

УДК 681.3

DOI: [10.26102/2310-6018/2023.42.3.006](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2023.42.3.006)

Алгоритмизация принятия управленческих решений в рамках реализации программы развития отрасли при случайных вариациях инвестиционного ресурса

Д.В. Иванов✉, Я.Е. Львович

*Воронежский государственный технический университет,
Воронеж, Российская Федерация*

Резюме. В статье рассмотрено применение оптимизационного подхода для принятия управленческих решений при случайных вариациях инвестиционного ресурса, выделяемого управляющим центром отраслевой организационной системы на реализацию подсистемы развития. Показаны недостатки традиционных экспертных оценок при распределении инвестиций между объектами организационной системы, причины необходимости случайных вариаций для сглаживания издержек неоптимальных решений. Приведена постановка оптимизационной задачи управления инвестированием. Предложена алгоритмизация принятия управленческих решений на основе интеграции экспертных и оптимизационных оценок. Определены цель и задачи исследования, приведенного в работе. Обоснована структура комбинированной алгоритмической процедуры принятия управленческих решений, основанной на синхронном поиске в пространствах показателей эффективности программы развития и варьируемого инвестиционного ресурса за счет погружения в рандомизированную среду. С этой целью на каждой итерации вводятся и определяются вероятностные характеристики значимости показателей при их аддитивной свертке и инвестиции объектов при согласовании экспертной оценки потребности в ресурсе с численным решением. С целью движения в пространстве показателей предложена модификация алгоритма роя частиц, интегрированного в схему рандомизированного поиска объема инвестиций при случайной вариации в соответствии с равномерным и нормальным законами распределений. Для реализации алгоритмической процедуры в случае двух вариантов закона распределения рассмотрена последовательность действий при введении начальных условий и топологии соседства частиц при переходе от текущей итерации к последующей при использовании правила остановки и определения оптимального управленческого решения.

Ключевые слова: инвестирование, отраслевая организационная система, программа развития, оптимизация, экспертное оценивание, рандомизированный поиск.

Для цитирования: Иванов Д.В., Львович Я.Е. Алгоритмизация принятия управленческих решений в рамках реализации программы развития отрасли при случайных вариациях инвестиционного ресурса. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии.* 2023;11(3). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1417> DOI: 10.26102/2310-6018/2023.42.3.006

Algorithmization of management decision-making as part of the industry development program with random variations of the investment resource

D.V. Ivanov✉, Ya.E. Lvovich

*Voronezh State Technical University,
Voronezh, the Russian Federation*

Abstract. The article considers the application of an optimization approach to making management decisions with random variations of the investment resource allocated by the managing center of a

sectoral organizational system for implementing the subsystem of development. The limitations of traditional expert assessments in the distribution of investments between organizational system objects and the reasons for using random variations to smooth the costs of non-optimal decisions are shown. The article presents the statement of investment management optimization problem. Algorithmization of management decision-making based on expert and optimization assessment integration is proposed. The article also determines the purpose and objectives of the research. The structure of the combined algorithmic procedure for making management decisions based on a synchronous search in the spaces of the development program performance indicators and a variable investment resource by means of the immersion in a randomized environment is substantiated. For this purpose, the probabilistic characteristics of indicator significance are introduced and determined at each iteration in their additive convolution and object investment in the coordination of an expert assessment of the need for a resource with a numerical solution. In order to navigate the indicators space, a modification of the particle swarm algorithm is suggested which is integrated into the scheme of random search for the volume of investments with random variation in accordance with uniform and normal distribution laws. To implement the algorithmic procedure in the case of two variants of the distribution law, a sequence of actions is considered when introducing initial conditions and the topology of a particle neighborhood while moving from the current iteration to the next one when using the stop rule and determining the optimal control decision.

Keywords: investment process, sectoral organizational system, development program, optimization, expert assessment, random search.

