УДК 519.7

А.О. Алексеев

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ПОДХОДОВ К ТЕОРЕТИКО-МНОЖЕСТВЕННЫМ ОПЕРАЦИЯМ НАД НЕЧЕТКИМИ МНОЖЕСТВАМИ В ПРОЦЕДУРЕ НЕЧЕТКОГО КОМПЛЕКСНОГО ОЦЕНИВАНИЯ

Рассматриваются матричные механизмы комплексного оценивания, широко применяющиеся для решения задач многокритериального выбора. Функциональные возможности данных методов существенно расширяются благодаря интерполяции функции свертки на непрерывной области определения сворачиваемых аргументов, чего удалось добиться в том числе благодаря нечеткой процедуре комплексного оценивания. Исследуется возможность использования в процедуре нечеткого комплексного оценивания многопараметрических объектов, альтернативных по отношению к известным максминному, вероятностному, в том числе аддитивно-мультипликативному, подходам к теоретико-множественным операциям пересечения и объединения нечетких множеств. Показано, что с использованием представленных в данной работе подходов не удается сделать матричную свертку монотонной и гладкой, что приводит к погрешности комплексного оценивания и необоснованности принимаемых решений в задачах многокритериального выбора, оптимизации и управления.

Ключевые слова: многопараметрические объекты, матричные свертки, нечеткие множества, операции над нечеткими множествами, нечеткое комплексное оценивание.

A.O. Alekseev

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

RESEARCH OF ALTERNATIVE APPROACHES TO THEORETIC-MULTIPLE OPERTIONS UNDER FUZZY SETS IN THE PROCEDURE OF FUZZY INTAGRATED ASSESSEMENT

The matrix integrated assessment mechanisms are widely used for solving multi-criteria selection task. The functionality of these methods significantly enhanced by convolution interpolation function on a continuous domain of the editor boxes arguments that could be achieved, including through the procedure of fuzzy comprehensive evaluation. The possibility of use in the procedure of fuzzy comprehensive evaluation multi-parameter objects serve as an alternative to the known maxmin, probabilistic, including additive-multiplicative approaches to set-theoretic operations of union and intersection of fuzzy sets. It is shown that using the presented in this paper approaches fail to make the convolution matrix monotone and smooth, resulting in a comprehensive estimation error and unfounded decisions made in the problems of multi-criteria selection, optimization and control.

Keywords: multi-criteria objects, matrix convolutions, fuzzy sets, operations under fuzzy sets, fuzzy integrated assessment.

Введение

Для решения задачи многокритериального выбора применяются самые различные механизмы комплексного оценивания, описывающие правило выбора лица, принимающего решения, под которым традиционно понимается целенаправленный индивид или коллектив, объединенный общей целью. Объекты, в отношении которых осуществляется выбор в многокритериальной задаче, описываются вектором свойств, по каждому из которых определяется критерий эффективности состояния объекта.

Сложность решения многокритериальной задачи выбора объясняется не только тем, что свойства объекта могут быть гетерогенными по отношению друг другу, но и тем, что некоторые свойства могут быть свойствами нечисловой природы, т.е. не количественно измеримыми, а качественно описываемыми, что определяет необходимость использования экспертных методов [1] оценивания их состояния.

1. Обзор существующих методов и подходов, применяющихся для решения задачи многокритериального выбора

В обзоре [2] представлен список применяющихся за рубежом подходов и методов для решения задачи многокритериального выбора на примере задачи выбора подрядчика. По словам авторов [2], наиболее часто встречаются решения, основанные на использовании метода анализа иерархий, метода анализа сетей, теории нечетких множеств, нейронных сетей, генетических алгоритмов и SMART-технологий, а также их различных комбинаций. Данные методы и подходы не только получили известность за рубежом, но и активно используются в российской практике. Однако к перечисленным подходам следует добавить популярные в нашей стране теории, не попавшие в обзор зарубежных исследователей и имеющие специальные инструменты комплексного оценивания. К таким теориям относятся квалиметрия [3], теория важности критериев [4], теория активных систем [5] и теория управления организационными системами [6]. В рамках последних двух теорий для решения задачи многокритериального выбора применяются матричные механизмы комплексного оценивания [7, 8], которые разрабатывались начиная с 70-х гг. XX в. и активно совершенствуются в настоящее время [9–13] разными исследователями.

