

Нечеткий метаэвристический метод распределения сотрудников по задачам проекта

Д. Д. Ярцев¹, М. Ю. Воротилова^{✉2}, С. В. Мордвин²

¹Росинформграпотех

141261, Россия, Московская область, Пушкинский г.о., р.п. Правдинский, Лесная улица, 60

²Филиал Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Смоленске
214013, Россия, г. Смоленск, Энергетический проезд, 1

Аннотация. Планирование реализации проекта играет ключевую роль в проектном управлении, особенно в условиях стремительного усложнения современных проектов и ограниченности ресурсов.

Цель исследования – разработка метода оптимального распределения сотрудников по задачам проекта, минимизирующего перегрузку персонала и обеспечивающего соблюдение временных и бюджетных ограничений.

Материалы и методы. Для решения задачи предложен гибридный метод, объединяющий алгоритм Worm Optimization, моделирующий поведение червей *Caenorhabditis elegans* в процессе поиска пищи, и нечеткий метод кластеризации FCM, применяемый для сужения пространства возможных решений. В работе для реализации предложенного метода использовались библиотеки NetworkX, Scikit-Fuzzy, Matplotlib и Plotly языка Python. Для снижения размерности пространства поиска применена нечеткая кластеризация FCM, которая позволила выделить кластер решений, характеризующий наиболее подходящих сотрудников с точки зрения командных характеристик.

Результаты. В рамках исследования был реализован программный инструмент на языке Python, который позволяет в автоматизированном режиме распределять задачи между исполнителями. Также был проведен вычислительный эксперимент для оценки эффективности предложенного метода и сравнения результатов его работы с популярным биоинспирированным алгоритмом Ant Colony Optimization, характеризующимся схожими моделями поведения агентов в процессе поиска решений.

Выводы. Результаты валидации показали преимущество гибридного метода по сравнению с базовым алгоритмом Worm Optimization и алгоритмом Ant Colony Optimization, о чем свидетельствуют более низкие значения целевой функции и сокращение перегрузок сотрудников, подтверждающие эффективность применения метода в задачах распределения исполнителей по задачам проекта.

Ключевые слова: управление персоналом, условная многокритериальная оптимизация, метаэвристики, алгоритм оптимизации «червя», нечеткая кластеризация

Поступила 23.10.2025, одобрена после рецензирования 17.11.2025, принята к публикации 10.02.2026

Для цитирования. Ярцев Д. Д., Воротилова М. Ю., Мордвин С. В. Нечеткий метаэвристический метод распределения сотрудников по задачам проекта // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2026. Т. 28. № 1. С. 175–187. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-1-175-187

Fuzzy metaheuristic method for allocating employees to project tasks

D.D. Yartsev¹, M.Yu. Vorotilova^{✉2}, S.V. Mordvin²

¹Rosinformagrotech

60, Lesnaya street, Pushkinsky Urban District, Pravdinsky Urban Settlement, Moscow Region, 141261, Russia

²Branch of the National Research University Moscow Power Engineering Institute in Smolensk
1, Energetichesky proezd, Smolensk, 214013, Russia

Abstract. Project implementation planning plays a key role in project management, especially in the context of rapidly increasing project complexity and resource constraints.

Aim. This study was to develop a method for optimally distributing project staff across tasks, minimizing staff overload and ensuring adherence to time and budget constraints.

Materials and methods. To solve this problem, we proposed a hybrid method combining the Worm Optimization algorithm, which models the foraging behavior of *Caenorhabditis elegans* worms, and the fuzzy clustering method FCM, which is used to narrow the solution space. The Python libraries NetworkX, Scikit-Fuzzy, Matplotlib, and Plotly were used to implement the proposed method. To reduce the search space dimensionality, fuzzy clustering FCM was used, enabling the identification of a solution cluster characterizing the most suitable employees in terms of team characteristics.

Results. As part of the study, a software tool in Python has been implemented that enables automated task distribution among performers. A computational experiment has also been conducted to evaluate the effectiveness of the proposed method and compare its results with those of the popular bioinspired Ant Colony Optimization algorithm, which is characterized by similar agent behavior patterns during solution search.

Conclusions. The validation results demonstrate the advantage of the hybrid method over the basic Worm Optimization algorithm and Ant Colony Optimization, as evidenced by lower objective function values and reduced employee overload, confirming the method's effectiveness in assigning project performers to tasks.

