

## Формирование состава программ развития наукоемких отраслей с использованием алгоритмов бактериальной оптимизации и методов нечеткой логики

О. В. Бульгина

кандидат экономических наук, доцент, доцент  
филиал Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Смоленске,  
Смоленск, Россия  
[baguzova\\_ov@mail.ru](mailto:baguzova_ov@mail.ru)

**Аннотация:** Сегодня развитие наукоемких отраслей осуществляется в рамках программ, объединяющих набор инновационных и инвестиционных проектов, направленных на достижение единой цели и реализуемых в общих ограничениях. Наличие большего числа проектных характеристик (в частности, сроков, ресурсов, исполнителей и т.п.), которые необходимо учитывать при формировании состава программы, приводит к постановке задачи многокритериальной оптимизации. Для ее решения предложено использовать алгоритм бактериальной оптимизации, дополненный процедурой формирования начальных позиций с помощью методов нечеткой логики.

**Ключевые слова:** проекты, программы, наукоемкие отрасли, бактериальная оптимизация, нечеткая логика.

**Благодарности:** Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых — кандидатов наук МК–1534.2020.9 «Методы моделирования сложных систем с использованием нечетко–сетевых алгоритмов и роевого интеллекта».

## Formation of the composition of programs for the knowledge-intensive industry development using bacterial optimization algorithms and fuzzy logic methods

O. V. Bulygina

Cand. Sci. (Econ.), Assoc. Prof.  
Branch of National Research University «MPEI» in Smolensk, Smolensk, Russia  
[baguzova\\_ov@mail.ru](mailto:baguzova_ov@mail.ru)

**Abstract:** Today the knowledge-intensive industry development is carried out by the programs that combine a set of innovation and investment projects aimed at achieving a single goal and implemented in general constraints. The presence of a larger number of project characteristics (in particular, terms, resources, performers, etc.), which must be taken into account when forming the composition of the program, leads to the formulation of the problem of multicriteria optimization. As its solution, it is proposed to use an algorithm of bacterial optimization, supplemented by a procedure for forming initial positions using fuzzy logic methods.

**Keywords:** projects, programs, knowledge-intensive industries, bacterial optimization, fuzzy logic.

**Acknowledgments:** This work was supported by a grant of the President of the Russian Federation for the state support of young Russian scientists — candidates of Sciences (MK–1534.2020.9 «Methods for modelling complex systems using fuzzy network algorithms and swarm intelligence»).

### Введение

В настоящее время глобальной тенденцией экономического развития является создание и развитие производств наукоемкой продукции, конкурентоспособной на мировом рынке, которое должно осуществляться опережающими темпами в структуре обрабатывающей промышленности.

На сегодняшний день не существует единого подхода к классификации отраслей по уровню их наукоемкости. В отечественной и зарубежной литературе в качестве показателя наукоемкости обычно используется доля затрат на НИОКР в годовой добавленной стоимости. Отрасль считается наукоемкой, если данный показатель превышает средний уровень или уровень, выбранный для некоторой обрабатывающей отрасли или для промышленности в целом.

Данный показатель используется в классификации Организации экономического сотрудничества и развития, которая была построена на основе анализа структуры высокотехнологичных отраслей развитых стран. Согласно данной классификации, высокотехнологичными считаются отрасли, в которых показатель наукоемкости превышает 3,5%. Если же он выше 8,5%, то такие отрасли определяются как «ведущие» (такowymi сегодня считаются аэрокосмическая отрасль, производство вычислительной техники и коммуникационных средств, фармацевтическая промышленность).

Развитие наукоемких отраслей в значительной степени связано с реализацией программ, состоящих из набора проектов, управление которыми координируется для достижения стратегических преимуществ, недоступных при управлении ими по отдельности. Их основной задачей является создание принципиально новых видов продукции и услуг, способных удовлетворять текущие и потенциальные рыночные потребности<sup>1</sup>.

Как показывает отечественный и зарубежный опыт, реализация подобных программ является чрезвычайно сложным, высокорискованным процессом, поскольку включает в себя набор (не менее двух) проектов, согласованных по различным характеристикам (в первую очередь, срокам, ресурсам, исполнителям). Кроме того, большинство проектов, входящих в состав такой программы, являются инновационными, поскольку связаны с созданием новых материалов, компонентов или технологий<sup>2</sup>. В свою очередь, это формирует дополнительные ограничения на процессы проектного и программного управления.

