

## Применение модифицированного метода муравьиных колоний для поиска рационального назначения сотрудников на задачи с применением нечетких множеств\*

**Цель исследования.** Целью исследования является выработка рекомендаций по выбору параметров модификации метода муравьиных колоний при поиске рационального решения задачи назначения работников на работы при условии задания времени выполнения работы с применением нечетких множеств и учета времени взаимодействия между работниками, назначенными на одну задачу. Предложен алгоритм работы модификации метода муравьиных колоний. Рассмотрены различные алгоритмы остановки модифицированного метода муравьиных колоний.

**Материалы и методы исследования.** Применение, разработанного для поиска пути коммивояжера, метода муравьиных колоний для задачи назначения требует создания «графа решений» и некоторых модификаций алгоритма, связанных с занесением весов (феромона) на граф. В работе предлагается создать граф решений путем создания набора вершин, определяющих назначение работника на задачи, для каждого работника и вычисления пути в графе, определяющего решение задачи о назначении. Для остановки алгоритма метода муравьиных колоний рассматриваются два различных алгоритма: остановка при выполнении некоторого количества итераций и остановка при нахождении решения, удовлетворяющего ограничениям. Для оценки эффективности алгоритма рассматривались следующие критерии: оценка математического ожидания числа итераций алгоритма, оценка математического ожидания значения критерия, оценка математического ожидания числа рассмотренных решений и т.д. Для всех оценок математического ожидания вычисляется также доверительный интервал. По полученным

оценкам в работе даются рекомендации по подбору параметров метода муравьиных колоний: количеству агентов, коэффициента испарения, параметров элитного и ранжированного метода муравьиных колоний и т.д. Оценивается и скорость и возможность поиска рациональных решений при различных значениях ограничений.

**Результаты.** В работе рассматривалась задача о назначении 35 работников по 15 задачам. В результате были выявлены следующие рекомендации по выбору параметров модифицированному методу муравьиных колоний. Чем больше агентов, тем лучше найденное решение, но количество рассмотренных решений увеличивается, что приводит к увеличению времени поиска. Для коэффициента испарения рекомендуется выбирать значение в пределах (0,8; 0,95). Использовать рекомендуется ранжированный алгоритм с параметром в 4 раза меньше количества агентов в группе. Определена проблема «заикливания» метода муравьиных колоний, вызванная прохождением агентов по одним и тем же маршрутам.

**Заключение.** Выработанные рекомендации позволяют применять метод муравьиных колоний для решения задачи назначения работников на задачи. Предложенные рекомендации по параметрам обеспечивают высокую скорость и точность нахождения рационального решения задачи. Описана проблема «заикливания» метода муравьиных колоний.

**Ключевые слова:** нечеткие множества, метод муравьиных колоний, управление персоналом, задача о назначении, оценка математического интервала.

Vladimir A. Sudakov<sup>1</sup>, Yuri Pavlovich Titov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russia  
<sup>2</sup> The Institute of Informatics Problems of the Russian Academy of Sciences (IPI RAN), Moscow, Russia

## Application of the Modified Method of ant Colonies to Search for Rational Assignment of Employees to Tasks Using Fuzzy Sets

**Purpose of the research.** The aim of the study is to develop recommendations on the selection of parameters for modifying the ant colony method when searching for a rational solution to the task of appointing employees to work, subject to setting the time to complete the work using fuzzy sets and taking into account the interaction time between employees assigned to one task. The algorithm is proposed for modifying the ant colony method. Various stopping algorithms of the modified ant colony method are considered.

**Materials and research methods.** The use of the ant colony method developed for finding the traveling salesman's path for the

assignment problem requires the creation of a "decision graph" and some modifications of the algorithm associated with entering weights (pheromone) on the graph. The paper proposes to create a graph of solutions by creating a set of vertices that determine the appointment of an employee for tasks for each employee and calculating the path in the graph that determines the solution to the assignment problem. To stop the algorithm of the ant colony method, two different algorithms are considered: the stop when performing a certain number of iterations and the stop when finding a solution that satisfies the constraints. To evaluate the effectiveness of the algorithm, the following criteria

\*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта 18-00-00012 (18-00-00011) КОМФИ.

were considered: the estimate of the mathematical expectation of the number of iterations of the algorithm, the estimate of the mathematical expectation of the criterion value, the estimate of the mathematical expectation of the number of considered solutions, etc. For all estimates of mathematical expectation, a confidence interval is also calculated. According to the estimates, the paper gives recommendations on the selection of parameters of the ant colony method: the number of agents, evaporation rate, parameters of the elite and ranked method of ant colonies, etc. Both the speed and the ability to find rational solutions for different values of constraints are evaluated.

**Results.** The work considered the task of appointing 35 employees for 15 tasks. As a result, the following recommendations were identified on the choice of parameters to the modified method of ant colonies. The more agents, the better solution found, but the number of the

considered solutions increases, which leads to an increase in search time. For the evaporation coefficient, it is recommended to choose a value in the range (0.8; 0.95). It is recommended to use a ranked algorithm with a parameter 4 times less than the number of agents in the group. The problem of “cycling” of the ant colony method, caused by the passage of agents along the same routes, is determined.

**Conclusion.** The developed recommendations make it possible to use the ant colony method to solve the problem of assigning employees to tasks. The proposed recommendations on the parameters provide high speed and accuracy of finding a rational solution to the problem. The problem of “cycling” of the ant colony method is described.

**Keywords:** fuzzy sets, ant colony method, personnel management, assignment problem, estimation of the mathematical interval.

## Введение

Определение времени выполнения задачи является одной из главных проблем при планировании работы. В настоящее время применяются подходы, связанные с экспертными оценками времени выполнения задачи. При этом эксперт обычно является руководителем, который на основе своего опыта выполнения подобных проектов производит разбиение его на задачи и оценочное определение времени их выполнения в виде определенного значения. Кроме того руководитель работы задает последовательность выполнения задач с точки зрения логики их возможного выполнения [1,2].