Преимущество матричных механизмов комплексного оценивания заключается в том, что с использованием простых категорических суждений эксперта, оценивающего состояние каждого свойства многопараметрического объекта, формируются составные правила вывода: «если i-е свойство … и j-е свойство …, то объект, по мнению эксперта, имеет … состояние». Например, если i-е свойство плохое и j-е свойство хорошее, то объект, по мнению эксперта, имеет удовлетворительное состояние.

Набор таких правил удобно представлять в матричном виде, что и определило название данного метода. Эти правила составляют базис для ранжирования любых объектов, описываемых набором учтенных экспертом свойств.

Учесть модальные суждения экспертов, усиливающие или ослабляющие свойства конкретных оцениваемых объектов выбора, позволила теория нечетких множеств [14], что нашло отражение в процедуре нечеткого комплексного оценивания, предложенной Д.А. Новиковым и его коллегами в работе [9]. Исследование нечеткой процедуры комплексного оценивания подробно описано в работах В.А. Харитонова (см., например, [11]).

В обычном случае, без использования нечеткого комплексного оценивания, из-за дискретности шкал для точного ранжирования многопараметрических объектов необходимо увеличение делений этих шкал, что приводит к осложнению процедуры конструирования логических матриц свертки.

В работе [13] показано, что, применив в процедуре нечеткого комплексного оценивания аддитивно-мультипликативный подход, удалось сделать матричную свертку на непрерывной области определения аргументов монотонной, и гладкой для стандартных функций свертки, и кусочно-гладкой на всем множестве определения аргументов свертки, что позволяет расширить применяемый набор инструментов исследования в задачах многокритериального выбора, оптимизации, а также управления.

2. Цель работы

Целью данной работы является исследование возможности применения в процедуре нечеткого комплексного оценивания многопараметрических объектов управления, альтернативных [15] по отношению к традиционными максминным и вероятностным, в том числе аддитивно-мультипликативным, подходам к теоретико-множественным операциям над нечеткими множествами.

3. Нечеткая процедура комплексного оценивания

Для осуществления нечеткой процедуры комплексного оценивания, обобщенный алгоритм которой представлен в [12], необходимы значения параметров, описывающих каждое свойство многопараметрического объекта, принадлежащее множеству действительных чисел, представить в виде нечетких чисел, т.е. фаззифицировать (от англ. *fuzzy set* – нечеткое множество).

Фаззификация производится следующим образом: каждому дискретному значению шкалы комплексного оценивания, соответствующему критерию состояния параметра и имеющему некую интерпретацию, например: 1 – плохое, 2 – удовлетворительное, 3 – хорошее и 4 – отличное состояние критерия (в общем случае может быть любое число делений шкалы комплексного оценивания), строится нечеткое множество с треугольной функцией принадлежности (рис. 1).

Тогда для любого значения, принадлежащего непрерывной шкале, определенной на шкале комплексного оценивания, можно вычислить значения функции принадлежности нечетких чисел, носителям которых принадлежит фаззифицируемое значение (см. рис. 1).

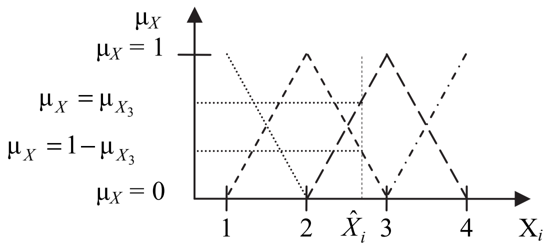


Рис. 1. Фаззификация значения параметра, описывающего i-е свойство многопараметрического объекта (*авторские результаты*)

Обратная задача – выбора представителя нечеткого числа – решается с помощью уравнения центра тяжести [11]:

$$X = \sum_{o=\overline{1,4}} X_o \cdot \mu_{X_o} \Big/ \sum_{o=\overline{1,4}} \mu_{X_o} \mid X_o = o; o = \overline{1,4}\,. \qquad (1)$$

Фаззифицируя значения параметров, описывающих свойства оцениваемого объекта на непрерывной области определения (см. рис. 1), и используя процедуру нечеткого комплексного оценивания, определяем непрерывную функцию свертки.

Для бинарной матрицы функцию свертки можно представить в виде трехмерной поверхности. В данной работе рассмотрим поверхности так называемых [11] стандартных функций, определенных на подмножествах матрицы свертки, образованных четырьмя соседними друг с другом элементами матрицы (таблица).

