

ОЦЕНКА АЛЬТЕРНАТИВ: НОВЫЕ ПОДХОДЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Е.А. Серебрякова, sea-parish@mail.ru

С.А. Баркалов, bsa610@yandex.ru

С.И. Моисеев, mail@moiseevs.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6136-9763>

Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия

Аннотация. Процесс принятия решений играет важную роль в развитии общества в целом и эффективном управлении организациями в частности. В современном мире, где сложность задач и конкурентная среда постоянно растут, принятие правильных и обоснованных решений становится ключевым элементом успеха. Любой человек, группа людей или организации постоянно сталкиваются с необходимостью выбора между несколькими возможными вариантами действий, называемых альтернативами, будь то в личной сфере или в работе организаций. Для эффективного принятия сложных решений в рамках деятельности организаций разработаны модели принятия оптимальных решений. Наиболее популярной из них является модель принятия решений в условиях определенности, когда на результат решения не оказывают воздействие случайные факторы. Все это подтверждает актуальность научных исследований в области принятия решений. **Цель исследования** заключается в разработке методики оценки степени привлекательности альтернатив на основе объективных количественных либо субъективных качественных критериев, что позволит повысить качество принимаемых решений. В основе методики лежат математические модели обработки информации, содержащей характеристики альтернатив по критериям оценивания. **Материалы и методы.** В основе приведенной в работе методики оценки альтернатив лежат математические модели обработки информации, которые основаны на методах математического моделирования, методах оптимизации, линейного программирования, теории нечетких множеств, теории латентных переменных, а также методы принятия решений в условиях неопределенности и методы экспертного оценивания. **Результаты.** В работе предложена методика оценивания степени привлекательности альтернатив при принятии решений в условиях определенности, а также описаны модели обработки информации, на основании которой производится оценивание альтернатив по критериям. Рассмотрены два варианта оценивания: по количественным критериям, которые оперируют объективными характеристиками альтернатив, и по качественным критериям, характеристики альтернатив для которых получаются на основе субъективного экспертного оценивания. Экспертное оценивание рассмотрено как для индивидуальной экспертизы одним экспертом, так и для группового экспертного оценивания множеством экспертов. **Заключение.** Применение приведенной методики в процедуру принятия решений в условиях определенности позволит повысить качество принимаемых решений и снизить риски от их реализации.

Ключевые слова: принятие решений, оценки альтернатив, математическое моделирование, критерии оценивания, нечеткие множества, латентные переменные

Для цитирования: Серебрякова Е.А., Баркалов С.А., Моисеев С.И. Оценка альтернатив: новые подходы принятия решений в условиях определенности // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2024. Т. 24, № 3. С. 90–98. DOI: 10.14529/ctcr240308

Original article
DOI: 10.14529/ctcr240308

EVALUATING ALTERNATIVES: NEW APPROACHES FOR DECISION MAKING UNDER CERTAINTY

E.A. Serebryakova, sea-parish@mail.ru

S.A. Barkalov, bsa610@yandex.ru

S.I. Moiseev, mail@moiseevs.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6136-9763>

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract. The decision-making process plays an important role in the development of society in general and the effective management of organizations in particular. In today's world, where the complexity of tasks and the competitive environment are constantly growing, making the right and informed decisions becomes a key element of success. Any person, group of people or organization is constantly faced with the need to choose between several possible courses of action, called alternatives, whether in the personal sphere or in the work of organizations. To effectively make complex decisions within the activities of organizations, models for making optimal decisions have been developed. The most popular of them is the model of decision-making under conditions of certainty, when the outcome of the decision is not influenced by random factors. All this confirms the relevance of scientific research in the field of decision making. **Aim.** The purpose of the study is to develop a methodology for assessing the degree of attractiveness of alternatives based on objective quantitative or subjective qualitative criteria, which will improve the quality of decisions made. The methodology is based on mathematical models for processing information containing the characteristics of alternatives according to evaluation criteria. **Materials and methods.** The methodology for evaluating alternatives presented in the work is based on mathematical models of information processing, which are based on methods of mathematical modeling, optimization methods, linear programming, theory of fuzzy sets, theory of latent variables, as well as methods of decision-making under conditions of uncertainty and methods of expert assessment. **Results.** The relevance of the development of a model for evaluating construction projects according to quantitative criteria is shown, ways of solving the tasks are given and justified. A mathematical model has been developed that makes it possible to evaluate construction projects by objective indicators based on the theory of fuzzy sets and the Rush model for estimating latent variables. On the basis of numerical methods, the adequacy of the received estimates of construction projects is substantiated, the methodology for implementing computational procedures necessary for the practical implementation of evaluation models is described. **Conclusion.** The application of the given methodology in the decision-making procedure under conditions of certainty will improve the quality of decisions made and reduce the risks of their implementation.