Keywords: human resource management, conditional multicriteria optimization, metaheuristics, “Worm Optimization”, fuzzy clustering

Submitted 23.10.2025,

approved after reviewing 17.11.2025,

accepted for publication 10.02.2026

For citation. Yartsev D.D., Vorotilova M.Yu., Mordvin S.V. Fuzzy metaheuristic method for allocating employees to project tasks. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2026. Vol. 28. No. 1. Pp. 175–187. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-1-175-187

ВВЕДЕНИЕ

Планирование является одной из ключевых функций проектного управления, от качества которого зависят сроки завершения проекта, эффективность использования ресурсов и достижение конечных целей [1]. Современные проекты характеризуются нарастанием степени их сложности, что связано с рядом факторов:

- рост масштабов и этапности за счет увеличения количества задач;
- ужесточение требований к срокам и бюджету проектов, ограничениям по использованию ресурсов вследствие повышения конкуренции, ускорения технологического развития и ограниченности ресурсов;



Content is available under license [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

- нарастание сложности зависимостей между отдельными задачами из-за необходимости синхронизации действий разных участников проекта;
- необходимость оперативного внесения изменений из-за высокой изменчивости внешних условий, оказывающих влияние на проекты.

Усложнение факторов реализации современных проектов оказывает значительное влияние на процессы проектного управления, повышая трудоемкость их выполнения. Особенно это проявляется в наукоемких и высокотехнологичных отраслях (например, в инженерных, производственных, исследовательских и ИТ-проектах), где ошибки при планировании оказывают сильное негативное влияние на сроки достижения конечного результата, качество работ и величину издержек [2].

Важным фактором, усложняющим процессы проектного планирования, является необходимость рационального распределения человеческих ресурсов. В условиях ограниченности квалифицированных специалистов, высокой загрузки персонала и их параллельного участия в нескольких проектах становится критически важным оптимально распределять задачи между сотрудниками с учетом их занятости [3, 4]. Ручная реализация данной задачи в условиях высокой сложности проектов является трудоемкой из-за необходимости учета большого количества аспектов (характеристики исполнителей, временные и бюджетные ограничения и пр.) и подверженной субъективным ошибкам [5, 6]. Вышесказанное обуславливает необходимость использования программных средств, позволяющих в автоматизированном режиме определять оптимальное распределение сотрудников по задачам проекта с учетом ограничений, а также своевременно адаптировать решение при изменении условий реализации проекта.

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ЗАДАЧИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧЕЛОВЕЧЕСКИХ РЕСУРСОВ ПО ЗАДАЧАМ ПРОЕКТА

При планировании проекта необходимо учитывать не только последовательность и сроки выполнения задач, но и распределение человеческих ресурсов, от которого зависит эффективность использования рабочего времени исполнителей. В задаче требуется определить назначение сотрудников на конкретные задачи проекта с учетом их доступности и ресурсных ограничений.

Рассматриваемая задача относится к классу многокритериальных задач оптимизации, поскольку включает несколько критериев (минимизацию общего времени выполнения проекта, максимизацию соответствия сотрудников требованиям задач, минимизацию перегрузки персонала). Для решения таких задач применяются два метода [7]:

- сведение к одному основному критерию эффективности;
- поиск решения при равной значимости всех критериев оптимизации.

В задаче используется метод выделения главного критерия, который позволяет свести задачу к однокритериальной форме [8]. В качестве основного критерия оптимизации выбрана минимизация неравномерности загрузки исполнителей, тогда как временные и бюджетные рамки рассматриваются в качестве пороговых ограничений задачи. Использование такого метода корректно только при условии, что для критериев, принимаемых в качестве ограничений, заданы допустимые пороговые значения, что означает необходимость предварительного выбора допустимых диапазонов значений, определяемых на основе выделенного бюджета и установленных временных рамок проекта. Такие ограничения предполагают, что лицо, принимающее решение, заранее устанавливает значения порогов для всех второстепенных критериев. Однако слишком строгие

пороговые значения могут привести к пустой области допустимых решений и, соответственно, невозможности найти оптимальное распределение сотрудников, удовлетворяющее всем ограничениям одновременно. Для решения проблемы возникновения пустой области решений на первом этапе производится проверка допустимости заданного набора ограничений с применением быстрого предварительного поиска решений. Если в его результате выявляется отсутствие допустимых решений, значения порогов автоматически ослабляются в контролируемых пределах (увеличиваются на 5–7 %). После этого производится повторная проверка разрешимости задачи. Такой итерационный процесс продолжается до тех пор, пока не будет найден набор порогов, при котором задача становится выполнимой. При этом корректировка порогов производится в рамках существующих резервов, при достижении лимита резервов данный итерационный процесс корректировки пороговых значений останавливается. Таким образом, среди множества возможных распределений сотрудников по задачам проекта необходимо найти такое решение, которое обеспечит минимум целевой функции Z :

$$Z(t) \rightarrow \min_{z \in Z},$$

$$Z = \sum_{j=1}^N \max(0, \sum_{i=1}^M r_{ij} \cdot t_{ij} - t_j^{norm}),$$

где j – номер сотрудника; N – общее количество сотрудников; t_j^{norm} – максимальная загрузка j -го сотрудника; M – общее количество задач; $r_{ij} = \{0, 1\}$ – назначение j -го сотрудника на i -ю задачу ($r_{ij}=1$ – если j -й сотрудник назначен на i -ю задачу; $r_{ij}=0$ – если не назначен); t_{ij} – время выполнения i -й задачи j -м сотрудником.