Стандартные функции свертки (*авторские результаты*)

№ п/п	Стандартная функция свертки	Интерпретация стандартной функции свертки	Заполнение четырех соседних элементов матрицы свертки
1	$F0$	Развитие частных критериев X_1 и X_2 не дает роста свертки $m \in X(X_1, X_2)$	$\begin{array}{cccc} & & & X_1 \\ & m & m & x_1+1 \\ & m & m & x_1 \\ X_2 & x_2+1 & x_2 & \end{array}$
2	$F1$	Развитие обоих частных критериев X_1 и X_2 дает рост свертки $m \in X(X_1, X_2)$	$\begin{array}{cccc} & & & X_1 \\ & m+1 & m & x_1+1 \\ & m & m & x_1 \\ X_2 & x_2+1 & x_2 & \end{array}$
3	$F2$	Развитие только второго критерия X_2 дает рост свертки $m \in X(X_1, X_2)$	$\begin{array}{cccc} & & & X_1 \\ & m+1 & m & x_1+1 \\ & m+1 & m & x_1 \\ X_2 & x_2+1 & x_2 & \end{array}$
4	$F3$	Развитие только первого критерия X_1 дает рост свертки $m \in X(X_1, X_2)$	$\begin{array}{cccc} & & & X_1 \\ & m+1 & m+1 & x_1+1 \\ & m & m & x_1 \\ X_2 & x_2+1 & x_2 & \end{array}$
5	$F4$	Развитие любого частного критерия (X_1 или X_2) дает рост свертки $m \in X(X_1, X_2)$	$\begin{array}{cccc} & & & X_1 \\ & m+1 & m+1 & x_1+1 \\ & m+1 & m & x_1 \\ X_2 & x_2+1 & x_2 & \end{array}$
6	$F5$	Развитие любого частного критерия (X_1 или X_2) дает рост свертки $m \in X(X_1, X_2)$, совместное развитие дает синергический эффект $m + 2$	$\begin{array}{cccc} & & & X_1 \\ & m+2 & m+1 & x_1+1 \\ & m+1 & m & x_1 \\ X_2 & x_2+1 & x_2 & \end{array}$

В данной работе ограничимся иллюстрацией $F1$, $F2$, $F4$ и $F5$. Не будем приводить стандартную функцию $F0$, так как очевидно, что образуется плоская поверхность и $F3$, ведь достаточно проиллюстрировать на примере стандартной функции $F2$, поскольку $F3 = F2^T$ (см. таблицу). Проекция этих поверхностей на область определения свертки образует набор кривых безразличия.

4. Исследование альтернативных подходов к операциям пересечения и объединения нечетких множеств

Для операции пересечения к альтернативным [15] представлениям следует отнести:

$$\tilde{A} \cap \tilde{B} = \left\{ x_i / \mu_{i_A} \right\} \cap \left\{ x_i / \mu_{i_B} \right\} = \left\{ x_i / \max(0; \mu_{i_A} + \mu_{i_B}) \right\}, \tag{2}$$

$$\tilde{A} \cap \tilde{B} = \left\{ x_i / \mu_{i_A} \right\} \cap \left\{ x_i / \mu_{i_B} \right\} = \left\{ x_i / \left\{ \begin{array}{c} \mu_{i_A}, \mu_{i_B} = 1 \\ \mu_{i_B}, \mu_{i_A} = 1 \\ 0, \mu_{i_B} < 1, \mu_{i_A} < 1 \end{array} \right. \right\}, \tag{3}$$

$$\begin{gathered} \tilde{A} \cap \tilde{B} = \left\{ x_i / \mu_{i_A} \right\} \cap \left\{ x_i / \mu_{i_B} \right\} = \\ = \left\{ x_i / 1 - \min\left(1; \left[\left(1 - \mu_{i_A}\right)^p + \left(1 - \mu_{i_B}\right)^p \right]^{1/p} \right. \right\}, \text{ для } p \geq 1, \end{gathered} \tag{4}$$