Keywords: decision making, evaluation of alternatives, mathematical modeling, evaluation criteria, fuzzy sets, latent variables

For citation: Serebryakova E.A., Barkalov S.A., Moiseev S.I. Evaluating alternatives: new approaches for decision making under certainty. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2024;24(3):90–98. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr240308

Введение

Принятие решений – это неотъемлемая часть нашей повседневной жизни. Любой человек, группа людей или организации постоянно сталкивается с необходимостью выбора между несколькими возможными вариантами действий, называемых альтернативами, будь то в личной сфере или в работе организаций. Для эффективного принятия сложных решений в рамках деятельности организаций разработаны модели принятия оптимальных решений. Наиболее популярной из них является модель принятия решений в условиях определенности [1], когда на результат решения не оказывают воздействие случайные факторы. При этом важнейшим этапом в процессе принятия решений является оценка альтернатив.

Под оценкой альтернатив будем понимать процесс получения степени ее привлекательности для лица, принимающего решение (ЛПР) в целом или по некоторому критерию (показателю) в частности.

При оценке альтернатив важно учитывать различные аспекты, такие как стоимость, время, ресурсы, потенциальные риски и выгоды. Необходимо также учитывать цели и ценности, которые необходимо достичь с помощью принимаемого решения. Ввиду этого процесс оценки альтернатив часто является многокритериальным.

Целью данной работы является описание методики оценки степени привлекательности альтернатив на основе объективного или экспертного оценивания. Данная методика будет содержать математические методы оценивания, некоторые из них отличаются научной новизной.

В основе математических моделей и в качестве математического инструментария, входящих в методику оценивания альтернатив, лежат теории нечетких множеств [2–4], теория латентных переменных, а именно модель Раша оценки латентных переменных [5–8], а также методы принятия решений в условиях неопределенности и методы экспертного оценивания.

Общая схема оценивания альтернатив

Постановка задачи следующая: имеется некоторое количество объектов, субъектов, процессов или признаков, которые мы назовем альтернативами, и необходимо каждой из них поставить в соответствие некоторое числовое значение, характеризующее степени привлекательности альтернатив для ЛПР.

Структурная схема процесса оценки альтернатив и принятия решений в условиях определенности приведена на рис. 1.

