

УДК 681.3

DOI: [10.26102/2310-6018/2025.50.3.033](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2025.50.3.033)

Оптимизация инвестиционного процесса субсидирования воздушных перевозок

Д.В. Иванов✉

*Воронежский государственный технический университет, Воронеж,
Российская Федерация*

Резюме. Одним из существенных направлений инвестирования гражданской авиации является субсидирование воздушных перевозок. В статье рассматривается возможность оптимизировать принятие управленческих решений по распределению объема инвестиций авиакомпаниям, участвующим в программе выбора маршрутов воздушных перевозок, которые обеспечивают рост показателей эффективности при ограниченном инвестиционном ресурсе. Для постановки задачи оптимизации вводятся непрерывные оптимизируемые переменные, определяющие объемы инвестиций, и альтернативные переменные, соответствующие выбору определенного маршрута перевозок. Исходные данные, предоставляемые авиакомпаниями, используются для оценки выполнения экстремальных и граничных требований к процессу субсидирования. Каждый показатель, на основе которого формируются указанные требования, рассчитывается по параметрам, зафиксированным в исходных данных, в зависимости от значений переменных. При этом возникает необходимость разбиения условия ограниченного интегрированного ресурса на два частных граничных условия. В результате имеем многокритериальную задачу оптимизации с ограничениями, заданную на множествах непрерывных и альтернативных оптимизируемых переменных. Для ее решения предложено использовать комбинацию адаптивного алгоритма направленного рандомизированного поиска и алгоритма роя частиц. Проведем вычислительный эксперимент с использованием оптимизационного подхода, который сравнивается с фактическими данными субсидирования воздушных перевозок. Оптимизированный вариант распределения инвестиций и выбора маршрутов характеризуется значениями показателей эффективности, лучше фактически достигнутых.

Ключевые слова: управление инвестированием, централизованное управление, субсидирование воздушных перевозок, авиакомпании, оптимизация.

Для цитирования: Иванов Д.В. Оптимизация инвестиционного процесса субсидирования воздушных перевозок. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2023;13(3). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=2010> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.50.3.033

Investment process optimization of air transport subsidies

D.V. Ivanov✉

Voronezh State Technical University, Voronezh, the Russian Federation

Abstract. One of the significant areas of investment in civil aviation is air transportation subsidies. The article considers the possibility of optimizing management decisions on the distribution of investment volumes among airlines participating in the air transportation route selection program that ensures growth of efficiency indicators with a limited investment resource. To formulate the optimization problem, continuous optimized variables that determine investment volumes and alternative variables corresponding to the choice of a specific transportation route are introduced. The initial data provided by the airlines are used to assess the fulfillment of extreme and boundary requirements for the subsidizing process. Each indicator, on the basis of which the specified requirements are formed, is calculated according to the parameters recorded in the initial data, depending on the values of the variables. In this case, it becomes necessary to split the condition of a limited integrated resource into

two particular boundary conditions. As a result, we have a multi-criteria optimization problem with constraints, defined on sets of continuous and alternative optimized variables. To solve it, it is proposed to use a combination of an adaptive algorithm of directed randomized search and a particle swarm algorithm. We conduct a computational experiment using an optimization approach, which is compared with actual data on air transport subsidies. The optimized variant of investment distribution and route selection is characterized by values of performance indicators that are better than those actually achieved.

Keywords: investment management, centralized control, air transport subsidies, airlines, optimization.

For citation: Ivanov D.V. Investment process optimization of air transport subsidies. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2023;13(3). (In Russ.). URL: <https://moitvvt.ru/journal/pdf?id=2010> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.50.3.033

Введение

Одной из основных форм инвестирования в гражданской авиации является ресурсное обеспечение ряда направлений развития отрасли на основе программно-целевого подхода [1]. При этом транспортные отрасли ориентируются на учет условий и факторов формирования и развития современного рынка инвестиций [2]. Выполнение этих условий заключается в выборе наиболее значимых для отрасли направлений развития, инвестирование которых позволяет обеспечить рост основных показателей эффективности транспортных систем^{1,2}, характеризующих достижение поставленных целей.

В соответствии с Публичной декларацией Росавиации, стратегическое развитие отрасли гражданской авиации ориентировано на следующие ключевые направления.

