

Научная статья
УДК 330.4+004.8
DOI: 10.25683/VOLBI.2024.67.984

Olga Valentinovna Bulygina
Candidate of Economics, Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Information Technology
in Economics and Management,
Branch of National Research University MPEI
in Smolensk
Smolensk, Russian Federation
baguzova_ov@mail.ru

Dmitry Alekseevich Tyukaev
Doctor of Economics, Associate Professor,
Professor of the Department of Information Technology
in Economics and Management,
Branch of National Research University MPEI
in Smolensk
Smolensk, Russian Federation
tyukaev_da@bk.ru

Evgeniy Sergeevich Yashin
Director of Smolensk branch,
Russian Insurance Company Evroins
Smolensk, Russian Federation
evgeny_smol@mail.ru

Ольга Валентиновна Бульгина
канд. экон. наук, доцент,
доцент кафедры информационных технологий
в экономике и управлении,
Филиал Национального исследовательского университета «МЭИ»
в г. Смоленске
Смоленск, Российская Федерация
baguzova_ov@mail.ru

Дмитрий Алексеевич Тюкаев
д-р экон. наук, доцент,
профессор кафедры информационных технологий
в экономике и управлении,
Филиал Национального исследовательского университета «МЭИ»
в г. Смоленске
Смоленск, Российская Федерация
tyukaev_da@bk.ru

Евгений Сергеевич Яшин
директор Смоленского филиала,
Русское страховое общество «Евроинс»
Смоленск, Российская Федерация
evgeny_smol@mail.ru

ОПТИМИЗАЦИЯ ПОРТФЕЛЯ ПРОЕКТОВ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ НАУКОЕМКОЙ ПРОДУКЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДИФИЦИРОВАННОГО АЛГОРИТМА ПЧЕЛИНЫХ КОЛОНИЙ

5.2.2 — Математические, статистические и инструментальные методы в экономике

5.2.3 — Региональная и отраслевая экономика

Аннотация. Одним из ключевых факторов, сдерживающих интенсивное развитие российской экономики, является ее высокая импортозависимость. Особенно остро данная проблема стоит перед высокотехнологичными отраслями, где доля зарубежных комплектующих порой превышает 60–70 %. Для повышения их импортнезависимости был разработан пакет мер государственной поддержки предприятий, занимающихся созданием наукоемкой продукции. Однако обширный перечень критически важной продукции, требующей оперативного замещения российскими аналогами, обуславливает целесообразность отбора наиболее «перспективных» проектов, которые будут объединены в портфель для достижения стратегических целей. Наиболее сложным процессом формирования портфеля является определение оптимального перечня компонентов (проектов и программ) в рамках заданных ограничений, поскольку он требует применения специальных экономико-математических методов решения задач комбинаторной оптимизации. Нелинейность целевой функции, большая размерность поискового пространства, информационная неопределенность существенно затрудняют применение традиционных методов детерминиро-

ванного поиска. В качестве альтернативы предлагается использование метаэвристических алгоритмов, позволяющих находить близкие к оптимальным решения за приемлемое время. Для решения поставленной научной задачи было предложено использовать зарекомендовавшие себя методы роевого интеллекта, среди которых авторами был выбран алгоритм искусственной пчелиной колонии. Канонический алгоритм, разработанный Д. Карабога, характеризуется высокой гибкостью и независимостью от проблем, однако не способен накапливать «опыт», полученный на предыдущих итерациях, и использовать его для повышения схожести. Для разрешения данной проблемы была проведена его гибридизация с алгоритмом нечеткой кластеризации. Разбиение всей популяции на кластеры (подпопуляции) проводится для определения объектов — центров кластеров, которые будут выступать в качестве исходных позиций для поискового алгоритма.

Ключевые слова: импортозамещение, наукоемкая продукция, портфель, проект, оптимизация и балансировка портфеля, комбинаторная оптимизация, роевый интеллект, биоинспирированный алгоритм, алгоритм искусственной пчелиной колонии, нечеткая кластеризация

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-11-00335, <https://rscf.ru/project/22-11-00335/>.

Для цитирования: Бульгина О. В., Тюкаев Д. А., Яшин Е. С. Оптимизация портфеля проектов импортозамещения наукоемкой продукции с использованием модифицированного алгоритма пчелиных колоний // Бизнес. Образование. Право. 2024. № 2(67). С. 125—131. DOI: 10.25683/VOLBI.2024.67.984.