For citation: Ivanov D.V., Lvovich Ya.E. Algorithmization of management decision-making as part of the industry development program with random variations of the investment resource. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2023;11(3). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1417> DOI: 10.26102/2310-6018/2023.42.3.006 (In Russ.).

Введение

Программа развития отрасли является основным инструментом инвестирования объектов отраслевой организационной системы [1, 2]. Принятие управленческих решений по распределению инвестиций между объектами осуществляется за счет взаимодействия управляющего центра и объектов организационной системы [3]. Управляющий центр определяет цели программы развития и устанавливает требования к ее реализации. К требованиям относятся плановый объем инвестиций X и значения показателей эффективности ψ_j^o , $j = \overline{1, J}$, которые необходимо достигнуть объектам системы при освоении инвестиционного ресурса x_i , $i = \overline{1, I}$, определяемого управляющим центром.

Традиционно управленческие решения применяются на экспертном уровне путем согласования предположений управляющего центра x_i , $i = \overline{1, I}$ и потребностей объектов отраслевой системы x_i^o , $i = \overline{1, I}$. Неоптимальный характер экспертного оценивания [4] приводит в ряде случаев к неполному освоению инвестиций в процессе реализации программы развития [5]. Для сглаживания указанных издержек управляющий центр использует вариативную инвестиционную стратегию. В этом случае согласование осуществляется в зависимости от случайных вариаций выделяемого инвестиционного ресурса \tilde{x}_i , $i = \overline{1, I}$ на интервалах $x_i^{\min} \leq x_i \leq x_i^{\max}$, $i = \overline{1, I}$.

Для поддержки экспертных решений используется оптимизационный подход [6]. Применение методов оптимизации требует наличия модели, которая связывает показатели эффективности программы развития с объемами инвестиций, выделяемых управляющим центром объектам отраслевой организационной системы:

$$\psi_j(x_i), \quad j = \overline{1, J}. \quad (1)$$

Эффективным способом использования (1) в задачах оптимизации инвестиций является агентно-игровое моделирование [7, 8].

Перечисленные предпосылки интеграции экспертного оценивания и оптимизационного подхода при принятии управленческих решений определяют формирование следующей оптимизационной задачи:

$$\begin{aligned} \psi_j(\tilde{x}_i) &\rightarrow x_i^{\max}, j = \overline{1, J}, \\ \sum_{i=1}^I x_i &\leq X, \\ x_i^{\min} &\leq \tilde{x}_i \leq x_i^{\max}. \end{aligned} \quad (2)$$

Традиционное решение задачи многокритериальной оптимизации (2) путем перехода к эквивалентной свертке локальных критериев $\psi_j, j = \overline{1, J}$ с определенными весовыми коэффициентами вновь приводит к усилению значимости экспертной составляющей в принятии решений [6]. Для равнозначного использования экспертного и формализованного оценивания информации погружают экспертные оценки в рандомизированную среду [4]. Однако в этом случае процесс адаптивной настройки весовых коэффициентов является достаточно длительным. В статье исследуется механизм ускорения этого процесса за счет комбинации рандомизированного поиска на множестве переменных $x_i, \overline{1, I}$ с поиском на множестве критериев $\psi_j, j = \overline{1, J}$ путем применения алгоритма роя частиц [9].

Целью статьи является формирование комбинированной алгоритмической процедуры принятия управленческих решений по инвестированию объектов отраслевой организационной системы.

Для достижения указанной цели решены следующие задачи:

- установление структуры комбинированной алгоритмической процедуры принятия управленческих решений;
- построение комбинированной алгоритмической процедуры с учетом случайных вариаций инвестиционного ресурса.

Структура комбинированной алгоритмической процедуры принятия управленческих решений

Установим те структурные компоненты, которые позволяют построить итерационный процесс для комбинированной алгоритмической процедуры принятия управленческих решений на основе интеграции рандомизированного поиска и метода роя частиц:

- структура свертки критериев задачи оптимизации (2);
- структура рандомизированной свертки;
- топология соседства частиц при их движении в рое;
- структура итерационного процесса рандомизированного поиска, синхронизированного в пространстве показателей эффективности и инвестиций.