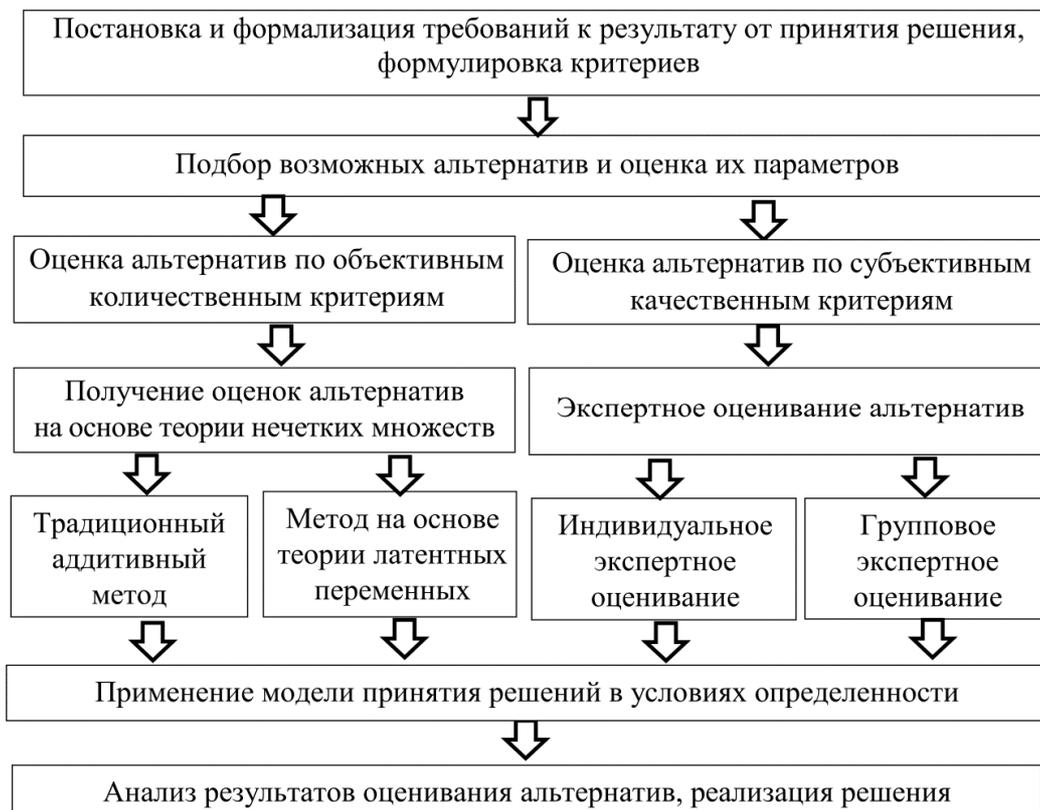


Рис. 1. Структурная схема оценки альтернатив
Fig. 1. Block diagram for evaluating alternatives

Таким образом, можно выделить два основных направления оценки альтернатив: оценка по объективным количественным критериям и оценка по субъективным или качественным критериям. Рассмотрим эти направления подробнее.

Методика оценки альтернатив на основе объективных критериев

Рассмотрим модель оценки альтернатив, которая базируется на методах теории нечетких множеств [2–4]. Число возможных альтернатив обозначим через n , а сами альтернативы будем

обозначать как A_1, A_2, \dots, A_n . Необходимо получить оценку каждой альтернативы U_i , на основании m критериев K_1, K_2, \dots, K_m .

Введем частные оценки u_{ij} – привлекательность i -й альтернативы по j -му критерию. Чтобы определить данные оценки, необходимо задать идентифицирующие признаки, определяющие степень привлекательности каждой альтернативы для каждого оценочного критерия. Каждому критерию K_j в такой постановке задачи будет соответствовать нечеткое множество с определенной заранее функцией принадлежности, которая формируется из типа и условия критерия, которую обозначим как $\mu_j(x)$. Если альтернатива A_i описывается характеристикой критерия x_i , то для оценки ее привлекательности с использованием функции принадлежности нечеткого множества будем применять следующую зависимость:

$$u_{ij} = \mu_j(x_i). \quad (1)$$

Если важности критериев для оценивания разные, то введем вес w_j критерия K_j , тогда оценки альтернатив U_i будут равны:

$$U_i = \sum_{j=1}^m w_j u_{ij} = \sum_{j=1}^m w_j \mu_j(x_i). \quad (2)$$

Такой способ оценивания альтернатив назовем аддитивным. Он традиционно используется на практике. Однако он имеет ряд недостатков, например, оценки альтернатив U_i зависят от степени выполнимости или невыполнимости критериев для всего множества альтернатив [9].

Для устранения этого недостатка и улучшения качества оценок опишем альтернативный метод оценивания альтернатив, который базируется на модели Раша оценки латентных переменных с вычислительным ядром, основанным на методе наименьших квадратов [7, 8]. Для этого введем дополнительные параметры β_j , имеющие смысл уровня невыполнимости оценочного критерия K_j для множества всех альтернатив, который можно интерпретировать как строгость критерия, то есть чем ниже данный параметр, тем лучше и привлекательнее выглядит вся группа альтернатив для приведенного критерия.