FORMING A PORTFOLIO OF IMPORT SUBSTITUTION PROJECTS FOR HIGH-TECH PRODUCTS USING A MODIFIED BEE COLONY ALGORITHM

5.2.3 — Regional and sectoral economy

5.2.2 — Mathematical, statistical and instrumental methods in economics

Abstract. *One of the key factors constraining the intensive development of the Russian economy is its high dependence on imports. This problem is especially acute in high-tech industries, where the share of foreign components sometimes exceeds 60-70%. A package of measures of state support for enterprises engaged in the creation of high-tech products has been developed to increase their import independence. However, an extensive list of critically important products that require prompt replacement with Russian analogues makes it advisable to select the most “promising” projects that will be combined into a portfolio to achieve strategic goals. The most difficult process of portfolio formation is determining the optimal list of components (projects and programs) within the given constraints, since it requires the use of special economic and mathematical methods for solving combinatorial optimization tasks. The nonlinearity of the objective function, the high dimensionality of the search space, and information uncertainty significantly complicate the use of tradi-*

tional deterministic search methods. As an alternative, it is proposed to use metaheuristic algorithms that make it possible to find close to optimal solutions in an acceptable time. To solve the scientific task, it was proposed to use proven methods of swarm intelligence. Among them, the authors chose the artificial bee colony algorithm. The canonical algorithm developed by D. Karaboga is characterized by high flexibility and problem-independence, but is not able to accumulate the “experience” gained in previous iterations and use it to increase convergence. To solve this problem, it was hybridized with a fuzzy clustering algorithm. The division of the entire population into clusters (subpopulations) is carried out to determine objects - cluster centers, which will act as starting positions for the search algorithm.

Keywords: *import substitution, high-tech products, portfolio, project, portfolio optimization and balancing, combinatorial optimization, swarm intelligence, bioinspired algorithm, artificial bee colony algorithm, fuzzy clustering*

Funding: The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-11-00335, <https://rscf.ru/en/project/22-11-00335/>.

For citation: Bulygina O. V., Tyukaev D. A., Yashin E. S. Forming a portfolio of import substitution projects for high-tech products using a modified bee colony algorithm. *Biznes. Obrazovanie. Pravo = Business. Education. Law.* 2024;2(67):125—131. DOI: 10.25683/VOLBI.2024.67.984.

Введение

Актуальность. В текущих российских реалиях активизация деятельности по созданию наукоемкой продукции, направленной на решение проблем импортозамещения в критически важных отраслях экономики, является одним из ключевых приоритетов государственной политики, реализация которого позволит преодолеть последствия санкционного давления, а также повысить налоговые поступления в бюджет и сформировать новые рабочие места. Критическая потребность в обширном перечне продукции заставила Правительство РФ сформировать внушительный пакет мер по финансовой и регуляторной поддержке предприятий, занимающихся данным направлением. Однако фактические инвестиционные потребности проектов и программ развития наукоемких производств существенно превышают выделяемые объемы бюджетных средств. В этой связи возникает острая необходимость в разработке методического и математического обеспечения процессов формирования портфелей проектов для достижения стратегических целей импортозамещения, которые смогут получить разностороннюю государственную поддержку.

Изученность проблемы. В современной истории принято выделять две глобальные волны импортозамещения: первая волна возникла в послевоенные годы (1950—1970-е гг.), а вторая — после мирового кризиса 2008 г. (и продолжается по сей день). Естественно, что каждая волна сопровождалась активизацией научных исследований в данной области. Так, проблемам импортозамещения, в т. ч. и в наукоемких отраслях, занимались как зарубежные (Г. Брутон, А. Крюгер, Р. Пребиш, А. Хиршман и др.), так и отечественные (И. И. Пичурин, И. Н. Попова, Т. Л. Сергеева, А. В. Тебекин, Т. А. Щербина и др.) ученые [1; 2]. В их трудах особая роль отводится инструментам государственной поддержки процессов создания наукоемких продукции и технологий, способных успешно заместить зарубежные аналоги.

Теоретические основы портфельного управления были заложены в 1960-е гг. в трудах Г. Марковица и Дж. Тобина. В последующие сорок лет ученые занимались их развитием, включая разработку необходимого инструментария (появились матрицы портфельного анализа, скоринговые модели, метод сортировки, пузырьковые диаграммы и т. д.). Особое развитие данное направление получило в начале текущего столетия, когда был разработан ряд международных и национальных стандартов, в которых подробно описаны процессы формирования портфеля проектов. Для их практической реализации в различных отраслях был разработан обширный набор инструментов, которые отражены в трудах зарубежных (Н. Арчер, Дж. Бард, Ф. Газемзаде, П. Кауфман, Р. Купер и др.) и отечественных (В. М. Аньшин, В. Д. Бархатов, А. А. Лифшиц, Л. С. Мазелис, К. С. Солодухин и др.) ученых [3—7].