для операции объединения:

$$\tilde{A} \cup \tilde{B} = \left\{ x_i / \mu_{i_A} \right\} \cup \left\{ x_i / \mu_{i_B} \right\} = \left\{ x_i / \min(1; \mu_{i_A} + \mu_{i_B}) \right\}, \tag{5}$$

$$\tilde{A} \cup \tilde{B} = \left\{ x_i / \mu_{i_A} \right\} \cup \left\{ x_i / \mu_{i_B} \right\} = \left\{ x_i / \left\{ \begin{array}{c} \mu_{i_A}, \mu_{i_B} = 0 \\ \mu_{i_B}, \mu_{i_A} = 0 \\ 1, \mu_{i_A} > 0, \mu_{i_B} > 0 \end{array} \right. \right\}, \tag{6}$$

$$\tilde{A} \cup \tilde{B} = \left\{ x_i / \mu_{i_A} \right\} \cup \left\{ x_i / \mu_{i_B} \right\} = \left\{ x_i / \min\left(1; \left[\mu_{i_A}{}^p + \mu_{i_B}{}^p \right]^{1/p} \right) \right\}, \text{ для } p \geq 1. \tag{7}$$

Так, с использованием операций (2) и (5) были получены результаты, представленные на рис. 2.

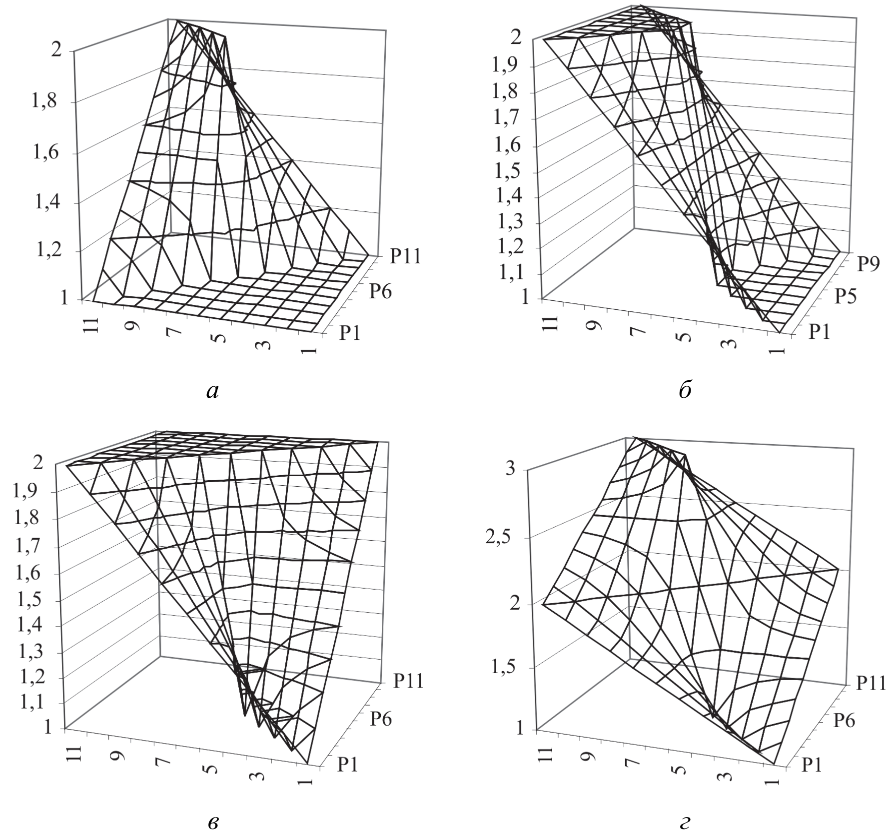


Рис. 2. Топологическое представление стандартных функций: *а* – *F*1; *б* – *F*2; *в* – *F*4; *г* – *F*5, полученное с использованием операций объединения (5) и пересечения (2) (*авторские результаты*)

Как видно из рис. 2, первый, приведенный по порядку альтернативный подход к операциям пересечения и объединения нечетких множеств не применим к нечеткой процедуре комплексного оценивания. Это можно заключить из рис. 2, *б*, так как если задавать аргумент в нечетком виде, то для стандартной функции *F*2 должна получаться плоская поверхность.

Второй из приведенных альтернативных подходов к операциям объединения (6) и пересечения (3) нечетких множеств также не применим, так как в результате объединения значения функции принадлежности свертки обнуляются везде, кроме границ подматрицы, на которой определена стандартная функция (рис. 3).