Исходя из теории модели Раша, для нахождения оценок альтернатив U_i и свойств критериев β_j нужно решать задачу нелинейной оптимизации:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m w_j \cdot \left(u_{ij} - \frac{e^{U_i - \beta_j}}{1 + e^{U_i - \beta_j}} \right)^2 \rightarrow \min; \quad (3)$$

$$U_i \geq 0; \beta_j \geq 0; i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m.$$

Данная модель имеет преимущества перед аддитивной: оценки альтернатив являются их индивидуальными характеристиками и не зависят от набора критериев, они измеряются по линейной безразмерной шкале, а также кроме оценок альтернатив удается получить свойства влияния критериев на результаты оценивания.

Методы индивидуального экспертного оценивания альтернатив по качественным критериям

В данном разделе опишем теоретические основы модели оценивания альтернатив по качественным или субъективным критериям на основе экспертного оценивания.

В настоящее время существует большое количество методов и инструментов для оценивания альтернатив по качественным критериям, которые могут быть разделены на несколько групп [10, 11]: экспертные методы, методы статистического анализа, методы экономического анализа, информационно-аналитические методы, теория латентных переменных.

Рассмотрим сначала индивидуальное экспертное оценивание альтернатив. Наиболее эффективной моделью проведения экспертного оценивания альтернатив одним экспертом являются методы парных сравнений, наиболее популярным из которых является метод анализа иерархий (МАИ), который подробно описан в литературе [12–14], поэтому его мы в рамках данной работы касаться не будем. МАИ далеко не совершенный метод, дискуссии по его улучшению ведутся с момента разработки метода Т. Саати. Основные претензии касаются несогласованности матрицы парных сравнений вычислительным сложностям, возникающим при большом числе сравниваемых признаков и иным аспектам.

В данной работе опишем альтернативный МАИ метод проведения индивидуальной экспертизы на основе парных сравнений, который основан на теории латентных переменных и модели Раша. Математическое обоснование этого метода приведено в работах [15, 16].

Математическая постановка модели оценивания альтернатив во многом схожа с методикой оценивания по МАИ. Рассмотрим ситуацию, когда необходимо оценить n альтернатив по качественному критерию. Оценкой альтернатив занимается эксперт, при этом оценку он осуществляет путем сравнения превосходства одной альтернативы над другой для всех возможных их пар. Для каждой пары альтернатив, которых обозначим как A_i и A_j , введем вероятностный показатель p'_{ij} , который является индикатором степени предпочтения привлекательности одной альтернативы над другой. Этот показатель можно интерпретировать как долю предпочтения по единичной шкале между альтернативами, в простейшей интерпретации это вероятность того, что первая альтернатива в паре будет выбрана как более привлекательная, чем вторая.

Для визуализации параметра p'_{ij} приведем единичную шкалу с некоторой меткой на ней, которая перемещается между парой сравниваемых признаков (альтернатив), определяя степень предпочтения в данной паре, что изображено на рис. 2.

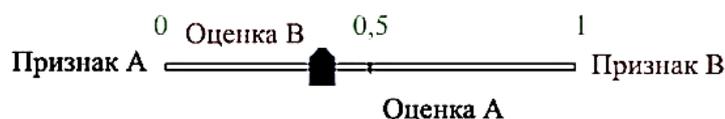


Рис. 2. Визуализация смысла параметра p'_{ij}

Fig. 2. Visualization of the meaning of the parameter p'_{ij}

Очевидно, что в таком подходе справедливы соотношения:

$$p'_{ij} = 1 - p'_{ji}; \quad p'_{ii} = 0,5.$$

Введем латентные переменные U_i , равные оценкам альтернатив. Согласно модели Раша, вероятность P_{ij} того, что альтернатива A_i , имеющая оценку по заданному критерию U_i , при оценке оказалась более привлекательной по сравнению с альтернативой A_j , имеющей оценку привлекательности U_j , связана следующим соотношением:

$$P_{ij} = \frac{e^{U_i - U_j}}{1 + e^{U_i - U_j}}, \quad (4)$$

а для нахождения оценок альтернатив необходимо решать задачу нелинейной оптимизации:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (p'_{ij} - P_{ij})^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(p'_{ij} - \frac{e^{U_i - U_j}}{1 + e^{U_i - U_j}} \right)^2 \rightarrow \min; \quad (5)$$

$$\min_i U_i = 0.$$

Полученные оценки будут определены на полубесконечной шкале $(0; \infty)$, и чтобы привести их в соответствие с МАИ, необходимо выполнить линейное нормирование на шкалу с единичной суммой.