Наиболее математически сложным процессом формирования портфеля является определение оптимального перечня компонентов, наилучшим образом обеспечивающих достижение стратегических целей. Для решения указанной задачи оптимизации был предложен ряд экономико-математических методов, основанных на моделях линейного (модели Дина, Альбаха, Хакса и Вайнгартнера и др.) и нелинейного (модели Радулеску, Буркова—Джавахадзе, Бадри—Девиса и др.) программирования [8]. Однако проектам создания наукоемкой продукции свойственна информационная неопределенность, которая совместно с нелинейностью целевой функции и большой размерностью поискового пространства существенно затрудняет применение традиционных методов. В качестве альтернативы можно воспользоваться метаэвристическими методами, отличительной особенностью которых является возможность решения сложных оптимизационных задач в условиях отсутствия полных и точных знаний о пространстве поиска.

В начале XXI в. исследователи обратили внимание на биологические системы, используя принципы их функционирования для моделирования сложных процессов. Сегодня наиболее известны популяционные алгоритмы, имитирующие коллективное поведение муравьев (Dorigo, 1996), бактерий (Passino, 2002), лягушек (Eusuff, 2003), пчел (Karaboga, 2005), обезьян (Zhao & Tang, 2007), рыб (Filho & Neto, 2008), кукушек (Yang & Deb, 2009), светлячков (Yang & He, 2013), волков (Mirjalili & Lewis, 2014) и т. д. [9] Выбор конкретного алгоритма зачастую определяется ландшафтом рассматриваемой фитнес-функции (если он известен) либо предпочтениями исследователя (для решения поставленной задачи был выбран алгоритм искусственной пчелиной колонии). Однако практическое применение большинства популяционных алгоритмов (в т. ч. и рассматриваемого) встречается с рядом трудностями, приводящих к снижению его сходимости. Вышесказанное подтверждает **целесообразность** проведения модификации алгоритма искусственной пчелиной колонии с целью использования для информационной поддержки процесса оптимизации и балансировки портфеля проектов импортозамещения наукоемкой продукции.

Научная новизна заключается в разработке экономико-математического метода поиска оптимального перечня компонентов портфеля, наилучшим образом обеспечивающих достижение стратегических целей импортозамещения с учетом заданных ограничений, который отличается гибридизацией алгоритмов искусственной пчелиной колонии и нечеткой кластеризации, используемой для определения исходных позиций для поискового алгоритма.

Целью исследования является разработка метода оптимизации и балансировки портфеля проектов импортозамещения наукоемкой продукции, основанного на комплексном применении алгоритмов роевого интеллекта и интеллектуального анализа данных. Для достижения поставленной задачи в статье решаются следующие **задачи**:

- обзор актуальных мер государственной поддержки предприятий, реализующих проекты импортозамещения наукоемкой продукции;
- анализ особенностей процессов формирования портфелей проектов импортозамещения наукоемкой продукции;
- разработка метода оптимизации и балансировки портфеля проектов с использованием алгоритмов роевого интеллекта и нечеткой кластеризации.

Теоретическая значимость заключается в расширении методических основ портфельного управления в части развития инструментария информационной поддержки процесса оптимизации и балансировки портфеля проектов импортозамещения наукоемкой продукции.

Практическая значимость заключается в развитии метаэвристических методов комбинаторной оптимизации в социально-экономических системах путем гибридизации популяционных алгоритмов и методов нечеткой кластеризации.

Основная часть

В современных условиях беспрецедентного давления на российскую экономику стратегическое значение приобретает активизация инновационно-инвестиционных процессов по созданию:

- наукоемкой продукции, способной успешно заменить зарубежные аналоги, ушедшие с российского рынка (в целях импортозамещения);

– передовых технологий и радикальных инноваций, способных обеспечить переход к новому технологическому укладу (в целях импортоопережения).

Впервые о необходимости импортозамещения «критической» продукции заговорили в начале 2000-х гг.: в это время были созданы государственные корпорации «Роснано», «Росатом», «Ростех», а также определены приоритетные направления развития науки, технологий и техники. Внешнеполитические события 2014 г., приведшие к запуску процесса введения взаимных санкций с западными странами, определили значимость применения стратегического подхода к планированию государственной политики в области импортозамещения: в результате был разработан ряд федеральных законов и программ развития. По данным Комитета Совета Федерации по экономической политике, в период с 2015 по 2021 г. совокупные инвестиции в проекты импортозамещения превысили 3 трлн руб., при этом порядка 500 млрд руб. было выделено из федерального бюджета.

Уход с российского рынка ряда мировых компаний, спровоцированный специальной военной операцией на территории Украины (февраль 2022 г.), остро поднял вопрос о выживании большого числа производств, существенно зависимых от импортных поставок. По данным Аналитического доклада НИУ ВШЭ, в 2023 г. в импортозависимости находилось две трети промышленных предприятий. Наибольшая зависимость свойственна станкостроению (76 % потребляемой отраслью продукции производится за рубежом), строительной-дорожной, коммунальной и наземной аэродромной технике (71 %) и медицинской промышленности (69 %).