Система показателей эффективности $\psi_j, j = \overline{1, J}$ выполнения программы развития отрасли является независимой по степени влияния инвестиционного ресурса $x_i, \overline{1, I}$ на изменение этих показателей для каждого объекта. Поэтому целесообразно от экстремальных требований к каждому показателю (2) перейти к максимизации их средневзвешенной свертки, которая определяет аддитивный эффект от проведения мероприятий, способствующих развитию объектов [10]:

$$F(x_i) = \sum_{j=1}^J \alpha_j \hat{\psi}_j(x_i) \rightarrow \max, \quad (3)$$

где $\hat{\psi}_j(x_i)$ – нормированные значения показателей эффективности,

$$\hat{\psi}_j(x_i) = \frac{\psi_j(x_i) - \psi_j^{\min}}{\psi_j^0 - \psi_j^{\min}},$$

ψ_j^{\min} – минимальное значение показателя, установленное управляющим центром;
 α_j – весовые коэффициенты, определяемые на основе экспертных оценок,

$$0 \leq \alpha_j \leq 1, \quad j = \overline{1, J}, \quad \sum_{j=1}^J \alpha_j = 1.$$

Помимо аддитивного эффекта использованные в (3) весовые коэффициенты отражают скорость движения по каждому показателю к экстремуму функции $F(x_i)$:

$$\alpha_j = \frac{\partial F(x_i)}{\partial \psi_j(x_i)}, \quad j = \overline{1, J}. \quad (4)$$

Каждый вариант значений $\alpha_j, j = \overline{1, J}$, установленный по результатам экспертного оценивания представляет собой точку множества Парето [11]. Для возможности сравнительной экспертной оценки нескольких точек множества Парето целесообразно эти оценки погрузить в рандомизированную среду, позволяющую автоматически осуществлять переход к новым точкам множества Парето при организации итерационной процедуры направленного перебора в соответствии с экстремальным требованием (3) [6].

С этой целью осуществляется рандомизация дискретного множества $j = \overline{1, J}$ путем введения вероятностных характеристик

$$p_j, \quad j = \overline{1, J}, \quad \sum_{j=1}^J p_j = 1.$$

В этом случае математическое ожидание, вычисленное на множестве показателей $\psi_j, j = \overline{1, J}$, является рандомизированной оценкой средневзвешенной свертки (3):

$$F(x_i) = m\{\hat{\psi}_j(x_i)\} = \sum_{j=1}^J p_j \hat{\psi}_j(x_i). \quad (5)$$

Для интеграции рандомизированного поиска по оценке (5) с алгоритмом роя частиц заменим множество показателей $\psi_j, j = \overline{1, J}$ частицами, образующими рой $\rho_j, j = \overline{1, J}$, а в качестве скорости движения частиц определим скорость движения к экстремуму по показателям (1), объединенным в средневзвешенную свертку (3).

Установим топологию соседства частиц при их движении в рое

$$\omega = \{\rho_{j_\omega}\}, \quad j_\omega \in \overline{1, J},$$

где ω – множество частиц ρ_{j_ω} , являющихся соседями.

Число показателей эффективности, которые определяются управляющим центром при формировании программы развития отраслевой организационной системы, в большинстве случаев не более 16. В этом случае приемлемым описанием соседства частиц является кластерная топология [12].

На Рисунке 1 представлена кластерная топология соседства частиц, $\rho_j, j = \overline{1, 16}$, которые распределены в виде клик по четыре частицы в четырех узлах.

Частицы $\rho_1, \rho_6, \rho_{10}, \rho_{15}$ имеют три соседних частицы, остальные – четыре.