Информация об оценке времени выполнения задач и их взаимосвязи используются в методе СРМ (Critical Path Method), который позволяет выделить задачи так называемого «Критического пути», т.е. задачи, изменение времени выполнения, которых приведет к изменению времени вы-

полнения всего проекта [3]. Но у данного алгоритма отсутствует наглядность и возможность управления ресурсами. Для устранения недостатков СРМ и привлечения руководителя непосредственно к календарному распределению задач применяются диаграммы Ганта, которые в первую очередь направлены на визуализацию процесса выполнения работы и занятости отдельных ресурсов. При этом в диаграммах Ганта помимо автоматической расстановки задач методом СРМ (по позициям раннего старта и финиша) существует возможность ручного изменения времени старта задачи [4–6]. Но стоит отметить, что от количества выделенных ресурсов, например работников, может изменяться и длительность работы, что никак не учитывается ни в методе СРМ, ни в диаграммах Ганта.

Задача о назначении сотрудников на работы может быть решена многими способами: Методом неявного перебора по векторной решетке, методом динамического про-

граммирования, методом последовательного спуска и т.д. Но каждый из предлагаемых методов накладывает ограничения и работает только с конкретным классом целевых функций. В случае применения в качестве описания времени выполнения задачи работником не определенного числа, а нечеткого множества и учета влияния необходимости взаимодействия сотрудников, назначенных на одну задачу, применение подобных методов невозможно [7].

Для решения подобных задач применяются различные эвристические или мета-эвристические алгоритмы [9, 10]. В данной работе рассматривается возможность применения модификации мета-эвристического алгоритма муравьиных колоний. В отличие от оригинального метода муравьиных колоний (ant colony optimization), предложенного итальянским исследователем Марко Дориго (Marco Dorigo) в 1992 [11], предлагаемый алгоритм ищет путь в дереве решений, а не гамильтонов путь

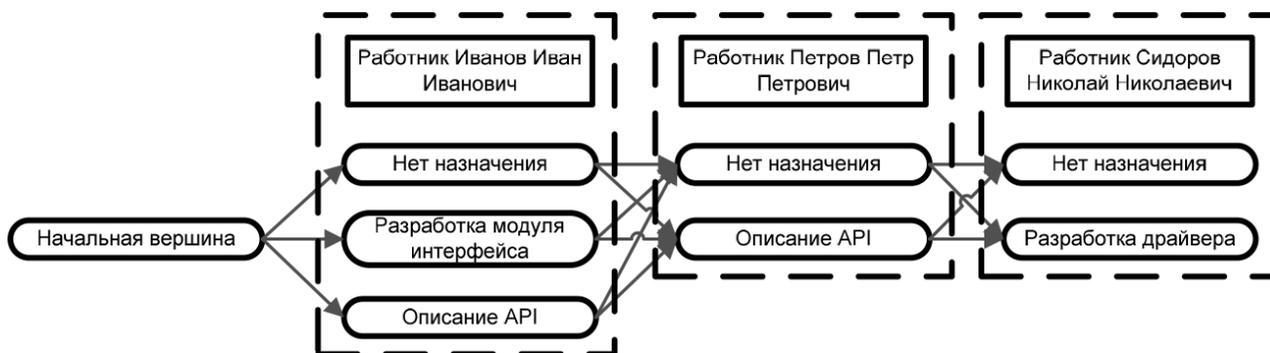


Рис. 1. Граф решений для назначения работников на задачи

в графе. Для работы алгоритма создается граф решений (рис. 1) в котором каждому работнику соответствует множество вершин [12–14]. Каждая вершина из множества определяет задачу, которую может выполнять сотрудник. Следует учесть также вершину, при которой сотрудник не назначается ни на одну из задач, так как в результате учета времени взаимодействия между сотрудниками общее время выполнения задач может возрасти [8].

### Модификация метода муравьиных колоний

Для поиска пути в данном графе необходимо модифицировать метод муравьиных колоний [15]. Кроме занесения весов (феромонов) на вершины графа, а не на дуги, модификации также подверглась целевая функция. Занесение весов на вершины графа позволяет акцентировать внимание на назначении работников на задачи. Чем больше веса, тем вероятнее включение данного назначения в конечное решение. Особым образом выставляются и дуги графа, осуществляющие все возможные переходы между вершинами соседних слоев (отдельных работников).

Для поиска наилучшего варианта назначения всех работников на задачи требуется определить значение критерия, определяющего насколько данное назначение лучше или хуже других. В качестве тако-

го критерия можно воспользоваться одним из множества методов дефаззификации нечеткой функции «выполнение задачи». Для простоты можно выбрать метод левого или правого модального значения или более сложный и распространенный метод центра тяжести нечеткой функции. Для выполнения подобных вычислений необходимо подключать аппарат, обеспечивающий работу с нечеткими функциями и вычисляющий значение критерия по итогам назначения работников на задачи.

Для вычисления критерия по определенному назначению необходимо последовательно совершить следующие операции:

1. Для каждого работника вычислить нечеткую функцию «производительность работника при выполнении задачи» для назначенной задачи.

2. Для каждой задачи вычислить обобщенную нечеткую функцию «выполнение задачи».

3. Для каждой задачи необходимо учесть задержки, связанные с взаимодействием работников. В рамках данной задачи возможно применение множества методов, при этом выбор конкретного метода зависит от задачи и планируемых методов взаимодействия работников. Кроме того в методах учета взаимодействия работников применяются различные коэффициенты, для вычисления которых чаще всего применяются экспертные методы.

4. Для каждой задачи провести процедуру дефаззификации и вычислить время выполнения каждой задачи по отдельности. Дефаззификация, в первую очередь, влияет на критерий для решения задачи назначения, так как часто лицу, принимающему решение, требуется и нечеткая функция «выполнение задачи».

5. Вычислить общий критерий для оценки полученного решения. В качестве критерия можно использовать математическое ожидание времен выполнения задач, максимальное время выполнения задач или критерий, полученный в результате календарного планирования. Данный критерий в первую очередь используется в методе муравьиных колоний, но может использоваться и для представления лицу, принимающему решение.