Для повышения импортонезависимости отраслей российской экономики Правительством РФ был разработан внушительный пакет мер финансовой и регуляторной (налоговые, таможенные, инвестиционные льготы и т. д.) поддержки. Основными финансовыми мерами стали субсидии из федерального бюджета на компенсацию:

- затрат на проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по современным технологиям (Постановление Правительства РФ от 12 декабря 2019 г. № 1649);
- затрат на создание научно-технического задела по разработке технологий производства электронных компонентов и радиоэлектронной аппаратуры (Постановление Правительства РФ от 17 февраля 2016 г. № 109);
- затрат на производство и реализацию пилотных партий средств производства (Постановление Правительства РФ от 25 мая 2017 г. № 634);
- доходов, недополученных кредитным организациям по кредитам на приобретение объектов недвижимости в промышленных целях (Постановление Правительства РФ от 6 сентября 2022 г. № 1570);
- поддержки проектов по разработке конструкторской документации на комплектующие для различных отраслей промышленности (Постановление Правительства РФ от 18 февраля 2022 г. № 208).

Ключевые направления предоставления различной поддержки определены в разработанном Минпромторгом России Перечне критических комплектующих изделий, необходимых для отраслей промышленности, производство которых не наложено на территории страны, а также в Отраслевых планах мероприятий по импортозамещению.

Критическая потребность в обширном перечне продукции (изделий, комплектующих, оборудования и т. п.) привела к переосмыслению критериев отбора проектов для получения

господдержки. Если ранее выбирались только экономически эффективные проекты, то сейчас уже готовы поддерживать и убыточные проекты, которые встроены в цепочки создания стоимости и обладают стратегической значимостью для экономической безопасности страны. Вышесказанное существенно повлияло на процессы формирования портфеля проектов для оказания финансовой, регуляторной и иной господдержки.

В мировой практике используют несколько подходов к управлению проектной деятельностью, отраженных в различных международных и национальных стандартах. Наибольшую известность получили стандарты, разработанные следующими организациями: *International Standartization Organization (ISO)*, *Project Management Institute (PMI)*, *International Project Management Association (IPMA)*, *The Office of Government Commerce (OGC)*. В России разработан комплекс национальных стандартов, рассматривающих различные аспекты проектного менеджмента.

В отечественных стандартах под портфелем понимается набор проектов и программ, сгруппированных для эффективного управления для достижения стратегических целей (т. е. выстраивается взаимосвязь между процессами стратегического планирования и организации проектной деятельности). Портфельное управление включает три группы процессов: информационного и методологического обеспечения; формирования портфеля; мониторинга и контроля. Наибольшей сложностью отличается группа процессов формирования портфеля, причем уровень этой сложности в значительной степени определяется особенностями предметной области, а также «качеством» информационного обеспечения.

На рис. 1 приведена модель формирования портфеля проектов импортозамещения наукоемкой продукции, которая отчитается учетом приоритетов стратегического развития российской экономики.



Рис. 1. Модель формирования портфеля проектов импортозамещения наукоемкой продукции

Несмотря на существенное теоретическое и практическое развитие методологии портфельного управления, на сегодняшний день не существует универсального подхода к формированию портфеля. Тем не менее в профильной литературе можно найти множество методов и моделей, которые успешно используются для информационной поддержки его процессов (в таблице представлена их классификация, предло-

женная отечественными и зарубежными авторами [10—13]). Выбор конкретного метода в значительной степени определяется специфическими требованиями, вытекающими из особенностей предметной области. Однако нередко возникают ситуации, когда целесообразна разработка «специализированных» инструментов, способных соответствовать конкретным условиям и ограничениям научной задачи.

**Классификация методов и моделей
формирования портфеля**

Авторы	Критерий	Классы моделей
Л. С. Мазелис, К. С. Солодухин	Число периодов	Однопериодные
		Многопериодные
J. F. Bard, R. Balachandra, P. E. Kaufmann, R. G. Cooper, S. J. Edgett, E. J. Kleinschmidt	Момент принятия проектов в портфель	Статические
		Динамические
Г. В. Моисеев	Количество критериев	Однокритериальные
		Многокритериальные
В. М. Аньшин, В. Д. Бархатов	Форма представления	Графические
		Экспертно- аналитические
		Экономико- математические
N. P. Archer, F. Ghasemzaden	Математическая основа	Методы <i>ad hoc</i>
		Сравнительные методы
		Скоринговые модели
		Матрицы портфельного анализа
		Оптимизационные модели
		Математическое программирование

Согласно ГОСТ Р 54870-2011, формирование портфеля проектов включает следующие процессы:

- 1) *идентификацию*: унифицированное описание компонентов (проектов и программ) и их категоризация;
- 2) *оценку*: определение значений показателей (метрических и неметрических), используемых для последующего ранжирования компонентов;
- 3) *приоритизацию*: ранжирование компонентов по значению интегрального показателя;
- 4) *оптимизацию и балансировку*: определение оптимального перечня компонентов, наилучшим образом обеспечивающих достижение стратегических целей с учетом заданных ограничений;
- 5) *авторизацию*: утверждение состава портфеля.