При этом важно соблюдение следующих ограничений:

$$T \leq T_{max}, \text{ где } T = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M t_{ij},$$

$$\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M (t_{ij} \cdot c_j) \leq S_{max},$$

где T – общее время выполнения проекта; T_{max} – максимальная длительность проекта; c_j – стоимость часа работы j -го сотрудника; S_{max} – максимально допустимый бюджет проекта.

Использование метода выделения главного критерия упрощает поиск решений и снижает вычислительную сложность, позволяя получить оптимальное распределение сотрудников, так целевая функция минимизирует и перегрузку персонала, и общий срок реализации проекта.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ УСЛОВНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Традиционные автоматизированные платформы управления проектами *PMIS* (*Project Management Information Systems*), такие как *Microsoft Project*, *Primavera* и аналогичные, ориентированы на реализацию базовых функций планирования. Они позволяют формировать графики задач, учитывать сложные взаимосвязи и ресурсы, но не обеспечивают автоматизированный поиск оптимального распределения сотрудников с учетом их загрузки и бюджетных ограничений. Изменение условий проекта требует ручного

пересмотра назначений, что увеличивает трудозатраты и снижает оперативность управления ресурсами. В таких условиях поиск эффективного метода распределения сотрудников по задачам проекта является актуальной исследовательской задачей. Методы оптимизации позволяют в автоматизированном режиме формирование распределения персонала [9].

За последние годы исследования в области управления распределением человеческих ресурсов показали тенденцию: по мере роста сложности задач классические методы становятся неприменимы, и актуальность гибридных и стохастических методов возрастает. С точки зрения математической оптимизации выделяют либо точные детерминированные методы, либо стохастические при больших пространствах решений. Наибольшее развитие получили биоинспирированные методы, имитирующие коллективное поведение организмов и способные исследовать пространство решений локально и глобально, что позволяет находить решения, близкие к оптимальным. На основе обзора методов многокритериальной оптимизации распределения сотрудников [10], анализирующего 52 научные работы, выделены основные подходы для решения таких задач. Наиболее распространенными являются эволюционные алгоритмы, включая генетические алгоритмы (*NSGA-II*, *SPEA2*, *MOEA/D*) и их гибридные версии с локальным поиском и другими эвристиками (*Adachi N.*, *Kobayashi S.*, *Moz M.*, *Respicio A.*, *Drechsler N.*, *Hamid M.*, *Huang L.*); математическое программирование, включая MILP/ILP и goal programming, (*Burke E.K.*, *Azaiez M.N.*, *Al Sharif S.S.*, *Ang B.Y.*, *Topaloglu S.*, *Rihm T.*, *Baumann P.*, *Ferland J.A.*). Обзоры последних лет подчеркивают следующие ключевые направления решений, которые сейчас активно изучаются: гибридизация с методами кластеризации для уменьшения пространства поиска, учет неопределенностей путем интеграции с элементами нечеткой логики и пр. [11]. Основные неразрешенные проблемы связаны с тем, что современные методы не полностью покрывают реальные потребности реальных задач распределения персонала. Среди ключевых проблем выделяют: проблему масштабируемости метода при росте объемов обрабатываемой информации, учет неопределенности и необходимости оперативного реагирования на изменения и пр. Для решения задачи распределения человеческих ресурсов предлагается использовать методы глобальной оптимизации, которые делятся на два класса. Первый класс применяется, когда связь между признаками жестко детерминирована, и исследование приводит к однозначному решению. Однако в условиях больших пространств возможных распределений такие методы применимы ограниченно, в таких ситуациях используются стохастические методы. Эта группа включает метаэвристики, методы основаны на алгоритмах, имитирующих природные явления или интеллектуальное поведение живых организмов в природе. Их поведение позволяет поисковым единицам обмениваться информацией о лучших вариантах, эффективно исследовать пространство решений и сходиться к глобально оптимальному распределению.

ГИБРИДНЫЙ АЛГОРИТМ ОПТИМИЗАЦИИ «ЧЕРВЯ» ДЛЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СОТРУДНИКОВ ПО ЗАДАЧАМ ПРОЕКТА

В рамках задачи рассматривается распределение сотрудников по задачам проекта. Для распределения сотрудников по задачам проекта предлагается гибридный метод, объединяющий нечеткий метод кластеризации *Fuzzy C-means (FCM)* и базовый биоинспирированный алгоритм *Worm Optimization (WO)*. На первом этапе выполняется кластеризация сотрудников с использованием *FCM* с целью выделения кластеров, внутри которых

сотрудники обладают близкими характеристиками [12]. В рамках решаемой задачи кластеризация не является самостоятельной целью, а используется как вспомогательный этап, позволяющий уменьшить размер пространства решений. В связи с тем, что метод *FCM* довольно прост в настройке и реализован в стандартных библиотеках (например, Scikit-fuzzy), это делает его удобным для использования и интеграции с другими методами. При небольших выборках данных, характерных для проектных команд, более сложные модификации *FCM* (*AFCM*, *FPCM*, *RFCM* и др.) не обеспечивают существенный прирост качества и требуют более тщательной настройки параметров метода. Поэтому базовый *FCM* является наиболее рациональным вариантом.