1. Повышение доступности и качества авиационных услуг для населения, в приоритете – социально значимые маршруты. Данное направление подразумевает не только расширение географии полетов и увеличение частоты рейсов, особенно в труднодоступные регионы и населенные пункты с ограниченными альтернативами транспортного сообщения, но и повышение уровня комфорта и сервиса для пассажиров. Это достигается за счет модернизации авиапарка, внедрения современных технологий обслуживания, а также разработки гибкой тарифной политики и государственного субсидирования.

2. Реализация комплексных проектов, направленных на устранение инфраструктурных ограничений, препятствующих экономическому росту и социально-экономическому развитию Российской Федерации. Это направление предполагает масштабную модернизацию и расширение аэропортовой сети, включая строительство новых терминалов и взлетно-посадочных полос, реконструкцию существующих объектов, внедрение современных систем управления воздушным движением и навигации.

3. Обеспечение устойчивого и безопасного функционирования системы воздушного транспорта, усиление транспортной безопасности и защиты жизни и здоровья населения от актов незаконного вмешательства, в том числе террористической направленности. Это направление предусматривает реализацию комплекса мер, направленных на повышение безопасности полетов, включая совершенствование систем технического обслуживания воздушных судов, повышение квалификации летного и диспетчерского персонала, внедрение современных технологий контроля и мониторинга воздушного пространства.

¹ Юзвович Л.И., Князева Е.Г., Дегтярев С.А. и др. *Инвестиции*. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та; 2016. 543 с.

² Руткаускас Т.К., Домников А.Ю., Медведева Л.А. и др. *Инвестиции и инвестиционная деятельность организаций*. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та; 2019. 316 с.

Соответственно, одной из базовых задач воздушного транспорта является улучшение авиационных услуг для населения, в частности, обеспечение доступности авиаперевозок по важным для общества направлениям. Для этого государство оказывает поддержку, например, предоставляя субсидии на авиабилеты по внутренним маршрутам. Ограниченный характер инвестиций приводит к конкуренции авиапредприятий, претендующих на включение в инвестирование маршрутов авиаперевозок, реализуемых этими компаниями [3]. Кроме приоритетов, связанных с социальной значимостью маршрутов, их влиянием на рост показателей эффективности, действуют приоритеты, характеризующие взаимодействие с другими отраслями, использующими воздушные перевозки пассажиров³. Указанные причины приводят к оптимизационному характеру в выборе определенного множества субсидируемых маршрутов для каждого авиапредприятия.

Оптимизационный подход к инвестированию различных направлений развития рассматривается в работах [4, 5], в том числе региональных [6]. Однако они не касаются такой формы инвестиций, как субсидирование, и тем более не учитывают условия и факторы распределения инвестиционного ресурса в гражданской авиации.

Поэтому целью данной статьи является формализованная постановка задачи оптимизации инвестиционного процесса, направленного на эффективное субсидирование воздушных перевозок.

Для достижения поставленной цели решены две задачи:

- формирование экстремальных и граничных требований оптимизации субсидирования воздушных перевозок;
- оптимизационное моделирование с учетом особенностей выбора маршрутов субсидируемых перевозок.

Формирование требований оптимизации субсидирования воздушных перевозок

Задача оптимизации государственной поддержки авиаперевозок заключается в следующем: из всех внутренних авиамаршрутов, предлагаемых авиакомпаниями, необходимо отобрать оптимальный набор, который при заданном объеме финансирования позволит достичь наилучших результатов в развитии авиационной отрасли. Ключевыми показателями, определяющими эффективность отобранных маршрутов и служащими критериями оптимизации, являются: количество совершенных рейсов (Ψ_1), общий пассажирооборот (Ψ_2), суммарный пассажиропоток (Ψ_3) и общее количество пассажиров, воспользовавшихся услугами аэропортов (Ψ_4).

Граничные требования связаны, во-первых, с необходимостью соответствия суммарных затрат на маршруты заданному инвестиционному ресурсу X , а во-вторых, интервалом объема субсидирования i -й авиакомпании ($i = \overline{1, I}$):

$$x_i^{min} \leq x_i \leq x_i^{max}, i = \overline{1, I}, \quad (1)$$

где x_i^{min}, x_i^{max} – минимальный и максимальные объемы субсидирования i -й авиакомпании.