То есть

$$\omega_1 = (\rho_2, \rho_3, \rho_4), \omega_2 = (\rho_1, \rho_3, \rho_4, \rho_5), \dots,$$

$$\omega_{15} = (\rho_{13}, \rho_{14}, \rho_{16}), \omega_{16} = (\rho_{13}, \rho_{14}, \rho_{15}, \rho_{16}).$$

Структурные компоненты, рассмотренные выше, позволяют установить структуру итерационного процесса рандомизированного поиска, синхронизированного в пространстве $\psi_j, j = \overline{1, J}$ и $x_i, i = \overline{1, I}$, по трем составляющим: начальные условия, поисковая процедура, правило останова.

Начальные условия для $k = 1$, где k – номер итерации:

$$p_j^1 = \frac{1}{J}, \quad j = \overline{1, J}; \quad p_i^1 = \frac{1}{I}, \quad i = \overline{1, I};$$

$$x_i^1, \quad i = \overline{1, I}, \quad \sum_{i=1}^I x_i^1 = X.$$

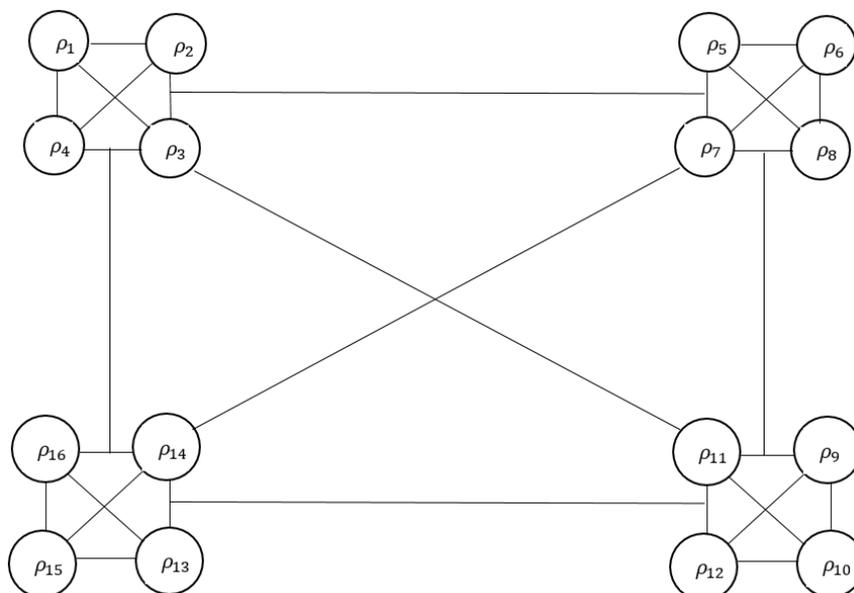


Рисунок 1 – Топология соседства частиц $\rho_j, j = \overline{1, 16}$
Figure 1 – Topology of particles neighborhood $\rho_j, j = \overline{1, 16}$

Начальные условия координат частиц задаются с учетом принятой кластерной топологии (Рисунок 1), начиная с частицы ρ_1

$$\hat{\psi}_{\rho_1}^1 = \{\hat{\psi}_1(x_i^1), \dots, \hat{\psi}_j(x_i^1), \dots, \hat{\psi}_J(x_i^1)\}.$$

Координаты остальных точек вычисляются по их соседству путем задания расстояний между точками внутри клик и между кликами. Если ввести векторы-столбцы

$$\hat{\psi}_{\rho_j} = \begin{bmatrix} \hat{\psi}_1 \\ \vdots \\ \hat{\psi}_j \\ \vdots \\ \hat{\psi}_J \end{bmatrix}, \quad \alpha = \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_j \\ \vdots \\ \alpha_J \end{bmatrix},$$

то значения интегральной функции

$$F_{\rho_j} = \alpha^T \hat{\psi}_{\rho_j},$$

где α^T – обозначение транспонированного вектора.