Процесс кластеризации сотрудников включает несколько этапов. Изначально случайным образом инициализируются центры кластеров, после чего вычисляются степени принадлежности сотрудников к каждому кластеру на основе расчета евклидова расстояния до центров кластеров. Алгоритм кластеризации *FCM* является нечетким, поэтому каждая точка может принадлежать нескольким или всем кластерам с различной степенью принадлежности. На основе значений степеней принадлежности центры кластеров корректируются, для чего вычисляется взвешенное среднее всех сотрудников, где весами выступают степени принадлежности к определенному кластеру, возведенные в степень m – экспонента нечеткой матрицы разбиения (равна 2; объект может частично принадлежать нескольким кластерам, но более похожие объекты получают больший вес).

Параметры алгоритма *FCM* задаются экспертом на основе предварительного анализа данных. В этой задаче количество кластеров выбрано 3, поскольку при таком значении достигается оптимальный баланс между однородностью групп сотрудников и устойчивостью кластеризации; максимальное количество итераций установлено равным 100, что обеспечивает достаточный запас для стабильной сходимости без избыточных вычислений; минимальное улучшение целевой функции выбрано равным $\varepsilon = 10^{-5}$, что позволяет зафиксировать момент, когда изменение центров кластеров становится практически незначимым и дальнейшие итерации не улучшают качество разбиения. Для каждого сотрудника формируются нечеткие функции на основе его характеристик (навыки, опыт, коммуникативные качества), которые нормируются в диапазоне $[0;1]$ и преобразуются в значения принадлежности с помощью гауссовых функций. Аналогично для каждой задачи формируются нечеткие требования к компетенциям исполнителей. В ситуации, когда на задачу назначено несколько сотрудников, нечеткие значения агрегируются путем усреднения, что позволяет получить интегральную оценку командной пригодности. После завершения кластеризации выбирается кластер, где ключевым свойством участников является способность эффективно взаимодействовать при выполнении совместных задач, что позволяет ограничить поиск решений внутри данной команды и тем самым сузить пространство возможных назначений [13]. На втором этапе применяется *WO*-алгоритм для поиска оптимального распределения сотрудников в пределах выбранного кластера по задачам проекта. Алгоритм имитирует поведение червя рода *Caenorhabditis elegans*, обладающего способностью находить пищу, избегать токсинов, вести поиск группами или индивидуально, перемещаться между локальными и глобальными зонами исследования и переключаться между стадиями активности и размножения [14]. Алгоритм работы предложенного нечеткого метода представлен на рисунке 1.

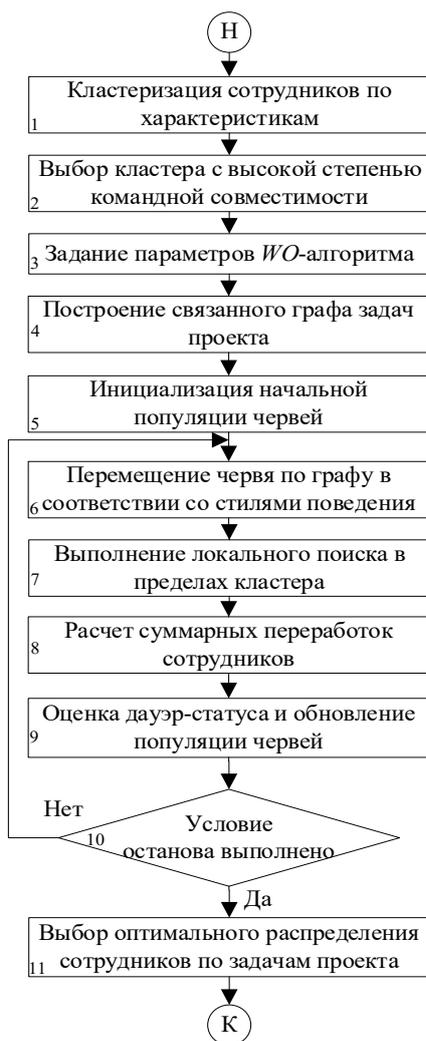


Рис. 1. Алгоритм работы предложенного метода

Fig. 1. The proposed method algorithm

В начале работы алгоритма формируется граф задач проекта, где узлы – задачи, а дуги – возможные пути перемещения червя. Для работы *WO*-алгоритма задаются следующие «свободные» параметры: количество червей, максимальное количество червей при размножении, соотношение между социальным и уединенным поведением червей, процент локального поиска, количество итераций локального поиска, количество решений без улучшений, интенсивность воспроизводства червей, фактор неудачного решения, коэффициент обновления феромонов, максимальное количество итераций выполнения алгоритма. *WO*-алгоритм моделирует аспекты поведения червей *C. elegans*. Так, в алгоритме реализован двойной стиль поиска, предполагающий, что в условиях «высокого качества пищи» (при улучшении текущего результата) червь выполняет локальный поиск вблизи найденной позиции, а при «низком качестве пищи» переключается на глобальный поиск, удаляясь для исследования новых областей (механизм избегания токсинов).