Метод муравьиных колоний в данном случае позволяет обеспечить направленный перебор различных вариантов назначения сотрудников на работы. При этом необходимо учитывать направление перебора, с целью максимизации или минимизации критерия. В случае использования в качестве критерия время выполнения задачи, то однозначно это минимизируемый критерий. Различные параметры модификации метода муравьиных колоний влияют на скорость нахождения решения и на его точность [18]. К таким параметрам относятся: количество агентов до изменения со-

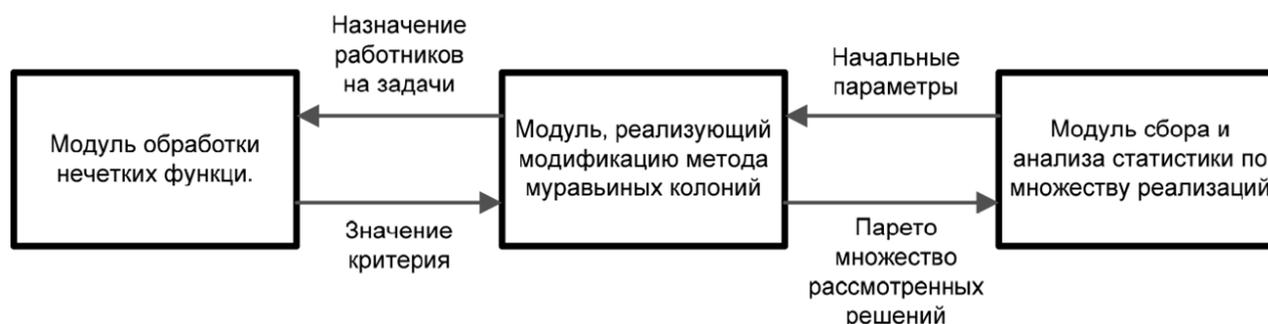


Рис 2. Схема взаимодействия модулей программы для анализа влияния параметров метода муравьиных колоний на скорость нахождения решения

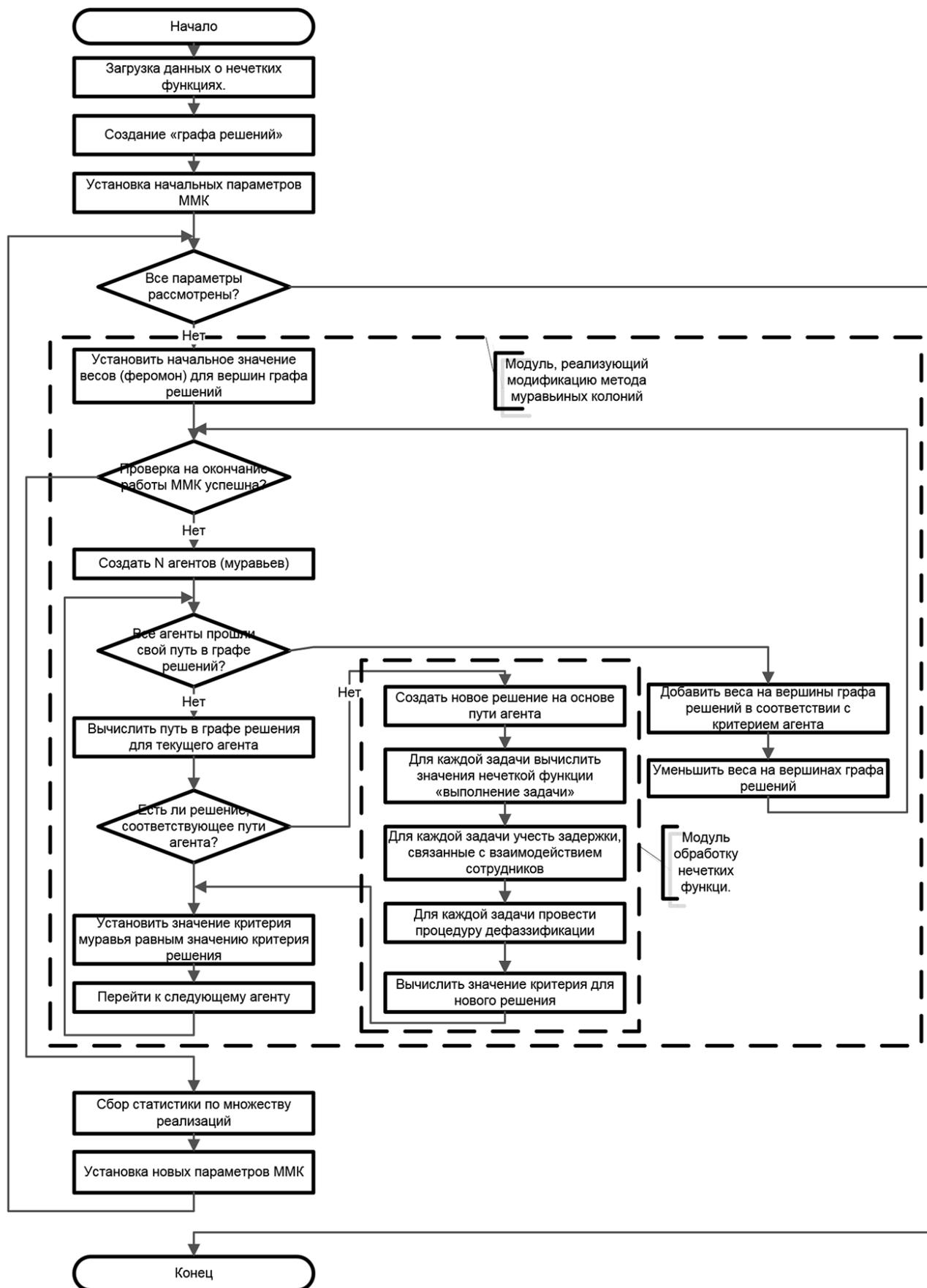


Рис. 3. Алгоритм работы модифицированного метода муравьиных колоний

стояния графа, коэффициент «испарения» весов, параметр заносимого феромона. Для анализа этого влияния необходимо разработать модуль сбора и анализа статистики по множеству реализаций, позволяющий итерационно запускать метод муравьиных колоний с различными параметрами. Общая схема взаимодействия блоков изображена на рис. 2.