Поисковую процедуру построим на основе вычисления вероятностных характеристик для $(k + 1)$ -й итерации

$$p_j^{k+1} = p_j^k + \kappa_1(p_j^k), \quad j = \overline{1, J} \quad (6)$$

$$p_i^{k+1} = p_i^k + \kappa_2(p_i^k), \quad i = \overline{1, I}, \quad (7)$$

где κ_1, κ_2 – корректирующие функции, расчет значений которых рассмотрен в [4].

На основе характеристик (7) путем сравнения со случайной последовательностью чисел ζ , равномерно распределенных на интервале $[0, 1]$, выбирается номер объекта инвестиций i^{k+1} для $(k + 1)$ -й итерации, что позволяет перейти к поиску в пространстве инвестиций

$$x_{i^{k+1}}^{k+1} = x_{i^{k+1}}^k + \gamma^{k+1} \frac{\partial F^{k+1}(x_{i^{k+1}}^k)}{\partial x_{i^{k+1}}}, \quad (8)$$

где γ^{k+1} – величина шага в направлении изменения частной производной,

$$F^{k+1}(x_{i^{k+1}}^k) = \sum_{j=1}^J p_j^{k+1} F_j(x_{i^{k+1}}^k). \quad (9)$$

Правило останова свяжем с движением к максимуму средневзвешенной свертки по рекорду движения частиц ρ_j с характеристиками, зафиксированными на K -й итерации:

$$\left| \max_{\rho_j, j=\overline{1, J}} [(\alpha^{(K)})^T \hat{\psi}_{\rho_j}^K] - \max_{\rho_j, j=\overline{1, J}} [(\alpha^{(K-1)})^T \hat{\psi}_{\rho_j}^{K-1}] \right| \leq \delta, \quad (10)$$

где $\delta > 0$ – малая величина, задаваемая экспертом.

При выполнении правила (10) получаем оптимальное распределение инвестиций между объектами отраслевой организационной системы

$$x_i^* = x_i^K, \quad i = \overline{1, I}.$$

Алгоритмическая процедура с учетом случайных вариаций инвестиционного ресурса

Рассмотрим реализацию алгоритмической процедуры для двух вариантов законов распределения случайных вариаций инвестиционного ресурса на интервале $x_i^{\min} \leq \tilde{x}_i \leq x_i^{\max}$: равномерного и нормального. Итерационный процесс поиска при заданных начальных условиях представляет собой последовательность следующих действий в точке x^k .

1. Определение значения j^{k+1} случайной дискретной величины \tilde{j} для $(k + 1)$ -й итерации на основе вероятных характеристик (6).

2. Определение значения i^{k+1} случайной дискретной величины \tilde{i} для $(k + 1)$ -й итерации на основе вероятных характеристик (7).

3. Определение объемов инвестиций $x_{i^{k+1}}^{k+1}$ на основе (8):

– в случае равномерного распределения $\tilde{x}_{i^{k+1}}$ со средним значением $x_{i^{k+1}}^k$ и интервалом изменения:

$$x_{i^{k+1}}^k - g^{k+1} \leq \tilde{x}_{i^{k+1}} \leq x_{i^{k+1}}^k + g^{k+1}$$

$$x_{i^{k+1}}^{k+1} = x_{i^{k+1}}^k + \frac{\hat{\psi}_{j^{k+1}}(x_{i^{k+1}}^k + g^{k+1}) - \hat{\psi}_{j^{k+1}}(x_{i^{k+1}}^k - g^{k+1})}{2g^{k+1}},$$

$$g^{k+1} = g^k \exp \left\{ \frac{1}{k} \operatorname{sign} \left[\frac{\hat{\psi}_{j^{k+1}}(x_{i^{k+1}}^k + g^k) - \hat{\psi}_{j^{k+1}}(x_{i^{k+1}}^k - g^k)}{2g^k} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \frac{\hat{\psi}_{j^{k+1}}(x_{i^{k+1}}^{k-1} + g^{k-1}) - \hat{\psi}_{j^{k+1}}(x_{i^{k+1}}^{k-1} - g^{k-1})}{2g^{k-1}} \right] \right\};$$