При длительном отсутствии улучшений червь впадает в стазис, его шаги уменьшаются, что снижает ненужные перемещения в бесперспективных зонах, и наоборот, при хороших условиях популяция может расширяться за счет добавления новых червей, усиливая исследование перспективной области. Работа алгоритма зависит от ряда параметров, отражающих биологические особенности червей: от качества пищи зависит ориентация

на локальный и глобальный поиск; концентрация червей определяет интенсивность коллективного поведения (при высокой концентрации усиливается социальный поиск, при низкой – индивидуальный); число итераций без улучшения используется как сигнал о неблагоприятных условиях (при превышении заданного порога активируется стадия стазиса или происходит переключение на глобальный поиск). Такое поведение позволяет алгоритму балансировать между разведкой пространства и эксплуатацией найденных перспективных решений, избегать стагнации и стабильно находить решения в задачах распределения сотрудников по задачам проекта. Работа алгоритма завершается, и выводится оптимальное распределение сотрудников по задачам, когда достигается условие останова (количество итераций достигло заданного значения). Критерием оценки полученного решения является значение неравномерности загрузки сотрудников, а также проверка на соответствие ограничениям задачи.

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ПРЕДЛОЖЕННОГО МЕТОДА

Программная реализация предложенного гибридного метода распределения сотрудников по задачам проекта производилась на языке *Python*. Важным критерием его выбора являлось наличие готовых библиотек, упрощающих процессы работы с метаэвристиками, нечеткой логикой и графами, а также с визуализацией результатов работы алгоритма [15]. Так, в процессе разработки метода были использованы следующие библиотеки [16]:

- библиотека *NetworkX* для создания, изучения и работы с графами;
- библиотека *Scikit-Fuzzy* для работы с нечеткой логикой;
- библиотеки *Matplotlib* и *Plotly* для визуализации работы алгоритма.

Для подтверждения того, что улучшение распределения сотрудников по задачам проекта не является случайным, а обусловлено особенностями предложенного алгоритма, проведена оценка его статистической значимости (табл. 1), которая проводилась на 30 независимых запусках, и значения целевой функции сравнивались со значениями целевой функции, полученной в результате полного перебора. Оценка проводилась на малой тестовой выборке, где возможен полный перебор (5 сотрудников и 5 задач; полный перебор позволил оценить все возможные распределения – 2^{25}).

Таблица 1. Оценка статистической значимости метода

Table 1. Evaluation of the method statistical significance

Метод	Среднее значение целевой функции, час.	Стандартное отклонение, %	Время работы, час.
<i>Fuzzy Worm Optimization</i>	0,75	0,01	0,53
Полный перебор	0,74	0	5

Среднее значение целевой функции для предложенного метода составило 0,75 часа, а эталонное – 0,74 часа, это подтверждает, что разработанный метод формирует распределение сотрудников по задачам, максимально приближенное к эталонному. Проверка адекватности метода проводилась путем сравнения результатов его работы с результатами работы базового *WO*-алгоритма и популярного *ACO*-алгоритма, схожего моделями поведения поисковых агентов [17]. Результаты валидации представлены в таблице 2. Тестирование работы алгоритмов проводилось на выборке данных из 35 сотрудников и проекте, который включает 15 задач с различными требованиями и ограничениями. После кластеризации выбран кластер, в котором оказалось 12 сотрудников, которые участвовали в распределении. Как видно из таблицы 2, предложенный метод уступает другим в скорости выполнения, однако обеспечивает наименьшее значение целевой функции.

Таблица 2. Результаты валидации разработанного гибридного метода**Table 2.** Results of validation of the developed hybrid method

Показатель	<i>Fuzzy Worm Optimization</i>	<i>Worm Optimization</i>	<i>Ant Colony Optimization</i>
Общее время работы, мин.	32,2	27	28,6
Значение целевой функции, час	0,75	0,79	0,83
Количество итераций до сходимости алгоритма, ед.	73	77	76

Для проверки эффективности разработанного метода проведено тестирование на наборе функций из международного бенчмарка *CEC-2017*, который содержит 29 функций. В рамках тестирования использовался набор функций из четырех классов: унимодальные (*F1*), мультимодальные (*F9*), гибридные (*F17*) и композиционные (*F23*). Полученные результаты сопоставлены с результатами базовых *WO*- и *ACO*-алгоритмов. Количество запусков составило 30, количество итераций 1000, средние значения лучшего решения за 30 запусков представлены в таблице 3.