Для сбора и анализа статистики необходимо определиться с моментом остановки работы модуля, реализующего модификации метода муравьиных колоний. Оригинальный итерационный алгоритм муравьиных колоний не предполагает конкретного момента остановки алгоритма. Из-за применения процедуры испарения весов (феромона) и вероятностного выбора пути агентов (муравьев) решение постоянно может изменяться. Фактически можно предложить 2 критерия остановки модификации метода муравьиных колоний: По достижению определенного числа итераций; По нахождению хотя бы одного решения удовлетворяющего ограничениям. В зависимости от выбранного типа остановки будут изменяться и критерии оценки эффективности работы метода муравьиных колоний. Для остановки по достижению определенного числа итераций основным критерием можно назвать оценку математического ожидания найденного решения, а для остановки по ограничениям – оценку математического ожидания количества итераций. Кроме того, оценить эффективность можно и по оценке математического ожидания количества рассмотренных решений, т.е. если агенты прошли по одному пути, то решение будет вычислено только один раз и будет храниться в массиве всех рассмотренных решений. Этот параметр требуется для случаев, когда работа модуля обработки нечетких функций

сильно дольше работы метода муравьиных колоний. В результате можно предложить следующий алгоритм работы программы. (рис. 3)

Для проведения тестов рассматривалась задача назначения 35 работников по 15 задачам. Каждый работник мог выполнять различное количество задач, но назначить его необходимо только на одну задачу. Всего в рамках теста рассматривалось более 180 функций принадлежности «выполнение задачи конкретным работником». Взаимодействие работников, назначенных на одну задачу, учитывалось по принципу наставничества, когда учитывалось взаимодействие всех работников, только с самым опытным работником. Для дефаззификации применялся метод левого модального значения, а обобщенный критерий вычислялся как сумма времен выполнения всех задач. В случае, если на задачу не назначено работников, то время ее выполнения приравнивается к условной бесконечности [16,17]. Наилучшее значение критерия (Krit) для данной задачи чуть меньше 352. На графиках приводится оценка математического ожидания и доверительный интервал этой оценки для доверительной вероятности 0,99. Оценка вычисляется по 500 реализациям метода муравьиных колоний.

#### **Варьирование параметров. Выработка рекомендаций**

Самым важным параметром метода муравьиных колоний является количество агентов, перемещающихся по графу в рамках одной группы, т.е. только после перемещения всех агентов из группы происходит изменение весов в графе решений: добавление и последующее уменьшения (испарение) весов. Рассмотрим, как влияет количество агентов на критерии при остановке на 500

итерации метода муравьиных колоний. (рис 4).

Серой линией отмечается наилучшее найденное решение из 500 итераций. На графиках отчетливо видна обратно-экспоненциальная зависимость оценки математического ожидания найденного критерия от количества агентов в группе. А вот зависимость количества рассмотренных решений – линейное. Из этого можно сделать вывод, что прирост в точности найденного решения при больших (больше 100) количествах агентов в группе сильно меньше времени, потраченного на поиск этого решения. Рекомендуется выбирать число агентов в интервале (Кол слоев; Кол слоев\*2), где Кол слоев определяет количество групп вершин в графе решений. Так как слои для нашей задачи определяют назначение работника, то эта величина зависит от числа работников и варьируется в интервале (35; 70). Но в случае, когда точность решения более критична времени его поиска, следует увеличивать данный показатель, так как он наиболее сильно влияет на точность найденного решения.

Кроме количества агентов другим важным параметром метода муравьиных колоний является коэффициент испарения, принимающий значения из интервала (0; 1). На его значение умножается вес в каждой вершине после итерации. Он позволяет немного сгладить распределение весов для возможности выбора агентами других маршрутов. Данный параметр принимает значения от 0, при котором каждую итерацию веса обновляются, до 1, при котором веса не изменяются в процессе испарения. (рис 5)

Из графиков видно, что низкое значение коэффициента испарения постоянно обновляет граф и, в результате, оценка математического ожидания найденного реше-

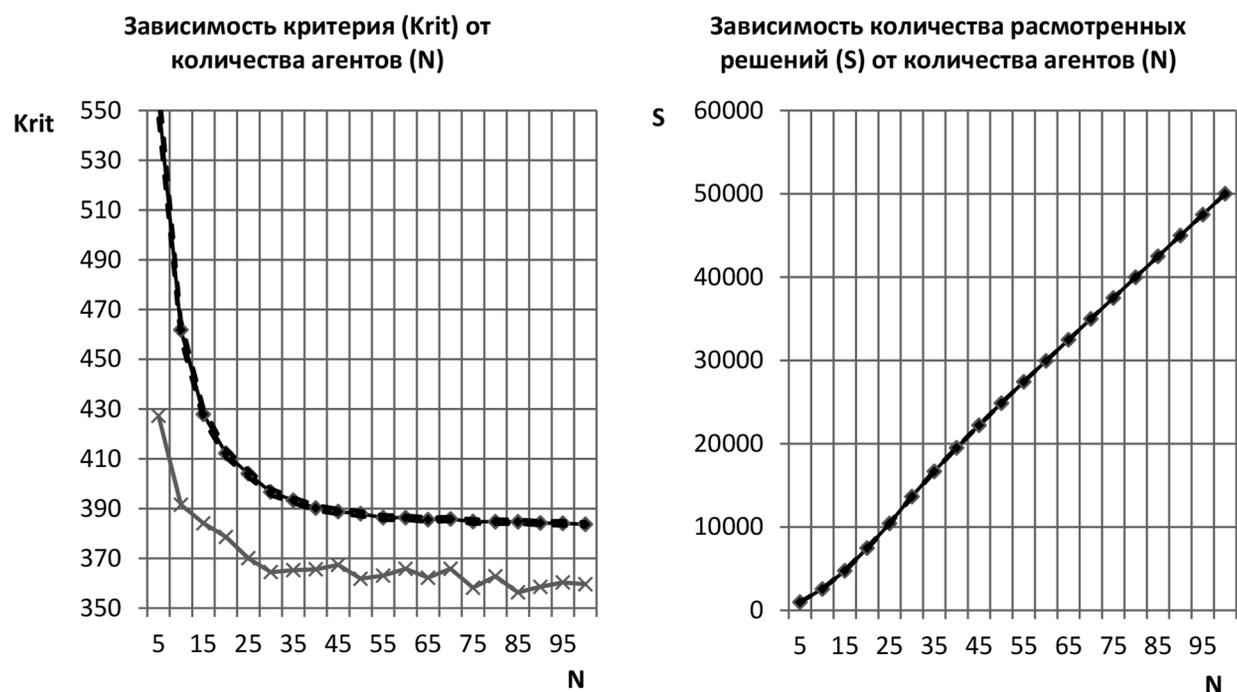


Рис 4. Результаты работы модифицированного метода муравьиных колоний при варьировании параметра количества агентов в группе