Для оценки альтернатив можно провести и многокритериальное оценивание. Предположим, что имеется K критериев оценки привлекательности альтернатив. Введем некоторые критерии оценивания альтернатив с номером i , которые обозначим через U_i^k по каждому k -му оценочному критерию. Также зададим веса, или степени важности оценочных критериев w^k , которые определяются по методу МАИ или на основе теории латентных переменных. На основании полученных данных вычисляются некоторые итоговые показатели оценки альтернатив U_i по качественным критериям по всей их совокупности, которые определяются для каждой альтернативы, они равны

$$U_i = \sum_k U_i^k w^k$$

и служат итоговой оценкой привлекательности альтернатив для всего множества оценочных критериев.

Методы группового экспертного оценивания альтернатив по качественным критериям

Важные решения, особенно в профессиональной деятельности как правило принимаются коллегиально, поэтому далее рассмотрим методы группового экспертного оценивания альтернатив.

Рассмотрим ситуацию, когда оценка множества из N альтернатив производится с помощью группы из K экспертов, которые оценили каждую из альтернатив по произвольной линейной шкале. Сразу стоит отметить, что экспертные оценки должны быть согласованными, поэтому сразу после получения экспертизы ее нужно проверить на согласованность на основании коэффициента конкордации [11].

Результаты экспертизы запишем в виде матрицы X , каждый элемент которой x_{ij} имеет смысл степени привлекательности i -й альтернативы, которую предоставил эксперт с номером j . Рассмотрим несколько методов обработки экспертной информации.

1. Метод обработки экспертной информации, учитывающий компетентность экспертов

Этот метод аналогичен простейшему аддитивному методу, когда итоговые оценки альтернатив равны средневзвешенному экспертному мнению, но является более эффективным ввиду того, что вклады экспертов в итоговое мнение не равны, как в аддитивном методе, а пропорциональны компетентности экспертов [17, 18]. Под компетентностью эксперта здесь понимается некоторый показатель, характеризующий то, насколько индивидуальное экспертное мнение совпадает с общегрупповым. Процедура получения итоговых оценок альтернатив производится итерационным методом [19]. Обозначим в дальнейшем через Q вектор-столбец показателей компетентности экспертов, а через U – вектор-строку итоговых оценок альтернатив.

На нулевой итерации будем считать, что все эксперты одинаково компетентны и вклад эксперта в итоговую оценку будет равен $1/K$, то есть столбец $Q^{(0)}$ на нулевой итерации содержит только эти элементы. Далее на основании этого вектора находим оценки альтернатив на первой итерации, по ним определяем компетентности экспертов на первой итерации, находим оценки альтернатив на второй и т. д. Математически итерационный процесс можно описать в виде:

$$\begin{cases} U^{(t)} = X \cdot Q^{(t-1)}; \\ Q^{(t)} = \frac{1}{\lambda^{(t)}} U^{(t)} \cdot X, \quad t=1, 2, \dots, \end{cases} \quad (6)$$

где $\lambda^{(t)} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^K U_i^{(t)} \cdot x_{ij}$.

Учитывая то, что $U^{(t)} \cdot X = X' \cdot U^{(t)}$, где штрихом обозначена матричная операция транспонирования, выражение (6) можно записать в ином виде:

$$\begin{cases} U^{(t)} = \frac{1}{\lambda^{(t)}} X \cdot X' \cdot U^{(t-1)}, \\ Q^{(t)} = \frac{1}{\lambda^{(t)}} X' \cdot X \cdot Q^{(t-1)}. \end{cases} \quad (7)$$

Количество итераций определяется из условий достижения необходимой точности, для точности порядка 0,001, как показывает практика, достаточно использовать 2–3 итерации.

2. Обработка экспертной информации, основанная на методах корреляции

Данный метод обработки экспертных оценок дает примерно тот же результат, что и предыдущий метод, и является довольно точным его приближением, не требующим проведения итерационного процесса. Согласно этому методу обобщенная экспертная оценка альтернатив U_i рассчитывается по формуле

$$U_i = \frac{\sum_{j=1}^K r_j x_{ij}}{\sum_{j=1}^K r_j}, \quad (8)$$

где r_j – коэффициенты парной корреляции между j -м столбцом матрицы x_{ij} и начальным приближением столбца оценок альтернатив \bar{x}_i , где $\bar{x}_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{ij}$.