Для решения задачи оптимального планирования авиамаршрутов используются следующие входные параметры по каждому рейсу: название авиаперевозчика, пункты вылета и прилета, дистанция перелета, модель самолета, вместимость пассажирского салона, временной интервал выполнения рейсов, еженедельная интенсивность полетов и

³ Постановление Правительства Российской Федерации от 27.05.2021 № 799 (ред. от 07.02.2022) «Об утверждении Правил предоставления из федерального бюджета субсидий на создание и внедрение программы стимулирования внутренних коммерческих перевозок пассажиров, организованных туроператорами на внутренних направлениях». Правительство России. URL: <http://government.ru/docs/all/134609/> (дата обращения: 08.07.2025).

общее количество рейсов, запланированных на весь период. Указанные исходные данные представим следующими обозначениями:

$d_i = \overline{1, D_i}$ – нумерационное множество маршрутов i -й авиакомпании, соответствующие перечню аэропортов отправления и назначения;

r_{d_i} – расстояние между аэропортами отправления и назначения d_i -го маршрута;

τ_{d_i} – число недель, соответствующее периоду выполнения полетов d_i -го маршрута;

π_{d_i} – количество пассажиров, перевозимых одним рейсом d_i -го маршрута, которое соответствует типу воздушного судна и количеству в нем кресел;

ω_{d_i} – частота полетов в неделю по d_i -му маршруту;

$b_{d_i} = \overline{1, B_{d_i}}$ – нумерационное множество аэропортов отправления, соответствующее множеству маршрутов $d_i = \overline{1, D_i}$;

$c_{d_i} = \overline{1, C_{d_i}}$ – нумерационное множество аэропортов назначения, соответствующее множеству маршрутов $d_i = \overline{1, D_i}$.

Перейдем от содержательной к формализованной постановке задачи оптимизации субсидирования воздушных перевозок.

Оптимизационное моделирование выбора маршрутов субсидированных перевозок

Оптимизационное моделирование состоит в переходе от нумерационного множества $d_i = \overline{1, D_i}, i = \overline{1, I}$ к вариантам редуцированного множества $\hat{d}_i = \overline{1, \hat{D}_i}, i = \overline{1, I}$ и выборе наилучшего варианта, соответствующего экстремальным граничным требованиям $(\hat{d}_i^* = \overline{1, \hat{D}_i^*}, i = \overline{1, I})$.

Процесс выбора свяжем с определением значений следующих оптимизируемых переменных для двадцати трех авиакомпаний $x_i, i = \overline{1, 23}$, соответствующих (1):

$$Z_{d_i} = \begin{cases} 1, \text{ если } d_i \text{ маршрут, выполняемый } i\text{-й авиакомпанией} \\ \text{включается в подмножество } \hat{d}_i = \overline{1, \hat{D}_i}, \\ 0, \text{ в противном случае,} \end{cases} \quad (2)$$

$$d_i = \overline{1, D_i}, i = \overline{1, 23}.$$

Сформируем зависимость показателей эффективности от оптимизируемых переменных и параметров, соответствующих исходным данным:

$$\Psi_1(x_i, Z_{d_i}) = \sum_{i=1}^{23} \sum_{\hat{d}_i=1}^{\hat{D}_i} \omega_{\hat{d}_i} \tau_{\hat{d}_i}, \quad (3)$$

$$\Psi_2(x_i, Z_{d_i}) = \sum_{i=1}^{23} \sum_{\hat{d}_i=1}^{\hat{D}_i} \omega_{\hat{d}_i} \tau_{\hat{d}_i} \pi_{\hat{d}_i} r_{\hat{d}_i}, \quad (4)$$

$$\Psi_3(x_i, Z_{d_i}) = \sum_{i=1}^{23} \sum_{\hat{d}_i=1}^{\hat{D}_i} \omega_{\hat{d}_i} \tau_{\hat{d}_i} \pi_{\hat{d}_i}, \quad (5)$$

$$\Psi_4(x_i, Z_{d_i}) = \sum_{i=1}^{23} \sum_{\hat{d}_i=1}^{\hat{D}_i} \left(\sum_{b_{\hat{d}_i}=1}^{B_{\hat{d}_i}} \omega_{b_{\hat{d}_i}} \tau_{\hat{d}_i} \pi_{\hat{d}_i} + \sum_{c_{\hat{d}_i}=1}^{C_{\hat{d}_i}} \omega_{c_{\hat{d}_i}} \tau_{\hat{d}_i} \pi_{\hat{d}_i} \right). \quad (6)$$