В этой связи особое внимание необходимо уделять процессам планирования программы, в частности формированию набора жизнеспособных, экономически успешных проектов, совместная реализация которых позволит достичь заявленных выгод программы (т.е. комплекса положительных результатов и/или эффектов)<sup>3</sup>.

На основе вышесказанного можно сделать вывод об актуальности научно-практической задачи разработки экономико-математических инструментов поддержки принятия решений по планированию содержания программы развития наукоемких отраслей, основанных на использовании методов интеллектуального анализа данных о различных характеристиках проектов, входящих в его состав, и факторах внешней среды.

### **Особенности управления программами в наукоемких отраслях**

Под программой принято понимать совокупность взаимосвязанных проектов, направленных на достижение единой цели и реализуемых в условиях общих ограничений.

Проекты по созданию наукоемкой продукции могут быть отнесены как инвестиционному, так и инновационному типу. Основное отличие между ними заключается в том, что целью инвестиционного проекта всегда является получение инвестором финансовой выгоды, превышающей понесенные капитальные вложения. В то же время инновационный проект нацелен на создание новации (в виде нового продукта, технологии, рационализаторского решения и т. д.) и доведение ее до практической реализации, которая обеспечит стейкхолдерам (разработчикам, инвесторам, производителям и т. д.) некоторое конкурентное преимущество, необязательно носящее финансовый характер. Например, создание новой военной техники, главным образом, повышает обороноспособность страны, и как следствие — ее престиж, зачастую не обеспечивая прямой коммерческой выгоды.

<sup>1</sup> Булыгина О.В., Емельянов А.А., Яшин Е.С. НЕ-факторы, темпоральная логика и нечетко-логические инструменты в гибридных моделях управления рисками импортозамещения. Прикладная информатика. 2020. Т. 15. № 4. С. 5–43.

<sup>2</sup> Черновалова М.В., Какатунова Т.В., Волкова И.В., Власова Е.А. Алгоритмы и программные средства адаптации базы знаний информационных систем управления проектами. Прикладная информатика. 2021. Т. 16. № 4 (94). С. 21–34.

<sup>3</sup> Халин В.Г., Черновалова М.В., Шманев С.В. Алгоритмическое и информационное обеспечение управления инновационными проектами в условиях неопределенности. Прикладная информатика. 2018. Т. 13. № 3 (75). С. 5–15.

Подходы к управлению проектами и программами описаны в стандартах международных и национальных профессиональных организаций, объединяющих специалистов в данной области. Наибольшую известность получили «*A Guide to the Project Management Body of Knowledge*» и «*Standard for Program Management*», разработанные *Project Management Institute* (США). В России приняты и используются ГОСТ Р 54869-2011 «Проектный менеджмент. Требования к управлению проектом» и ГОСТ Р 54871-2011 «Проектный менеджмент. Требования к управлению программой».

Согласно указанным стандартам управление проектами включает пять последовательных процессов: инициация, планирование, исполнение и контроль, завершение. Для программ, помимо указанных процессов, предусмотрены процессы, связанные с запуском проектов, входящих в состав программы, приемкой их результатов, использованием промежуточных выгод программы и закрытием этих проектов. Процессы управления программой могут осуществляться как последовательно, так и параллельно. Некоторые процессы могут выполняться многократно в ходе реализации программы.

Обычно программы по созданию наукоемкой продукции реализуются в рамках кластеров, в состав которых обычно входят промышленные предприятия, образовательные учреждения, научно-исследовательские институты, инфраструктурные организации и другие субъекты, находящиеся в одной географической локации и объединенные между собой устойчивыми экономическими связями.

Таким образом, отличительной особенностью проектного планирования в рамках программы является необходимость согласования возможностей большого числа участников, обладающих разной материально-технической базой, человеческим капиталом, интеллектуальным потенциалом и научно-исследовательским опытом, что должно выполняться с учетом большой длительности реализации программы, в течение которой может существенно измениться состояние внутреннего и внешнего окружения каждого из проектов, входящих в ее состав.

#### **Выбор метода решения научно-практической задачи**

Одним из выходов процесса планирования содержания программы является перечень проектов, которые должны быть реализованы для получения заявленных программных выгод. Данная задача сводится к формированию оптимального набора проектов в рамках заранее определенных программных ограничений, которое должно осуществляться на основе анализа одной или нескольких проектных характеристик, представленных в таблице 1.