3. Обработка экспертной информации на основе теории латентных переменных

Данный подход не учитывает компетентность экспертов, зато позволяет получать независимые оценки для любого набора экспертов, учитывая их строгость или лояльность к оцениваемым альтернативам.

Как и в предыдущих моделях, вводим латентный показатель β_j , имеющий смысл строгости-лояльности j -го эксперта, то есть чем меньше значение данного параметра, тем более требовательным или строгим является эксперт относительно всего множества оцениваемых альтернатив.

Тогда в соответствии с моделью Раша, вычислительным ядром которой является метод наименьших квадратов [7, 8], для нахождения оценок альтернатив и показателей строгости экспертов необходимо решать задачу нелинейной оптимизации:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^K \left(x_{ij} - \frac{e^{U_i - \beta_j}}{1 + e^{U_i - \beta_j}} \right)^2 \rightarrow \min, \quad (9)$$

$$U_i \geq 0; \beta_j \geq 0; i = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, K.$$

Данный метод позволяет получать независимые оценки альтернатив по линейной шкале, а также учитывает индивидуальные особенности проведения экспертизы каждым экспертом.

Заключение

В данной работе предложена методика оценивания степени привлекательности альтернатив с точки зрения ЛППР при принятии решений в условиях определенности, а также описаны модели обработки информации, на основании которой производится оценивание альтернатив по некоторым критериям.

Рассмотрены два варианта оценивания: по количественным критериям, которые оперируют объективными характеристиками альтернатив, и по качественным критериям, характеристики альтернатив для которых получаются на основе субъективного экспертного оценивания.

При использовании количественных критериев, базирующихся на объективных характеристиках оцениваемых альтернатив, процедура оценивания содержит два уровня. На первом уровне формируются функции принадлежности группы нечетких множеств, соответствующие критериям, базирующихся на объективных характеристиках альтернатив и определяющих степень привлекательности альтернатив по критериям. Подставляя показатели альтернатив в функции принадлежности, можно определить объективную оценку альтернатив. На втором уровне производится свертка альтернатив по критериям на основании аддитивного метода или метода, основанного на теории латентных переменных, что приводит к получению итоговых оценок альтернатив.

При использовании качественных критериев получение оценок альтернатив производится экспертными методами. Рассмотрены случаи индивидуальной и групповой экспертизы.

При индивидуальном экспертном оценивании традиционно используется метод анализа иерархий, однако в работе предложен альтернативный метод оценивания, основанный на теории латентных переменных. Данный метод является менее чувствительным к несогласованности парных оценок и содержит более объективную шкалу сравнений альтернатив в паре [20].

При групповом экспертном оценивании традиционный аддитивный метод дополняется методом обработки экспертной информации, основанной на компетентности экспертов, что позволит в какой-то мере нивелировать влияние на итоговую оценку некачественного экспертного мнения. Также предложен приближенный вариант данного метода, основанный на корреляционном анализе.

Применение приведенной методики в процедуре принятия решений в условиях определенности позволит повысить качество принимаемых решений и снизить риски от их реализации.

Список литературы

1. Ларичев О.И. Объективные модели и субъективные решения. М.: Наука, 2007. 143 с.
2. Назаров Д.М. Интеллектуальные системы: основы теории нечетких множеств: учеб. пособие для академического бакалавриата. М.: Юрайт, 2017. 618 с.
3. Gottwald S. Universes of Fuzzy Sets and Axiomatizations of Fuzzy Set Theory. Part I: Model-Based and Axiomatic Approaches // Studia Logica. 2006. Vol. 82 (2). P. 211–244. DOI: 10.1007/s11225-006-7197-8
4. Кофман А.С. Введение в теорию нечетких множеств. М.: Огни, 2013. 432 с.