Оптимизируемые переменные x_i, Z_{d_i} влияют на показатели (3)–(6) посредственно за счет следующих зависимостей:

$$x_i = f(\hat{d}_i), \quad (7)$$

$$\hat{d}_i = f(Z_{d_i}), \quad (8)$$

что приводит к зависимости

$$Z_{d_i} = f(x_i) \quad (9)$$

и необходимости разделения граничного требования по ограниченному ресурсным обеспечением на три условия:

$$\sum_{\hat{d}_i=1}^{\hat{D}_i} \hat{x}_{\hat{d}_i} \omega_{\hat{d}_i} \tau_{\hat{d}_i} \leq x_i^u, \quad \hat{d}_i = f(x_i, Z_{d_i}), \quad i = \overline{1, 23}, \quad (10)$$

где $\hat{x}_{\hat{d}_i}$ – объем субсидирования 1 рейса $\hat{d}_i$ -го маршрута;

$$\sum_{i=1}^{23} x_i^u \leq X, \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^{23} \hat{D}_i(Z_{d_i}) \geq D. \quad (12)$$

где D – граничное значение общего числа субсидируемых маршрутов.

Объединяя экстремальные требования к показателям эффективности (3)–(6) и граничные требования (1), (2), (10), (11), (12), имеем следующую задачу оптимизации распределения общего объема инвестиций, запланированных управляющим центром на субсидирование воздушных перевозок по маршрутам внутренних воздушных линий между авиакомпаниями:

$$\Psi_j(x_i, z_{d_i}) \rightarrow \max, \quad j = \overline{1, 4}, \quad (13)$$

$$\sum_{\hat{d}_i=1}^{\hat{D}_i} x_{\hat{d}_i} \omega_{\hat{d}_i} \tau_{\hat{d}_i} \leq x_i^u, \quad \hat{d}_i = f(x_i, z_{d_i}), \quad i = \overline{1, 23},$$

$$\sum_{i=1}^{23} x_i^u \leq X,$$

$$\sum_{i=1}^{23} \hat{D}_i(z_{d_i}) \geq D,$$

$$x_i^{\text{мин}} \leq x_i^u \leq x_i^{\text{макс}}, \quad i = \overline{1, 23},$$

$$z_{d_i} = \begin{cases} 1, & d_i = \overline{1, D}, \\ 0, & i = \overline{1, 23}. \end{cases}$$

В общем случае оптимизационную задачу необходимо дополнить весовыми коэффициентами вектора варьируемых параметров и осуществлять их настройку [7].

Для решения оптимизационной задачи (13), которая является многокритериальной с ограничениями и содержит альтернативные переменные Z_{d_i} и непрерывные переменные x_i , используем алгоритм, рассмотренный в [8], с учетом особенностей портфеля инвестиций, рассмотренных в [9].

В основе алгоритма лежит оптимизация методом роя частиц [10] с заданной топологией частиц в пространстве. Определение объемов субсидирования осуществляется на основе таких законов распределения, как равномерный и нормальный в зависимости от того, каким законом распределения определена величина x_i^u . Условие останова представляет собой вычисление погрешности между соседними частицами роя ρ_j в пространстве (14):

$$\left| \max_{\rho_j, j=1, J} [\hat{\psi}_{\rho_j}^K] - \max_{\rho_j, j=1, J} [\hat{\psi}_{\rho_j}^{K-1}] \right| \leq \delta. \quad (14)$$

Адаптированный в соответствии с текущей задачей алгоритм приведен на Рисунке 1.