– в случае распределения $\tilde{x}_{i^{k+1}}$ по нормальному закону со средним значением $x_{i^{k+1}}^k$ и среднеквадратичным отклонением $\sigma_{i^{k+1}}^k = \frac{1}{3} g^k$:

$$x_{i^{k+1}}^{k+1} = x_{i^{k+1}}^k + \frac{3 \left[\hat{\psi}_{j^{k+1}} \left(x_{i^{k+1}}^k + \frac{1}{3} g_{i^{k+1}}^{k+1} \tilde{v} \right) \right] \tilde{v}}{g_{i^{k+1}}^{k+1}},$$

$$g_{i^{k+1}}^{k+1} = g_{i^{k+1}}^k \exp \left\{ \frac{1}{k} \operatorname{sign} \left[\frac{\left[\hat{\psi}_{j^{k+1}} \left(x_{i^{k+1}}^k + \frac{1}{3} g_{i^{k+1}}^k \tilde{v}^k \right) \right] \tilde{v}^k}{g_{i^{k+1}}^k} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \frac{\left[\hat{\psi}_{j^{k+1}} \left(x_{i^{k+1}}^{k-1} + \frac{1}{3} g_{i^{k+1}}^{(k-1)} \tilde{v}^k \right) \right]}{g_{i^{k+1}}^{k-1}} \right] \right\},$$

где $\tilde{v} = \frac{\tilde{x}_{i^{k+1}} - x_{i^{k+1}}^k}{\sigma}$ – случайная величина, распределенная по нормированному нормальному распределению.

Значения остальных переменных $x_{i^{k+1}}^{k+1}$, $i = \overline{1, I}$, $i \neq i_{k+1}$ определяются из условия

$$\sum_{i=1}^I x_{i^{k+1}}^{k+1} = X.$$

4. Вычисление координат точек ρ_j , $j = \overline{1, J}$ при новых значениях x_i^{k+1}

$$\hat{\psi}_{\rho_j^{k+1}} = \{\psi_1(x_i^{k+1}), \dots, \psi_j(x_i^{k+1}), \dots, \psi_J(x_i^{k+1})\}.$$

Значения остальных координат $\hat{\psi}_{\rho_j}$ вычисляются в соответствии с расположением точек ρ_j , $j = \overline{1, J}$, $j \neq j_1$, соответствующим топологии соседства (Рисунок 1).

5. Определение рекордного значения (5) на множестве $\omega_{j^{k+1}}$ частиц ρ_j , которые являются соседними $\rho_{j^{k+1}}$ в рое частиц

$$\max_{\rho_j \in \omega_{j^{k+1}}} \{(p^k)^T \hat{\psi}_{\rho_j}\},$$

где

$$p^k = \begin{pmatrix} p_1^k \\ \vdots \\ p_j^k \\ \vdots \\ p_j^k \end{pmatrix}.$$

6. Расчет новых вероятностных характеристик (6) для $(k + 1)$ -й итерации

$$p_j^{k+1} = \frac{p_j^k + \varepsilon^{k+1} \chi(\Delta F^k)}{1 + \varepsilon^{k+1}},$$

где

$$\Delta F^k = (p^k)^T \hat{\psi}_{\rho_{j,k+1}}(x_i^k) - \max_{\rho_j \in \omega_{j,k+1}} \left\{ (p^k)^T \hat{\psi}_{\rho_j}(x_i^k) \right\},$$

$$\chi(\Delta F^k) = \begin{cases} 1, & \text{если } \Delta F^k > 0, \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases}$$

$$\varepsilon^{k+1} = \varepsilon^k \exp \left\{ \frac{1}{k} \operatorname{sign}(\Delta F^k \cdot \Delta F^{k+1}) \right\},$$

начальное значение $\varepsilon_{j_1}^1 > 0$ задается экспертом, его изменение начинается с $k = 3$.