Таблица 1

**Проектные характеристики [разработано автором]**

№	Характеристика	Описание
1	Назначение	Описание результатов проекта – принципиально новых продуктов или услуг
2	Объем работ	Количественные показатели объема проектных работ
3	Сроки	Время выполнения проекта (даты начала и окончания)
4	Стоимость	Сметные затраты на выполнения проектных работ
5	Ресурсы	Материально-технические и человеческие ресурсы, необходимые для осуществления проекта
6	Исполнители	Специалисты и организации, привлеченные к выполнению проектных работ
7	Качество	Соответствие характеристик проекта установленным стандартам требованиям
8	Риски	Описание рискованных событий, которые могут произойти в ходе выполнения проекта (с указанием вероятности возникновения и ущерба от их воздействия)

Особенности решаемой научно-практической задачи определяют целесообразность использования многокритериальной оптимизации, проводимой по нескольким проектным характеристикам. Решение подобных задач существенно отличается от оптимизации по одному критерию, при которой разыскивается решение, наилучшее среди всех возможных. При многокритериаль-

ной оптимизации необязательно существует решение, лучшее по всем критериям, ввиду возникновения различных конфликтов.

Для решения поставленной задачи можно использовать методы параметрической оптимизации, которые позволяют даже в условиях недостатка статистической информации определять вектор параметров, при котором заданная целевая функция принимает оптимальное значение. Например, в качестве целевой функции можно использовать показатели экономической эффективности (в частности, чистый приведенный доход).

В последние годы для решения подобных задач активно используются метаэвристические методы, основанные на высокоуровневой стратегии поиска приближенного решения, который опирается на несколько эвристик нижнего уровня. Отличительной особенностью таких методов является возможность решения трудноразрешимых задач без наличия полных и точных знаний о пространстве поиска. В данном случае прямой случайный поиск решений, близких к оптимальным, осуществляется до тех пор, пока не будет выполнено условие останова (например, достигнуто заданное число итераций).

Среди множества метаэвристических методов особой популярностью пользуются алгоритмы роевого интеллекта, основанные на моделировании коллективного поведения колоний различных живых организмов. К наиболее известным роевым алгоритмам, инспирированным живой природой, относятся следующие алгоритмы: светличковый; муравьиной и пчелиной колоний; кукушкиного поиска; бактериальной оптимизации и другие<sup>4,5</sup>.

Роевые алгоритмы используют популяцию особей (потенциальных решений) и метод стохастической оптимизации. Как и в эволюционных алгоритмах, начальная популяция генерируется случайным образом, а затем осуществляется поиск (суб)оптимального решения. Каждая особь популяции оценивается с помощью фитнес-функции. На практике целевая функция и фитнес-функция обычно различаются: целевая функция используется для оценки характеристик особи относительно конечной цели, а фитнес-функция предназначена для выбора особи для дальнейшей репродукции. Основными требованиями к фитнес-функции являются возможность количественного измерения и простота вычисления.

#### **Применение алгоритмов бактериальной оптимизации для формирования состава программы**

Для решения экономико-математических задач, в которых особое внимание уделяться рискам, подходят алгоритмы бактериальной оптимизации, позволяющие учитывать как благоприятные, но и негативные факторы.

На сегодняшний день разработано несколько алгоритмов, основанных на бионических принципах поиска питательных веществ бактериями *E.coli* (классический алгоритм предложен К. Пассино в 2002 году)<sup>6,7,8</sup>. В их основе лежит предположение о том, что бактерия в процессе своего перемещения стремится в область с питательными веществами (аттрактантами), избегая при этом опасные вещества (репелленты). Таким образом, бактерия осуществляет поиск питательных веществ с целью максимизации энергии, получаемой в единицу времени.

<sup>4</sup> Карпенко А.П. Популяционные алгоритмы глобальной поисковой оптимизации. Обзор новых малоизвестных алгоритмов. ИТ: Приложение к журналу «Информационные технологии». 2012. № 7. С. 1–32.

<sup>5</sup> Смирнова О.С., Богорадникова А.В., Блинов М.Ю. Описание роевых алгоритмов, инспирированных неживой природой и бактериями, для использования в онтологической модели. International Journal of Open Information Technologies. 2015. vol. 3, no. 12, pp. 28–37.

