). – P. 529-539.
5. Bender M.J., Simonovic S.P. A fuzzy compromise approach to water resource systems planning under uncertainty // Fuzzy Sets Syst. – 2000. – Vol. 115 (1). – P. 35-44.

6. Vahdani B., Hadipour H. Extension of the ELECTRE method based on interval-valued fuzzy sets // *Soft Comput.* – 2011. – Vol. 15 (3). – P. 569-579.
7. Rouyendegh B., Erkan T. An Application of the Fuzzy ELECTRE Method for Staff Selection // *Hum. Factor Ergon. Man.* – 2013. – Vol. 23 (2). – P. 107-115.
8. Kaya T., Kahraman C. A fuzzy approach to ebanking website quality assessment based on an integrated AHP-ELECTRE method // *Technological and Economic Development of Economy.* – 2011. – 17 (2). – P. 313-334.
9. Wu M.-C., Chen T.-Y. The ELECTRE multicriteria analysis approach based on Atanassov's intuitionistic fuzzy sets // *Expert Syst. Appl.* – 2011. – Vol. 38 (10). – P. 12318-12327.
10. Chen T.-Y. An ELECTRE-based outranking method for multiple criteria group decision making using interval type-2 fuzzy sets // *Inform. Sciences.* – 2014. – Vol. 263. – P. 1-21.
11. Goumas M., Lygerou V. An extension of the PROMETHEE method for decision making in fuzzy environment: Ranking of alternative energy exploitation projects // *Eur. Jour. Oper. Res.* – 2000. – Vol. 123 (3). – P. 606-613.
12. Chang T.H. Fuzzy VIKOR method: A case study of the hospital service evaluation in Taiwan // *Inform. Sciences.* – 2014. – Vol. 271. – P. 196-212.
13. Kacprzyk J., Zadrozny S., Nurmi H., Bozhenyuk A. Towards Innovation Focused Fuzzy Decision Making // *IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems.* – 2021. – P. 256-268.
14. Ebrahimnejad S., et. el. Risk ranking in mega projects by fuzzy compromise approach: A comparative analysis // *Jour. Intell. Fuzzy Systems.* – 2014. – Vol. 26 (2). – P. 949-959.
15. Sanayei A., Mousavi S.F., Yazdankhah A. Group decision making process for supplier selection with VIKOR under fuzzy environment // *Expert Syst. Appl.* – 2010. – Vol. 37 (1). – P. 24-30.
16. Chen S., Hwang C.L. *Fuzzy Multiple Attribute Decision Making Methods and Applications.* – Springer Verlag, 1992.
17. Ye F., Li Y.N. An extended TOPSIS model based on the Possibility theory under fuzzy environment // *Knowl.-Based Systems.* – 2014. – Vol. 67. – P. 263-269.
18. Boran F.E., et. al. A multicriteria intuitionistic fuzzy group decision making for supplier selection with TOPSIS method // *Expert Systems Appl.* – 2009. – Vol. 36 (8). – P. 11363-11368.
19. Zeng J., An M., Smith N.J. Application of a fuzzy based decision making methodology to construction project risk assessment // *Int. Jour. of Project Management.* – 2007. – Vol. 25 (6). – P. 589-600.
20. Rodzin S., Rodzina O. Metaheuristics memes and biogeography for trans computational combinatorial optimization problems // *Proc. of the 6th Int. Conf. – Cloud System and Big Data Engineering.* – 2016. – P. 1-5.
21. Xu Z., Liao H. Intuitionistic fuzzy analytic hierarchy process // *IEEE Trans. Fuzzy Systems.* – 2014. – Vol. 22 (4). – P. 749-761.
22. Wang Y., et. al. Selecting a cruise port of call location using the fuzzy-AHP method: A case study in East Asia // *Tourism Management.* – 2014. – Vol. 42. – P. 262-270.
23. El-Khatib S., Rodzin S., Skobtsov Yu. Investigation of optimal heuristical parameters for mixed ACO-k-means segmentation algorithm for MRI images // *Proc. 3rd Int. Scientific Conf. on Information Technologies in Science, Management, Social Sphere and Medicine (ITSMSSM).* – 2016. – Vol. 51. – P. 216-221.
24. Cho J., Lee J. Development of a new technology product evaluation model for assessing commercialization opportunities using Delphi method and fuzzy AHP approach // *Expert Syst. Appl.* – 2013. – Vol. 40 (13). – P. 5314-5330.
25. Chan F.T.S., Kumar N. Global supplier development considering risk factors using fuzzy extended AHP-based approach // *Omega-Int. Jour. Manage Syst.* – 2007. – Vol. 35 (4). – P. 417-431.
26. Saaty T.L. *Theory and applications of the analytic network process.* – RWS Publications, 2005.
27. Onut S., Kara S.S., Isik E. Long term supplier selection using a combined fuzzy MCDM approach: A case study for a telecommunication company // *Expert Syst. Appl.* – 2009. – Vol. 36 (2). – P. 3887-3895.
28. Pourjavad E., Shirouyehzad H. Evaluating manufacturing systems by fuzzy ANP: A case study // *Int. Jour. of Appl. Manag. Science.* – 2014. – Vol. 6 (1). – P. 65-83.
29. Tadic S., et. al. A novel hybrid MCDM model based on fuzzy DEMATEL, fuzzy ANP and f VIKOR for city logistics concept selection // *Expert Systems with Appl.* – 2014. – Vol. 41 (18). – P. 8112-8128.