С математической точки зрения наибольший интерес представляет процесс оптимизации и балансировки портфеля, поскольку он требует применения «специальных» инструментов. На сегодняшний день разработано множество методов решения сложных задач многомерной (целевая функция включает две и более переменных) и многокритериальной (используется две и более конфликтующие целевые функции) оптимизации. Возможности применения каждого из них определяются особенностями рассматриваемой задачи (в частности, ее размерностью), а также количеством и качеством (достоверностью, полнотой, точностью и т. п.) имеющейся информации.

Сформулируем задачу поиска оптимального состава портфеля проектов, обеспечивающего достижение стратегических целей, следующим образом. Пусть имеется N потенциальных компонентов: P_1, P_2, \dots, P_N — влияющих на K стратегических целей: G_1, G_2, \dots, G_K . Ограничениями выступают размеры выделяемых финансовых, материально-технических и трудовых ресурсов. Требуется найти такую комбинацию компонентов, которая обеспечит максимальный эффект в рамках заданных ограничений.

Описанная задача относится к комбинаторной оптимизации, суть которой состоит в поиске наилучшего объекта (например, некоторого подмножества) в конечном дискретном пространстве. В то же время она не требует нахождения глобального оптимума с предоставлением теоретических гарантий, что получаемый результат действительно является таковым. Данное допущение подтверждает возможность применения метаэвристических алгоритмов, позволяющих находить близкие к оптимальным решения за приемлемое время. Такие алгоритмы демонстрируют «достойные» результаты при поиске решений алгоритмически сложных задач, в т. ч. и в условиях отсутствия полных и точных знаний о пространстве поиска.

Существенное развитие среди метаэвристических методов получили алгоритмы, вдохновленные физическими и биологическими процессами в природе (на сегодняшний день известно свыше 130 алгоритмов). Особой популярностью пользуются биоинспирированные алгоритмы, которые основаны на использовании популяционного подхода и вероятностной стратегии поиска (их принято называть «роевым интеллектом», *Swarm intelligence*). Они базируются на принципах кооперативного поведения децентрализованной самоорганизующейся колонии живых организмов (пчел, муравьев, птиц и т. п.) для достижения определенных целей (в большинстве случаев для удовлетворения пищевых потребностей). Широкую известность получили так называемые «пчелиные» алгоритмы, моделирующие пищедобывательное поведение медоносных пчел. Их отличительной особенностью является наличие «коммуникационного» аспекта, заключающегося в обмене информацией о результатах исследования между особями популяции.

Рассмотрим сущность «пчелиных» алгоритмов [14]. Колония пчел состоит из разведчиков и фуражиров. Разведчики исследуют окружающее улей пространство и сообщают фуражирам о «перспективных» местах с наибольшим количеством нектара (для передачи информации используется специальный механизм — «виляющий танец»). По указанным направлениям вылетают фуражиры, которые собирают нектар, попутно уточняя информацию о количестве нектара в некоторой окрестности. В это время разведчики занимаются поиском новых источников, на которые впоследствии будут переориентированы фуражиры. Таким образом, на каждом шаге пчелы исследуют и «обрабатывают» как элитные, так и соседними с ними участки. Это позволяет, во-первых, разнообразить совокупность решений на последующих итерациях, а во-вторых — повысить вероятность обнаружения решений, близких к оптимальным.

Каноническим считается алгоритм искусственной пчелиной колонии — *Artificial bee colony (ABC)*, предложенный Д. Карабога в 2005 г. Он характеризуется высокой гибкостью и проблемно-независимостью, однако не способен накапливать «опыт», полученный на предыдущих итерациях, и использовать его для повышения сходимости (свойство итерационного алгоритма достигать оптимума целевой функции или приближаться к нему достаточно близко за конечное число шагов). Одним из способов разрешения данной проблемы является гибридизация *ABC*-алгоритма с методами интеллектуального анализа данных. Д. Карабога с соавторами проведен обзор исследований по улучшению *ABC*-алгоритма с помощью методов машинного обучения, применяемых на различных шагах (например, для инициации популяции, отбора позиций в окрестностях, генерации новых решений, отсева неперспективных позиций и т. п.) [15].