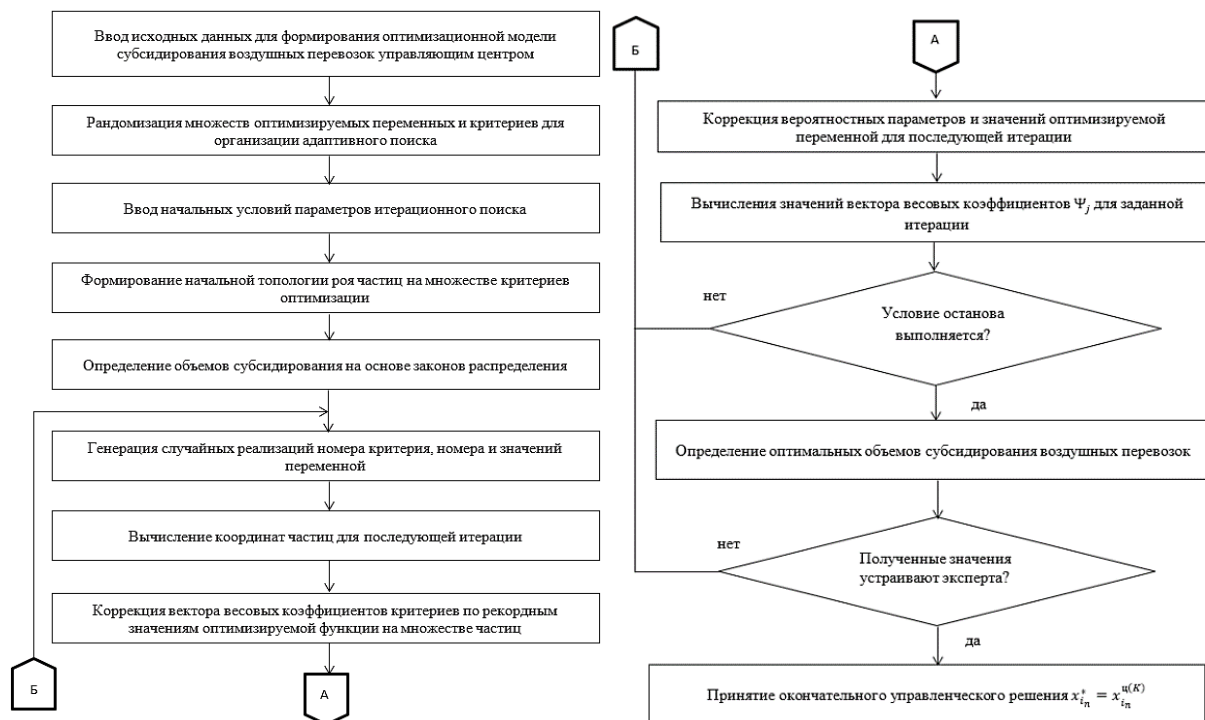


Рисунок 1 – Схема оптимизации инвестиционного процесса субсидирования воздушных перевозок

Figure 1 – Optimizing scheme for the investment process of air transport subsidies

В результате в число маршрутов, целесообразных для субсидирования воздушных перевозок включаются $\hat{a}_i^*$, $i = \overline{1,23}$, соответствующие значению $Z_{\hat{a}_i}^* = 1$, $i = \overline{1,23}$, а объем субсидирования равен x_i^* из заданного интервала (1).

Проведено сравнение фактических данных субсидирования воздушных перевозок за отчетный период и рассчитанных на основании решения задачи оптимизации (13).

Результаты проведенного моделирования показали, что в оптимальный набор из 23 маршрутов $\hat{a}_j^*$, $j = \overline{1,23}$ вошли пять наиболее протяженных маршрутов и четыре маршрута с самолетами повышенной вместимости, при условии соблюдения заданных ограничений (11) и (12). Распределение субсидий между авиакомпаниями, полученное в результате оптимизации, позволило значительно увеличить показатели эффективности $\Psi_2 \div \Psi_4$ (пассажирооборот, пассажиропоток и число обслуженных пассажиров) при фиксированном количестве рейсов $\Psi_1 = 49432$. В частности, внедрение предложенного подхода к управлению инвестициями в авиаперевозки потенциально может привести к увеличению пассажирооборота на 1,6 %, пассажиропотока на 1,1 % и числа обслуженных аэропортами пассажиров на 1,3 %.

Заключение

Субсидирование воздушных перевозок является важной формой инвестирования в гражданской авиации. Поскольку распределение объемов инвестиционного ресурса между авиакомпаниями зависит от выбора множества субсидируемых маршрутов, что влияет на рост показателей эффективности, целесообразно осуществлять выбор наилучшего варианта на основе постановки оптимизационной задачи.

Исходные данные по организации авиакомпаниями воздушных перевозок позволяют сформулировать зависимости экстремальных и граничных требований от двух групп оптимизируемых переменных: альтернативных, характеризующих выбор

конкретного маршрута, и непрерывных, характеризующих изменение объема инвестирования авиакомпаний на заданном интервале. В результате имеем многокритериальную задачу оптимизации с ограничениями, для решения которой разработан комбинированный алгоритм.