7. Определение оптимальных объемов инвестиций в рамках программы развития объектов организационной системы при выполнении правила останова (9) на k -й итерации

$$x_i^* = x_i^K, \quad i = \overline{1, I}.$$

Заключение

Эффективным подходом к принятию управленческих решений в рамках программы развития отраслевой организационной системы при случайных вариациях инвестиционного ресурса является подход, основанный на интеграции экспертных оценок и оценок, полученных при решении оптимизационной задачи.

Необходимость учета случайных вариаций инвестиций, выделяемых управляющим центром объектам организационной системы, определяет целесообразность построения алгоритма принятия решения, осуществляющего поиск в рандомизированной среде. При этом в рандомизированной среде следует управлять движением к оптимальному решению как в пространстве показателей эффективности программы развития, так и в пространстве объемов инвестиционного ресурса.

Приемлемым способом построения итерационной поисковой процедуры является построение комбинированного алгоритма, который объединяет движение в пространстве показателей на основе метода роя частиц и покоординатный направленный поиск в пространстве случайных вариаций ресурсного обеспечения в соответствии с равномерным и нормальным законами распределения.

Последовательность действий в рамках комбинированного алгоритма направлена на выбор начальных условий решения, изменения вероятностных характеристик и объема инвестиций при переходе от текущей итерации поиска к последующей и установления оптимального решения с учетом выполнения правил останова.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Межов И.С., Клецкова Е.В. Моделирование стратегий развития региональной экономики. *Управленческие науки*. 2017;7:4:26–35.
2. Скопина И.В. Формирование прогнозно-адаптивной системы управления региональной экономикой. *Управление экономическими системами: электронный научный журнал*. 2006;1(5):26–31.
3. Львович Я.Е., Львович И.Я., Чопоров О.Н. *Оптимизация цифрового управления в организационных системах: коллективная монография*. Воронеж: ИПЦ «Научная книга»; 2021. 191 с.

4. Львович Я.Е., Львович И.Я. *Принятие решений в экспертно-виртуальной среде: монография*. Воронеж: ИПЦ «Научная книга»; 2010. 140 с.
5. Борзова А.С., Иванов Д.В. Оптимизационное моделирование инвестиционного процесса развития отраслевой организационной системы гражданской авиации. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2021;9(1):7–8. DOI: 10.26102/2310-6018/2021.32.1.030.
6. Львович И.Я., Львович Я.Е., Фролов В.Н. *Информационные технологии моделирования и оптимизации: краткая теория и приложения: монография*. Воронеж: ИПЦ «Научная книга»; 2016. 444 с.
7. Иванов Д.В. Алгоритмизация процедур принятия решения для социотехнических объектов на основе теоретико-игровых методов и мультиагентных технологий в условиях риска. *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение*. 2016;4(21):11–18.
8. Иванов Д.В. Автоматизация процессов принятия решения для социотехнических объектов на основе теоретико-игровых методов и мультиагентных. *Оптимизация и моделирование в автоматизированных системах: материалы всерос. молодежной науч. шк.* 2017;150–154.
9. Карпенко А.П. *Современные алгоритмы поисковой оптимизации: алгоритмы, вдохновленные природой*. М.: изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана; 2014. 448 с.
10. Каширина И.П., Львович Я.Е., Сорокин С.О. Интегральное оценивание эффективности сетевых систем с кластерной структурой. *Экономика и менеджмент систем управления*. 2015;1–3(15):330–337.
11. Батищев Д.И., Львович Я.Е., Фролов В.Н. *Оптимизация в САПР*. Воронеж: изд-во Воронежского гос. ун-та. 1997. 421 с.
12. Карпенко А.П. Популяционные алгоритмы глобальной поисковой оптимизации. Обзор новых и малоизвестных алгоритмов. *Информационные технологии. Приложения*. 2012;S7:1–32.