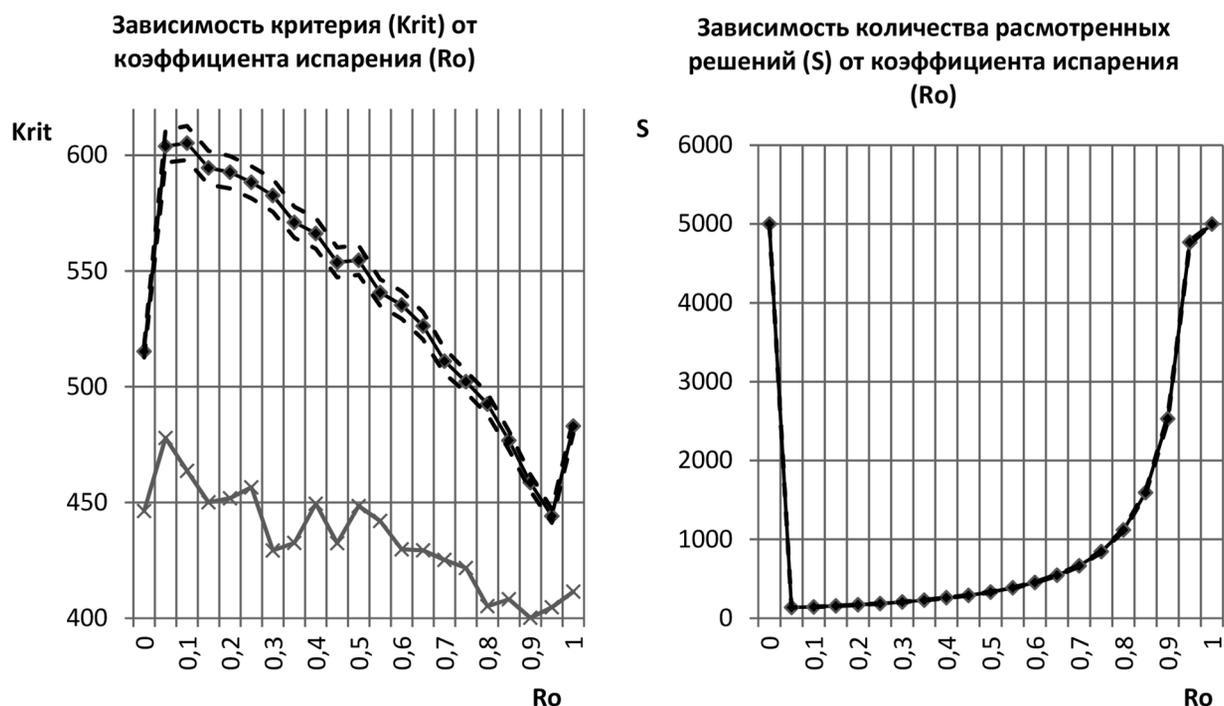


Рис 5. Результаты работы модифицированного метода муравьиных колоний при варьировании параметра испарения.

ния самая худшая (более 600). При увеличении коэффициент видно, как улучшается оценка математического ожидания найденного решения и принимает наилучшее значение при значении коэффициента испарения

близкому к 1. Но при этом и увеличивается количество рассмотренных решений, так как происходит постепенное улучшение решения. Есть две крайние точки при значении коэффициента испарения

равного 0 и 1, но их выбирать не рекомендуется. Рекомендуется выбирать значение коэффициента испарения в диапазоне (0,8; 0,95) в зависимости от скорости вычисления критерия для новых решений. В

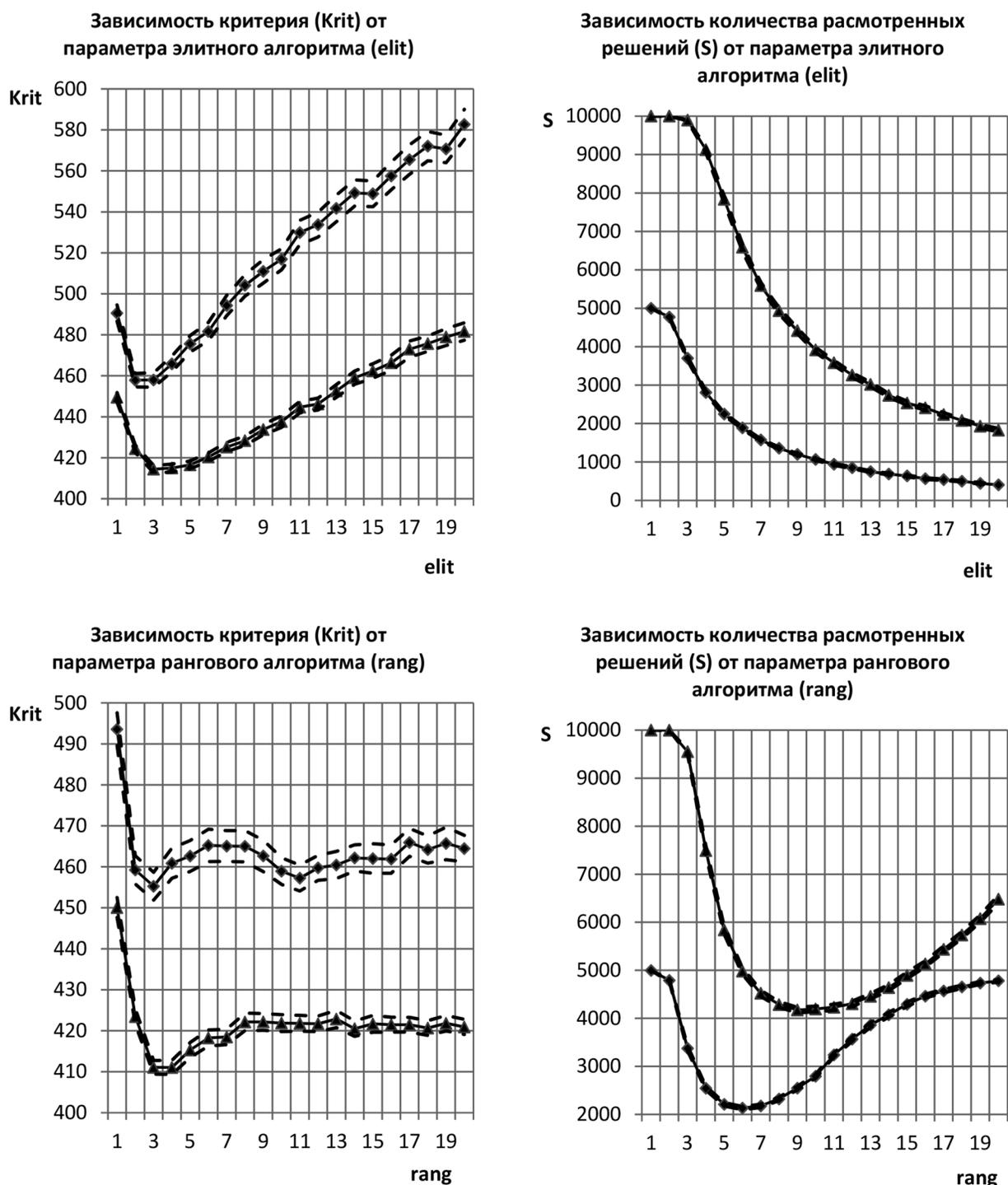


Рис. 6. Результаты работы модифицированного метода муравьиных колоний при варьировании параметра элитной или ранжированной модификации

случае, если решения не будут храниться в массиве, а каждый раз будут вычисляться заново, то стоит выбирать максимальное значение коэффициента испарения.