5. Rasch G. *Probabilistic Models for Some Intelligence and Attainment Tests*. Copenhagen, Denmark: Danish Institute for Educational Research, 1960. 160 p.
6. Rasch Models. Foundations, Resent Developments, and Applications / Editors G.H. Fischer, I.W. Molenaar. Springer, 1997.
7. Маслак А.А., Моисеев С.И. Модель Раша оценки латентных переменных и ее свойства: моногр. Воронеж: НПЦ «Научная книга», 2016. 177 с.
8. Моисеев С.И., Киреев Ю.В., Гончаров С.В. Модель оценки латентных переменных с непрерывными множествами исходных данных и ее приложения // Системы управления и информационные технологии. 2014. Т. 57, № 3.1 (57). С. 161–167.
9. Mathematical Models of Expert Information Processing for Evaluation of Projects / S.A. Barkalov, S.I. Moiseev, O.S. Perevalova, L.V. Shevchenko // Smart Innovation, Systems and Technologies. 2021. Vol. 227. P. 737–744. DOI: 10.1007/978-981-16-0953-4_72
10. Бешелев С.Д., Гурвич Ф.Г. Экспертные оценки. М.: Наука, 2003. 79 с.
11. Панкова Л.А., Петровский А.М., Шнейдерман М.В. Организация экспертиз и анализ экспертной информации. М.: Наука, 2004. 120 с.
12. Саати Т., Кернс К. Аналитическое планирование. Организация систем: пер. с англ. М.: Радио и связь, 1991. 224 с.
13. Lootsma F.A. Scale sensitivity in the multiplicative AHP and SMART // Journal of Multi-Criteria Decision Analysis. 1993. Vol. 2. P. 87–110.
14. Пономарева А.Н. Использование метода анализа иерархий в отборе приоритетных критериев анализа инновационной деятельности предприятий // Актуальные вопросы экономических наук. 2010. № 11-1. С. 235–240.
15. Баркалов С.А., Карпович М.А., Моисеев С.И. Метод анализа иерархий: подход, основанный на теории латентных переменных // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2022. Т. 22, № 2. С. 58–66. DOI: 10.14529/ctcr220205
16. Алгоритм и методы принятия управленческих решений на основе теории латентных переменных в условиях временных ограничений / С.А. Баркалов, А.В. Ананьев, К.С. Иванников, С.И. Моисеев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2022. Т. 22, № 3. С. 106–116. DOI: 10.14529/ctcr220310
17. Китаев Н.Н. Групповые экспертные оценки. М.: Знание, 2005. 64 с.
18. Кузьмин В.Б., Орлов А.И. Статистические методы анализа экспертных оценок. М.: Наука, 2007. С. 220–227.
19. Баркалов С.А., Моисеев С.И., Порядина В.Л. Математические методы и модели в управлении и их реализация в MS Excel. Воронеж: Воронежский ГАСУ, 2015. 265 с.
20. Мельников А.В., Моисеев С.И. Альтернативный метод проверки степени согласованности матрицы парных сравнений // Системы управления и информационные технологии. 2023. № 2 (92). С. 49–52.

References

1. Larichev O.I. *Ob'yektivnyye modeli i sub'yektivnyye resheniya* [Objective models and subjective decisions]. Moscow: Nauka; 2007. 143 p. (In Russ.)
2. Nazarov D.M. *Intellektual'nyye sistemy: osnovy teorii nechetkikh mnozhestv: uchebnoye posobiye dlya akademicheskogo bakalavriata* [Intelligent systems: foundations of the theory of fuzzy sets. Textbook for academic bachelor's degree]. Moscow: Yurayt; 2017. 618 p. (In Russ.)
3. Gottwald S. Universes of Fuzzy Sets and Axiomatizations of Fuzzy Set Theory. Part I: Model-Based and Axiomatic Approaches. *Studia Logica*. 2006;82(2):211–244. DOI: 10.1007/s11225-006-7197-8
4. Kofman A.S. *Vvedeniye v teoriyu nechetkikh mnozhestv* [Introduction to the theory of fuzzy sets]. Moscow: Ognj; 2013. 432 p. (In Russ.)
5. Rasch G. *Probabilistic Models for Some Intelligence and Attainment Tests*. Copenhagen, Denmark: Danish Institute for Educational Research; 1960. 160 p.
6. Fischer G.H., Molenaar I.W. (Eds.). *Rasch Models. Foundations, Resent Developments, and Applications*. Springer, 1997.
7. Maslak A.A., Moiseev S.I. *Model' Rasha otsenki latentnykh peremennykh i yeye svoystva: monografiya* [The Rasch model for estimating latent variables and its properties. Monograph]. Voronezh: Nauchnaya kniga; 2016. 177 p. (In Russ.)