30. *Ertay T. et. al.* Evaluation of renewable energy alternatives using MACBETH and fuzzy AHP multicriteria methods: the case of Turkey // *Technological and Economic Development of Economy*. – 2013. – Vol. 19 (1). – P. 38-62.
31. *Chang B., Chang C.-W., Wu C.-H.* Fuzzy DEMATEL method for developing supplier selection criteria // *Expert Syst Appl.* – 2011. – Vol. 38 (3). – P. 1850-1858.
32. *Wu W.-W., Lee Y.-T.* Developing global managers' competencies using the fuzzy DEMATEL method // *Expert Syst. Appl.* – 2007. – Vol. 32 (2). – P. 499-507.
33. *Xu Z.* Choquet integrals of weighted intuitionistic fuzzy information // *Inform. Sciences*. – 2010. – Vol. 180 (5). – P. 726-736.
34. *Liu S.-T.* A fuzzy DEA/AR approach to the selection of flexible manufacturing systems // *Comput. Ind. Eng.* – 2008. – Vol. 54 (1). – P. 66-76.
35. *Ногин В.Д.* Принятие решений при многих критериях. – СПб.: Изд-во «ЮТАС», 2007.
36. *Борисов А.И.* Принятие решений на основе нечетких моделей. – М.: Наука, 1990.
37. *Ларичев О.И.* Вербальный анализ решений. – М.: Наука, 2006.
38. *Подиновский В.В.* Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. – М.: Физматлит, 2007.
39. *Родзин С.И., Родзина Л.С.* Биоинспирированный поиск решений: теория и приложения для обработки проблемно-ориентированных знаний в геоинформатике // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2015. – № 4. – С. 203-216.
40. *Kahraman C., Cevik S., Oztaysi B.* Fuzzy Multicriteria Decision-Making: A Literature Review // *Int. Jour. of Computational Intelligence Systems*. – 2015. – No. 8 (4). – P. 637-666.
41. *Родзин С.И.* Биоэвристики многокритериальной оптимизации: проектирование и гибридизация // *Тр. межд. конгресса IS&IT'18*. – Таганрог: Изд-во Ступина С.А., 2018. – Т. 1. – С. 33-47.
42. *Герасименко Е.М., Курейчик В.В., Родзин С.И., Кухаренко А.П.* Применение нечеткой логики для принятия решений об эвакуации при наводнении // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2022. – № 4. – С. 15-29.
43. *Родзина О.Н.* Проблемно-ориентированные алгоритмы мягких вычислений. – Чебоксары: Издательский дом «Среда», 2020. – 96 с.
44. *Atanassov K.* Intuitionistic Fuzzy Sets: Theory and Applications. Physica, 1999.
45. *Szmidt E., Kacprzyk J.* Using intuitionistic fuzzy sets in group decision making // *Control and Cybernetics*. – 2002. – Vol. 31. – P. 1055-1057.
46. *Yager R.R.* On ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decision making // *IEEE Trans. on systems. Man and Cybernetics*. – 1988. – Vol. 18 (1). – P. 183-190.
47. *Llamazares B.* Choosing OWA operator weights in the field of Social Choice // *Information Sciences*. – 2007. – Vol. 177 (21). – P. 4745-4756.