REFERENCES

1. Mezhev I.S., Kletskova E.V. Modeling strategies for the development of the regional economy. *Управленческие науки = Managerial Science*. 2017;7:4:26–35. (In Russ.).
2. Skopina I.V. Formation of a predictive-adaptive system for managing the regional economy. *Управление экономическими системами: электронный научный журнал = Management of economic systems: electronic scientific journal*. 2006;1(5):26–31. (In Russ.).
3. Lvovich Ya.E., Lvovich I.Ya., Choporov O.N. *Optimization of digital control in organizational systems: a collective monograph*. Voronezh: CPI "Nauchnaya Kniga"; 2021. 191 p. (In Russ.).
4. Lvovich Ya.E., Lvovich I.Ya. *Decision making in an expert-virtual environment: monograph*. Voronezh: CPI "Nauchnaya Kniga"; 2010. 140 p. (In Russ.).
5. Borzova A.S., Ivanov D.V. Optimization modeling of the investment process of development of the sectoral organizational system of civil aviation. *Modeling, optimization and information technology*. 2021;9(1):7–8. DOI: 10.26102/2310-6018/2021.32.1.030. (In Russ.).
6. Lvovich I.Ya., Lvovich Ya.E., Frolov V.N. *Information technology modeling and optimization: a brief theory and applications: monograph*. Voronezh: CPI "Scientific Book"; 2016. 444 p. (In Russ.).

7. Ivanov D.V. Algorithmization of decision-making procedures for sociotechnical objects based on game-theoretic methods and multi-agent technologies under risk conditions. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravleniye, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoye priborostroyeniye = Proceedings of the Southwestern State University. Series: Management, computer technology, informatics. Medical instrumentation*. 2016;4(21):11–18. (In Russ.).
8. Ivanov D.V. Automation of decision-making processes for sociotechnical objects based on game-theoretic and multi-agent methods. *Optimizatsiya i modelirovaniye v avtomatizirovannykh sistemakh: materialy vseros. molodezhnoy nauch. shk. = Optimization and Modeling in Automated Systems: Proceedings of Russian youth scientific school*. 2017;150–154. (In Russ.).
9. Karpenko A.P. *Modern search engine optimization algorithms: algorithms inspired by nature*. M.: Publishing house of MSTU im. N.E. Bauman; 2014. 448 p. (In Russ.).
10. Kashirina I.P., Lvovich Ya.E., Sorokin S.O. Integral Estimation of the Efficiency of Network Systems with a Cluster Structure. *Ekonomika i menedzhment sistem upravleniya = Economics and management of control systems*. 2015;1–3(15):330–337. (In Russ.).
11. Batishchev D.I., Lvovich Ya.E., Frolov V.N. *Optimization in CAD*. Voronezh: publishing house of the Voronezh state. University; 1997. 421 p. (In Russ.).
12. Karpenko A.P. Population algorithms for global search optimization. Overview of new and little-known algorithms. *Informatsionnyye tekhnologii. Prilozheniya = Information Technology. Applications*. 2012;S7:1–32. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Иванов Денис Вячеславович, кандидат технических наук, доцент, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Российская Федерация
e-mail: ivanov.sapris@mail.ru
ORCID: [0009-0000-6690-8335](https://orcid.org/0009-0000-6690-8335)

Denis Vyacheslavovich Ivanov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, the Russian Federation

Львович Яков Евсеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой систем автоматизированного проектирования и информационных систем, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Российская Федерация
e-mail: d-lvovich@mail.ru
ORCID: [0000-0002-7051-3763](https://orcid.org/0000-0002-7051-3763)

Yakov Evseevich Lvovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Computer-aided design and information systems, Voronezh State Technical University, Voronezh, the Russian Federation

Статья поступила в редакцию 23.06.2023; одобрена после рецензирования 12.07.2023; принята к публикации 24.07.2023.

The article was submitted 23.06.2023; approved after reviewing 12.07.2023; accepted for publication 24.07.2023.