8. Moiseev S.I., Kireev Yu.V., Goncharov S.V. [A model for estimating latent variables with continuous sets of initial data and its applications]. *Sistemy upravleniya i informatsionnyye tekhnologii*. 2014;3.1(57):161–167. (In Russ.)
9. Barkalov S.A., Moiseev S.I., Perevalova O.S., Shevchenko L.V. Mathematical Models of Expert Information Processing for Evaluation of Projects. *Smart Innovation, Systems and Technologies*. 2021;227:737–744. DOI: 10.1007/978-981-16-0953-4_72
10. Beshelev S.D., Gurvich F.G. *Ekspertnyye otsenki* [Expert assessments]. Moscow: Nauka; 2003. 79 p. (In Russ.)
11. Pankova L.A., Petrovsky A.M., Shneiderman M.V. *Organizatsiya ekspertiz i analiz ekspertnoy informatsii* [Organization of examinations and analysis of expert information]. Moscow: Nauka; 2004. 120 p. (In Russ.)
12. Saaty T.L., Kearns K.P. Analytical Planning. The Organization of Systems. Pergamon Press; 1985.
13. Lootsma F.A. Scale sensitivity in the multiplicative AHP and SMART // *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*. 1993; 2:87–110.
14. Ponomareva A.N. [Using the method of analysis of hierarchies in the selection of priority criteria for analyzing the innovative activities of enterprises]. *Aktual'nye voprosy ekonomicheskikh nauk*. 2010;11-1:235–240. (In Russ.)
15. Barkalov S.A., Karpovich M.A., Moiseev S.I. Analytic hierarchy process: An approach based on the theory of latent variables. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2022;22(2):58–66. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr220205
16. Barkalov S.A., Ananiev A.V., Ivannikov K.S., Moiseev S.I. Algorithm and methods for management decision-making based on the theory of latent variables under time conditions. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2022;22(3):106–116. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr220310
17. Kitaev N.N. *Grupповые ekspertnyye otsenki* [Group expert assessments]. Moscow: Znanie; 2005. 64 p. (In Russ.)
18. Kuzmin V.B., Orlov A.I. *Statisticheskiye metody analiza ekspertnykh otsenok* [Statistical methods for analyzing expert assessments]. Moscow: Nauka; 2007. P. 220–227. (In Russ.)
19. Barkalov S.A., Moiseyev S.I., Poryadina V.L. *Matematicheskiye metody i modeli v upravlenii i ikh realizatsiya v MS Excel* [Mathematical Methods and Models in Management and Their Implementation in MS Excel]. Voronezh: SUACE Publ.; 2015. 265 p. (In Russ.)
20. Melnikov A.V., Moiseev S.I. Alternative method for checking the consistency of a pairwise comparison matrix. *Sistemy upravleniya i informatsionnyye tekhnologii*. 2023;2(92):49–52. (In Russ.)

Информация об авторах

Серебрякова Елена Анатольевна, канд. экон. наук, доц., доц. кафедры цифровой и отраслевой экономики, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия; sea-parish@mail.ru.

Баркалов Сергей Алексеевич, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой управления, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия; bsa610@yandex.ru.

Моисеев Сергей Игоревич, канд. физ.-мат. наук, доц., доц. кафедры управления, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия; mail@moiseevs.ru.

Information about the authors

Elena A. Serebryakova, Cand. Sci. (Econ.), Ass. Prof., Ass. Prof. of the Department of Digital and Industrial Economics, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; sea-parish@mail.ru.

Sergey A. Barkalov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Management, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; bsa610@yandex.ru.

Sergey I. Moiseev, Cand. Sci. (Phys. and Math.), Ass. Prof., Ass. Prof. of the Department of Management, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; mail@moiseevs.ru.

Статья поступила в редакцию 26.02.2024

The article was submitted 26.02.2024