Выбор шага и направления модификации алгоритма определяется постановкой оптимизационной задачи. Например, для крупномасштабных задач рекомендуется «развивать» инициацию исходной популяции, на котором определяются начальные позиции поиска (в каноническом алгоритме они задаются случайным образом). Использование «интеллектуальных» методов на этом шаге нацелено либо на сокращение масштаба задачи, либо на ограничение пространства поиска. Одним из методов, который подходит для указанных целей, является кластеризация (разбиение совокупности на группы, объекты которых схожи между собой и отличны от объектов других групп) [16].

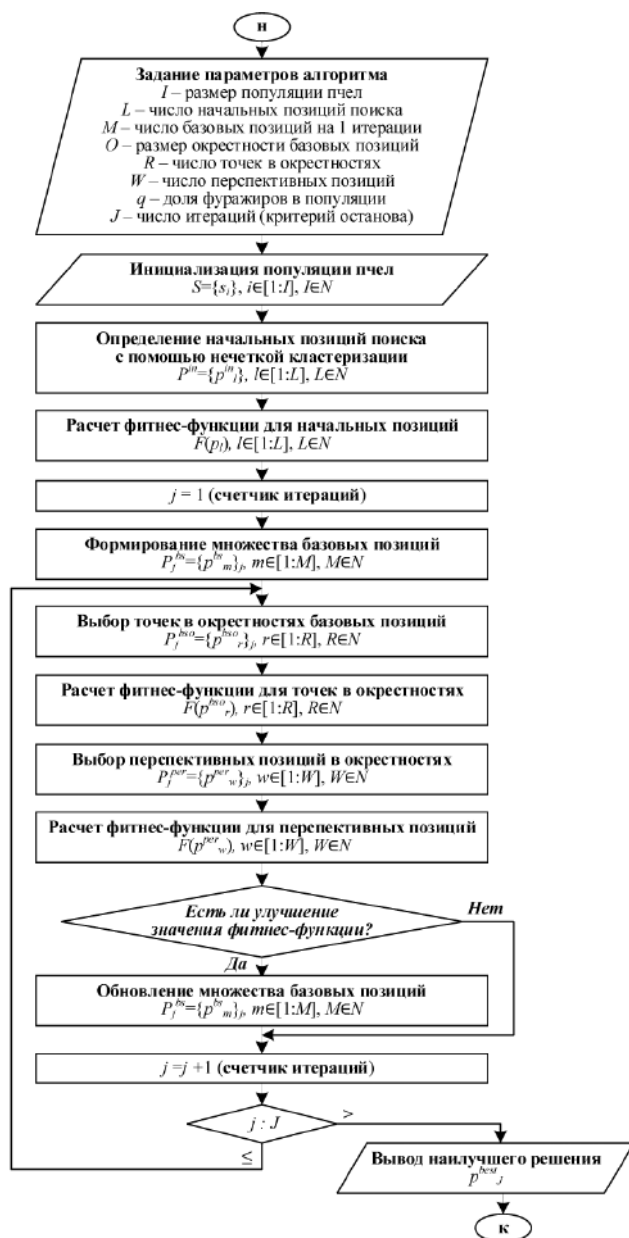


Рис. 2. Блок-схема модифицированного ABC-алгоритма

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Попова И. Н., Сергеева Т. Л. Импортзамещение в современной России: проблемы и перспективы // *Beneficium*. 2022. № 2(43). С. 73—84. DOI: 10.34680/BENEFICIUM.2022.2(43).73-84
2. Тебекин А. В. Анализ проблем и перспектив реализации планов импортзамещения в отраслях промышленности // *Транспортное дело России*. 2022. № 2. С. 159—165. DOI: 10.52375/20728689_2022_2_159
3. Ванюшкин А. С. Методологические подходы к оптимизации портфеля проектов развития региона // *Научный вестник: Финансы, банки, инвестиции*. 2017. № 4. С. 63—70.

В текущих российских реалиях задачу поиска оптимального состава портфеля проектов импортзамещения наукоемкой продукции можно отнести к указанному классу, что, в свою очередь, подтверждает целесообразность применения методов кластеризации. Для рассматриваемой задачи предлагается проводить разбиение всей популяции на кластеры (подпуляции) с целью определения объектов — центров кластеров, которые будут выступать в качестве исходных позиций для поискового алгоритма.