<sup>6</sup> Chiranjib S., Shukla A. Coalition formation for multi-agent coordination for surveillance and capture of foreign intruder using bacteria foraging algorithm. Proceedings of Third International Conference on Advances in Control and Optimization of Dynamical Systems. Kanpur, India: Indian Institute of Information Technology & Management, 2014, pp. 511–518.

<sup>7</sup> Liu Y., Passino K.M. Biomimicry of social foraging bacteria for distributed optimization: models, principles, and emergent behaviors. Journal of Optimization Theory and Applications, 2002, vol. 115, no. 3, pp. 603–628.

<sup>8</sup> Passino K.M. Biomimicry of bacterial foraging for distributed optimization and control. IEEE Control Systems Magazine, 2002, vol. 22, no. 3, pp. 52–67.

Бактерия *E.coli* может выполнять два простых действия: плавание (равномерное прямолинейное движение) и кувырок (разворот для смены направления движения). Непосредственно перемещение бактерии в пространстве реализуется следующим образом<sup>9</sup>:

- в нейтральной среде: путем чередования кувырков и плавания;
- в среде, содержащей аттрактанты: по градиенту аттрактанта, т. е. в направлении благоприятной среды;
- в среде, содержащей репелленты: в направлении, противоположном градиенту репеллента.

Для формирования состава программ развития наукоемких отраслей можно использовать следующий алгоритм бактериальной оптимизации<sup>10</sup>:

1. Постановка оптимизационной задачи, заключающаяся в задании пространства решений (набора проектов) и программных ограничений, определяющих область поиска.

2. Хемотаксис, представляющий собой перемещение бактерий путем выполнения шагов определенной длины в задаваемом единичным вектором направлении. При плавании бактерии вектор остается неизменным, а при кувырке представляет случайный вектор, компоненты которого лежат в диапазоне [-1;1]. Плавание бактерии продолжается до тех пор, пока значение фитнес-функции растет (либо достигнуто заданное число итераций).

3. Репродукция, нацеленная на отбор наиболее перспективных бактерий. Для каждой бактерии рассчитывается значение фитнес-функции, а затем производится их сортировка. Наиболее слабые бактерии исключаются из популяции, а каждая выжившая делится на две бактерии, имеющие координаты поделившейся (так обеспечивается постоянная численность особей в популяции).

4. Рассеивание, выполняемое после заданного числа репродукций. В популяции отсеивается некоторое число бактерий, а взамен уничтоженных генерируются новые (при этом общее число особей в популяции должно остаться неизменным).

Алгоритм завершается либо при достижении заданного числа итераций, либо при получении решения с заданной точностью.

Одним из направлений развития описанного выше алгоритма является разработка метода задания исходных позиций бактерий на этапах хемотаксиса и рассеивания (т. е. значений проектных характеристик), который позволит сократить время выполнения этих этапов, повысив сходимость алгоритма. Для решения данной задачи можно использовать методы нечеткой логики, которые на основе накопленного опыта и квалиметрических данных позволяют формировать обоснованные решения.

### Заключение

Как представляется, применение классического алгоритма бактериальной оптимизации, дополненного процедурой формирования начальных позиций с помощью методов нечеткой логики, позволит эффективно решать задачу планирования содержания экономически выгодных программ развития наукоемких отраслей благодаря наличию возможности учета множества проектных характеристик, в том числе негативного влияния различных рисков внутреннего и внешнего окружения проектов, входящих в их состав.

### Список литературы

1. Булыгина О.В., Емельянов А.А., Яшин Е.С. НЕ-факторы, темпоральная логика и нечетко-логические инструменты в гибридных моделях управления рисками импортозамещения. Прикладная информатика. 2020. Т. 15. № 4. С. 5–43.
2. Черновалова М.В., Какатунова Т.В., Волкова И.В., Власова Е.А. Алгоритмы и программные средства адаптации базы знаний информационных систем управления проектами. Прикладная информатика. 2021. Т. 16. № 4(94). С. 21–34.

---

<sup>9</sup> Булыгина О.В., Рудометкин А.Н., Гимаров В.В. Экономико-математические методы и инструменты для формирования территорий инновационного развития в северных регионах России. Транспортное дело России. 2017. №5. С. 32–35.

<sup>10</sup> Emelyanov A.A., Bulygina O.V., Emelyanova N.Z. Complex swarm-simulation modeling of innovative projects promotion into the regions. Proceedings of 4th International Conference on Information Technologies in Engineering Education, Inforino 2018.