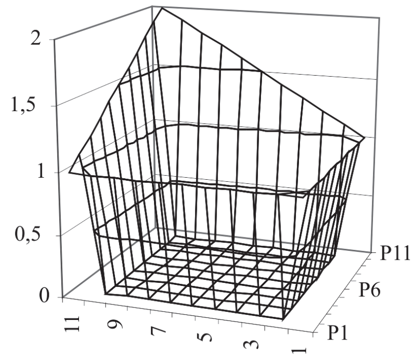
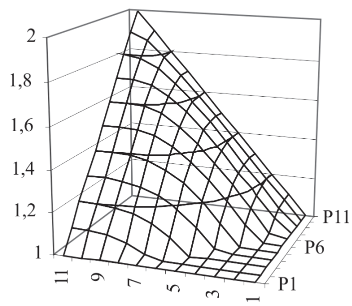
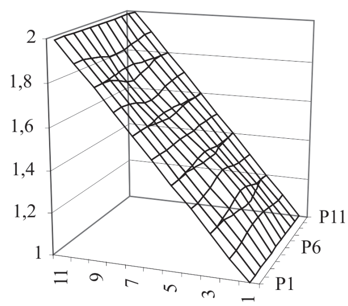


Рис. 3. Топологическое представление стандартной функции $F1$, полученное с использованием операций объединения (6) и пересечения (3) (*авторские результаты*)

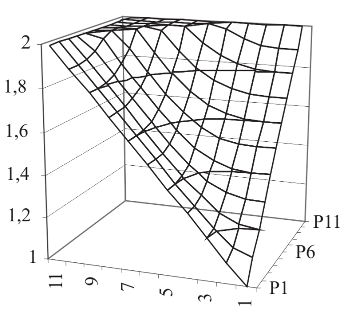
Важно отметить, что результаты применения операций (4) и (7) зависят от неизвестного параметра p. Так, при $p = 2$ были получены результаты, представленные на рис. 4.



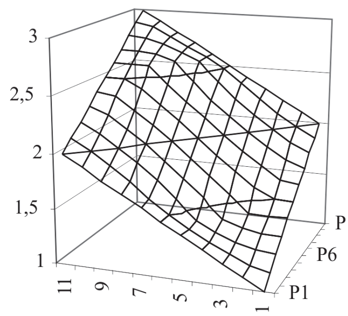
а



б



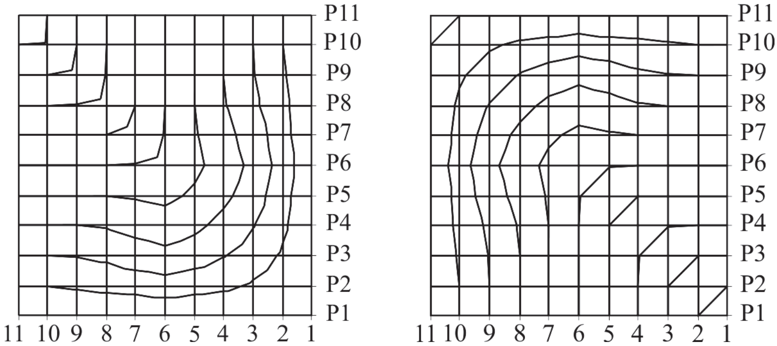
в



г

Рис. 4. Топологическое представление стандартных функций: *а* – $F1$; *б* – $F2$; *в* – $F4$; *г* – $F5$, полученное с использованием операций объединения (7) и пересечения (4) (*авторские результаты*)

При увеличении параметра p поверхности стандартных функций $F2$, $F3$ и $F5$ начинают сглаживаться, однако при этом стандартные функции $F1$ и $F4$ теряют монотонность (рис. 5). При стремлении p к бесконечности получим результат, близкий к результату, полученному с помощью максминного подхода, приведенного в [11].



а *б*

Рис. 5. Проекция стандартной функции: *а* – $F1$; *б* – $F4$, полученная с использованием операций объединения (7) и пересечения (4) при параметре p = 10 (*авторские результаты*)

Как видно из представленных рисунков (см. рис. 2–6), ни один из альтернативных подходов к операциям пересечения (2)–(4) и объединения (5)–(7) не делает матричную свертку монотонной, что будет приводить к погрешности процедуры комплексного оценивания и препятствовать ее практическому использованию.