Таблица 3. Результаты тестирования на бенчмарке *CEC-2017***Table 3.** *CEC-2017* benchmark test results

Функция/алгоритм	<i>Fuzzy Worm Optimization</i>	<i>Worm Optimization</i>	<i>Ant Colony Optimization</i>
<i>F1 Sphere (Unimodal)</i>	$1,2 \times 10^{-6}$	$4,9 \times 10^{-6}$	$7,3 \times 10^{-6}$
<i>F9 Rastrigin (Multimodal)</i>	0,42	1,87	3,12
<i>F17 Hybrid 3 (Hybrid)</i>	8,3	14,6	20,4
<i>F23 Composition 4 (Composition)</i>	32,7	49,1	61,5

Нечеткий *WO*-алгоритм показывает лучшие результаты по сравнению с базовой версией алгоритма на всех типах функций, что связано со способностью *FCM* уменьшать риск преждевременной сходимости за счет формирования более устойчивых к шуму пространств решений. *ACO*-алгоритм показал высокую вариативность и меньшую устойчивость к сложным композиционным поверхностям. Для оценки чувствительности метода к управляющим параметрам проводился эксперимент (табл. 4), в котором рассчитывалось среднее значение целевой функции и время работы алгоритма при варьировании параметров «локальный/глобальный поиск», «максимальное количество итераций без улучшений».

Таблица 4. Оценка чувствительности метода к управляющим параметрам**Table 4.** Evaluation of the sensitivity of the method to control parameters

Локальный/ глобальный поиск, %	Макс. кол-во итераций без улучшений, ед.	Среднее значение целевой функции, час.	Стандартное отклонение, %	Среднее время работы, мин.
70/30	10	0,79	0,020	29,0
70/30	20	0,77	0,018	30,5
70/30	30	0,76	0,015	31,2
70/30	40	0,75	0,014	32,0
50/50	10	0,78	0,018	30,5
50/50	20	0,76	0,015	31,2
50/50	30	0,75	0,014	32,0
50/50	40	0,74	0,013	33,1
30/70	10	0,79	0,020	30,0
30/70	20	0,77	0,018	31,0
30/70	30	0,76	0,016	31,8
30/70	40	0,75	0,015	32,5

Видно, что увеличение процента локального поиска повышает скорость сходимости алгоритма и показывает более низкие значения целевой функции, однако слишком высокий локальный поиск увеличивает риск преждевременной сходимости, особенно при малом числе итераций без улучшений. Высокий процент глобального поиска снижает риск застревания в локальных минимумах, но средние значения целевой функции слегка ухудшаются. Увеличение порога с 10 до 40 итераций позволяет червям дольше искать улучшения и переключаться на глобальный поиск, что снижает значение целевой функции и уменьшает стандартное отклонение. Высокий локальный поиск и достаточное число итераций без улучшений позволяют находить оптимальные решения при разумных затратах времени. Нечеткий *WO* практически достигает оптимального решения и при этом требует меньше времени, что делает его эффективным для распределения сотрудников по проектным задачам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предполагается, что разработанный гибридный метод оптимизации, интегрирующий преимущества метаэвристики, инспирированной поведением червей *C. elegans*, с нечетким методом кластеризации *FCM*, позволит формировать в автоматизированном режиме распределение сотрудников по задачам проекта. Практическая ценность метода подтверждается результатами его валидации, алгоритм обеспечивает распределение, близкое к эталонному. Применение метода в реальных процессах позволит повысить эффективность управления проектами, снижая субъективный фактор и затраты времени на ручное планирование.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рубин Ю. Б. Менеджмент участия в конкуренции как направление научных исследований // Современная конкуренция. 2024. Т. 18. № 1(97). С. 69–91. DOI: 10.37791/2687-0657-2024-18-1-69-91
2. Дли М. И., Стоянова О. В., Белозерский А. Ю. Модель оценки траекторий для управления проектами в сфере наукоемкой промышленной продукции // Прикладная информатика. 2015. Т. 10. № 6(60). С. 105–117.
3. Комарова Л. А., Черемухин А. Д. Повышение эффективности методов подбора персонала на основе глубоких нейронных сетей // Прикладная информатика. 2024. Т. 19. № 2(110). С. 10–22. DOI: 10.37791/2687-0649-2024-19-2-10-22
4. Булыгина О. В., Ярцев Д. Д., Кулясов Н. С. и др. Нечеткий биоинспирированный метод формирования набора кандидатов на линейные должности // Прикладная информатика. 2025. Т. 20. № 2(116). С. 4–23. DOI 10.37791/2687-0649-2025-20-2-4-23
5. Калинин А. Р., Зуева Н. А. Создание и применение графовых моделей к задачам найма сотрудников // Прикладная информатика. 2025. Т. 20. № 3(117). С. 43–65. DOI: 10.37791/2687-0649-2025-20-3-43-65
6. Глазкова А. С., Тутов С. В., Рожков В. В. Формирование конкурентоспособного кадрового потенциала химических предприятий с использованием многоэтапного механизма целевого обучения в вузах // Современная конкуренция. 2025. Т. 19. № 1(103). С. 38–51. DOI: 10.37791/2687-0657-2025-19-1-38-51
7. Етихин А. И. Оптимизация параметров рабочего процесса судовых двигателей на основе метода многокритериальной оптимизации // Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 4-1. С. 53–57. DOI: 10.37220/MIT.2023.62A.006