REFERENCES

1. *Petrovskiy A.B.* Teoriya prinyatiya resheniy [Decision Theory]. Moscow: Izdatel'skiy tsentr «Akademiya», 2009.
2. *Zade L.A.* Ponyatie lingvisticheskoy peremennoy i ego primeneniye k prinyatiyu priblizhennykh resheniy [The concept of a linguistic variable and its application to making approximate decisions]. Moscow: Mir, 1976.
3. *Garibaldi J.M., Jaroszewski M., Musikasuwan S.* Nonstationary Fuzzy Sets, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2008, Vol. 16 (4), pp. 1072-1086.
4. *Torra V.* Hesitant fuzzy sets, *Jour. Int. Intell. Syst.*, 2010, Vol. 25 (6), pp. 529-539.
5. *Bender M.J., Simonovic S.P.* A fuzzy compromise approach to water resource systems planning under uncertainty, *Fuzzy Sets Syst.*, 2000, Vol. 115 (1), pp. 35-44.
6. *Vahdani B., Hadipour H.* Extension of the ELECTRE method based on interval-valued fuzzy sets, *Soft Comput.*, 2011, Vol. 15 (3), pp. 569-579.
7. *Rouyendegh B., Erkan T.* An Application of the Fuzzy ELECTRE Method for Staff Selection, *Hum. Factor Ergon. Man.*, 2013, Vol. 23 (2), pp. 107-115.
8. *Kaya T., Kahraman C.* A fuzzy approach to ebanking website quality assessment based on an integrated AHP-ELECTRE method, *Technological and Economic Development of Economy*, 2011, 17 (2), pp. 313-334.
9. *Wu M.-C., Chen T.-Y.* The ELECTRE multicriteria analysis approach based on Atanassov's intuitionistic fuzzy sets, *Expert Syst. Appl.*, 2011, Vol. 38 (10), pp. 12318-12327.