На сегодняшний день разработано несколько подходов к кластеризации, основанных на применении вероятностных, иерархических, интеллектуальных, графовых или иных методов. Однако необходимость взаимодействия особой популяции между собой обуславливает целесообразность использования нечеткой кластеризации, которая позволяет формировать пересекающиеся кластеры. Ее сущность заключается в расчете для всех объектов степени их принадлежности к каждому из заданных кластеров (в диапазоне от 0 до 1), т. е. он может попадать в несколько кластеров. Исходя из сказанного, рассматриваемая задача кластеризации сводится к разделению популяции P мощностью n на L нечетких кластеров с центрами β так, чтобы функция потерь стремилась к минимуму.

Первые работы в области нечеткой кластеризации появились в начале 1970-х гг. (E. Ruspini, J. C. Dunn). Благодаря Дж. Бездеку (и его методу *Fuzzy C-Means*) данное направление получило существенное развитие, и появилось множество FCM-подобных методов, зарекомендовавших себя в различных областях. В рассматриваемой задаче центры кластеров выступают всего лишь в качестве исходных позиций, поэтому можно воспользоваться классическим FCM-методом нечеткой кластеризации. На рис. 2 показана блок-схема предлагаемой модификации ABC-алгоритма.

Заключение

В статье предложен метаэвристический метод оптимизации и балансировки портфеля проектов импортзамещения наукоемкой продукции, который базируется на биоинспирированном алгоритме, моделирующем пищевое поведение медоносных пчел. В его основе лежит канонический алгоритм искусственной пчелиной колонии, в который добавлена дополнительная процедура предварительного определения исходных позиций поиска с помощью FCM-метода нечеткой кластеризации.

Для проверки эффективности разработанного метаэвристического метода оптимизации и балансировки портфеля проектов импортзамещения наукоемкой продукции применялась имитационная процедура. С использованием генератора псевдослучайных чисел было сформировано множество из 700 проектов, характеризующихся десятью параметрами (затраты, эффекты, риски). Применение предложенного метода позволило сформировать портфель из 90 проектов. При этом сформированный набор проектов незначительно (с допустимой для подобных задач погрешностью) отличался от «оптимального» набора, полученного в результате полного перебора.

4. Лихошерст Е. Н., Мазелис Л. С., Чен А. Я. Выбор оптимального портфеля проектов строительной компании с учетом запросов стейкхолдеров в нечетко-множественной постановке // Территория новых возможностей. Вестник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса. 2015. № 4(31). С. 27—40.
5. Нецаева И. М. Модели формирования портфеля проектов в строительной отрасли // Вестник Санкт-Петербургского университета. Менеджмент. 2021. Т. 20. Вып. 2. С. 242—262. DOI: 10.21638/11701/spbu08.2021.205
6. Бальнин И. В. Оптимизация инвестиционного портфеля в контексте практической реализации риск-ориентированного подхода: многообразие методов и принципов // Экономический анализ: теория и практика. 2016. № 10. С. 79—92.
7. Авдошин С. М., Лифшиц А. А. Формирование портфеля проектов на основе нечеткой модели многокритериальной оптимизации // Бизнес-информатика. 2014. № 1(27). С. 14—21.
8. Культин Д. Н. Автоматизация процесса формирования портфеля проектов с использованием экспертной системы // Современные наукоемкие технологии. 2019. № 7. С. 45—50.
9. Xing B., Gao W.-J. Innovative computational intelligence : A rough guide to 134 clever algorithms. Cham : Springer, 2014. 451 p. DOI: 10.1007/978-3-319-03404-1.
10. Аньшин В. М., Бархатов В. Д. Управление портфелем проектов: сравнительный анализ подходов и рекомендации по их применению // Управление проектами и программами. 2012. № 1(29). С. 20—40.
11. Мазелис Л. С., Солодухин К. С. Модели оптимизации портфеля проектов университета с учетом рисков и корпоративной социальной ответственности // Университетское управление: практика и анализ. 2012. № 4. С. 53—56.
12. Моисеев Г. В. Многокритериальная оптимизация инвестиционной деятельности // Хроноэкономика. 2019. № 6(19). С. 13—18.
13. Петренко Е. Ю. Математические модели формирования портфеля проектов: эволюция, типология, будущее // Научные исследования и разработки. Российский журнал управления проектами. 2014. № 3(4). С. 33—53. DOI: 10.12737/7130.
14. Булыгина О. В., Иванова О. А., Хамидуллин Р. Я., Зырянов С. И. Инструменты управления организационными изменениями с помощью методов роевого интеллекта // Прикладная информатика. 2021. Т. 16. № 2. С. 123—130. (На англ. яз.) DOI: 10.37791/2687-0649-2021-16-2-123-130.
15. Karaboga D., Akay B., Karaboga N. A survey on the studies employing machine learning (ML) for enhancing artificial bee colony (ABC) optimization algorithm // Cogent Engineering. 2020. Vol. 7. No. 1. Art. 1855741. DOI: 10.1080/23311916.2020.1855741.
16. Булыгина О. В., Кулясов Н. С., Ярцев Д. Д. Направления модификации алгоритма искусственной пчелиной колонии для оптимизации параметров управления сложными социально-экономическими системами // Прикладная информатика. 2024. Т. 19. № 1. С. 28—37. (На англ. яз.) DOI: 10.37791/2687-0649-2024-19-1-28-37.