3. Халин В.Г., Черновалова М.В., Шманев С.В. Алгоритмическое и информационное обеспечение управления инновационными проектами в условиях неопределенности. Прикладная информатика. 2018. Т. 13. № 3 (75). С. 5–15.
4. Карпенко А.П. Популяционные алгоритмы глобальной поисковой оптимизации. Обзор новых малоизвестных алгоритмов. ИТ: Приложение к журналу «Информационные технологии». 2012. № 7. С. 1–32.
5. Смирнова О.С., Богорадникова А.В., Блинов М.Ю. Описание роевых алгоритмов, инспирированных неживой природой и бактериями, для использования в онтологической модели. International Journal of Open Information Technologies. 2015. vol. 3, no. 12, pp. 28–37.
6. Chiranjib S., Shukla A. Coalition formation for multi-agent coordination for surveillance and capture of foreign intruder using bacteria foraging algorithm. Proceedings of Third International Conference on Advances in Control and Optimization of Dynamical Systems. Kanpur, India: Indian Institute of Information Technology & Management, 2014, pp. 511–518.
7. Liu Y., Passino K.M. Biomimicry of social foraging bacteria for distributed optimization: models, principles, and emergent behaviors. Journal of Optimization Theory and Applications, 2002, vol. 115, no. 3, pp. 603–628.
8. Passino K.M. Biomimicry of bacterial foraging for distributed optimization and control. IEEE Control Systems Magazine, 2002, vol. 22, no. 3, pp. 52–67.
9. Булыгина О.В., Рудометкин А.Н., Гимаров В.В. Экономико-математические методы и инструменты для формирования территорий инновационного развития в северных регионах России. Транспортное дело России. 2017. № 5. С. 32–35.
10. Emelyanov A.A., Bulygina O.V., Emelyanova N.Z. Complex swarm-simulation modeling of innovative projects promotion into the regions. Proceedings of 4th International Conference on Information Technologies in Engineering Education, Inforino 2018.

#### References

1. Bulygina O.V., Emelyanov A.A., Yashin E.S. NON-factors, temporal logic and fuzzy-logical tools in hybrid models of import substitution risk management. Applied informatics. 2020. Т. 15. № 4. С. 5–43.
2. Chernovalova M.V., Kakatunova T.V., Volkova I.V., Vlasova E.A. Algorithms and software tools for adapting the knowledge base of project management information systems. Applied informatics. 2021. Т. 16. № 4(94). С. 21–34.
3. Khalin V.G., Chernovalova M.V., Shmanev S.V. Traditimic and information support for the management of innovative projects in conditions of uncertainty. Applied informatics. 2018. Т. 13. № 3 (75). С. 5–15.
4. Karpenko A.P. Population algorithms of global search optimization. Overview of new little-known algorithms. ИТ: Appendix to the journal «Information Technologies». 2012. № 7. С. 1–32.
5. Smirnova O.S., Bogoradnikova A.V., Blinov M.Yu. Description of swarm algorithms inspired by non-living nature and bacteria for use in the ontological model. International Journal of Open Information Technologies. 2015. vol. 3, no. 12, pp. 28–37.
6. Chiranjib S., Shukla A. Coalition formation for multi-agent coordination for surveillance and capture of foreign intruder using bacteria foraging algorithm. Proceedings of Third International Conference on Advances in Control and Optimization of Dynamical Systems. Kanpur, India: Indian Institute of Information Technology & Management, 2014, pp. 511–518.
7. Liu Y., Passino K.M. Biomimicry of social foraging bacteria for distributed optimization: models, principles, and emergent behaviors. Journal of Optimization Theory and Applications, 2002, vol. 115, no. 3, pp. 603–628.
8. Passino K.M. Biomimicry of bacterial foraging for distributed optimization and control. IEEE Control Systems Magazine, 2002, vol. 22, no. 3, pp. 52–67.
9. Bulygina O.V., Rudometkin A.N., Gimarov V.V. Economic and mathematical methods and tools for the formation of territories of innovative development in the northern regions of Russia. Transport business of Russia. 2017. № 5. С. 32–35.
10. Emelyanov A.A., Bulygina O.V., Emelyanova N.Z. Complex swarm-simulation modeling of innovative projects promotion into the regions. Proceedings of 4th International Conference on Information Technologies in Engineering Education, Inforino 2018.