10. Chen T.-Y. An ELECTRE-based outranking method for multiple criteria group decision making using interval type-2 fuzzy sets, *Inform. Sciences*, 2014, Vol. 263, pp. 1-21.
11. Goumas M., Lygerou V. An extension of the PROMETHEE method for decision making in fuzzy environment: Ranking of alternative energy exploitation projects, *Eur. Jour. Oper. Res.*, 2000, Vol. 123 (3), pp. 606-613.
12. Chang T.H. Fuzzy VIKOR method: A case study of the hospital service evaluation in Taiwan, *Inform. Sciences*, 2014, Vol. 271, pp. 196-212.
13. Kacprzyk J., Zadrozny S., Nurmi H., Bozhenyuk A. Towards Innovation Focused Fuzzy Decision Making, *IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems*, 2021, pp. 256-268.
14. Ebrahimnejad S., et. al. Risk ranking in mega projects by fuzzy compromise approach: A comparative analysis, *Jour. Intell. Fuzzy Systems*, 2014, Vol. 26 (2), pp. 949-959.
15. Sanayei A., Mousavi S.F., Yazdankhah A. Group decision making process for supplier selection with VIKOR under fuzzy environment, *Expert Syst. Appl.*, 2010, Vol. 37 (1), pp. 24-30.
16. Chen S., Hwang C.L. Fuzzy Multiple Attribute Decision Making Methods and Applications. Springer Verlag, 1992.
17. Ye F., Li Y.N. An extended TOPSIS model based on the Possibility theory under fuzzy environment, *Knowl.-Based Systems*, 2014, Vol. 67, pp. 263-269.
18. Boran F.E., et. al. A multicriteria intuitionistic fuzzy group decision making for supplier selection with TOPSIS method, *Expert Systems Appl.*, 2009, Vol. 36 (8), pp. 11363-11368.
19. Zeng J., An M., Smith N.J. Application of a fuzzy based decision making methodology to construction project risk assessment, *Int. Jour. of Project Management*, 2007, Vol. 25 (6), pp. 589-600.
20. Rodzin S., Rodzina O. Metaheuristics memes and biogeography for trans computational combinatorial optimization problems, *Proc. of the 6th Int. Conf. – Cloud System and Big Data Engineering*, 2016, pp. 1-5.
21. Xu Z., Liao H. Intuitionistic fuzzy analytic hierarchy process, *IEEE Trans. Fuzzy Systems*, 2014, Vol. 22 (4), pp. 749-761.
22. Wang Y., et. al. Selecting a cruise port of call location using the fuzzy-AHP method: A case study in East Asia, *Tourism Management*, 2014, Vol. 42, pp. 262-270.
23. El-Khatib S., Rodzin S., Skobtsov Yu. Investigation of optimal heuristical parameters for mixed ACO-k-means segmentation algorithm for MRI images, *Proc. 3rd Int. Scientific Conf. on Information Technologies in Science, Management, Social Sphere and Medicine (ITSMSSM)*, 2016, Vol. 51, pp. 216-221.
24. Cho J., Lee J. Development of a new technology product evaluation model for assessing commercialization opportunities using Delphi method and fuzzy AHP approach, *Expert Syst. Appl.*, 2013, Vol. 40 (13), pp. 5314-5330.
25. Chan F.T.S., Kumar N. Global supplier development considering risk factors using fuzzy extended AHP-based approach, *Omega-Int. Jour. Manage Syst.*, 2007, Vol. 35 (4), pp. 417-431.
26. Saaty T.L. Theory and applications of the analytic network process. RWS Publications, 2005.
27. Onut S., Kara S.S., Isik E. Long term supplier selection using a combined fuzzy MCDM approach: A case study for a telecommunication company, *Expert Syst. Appl.*, 2009, Vol. 36 (2), pp. 3887-3895.
28. Pourjavad E., Shirouyehzad H. Evaluating manufacturing systems by fuzzy ANP: A case study, *Int. Jour. of Appl. Manag. Science*, 2014, Vol. 6 (1), pp. 65-83.
29. Tadic S., et. al. A novel hybrid MCDM model based on fuzzy DEMATEL, fuzzy ANP and f VIKOR for city logistics concept selection, *Expert Systems with Appl.*, 2014, Vol. 41 (18), pp. 8112-8128.
30. Ertay T. et. al. Evaluation of renewable energy alternatives using MACBETH and fuzzy AHP multicriteria methods: the case of Turkey, *Technological and Economic Development of Economy*, 2013, Vol. 19 (1), pp. 38-62.
31. Chang B., Chang C.-W., Wu C.-H. Fuzzy DEMATEL method for developing supplier selection criteria, *Expert Syst Appl.*, 2011, Vol. 38 (3), pp. 1850-1858.
32. Wu W.-W., Lee Y.-T. Developing global managers' competencies using the fuzzy DEMATEL method, *Expert Syst. Appl.*, 2007, Vol. 32 (2), pp. 499-507.
33. Xu Z. Choquet integrals of weighted intuitionistic fuzzy information, *Inform. Sciences.*, 2010, Vol. 180 (5), pp. 726-736.
34. Liu S.-T. A fuzzy DEA/AR approach to the selection of flexible manufacturing systems, *Comput. Ind. Eng.*, 2008, Vol. 54 (1), pp. 66-76.
35. Nogin V.D. Prinyatie resheniy pri mnogikh kriteriyakh [Decision-making under many criteria]. St. Petersburg: Izd-vo «YuTAS», 2007.