Параметр метода муравьиных колоний, отвечающий за количество заносимого веса агентами, не сильно влияет

на эффективность методов. Это связано с относительным характером весов при поиске маршрута агентами. Но на начальном этапе значения заносимых изменений весов агентов могут соперничать с начальным значением весов в вершинах. Начальное значение не равно 0, так как иначе

невозможен был бы первоначальный вероятностный выбор вершин.

Для ускорения работы оригинального метода муравьиных колоний предложены его модификации, например, элитный и ранжированный алгоритмы занесения весов [19,20]. В элитном алгоритме агент,

нашедший лучшее решение на итерации, заносит больше весов в  $X$  раз. При использовании ранжированного алгоритма учитывается вклад  $X$  лучших агентов, веса которого увеличиваются в зависимости от места агента. Приведем графики зависимости оценки математического ожидания найденного критерия и оценки математического ожидания количества рассмотренных решений от параметра  $X$  при различном количестве агентов в группе: 10 – отображается ромбами и 20 – отображается треугольниками (рис 6).

Применение ранжированного алгоритма показывает лучшие результаты, как по количеству рассмотренных решений, так и по оценке математического ожидания критерия, по сравнению, как с Элитным, так и с оригинальным алгоритмами (рис 6). Точность найденного решения при применении элитного алгоритма сильно зависит от числа агентов в группе. При этом оптимальным значением параметра элитного алгоритма является

значение в 4 раза меньше числа агентов в группе. При большом значении параметра элитного алгоритма найденное решение будет хуже. Для ранжированного алгоритма рекомендуется выбирать параметр в 3–4 раза меньше числа агентов в группе. При этом при выборе большого значения параметра точность найденного решения не сильно хуже, но резко увеличивается время поиска, так как возрастает число рассмотренных решений. При этом, чем больше агентов в одной группе, тем больше это влияние.

Интересным также является исследование, связанное с анализом изменения значений критериев при увеличении ограничения на число итераций. Как видно из графиков, в данном случае не только возрастает количество решений и улучшится оценка математического ожидания найденного решения, но и увеличится доверительный интервал этой оценки (рис 7). Это означает, что увеличение числа итераций не всегда приводит к улуч-

шению решений. Причем на графиках отчетливая логарифмическая зависимость. При установке ограничения больше 300 практически не изменяется ни количество рассмотренных решений, ни оценка математического ожидания критерия.

### Заикливание метода муравьиных колоний

Исправить этот недочет призван критерий остановки алгоритма, связанный с поиском решения, удовлетворяющего ограничениям. При применении метода муравьиных колоний могут возникать ситуации, когда несколько агентов из группы, пройдя по хорошему маршруту, заносят столько веса, что дальнейшее отклонение других агентов от данного маршрута становится минимальным. В результате большинство агентов перемещаются по близким маршрутам, но нет никакой гарантии, что этот маршрут будет удовлетворять ограничениям. Такую ситуацию можно назвать «заикливанием». Для отсека-

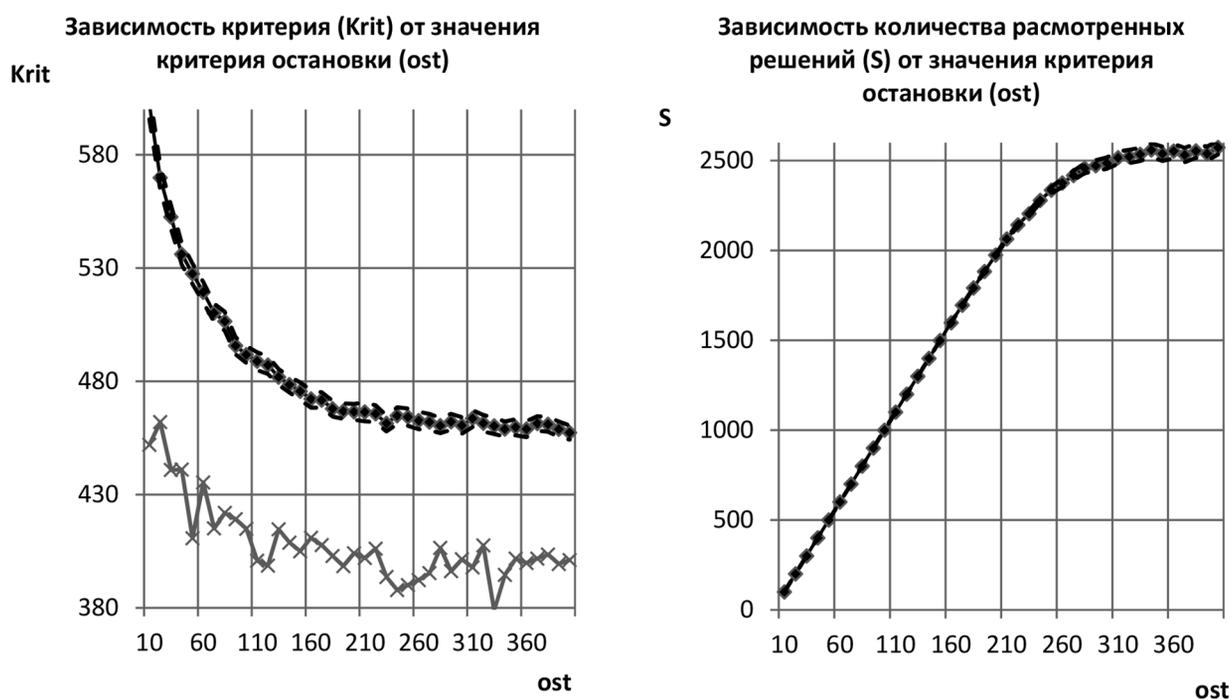


Рис. 7. Результаты работы модифицированного метода муравьиных колоний при варьировании критерия остановки