REFERENCES

1. Popova I. N., Sergeeva T. L. Import Substitution in Modern Russia: Problems and Prospects. *Beneficium*. 2022;2(43):73—84. (In Russ.) DOI: 10.34680/BENEFICIUM.2022.2(43).73-84.
2. Tebekin A. Analysis of problems and prospects for the implementation of import substitution plans in industries. *Transportnoe delo Rossii = Transport business in Russia*. 2022;2:159—165. (In Russ.) DOI: 10.52375/20728689_2022_2_159.
3. Vanushkin A. S. Methodological approaches to optimization of portfolio of projects of regional development. *Nauchnyi vestnik: Finansy, banki, investitsii = Scientific Bulletin: Finance, banks, investments*. 2017;4:63—70. (In Russ.)
4. Likhosherst E. N., Mazelis L. S., Chen A. Ya. Selection of the optimal portfolio construction company taking into account the requests of stakeholders in the formulation of multi-fuzzy. *Territoriya novykh vozmozhnostei. Vestnik Vladivostokskogo gosudarstvennogo universiteta ekonomiki i servisa = The Territory of new opportunities. The Herald of Vladivostok State University of Economics and Service*. 2015;4(31):27—40. (In Russ.)
5. Nechaeva I. M. Models of projects portfolio formation in construction business. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Menedzhment = Vestnik of Saint Petersburg University. Management*. 2021;20(2):242—262. (In Russ.) DOI: 10.21638/11701/spbu08.2021.205.
6. Balyinin I. V. Optimization of investment portfolio as part of practical implementation of a risk-based approach: a variety of methods and principles. *Ekonomicheskii analiz: teoriya i praktika = Economic analysis: theory and practice*. 2016;10:79—92. (In Russ.)
7. Avdoshin S., Lifshits A. Project portfolio formation based on fuzzy multi-objective model. *Biznes-informatika = Business Informatics*. 2014;1(27):14—21. (In Russ.)
8. Kultin D. N. Automation of project portfolio composition process by means of expert system. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii = Modern high technologies*. 2019;7:45—50. (In Russ.)
9. Bo Xing, Wen-Jing Gao. Innovative computational intelligence: A rough guide to 134 clever algorithms. Cham, Springer, 2014. 451 p. DOI: 10.1007/978-3-319-03404-1.
10. Anshin V. M., Barkhatov V. D. Project portfolio management: comparative analysis of approaches and recommendations for their application. *Upravlenie proektami i programmami = Project and program management*. 2012;1(29):20—40. (In Russ.)
11. Mazelis L. S., Solodukhin K. S. The university projects portfolio optimization models involving risks and corporate social responsibility. *Universitetskoe upravlenie: praktika i analiz = University Management: Practice and Analysis*. 2012;4:53—56. (In Russ.)
12. Moiseev G. V. Multicriterial optimization of investment activity. *Khronoekonomika = Chronoeconomics*. 2019;6(19):13—18. (In Russ.)
13. Petrenko E. Mathematical models of project portfolio formation: evolution, typology, future. *Nauchnye issledovaniya i razrabotki. Rossiiskii zhurnal upravleniya proektami = Scientific research and development. Russian journal of project management*. 2014;3(4):33—53. (In Russ.) DOI: 10.12737/7130.
14. Bulygina O., Ivanova O., Khamidullin R., Zyrianov S. Tools of organizational change management using swarm intelligence methods. *Prikladnaya informatika = Journal of Applied Informatics*. 2021;16(2):123—130. DOI: 10.37791/2687-0649-2021-16-2-123-130.
15. Karaboga D., Akay B., Karaboga N. A survey on the studies employing machine learning (ML) for enhancing artificial bee colony (ABC) optimization algorithm. *Cogent Engineering*. 2020;7(1):1855741. DOI: 10.1080/23311916.2020.1855741.
16. Bulygina O., Kulyasov N., Yartsev D. Directions for modifying the artificial bee colony algorithm to optimize control parameters for complex systems. *Prikladnaya informatika = Journal of Applied Informatics*. 2024;19(1):28—37. DOI: 10.37791/2687-0649-2024-19-1-28-37.

Статья поступила в редакцию 15.02.2024; одобрена после рецензирования 25.03.2024; принята к публикации 18.04.2024.
The article was submitted 15.02.2024; approved after reviewing 25.03.2024; accepted for publication 18.04.2024.