36. Borisov A.I. Prinyatie resheniy na osnove nechetkikh modeley [Decision-making based on fuzzy models]. Moscow: Nauka, 1990.
37. Larichev O.I. Verbal'nyy analiz resheniy [Verbal analysis of solutions]. Moscow: Nauka, 2006.
38. Podinovskiy V.V. Pareto-optimal'nye resheniya mnogokriterial'nykh zadach [Pareto-optimal solutions to multi-criteria problems]. Moscow: Fizmatlit, 2007.
39. Rodzin S.I., Rodzina L.S. Bioinspirirovannyi poisk resheniy: teoriya i prilozheniya dlya obrabotki problemno-orientirovannykh znaniy v geoinformatike [Bioinspired search for solutions: theory and applications for processing problem-oriented knowledge in geoinformatics], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 4, pp. 203-216.
40. Kahraman C., Cevik S., Oztaysi B. Fuzzy Multicriteria Decision-Making: A Literature Review, *Int. Jour. of Computational Intelligence Systems*, 2015, No. 8 (4), pp. 637-666.
41. Rodzin S.I. Bioevristiki mnogokriterial'noy optimizatsii: proektirovanie i gibridizatsiya [Bioheuristics of multicriteria optimization: design and hybridization], *Tr. mezhd. kongressa IS&IT'18* [Proceedings of the international congress IS&IT'18]. Taganrog: Izd-vo Stupina S.A., 2018, Vol. 1, pp. 33-47.
42. Gerasimenko E.M., Kureychik V.V., Rodzin S.I., Kukharensko A.P. Primenenie nechetkoy logiki dlya prinyatiya resheniy ob evakuatsii pri navodnenii [Application of fuzzy logic for decision-making on evacuation in case of flooding], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2022, No. 4, pp. 15-29.
43. Rodzina O.N. Problemno-orientirovannyye algoritmy myagkikh vychisleniy [Problem-oriented algorithms of soft computing]. Cheboksary: Izdatel'skiy dom «Sreda», 2020, 96 p.
44. Atanassov K. Intuitionistic Fuzzy Sets: Theory and Applications. Physica, 1999.
45. Szmidt E., Kacprzyk J. Using intuitionistic fuzzy sets in group decision making, *Control and Cybernetics*, 2002, Vol. 31, pp. 1055-1057.
46. Yager R.R. On ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decision making, *IEEE Trans. on systems. Man and Cybernetics*, 1988, Vol. 18 (1), pp. 183-190.
47. Llamazares B. Choosing OWA operator weights in the field of Social Choice, *Information Sciences*, 2007, Vol. 177 (21), pp. 4745-4756.

Статью рекомендовала к опубликованию д.т.н., профессор Л.С. Лисицына.

Родзин Сергей Иванович – Южный федеральный университет; e-mail: srodzin@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; кафедра математического обеспечения и применения ЭВМ; профессор.

Боженюк Александр Витальевич – e-mail: avb002@yandex.ru; кафедра информационно-аналитических систем безопасности; профессор.

Кравченко Юрий Алексеевич – e-mail: yakravchenko@sfedu.ru; кафедра систем автоматизированного проектирования; д.т.н.; доцент.

Родзина Ольга Николаевна – e-mail: orodzina@sfedu.ru; кафедра математического обеспечения и применения ЭВМ; ст. преподаватель.

Rodzin Sergey Ivanovich – Southern Federal University; e-mail: srodzin@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371673; the department of software engineering; professor.

Bozhenyuk Alexander Vitalyevich – e-mail: avb002@yandex.ru; phone: +78634371651; the department of information and analytical security system; professor.

Kravchenko Yuriy Alekseevich – e-mail: yakravchenko@sfedu.ru; the department of computer aided design; dr. of eng. sc.; associate professor.

Rodzina Olga Nikolaevna – e-mail: orodzina@sfedu.ru; phone: +78634371673; the department of software engineering; senior teacher.