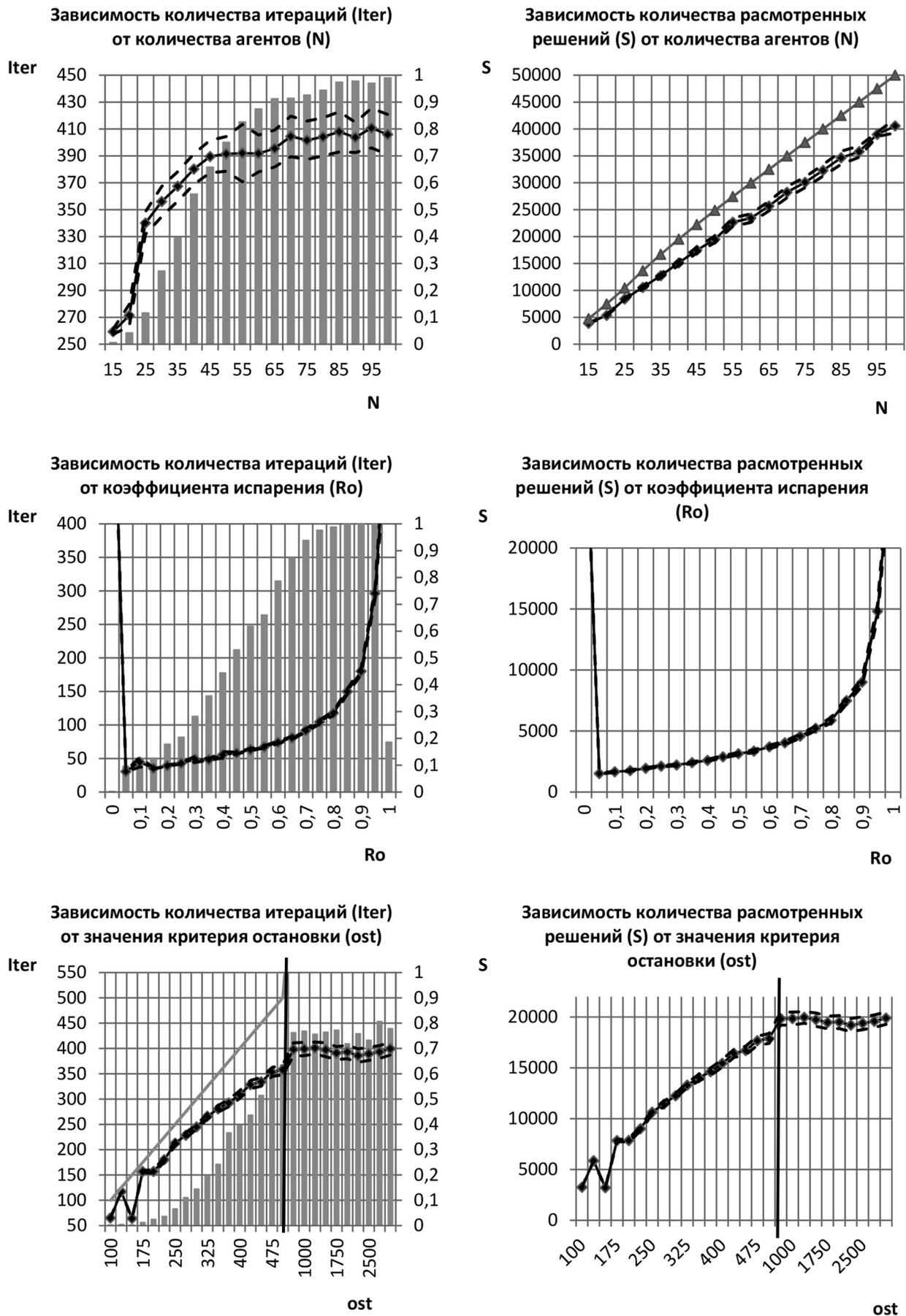


Рис. 8. Результаты работы модифицированного метода муравьиных колоний при альтернативном критерии остановки

ния ситуации закливания установим достаточно большое ограничение на число итераций алгоритма. Для нашей задачи установим параметр закливания алгоритма на 1000 итераций.

Рассмотрим влияние параметров алгоритма муравьиных колоний: количества агентов и коэффициента испарения для выработки рекомендаций. (рис 8) Гистограммой на графиках количества итераций отображен процент успешных прогонов, т.е. прогонов поиска решений, при которых количество итераций не достигло критерия «закливания». Для гистограмм предусмотрена отдельная, правая ось. Графики с ромбами отмечают подобные характеристики при использовании в качестве критерия остановки определенного количества итераций. Штриховой линией приводится оценка математического ожидания и доверительный интервал этой оценки для доверительной вероятности 0,99.

Из графиков видно, что в целом рекомендации по выбору параметров не зависят от критерия остановки алгорит-

ма муравьиных колоний. Так количество агентов в одной группе следует выбирать наибольшим, исходя из ограничений на время (количество решений), а параметр испарения стоит выбирать в пределах (0,8; 0,95). Эти рекомендации обусловлены также низким коэффициентом закливания алгоритма. Параметр, отвечающий за количество весов, заносимого агентами также не влияет на скорость и точность получения решения.

Проблема «закливаний» алгоритма муравьиных колоний не решается путем увеличения ограничения на итерации. На нижних графиках рисунка 8 отчетливо видно, что увеличение ограничения на количество итераций до 500 еще влияет на количество закливаний алгоритма, а далее увеличение ограничения не может уменьшить этот процент. Вертикальная линия как раз показывает момент этого перехода и далее шаг оси *ost* резко увеличивается. В результате для нашей задачи в любом случае около 25% итераций не смогут найти решение, удовлетворяющее установленным требуемым

ограничениям. Единственным параметром, который адекватно можно изменять для уменьшения процента «закливания» алгоритма является число агентов в группе, но увеличение этого параметра в любом случае увеличивает количество рассмотренных итераций и, следовательно, время работы алгоритма.