8. *Jayan C.Ya., Malykhnia G.F.* Multi-criterion optimization of control process based on DPCA and ANN // *Systems analysis in design and management*. 2024. С. 7–14. DOI: 10.18720/SPBPU/2/id24-492
9. *Еремينا И. И.* Математическая модель решения оптимизационной задачи распределения производственных и трудовых ресурсов предприятия // X Международная научно-практическая конференция «ЭТАП-2023»: материалы конференции. Набережные Челны: КФУ, 2024. С. 608–621.
10. *Böðvarsdóttir E.B., Stidsen T.* A review of multi-objective optimization methods for personnel rostering problems // *Journal of Scheduling*. 2025. DOI: 10.1007/s10951-025-00845-0
11. *Rodríguez-Ballesteros S., Alcaraz J., Anton-Sanchez L.* Metaheuristics for the bi-objective resource-constrained project scheduling problem with time-dependent resource costs: An experimental comparison // *Computers & Operations Research*. 2024. С. 163. DOI: 10.1016/j.cor.2023.106489
12. *Yang J., Qiu A., Yang Zh.* Fuzzy clustering method with approximate orthogonal regularization // *Applied Soft Computing*. 2023. Vol. 147. Pp. 110829. DOI: 10.1016/j.asoc.2023.110829
13. *Nesamalar K. E., Satheeshkumar J., Amudha T.* Efficient DNA-ligand interaction framework using fuzzy C-means clustering based glowworm swarm optimization (FCMGSO) method // *Journal of Biomolecular Structure and Dynamics*. 2023. Vol. 41. № 13. Pp. 6249–6261. DOI: 10.1080/07391102.2022.2105958
14. *Arnaout J-P.* A worm optimization algorithm to minimize the makespan on unrelated parallel machines with sequence-dependent setup times // *Annals of Operations Research*. 2020. vol. 285. Pp. 273–293. DOI 10.1007/s10479-019-03138-w
15. *Дли М. И., Пучков А. Ю., Максимкин М. В.* Программная модель интеллектуальной системы управления сложными процессами переработки мелкорудного сырья // *Прикладная информатика*. 2024. Т. 19. № 6(114). С. 96–112. DOI: 10.37791/2687-0649-2024-19-6-96-112
16. *Галимуллин Н. Р.* Python: использование Python для автоматизации повседневных задач // *Экономика и управление: проблемы, решения*. 2024. Т. 9. № 9(150). С. 69–76. DOI: 10.36871/ek.up.p.r.2024.09.09.010
17. *Dorigo M., Birattari M., Stützle T.* Ant Colony Optimization // *Computational Intelligence Magazine*. 2006. Vol. 1. Pp. 28–39.

REFERENCES

1. Rubin Yu.B. Management of participation in competition as a field of scientific research. *Journal of Modern Competition*. 2024. Vol. 18. No. 1(97). Pp. 69–91. DOI: 10.37791/2687-0657-2024-18-1-69-91. (In Russian)
2. Dli M.I., Stoyanova O.V., Belozersky A.Yu. A trajectory assessment model for project management in the field of high-tech industrial products. *Journal of Applied Informatics*. 2015. Vol. 10. No. 6(60). Pp. 105–117. (In Russian)
3. Komarova L.A., Cheremuhin A.D. Increasing the efficiency of recruitment based on deep neural networks. *Journal of Applied Informatics*. 2024. Vol. 19. No. 2(110). Pp. 10–22. DOI: 10.37791/2687-0649-2024-19-2-10-22. (In Russian)
4. Bulygina O.V., Yartsev D.D., Kulyasov N.S. et al. Fuzzy bioinspired method for forming a set of candidates for linear positions. *Journal of Applied Informatics*. 2025. Vol. 20. No. 2(116). Pp. 4–23. DOI: 10.37791/2687-0649-2025-20-2-4-23. (In Russian)
5. Kalinin A.R., Zueva N.A. Creation and application of graph models for employee recruitment tasks. *Journal of Applied Informatics*. 2025. Vol. 20. No. 3. Pp. 43–65. DOI: 10.37791/2687-0649-2025-20-3-43-65. (In Russian)