Эффективность предложенного метода оптимизации инвестиций в гражданскую авиацию подтверждается сопоставлением реальных данных о субсидировании внутренних авиамаршрутов с результатами вычислительного эксперимента, моделирующего оптимальное распределение инвестиций, что свидетельствует о перспективности его применения для повышения эффективности субсидирования воздушных перевозок.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Борзова А.С., Иванов Д.В. Оптимизационное моделирование инвестиционного процесса развития отраслевой организационной системы гражданской авиации. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2021;9(1). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2021.32.1.030>
Borzova A.S., Ivanov D.V. Optimization Modeling of the Investment Process for the Development of the Civil Aviation Sectoral Organizational System. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2021;9(1). (In Russ.). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2021.32.1.030>
2. Калмыкова А.А. Условия и факторы формирования и развития современного рынка инвестиций. *Транспортное дело России*. 2012;(5):23–24.
Kalmikova A. Conditions, Factors of Formation and Development of Modern Market of Investments. *Transport Business of Russia*. 2012;(5):23–24. (In Russ.).
3. Горковенко М.Л., Трофимов С.В. Особенности аэропортовой деятельности в условиях конкуренции авиапредприятий, обеспечивающих воздушные перевозки. *Конкурентное право*. 2020;(1):40–44.
Gorkovenko M.L., Trofimov S.V. Peculiarities of Airport Activities in Conditions of Competition Between Aviation Enterprises Securing Air Transportations. *Konkurentnoe pravo*. 2020;(1):40–44. (In Russ.).
4. Анисимов Ю.П., Куксова И.В., Губертон Е.А., Жильников А.Ю., Иголкин И.С. Оптимизация потоков инвестиционных ресурсов для развития инновационной деятельности на предприятии. *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*. 2022;84(2):400–406. <http://doi.org/10.20914/2310-1202-2022-2-400-406>
Anisimov Yu.P., Kuksova I.V., Gubertov E.A., Zhilnikov A.Yu., Igolkin I.S. Optimization of Investment Resource Flows for the Development of Innovative Activities at the Enterprise. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2022;84(2):400–406. (In Russ.). <http://doi.org/10.20914/2310-1202-2022-2-400-406>
5. Bazaluk O., Zhykharieva V., Vlasenko O., Nitsenko V., Streimikiene D., Balezentis T. Optimization of the Equity in Formation of Investment Portfolio of a Shipping Company. *Mathematics*. 2022;10(3). <http://doi.org/10.3390/math10030363>
6. Межов И.С., Клецкова Е.В. Моделирование стратегий развития региональной экономики. *Управленческие науки*. 2017;7(4):26–35.
Mezhov I.S., Kletskova E.V. Modelling of Regional Economy Growth Strategy. *Management Sciences*. 2017;7(4):26–35. (In Russ.).
7. Карпенко А.П. Современные техники оптимизации проектных решений. В сборнике: *Интеллектуальные информационные системы: труды Международной*

- научно-практической конференции, посвященной 40-летию кафедры САПРИС, 14–15 февраля 2024 года, Воронеж, Россия. Воронеж: Воронежский государственный технический университет; 2024. С. 9–12.
8. 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). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2023.42.3.006>
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). (In Russ.). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2023.42.3.006>
9. Кондратьева О.В. Алгоритм интеллектуальной поддержки принятия решений при формировании портфеля ценных бумаг на основе роевого интеллекта. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2021;9(2). <http://doi.org/10.26102/2310-6018/2021.33.2.029>
Kondrateva O.V. Intellectual Decision-Making Support Algorithm on the Securities Portfolio Formation Based on the Swarm Intelligence. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2021;9(2). (In Russ.). <http://doi.org/10.26102/2310-6018/2021.33.2.029>
10. Карпенко А.П. Методы повышения эффективности роевых алгоритмов глобальной оптимизации. В сборнике: *БИОНИКА-2023: материалы III Международной научно-практической конференции, 01–03 ноября 2023 года, Москва, Россия*. Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана; 2024. С. 40–47.
Karpenko A.P. Methods for Increasing the Efficiency of Swarm Algorithms for Global Optimization. In: *BIONIKA-2023: materialy III Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, 01–03 November 2023, Moscow, Russia*. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman; 2024. P. 40–47. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Иванов Денис Вячеславович, кандидат технических наук, доцент, Воронежский государственный технический университет, Российская Федерация. **Denis V. Ivanov**, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, the Russian Federation.
e-mail: ivanov.sapris@mail.ru
ORCID: [0009-0000-6690-8335](https://orcid.org/0009-0000-6690-8335)

Статья поступила в редакцию 04.07.2025; одобрена после рецензирования 30.07.2025; принята к публикации 01.08.2025.

The article was submitted 04.07.2025; approved after reviewing 30.07.2025; accepted for publication 01.08.2025.