Заключение

Среди подходов к теоретико-множественным операциям объединения и пересечения в данной работе рассматривались альтернативные по отношению к максминному, вероятностному и аддитивно-мультипликативному подходы, которые подробно были рассмотрены в [13]. Перечень исследуемых подходов может быть расширен, но полученные в данной работе результаты показывают, что матричная свертка не является монотонной. Это говорит о том, что при описанных подходах к фаззификации и дефаззификации единственным на данный момент подходом к теоретико-множественным операциям, делающим матричную свертку монотонной и кусочно-гладкой на всей области определения сворачиваемых аргументов, является аддитивно-мультипликативный [13].

Работа подготовлена при финансовой поддержке ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Список литературы

1. Орлов А.И. Теория экспертных оценок в нашей стране [Электронный ресурс] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2013. – № 93. – С. 1–11. – URL: http://ej.kubagro.ru/2013/09/pdf/19.pdf.

2. Ho W., Xu X., Dey P.K. Multi-criteria decision making approaches for supplier evaluation and selection: A literature review // European journal of operational research. – 2010. – No. 202. – P. 16–24.

3. Азгальдов Г.Г. Теория и практика оценки качества товаров (основы квалиметрии). – М.: Экономика, 1982. – 256 с.

4. Подиновский В.В. Введение в теорию важности критериев в многокритериальных задачах принятия решений. – М.: Физматлит, 2007. – 64 с.

5. Бурков В.Н., Новиков Д.А. Теория активных систем: состояние и перспективы. М.: Синтег, 1999. – 128 с.

6. Новиков Д.А. Теория управления организационными системами / Моск. психол.-соц. ин-т. – М., 2005. – 581 с.

7. Бурков В.Н., Зимоха В.А., Цыганов В.В. Методология и принципы автоматизированной комплексной количественной оценки результатов деятельности НИИ и КБ // Приборы и системы управления. – 1982. – № 3. – С. 41–43.

8. Глотов В.А., Павельев В.В. Векторная стратификация. – М.: Наука, 1984 – 132 с.

9. Андроникова Н.Г., Леонтьев С.В., Новиков Д.А. Процедуры нечеткого комплексного оценивания // Современные сложные системы управления: тр. междунар. науч.-практ. конф. / Лип. гос. техн. ун-т. – Липецк, 2002. – С. 7–8.

10. Анохин А.М. Гусев В.Б. Павельев В.В. Комплексное оценивание и оптимизация на моделях многомерных объектов. – М.: Изд-во Ин-та проблем управления им. Трапезникова РАН, 2003. – 79 с.

11. Технологии современного менеджмента / В.А. Харитонов, А.А. Белых; под науч. ред. В.А. Харитонова. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2007. – 190 с.

12. Алгоритмические основы нечеткой процедуры комплексного оценивания объектов различной природы / А.О. Алексеев [и др.] // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 3 (ч. 3). – С. 469–474. – URL: www.rae.ru/fs/?section=content&op=show_article&article_id=10002965 (дата обращения: 07.05.2014).

13. Алексеев А.О., Алексеева И.Е. Процедуры нечеткого комплексного оценивания объектов различной природы [Электронный ресурс] // XII Всерос. совещание по проблемам управления (ВСПУ 2014), г. Москва, 16–19 июня 2014 г. – М.: ИПУ РАН, – 2014. – С. 7884–7893. – URL: http://vspu2014.ipu.ru/proceedings/prcdngs/7884.pdf.

14. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / пер. Н.И. Ринго, под ред. Н.Н. Моисеева и С.А. Орловского. – М.: Мир, 1976. – 167 с.

15. Нечеткое множество [Электронный ресурс]. – URL: http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9D%D0%B5%D1%87%D0%B5%D1%82%D0%BA%D0%BE%D0%B5_%D0%BC%D0%BD%D0%BE%D0%B6%D0%B5%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%BE (дата обращения: 18.05.2014).

References

1. Orlov A.I. Teoriia ekspertnykh otsenok v nashei strane [Theory of expert values in our country]. Politematicheskii setevoi elektronnyi nauchnyi zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta, 2013, no. 93, pp. 1-11, available at: http://ej.kubagro.ru/2013/09/pdf/19.pdf.

2. Ho W., Xu X., Dey P.K. Multi-criteria decision making approaches for supplier evaluation and selection: A literature review. *European journal of operational research*, 2010, no. 202, pp. 16-24.