6. Glazkova A.S., Tutov S.V., Rozhkov V.V. Formation of personnel potential of chemical enterprises using multi-stage mechanism of target set of applicants of universities. *Journal of Modern Competition*. 2025. Vol. 19. No. 1. Pp. 38–51. DOI: 10.37791/2687-0657-2025-19-1-38-51. (In Russian)
7. Epikhin A.I. Optimization of working process parameters of marine engines based on the method of multicriteria optimization. *Marine Intelligent Technologies*. 2023. No. 4-1. Pp. 53–57. DOI: 10.37220/MIT.2023.62A.006. (In Russian)
8. Jayan C.Ya., Malykhnia G.F. Multi-criterion optimization of control process based on DPCA and ANN. *Systems analysis in design and management*. 2024. Pp. 7–14. DOI: 10.18720/SPBPU/2/id24-492
9. Eremina I.I. Mathematical model for solving the optimization problem of distribution of production and labor resources of an enterprise. *X Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya «ETAP-2023»*. Naberezhnye Chelny, KFU. 2024. Pp. 608–621. (In Russian)
10. Böðvarsdóttir E.B., Stidsen T. A review of multi-objective optimization methods for personnel rostering problems. *Journal of Scheduling*. 2025. DOI: 10.1007/s10951-025-00845-0
11. Rodríguez-Ballesteros S., Alcaraz J., Anton-Sanchez L. Metaheuristics for the bi-objective resource-constrained project scheduling problem with time-dependent resource costs: An experimental comparison. *Computers & Operations Research*. 2024. Pp. 163. DOI: 10.1016/j.cor.2023.106489
12. Yang J., Qiu A., Yang Zh. Fuzzy clustering method with approximate orthogonal regularization. *Applied Soft Computing*. 2023. Vol. 147. Pp. 110829. DOI: 10.1016/j.asoc.2023.110829
13. Nesamalar K.E., Satheeshkumar J., Amudha T. Efficient DNA-ligand interaction framework using fuzzy C-means clustering based glowworm swarm optimization (FCMGSO) method. *Journal of Biomolecular Structure and Dynamics*. 2023. Vol. 41. No. 13. Pp. 6249–6261. DOI: 10.1080/07391102.2022.2105958
14. Arnaout J-P. A worm optimization algorithm to minimize the makespan on unrelated parallel machines with sequence-dependent setup times. *Annals of Operations Research*. 2020. Vol. 285. Pp. 273–293. DOI: 10.1007/s10479-019-03138-w
15. Dli M.I., Puchkov A.Yu., Maksimkin M.V. A software model of an intelligent control system for complex processing of small ore raw materials. *Journal of Applied Informatics*. 2024. Vol. 19. No. 6(114). Pp. 96–112. DOI: 10.37791/2687-0649-2024-19-6-96-112. (In Russian)
16. Galimullin N.R. Python: using Python to automate everyday tasks. *Ekonomika i upravlenie problemy resheniya* [Economics and Management: Problems and Solutions]. 2024. Vol. 9. No. 9(150). Pp. 69–76. DOI: 10.36871/ek.up.p.r.2024.09.09.010. (In Russian)
17. Dorigo M., Birattari M., Stützle T. Ant colony optimization. *Computational Intelligence Magazine*. 2006. Vol. 1. Pp. 28–39. DOI: 10.1109/MCI.2006.329691

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflict of interest.

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторах

Ярцев Денис Дмитриевич, аспирант, Росинформагротех;
141261, Россия, Московская область, Пушкинский г.о., р.п. Правдинский, Лесная улица, 60;
Yarcevdd@me.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-0760-4783>

Воротилова Маргарита Юрьевна, аспирант, филиал Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Смоленске;

214013, Россия, г. Смоленск, Энергетический проезд, 1;
rita.vorotilova@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4646-3540>, SPIN-код: 6572-7685

Мордвин Сергей Валерьевич, ассистент кафедры, филиал Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Смоленске;

214013, Россия, г. Смоленск, Энергетический проезд, 1;
mors@leska.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-8121-0716>

Information about the authors

Denis D. Yertsev, Postgraduate Student, Rosinformagrotech;
60, Lesnaya street, Pushkinsky Urban District, Pravdinsky Urban Settlement, Moscow Region, 141261, Russia
Yarcevdd@me.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-0760-4783>

Margarita Yu. Vorotilova, Postgraduate Student, Branch of the National Research University “Moscow Power Engineering Institute” in Smolensk;

1, Energeticheskyy proezd, Smolensk, 214013, Russia;
rita.vorotilova@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4646-3540>, SPIN-code: 6572-7685

Sergey V. Mordvin, Assistant Professor, Branch of the National Research University “Moscow Power Engineering Institute” in Smolensk;

1, Energeticheskyy proezd, Smolensk, 214013, Russia;
mors@leska.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-8121-0716>