3. Azgal'dov G.G. Teoriia i praktika otsenki kachestva tovarov (osnovy kvalimetrii) [Theory and practices of commodity quality assessment (fundamentals of qualimetrics)]. Moscow: Ekonomika, 1982, 256 p.

4. Podinovskii V.V. Vvedenie v teoriiu vazhnosti kriteriev v mnogokriterial'nykh zadachakh priniatiia reshenii [[Introduction to the theory of criteria importance in the multicriteria challenges of decision-making]. Moscow: Fizmatlit, 2007, 64 p.

5. Burkov V.N., Novikov D.A. Teoriia aktivnykh sistem: sostoianie i perspektivy [Theory of active systems: state and prospects]. Moscow: Sinteg, 1999, 128 p.

6. Novikov D.A. Teoriia upravleniia organizatsionnymi sistemami [Organization systems control science]. Moscow: Moskovskii psikhologo-sotsial'nyi institut, 2005, 581 p.

7. Burkov V.N., Zimokha V.A. Tsyganov V.V. Metodologiia i printsipy avtomatizirovannoi kompleksnoi kolichestvennoi otsenki rezul'tatov deiatel'nosti NII i KB [Methodology and principles of automated complex quantitative performance evaluation research institutes and design departments]. *Pribory i sistemy upravleniia*, 1982, no. 3, pp. 41-43.

8. Glotov V.A., Pavel'ev V.V. Vektornaia stratifikatsiia [Vector stratification]. Moscow: Nauka, 1984, 132 p.

9. Andronikova N.G., Leont'ev S.V., Novikov D.A. Protsedury nechetkogo kompleksnogo otsenivaniia [Fuzzy integrated assessment procedures]. Trudy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "*Sovremennye slozhnye sistemy upravleniia*". Lipetsk: Lipetskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2002, pp. 7-8.

10. Anokhin A.M., Gusev V.B., Pavel'ev V.V. Kompleksnoe otsenivanie i optimizatsiia na modeliakh mnogomernykh ob'ektov [Integrated assessment and optimization on models of multi-criteria objects]. Moscow: Institut problem upravleniia imeni V.A. Trapeznikova, 2003, 79 p.

11. Kharitonov V.A., Belykh A.A. Tekhnologii sovremennogo menedzhmenta [Technologies of up-to-date management]. Ed. V.A. Kharitonov. Perm: Permskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2007, 190 p.

12. Alekseev A.O. [et al.] Algoritmicheskie osnovy nechetkoi protsedury kompleksnogo otsenivaniia ob'ektov razlichnoi prirody [Algorithmic basics of fuzzy protsedure of integrated assessment of different object nature]. *Fundamental'nye issledovaniia*, 2014, no. 3 (part 3), pp. 469-474, available at: www.rae.ru/fs/?section=content&op=show_article&article_id=10002965 (accessed 7 May 2014).

13. Alekseev A.O., Alekseeva I.E. Protsedury nechetkogo kompleksnogo otsenivaniia ob'ektov razlichnoi prirody [Procedures of fuzzy integrated assessment of difference objects nature]. XII Vserossiiskoe soveshchanie po problemam upravleniia VSPU 2014. Moscow: Institut problem upravleniia imeni V.A. Trapeznikova, 2014, pp. 7884-7893, available at: http://vspu2014.ipu.ru/proceedings/prcdngs/7884.pdf.

14. Zade L. Poniatie lingvisticheskoi peremennoi i ego primenenie k priniatiiu priblizhennykh reshenii [The concept of a linguistic variable and

its application to the making of approximate decisions]. Moscow: Mir, 1976, 167 p.

15. Nechetkoe mnozhestvo [Fuzzy set], available at: http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9D%D0%B5%D1%87%D0%B5%D1%82%D0%BA%D0%BE%D0%B5_%D0%BC%D0%BD%D0%BE%D0%B6%D0%B5%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%BE.

Получено 21.11.2014

Об авторе

Алексеев Александр Олегович (Пермь, Россия) – кандидат экономических наук, докторант кафедры «Строительный инжиниринг и материаловедение» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: alekseev@cems.pstu.ru)

About the author

Alexander O. Alekseev (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Economical Sciences, Doctoral student, Department of Construction Engineering and Material Sciences, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: alekseev@cems.pstu.ru).