При улучшении критерия остановки, в нашем случае уменьшения суммарного времени выполнения всех работ, количество закливаний алгоритма будет увеличиваться до тех пор, пока коэффициент закливания не станет равным 1. Для нашей задачи при ограничении 360 ни одна итерация не нашла решения, удовлетворяющего ограничению. Основная проблема заключается в том, что это не означает невозможность существования решения, удовлетворяющего данным ограничениям, а лишь, то, что при текущих параметрах алгоритма практически невозможно однозначно достичь требуемого решения. На графике зависимости критерия (*Krit*) штрихпунктирной линией отображается интервал

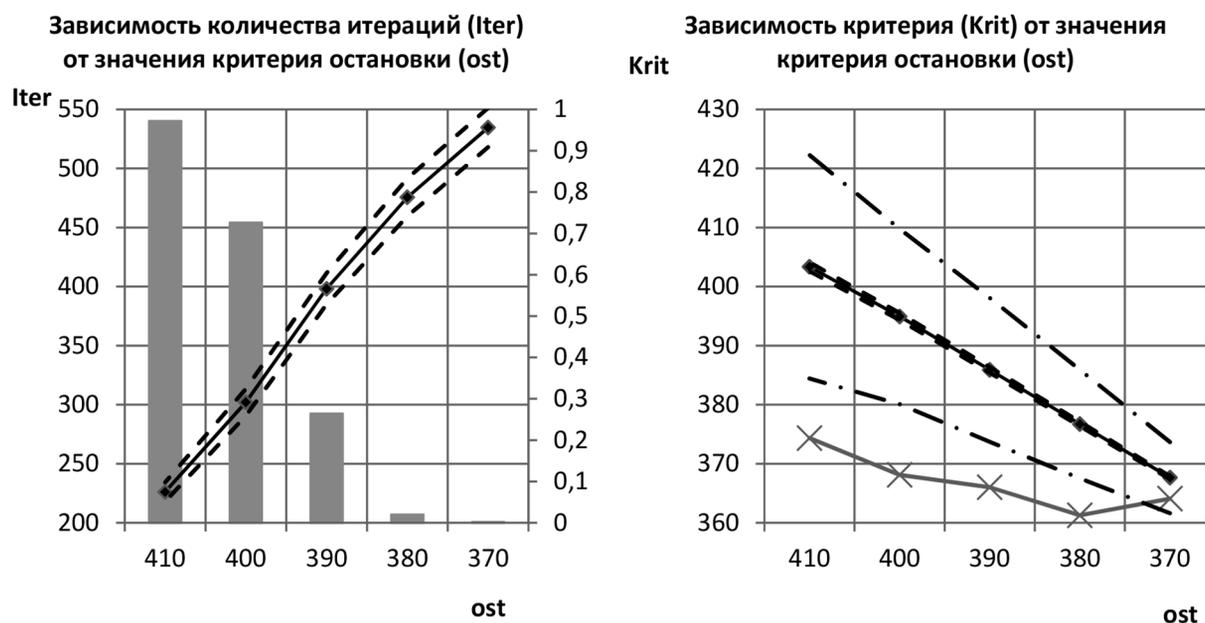


Рис 9. Результаты работы модифицированного метода муравьиных колоний при изменении значения альтернативного критерия остановки

в 3 СКО. График, отмеченный крестиками, описывает лучшие решения, найденные при данных ограничениях среди 500 прогонов модели. При этом видно, что алгоритм находит решения лучше 370, но эти решения чаще всего лежат за пределами 3 СКО. Для решения данной проблемы можно только увеличивать количество агентов в группе, что приводит к увеличению времени поиска решения.

### Заключение

По результатам работы предложен алгоритм, позволяющий применять модифицированный метод муравьиных колоний для решения задачи

о назначении работников на задачи. Особенностью данного алгоритма является применение в качестве информации о времени выполнения задачи работником соответствующего нечеткого множества с учетом взаимодействия между работниками, назначенными на одну задачу. Для решения задачи о назначении создается граф решений, вершины которого определяют назначение конкретного работника на выполнение конкретной задачи. В работе были выработаны рекомендации по установке параметров модифицированного метода муравьиных колоний с целью уменьшения времени поиска и увеличению рациональности найденного реше-

ния. Количество агентов в одной группе следует выбирать из интервала (Кол слоев графа решений; Кол слоев графа решений\*2). Коэффициент испарения рекомендуется брать в диапазоне (0,8; 0,95). При этом применять рекомендуется ранжированный алгоритм занесения весов с параметром, равным количеству агентов/4. Кроме того рассмотрена проблема «зацикливания» метода, связанная с невозможностью изменения решения при увеличении ограничения на количества итераций. Это происходит из-за прохождения агентов по одним и тем же маршрутам, при этом альтернативные маршруты не рассматриваются.

### Литература

1. Джамай Е.В., Зинченко А.С. Управление затратами предприятия машиностроения в современных финансовых условиях // Социально-экономические и гуманитарные исследования. 2015. № 7. С. 110–113.
2. A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide) – Fifth Edition.
3. Михайлова Л.В., Сазонов А.А., Петров Д.Г. Особенности применения методов сетевого планирования при управлении проектами на предприятиях машиностроения // Вестник университета. 2017. № 1. С. 10–13.
4. Путятин Л. М., Джамай Е.В., Тарасова Н.В. Структура и содержание управленческого анализа на предприятии в современных условиях // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Экономика. 2014. № 4. С. 136–139.
5. Фридлянов М.А. Методы и приемы управления проектами в сфере промышленного производства // Проблемы рыночной экономики. 2017. № 3. С. 17–24.
6. Бондаренко А.Н., Шаврин А.В. Метод PERT в управлении проектами // Управление проектами и программами. 2016. № 1. С. 68–78.
7. Зацаринный А. А., Коротков В. В., Матвеев М. Г. Моделирование процессов сетевого планирования портфеля проектов с неоднородными ресурсами в условиях нечеткой информации // Информатика и ее применения. 2019. № 13 (2). С. 92–99.
8. Батищев Д.И., Гудман Э.Д., Норенков И.П., Прилуцкий М.Х. Метод декомпозиций для решения комбинаторных задач упорядочения и распределения ресурсов // Информационные технологии. 1997. № 1. С. 29–33.
9. Белецкая С.Ю., Асанов Ю.А., Поваляев А.Д., Гаганов А.В. Исследование эффективности генетических алгоритмов многокритериальной оптимизации // Вестник ВГТУ. 2015. № 1. С. 24–27.
10. Kumanan S., G.J. Jose, K. Raja. Multi-project scheduling using a heuristic and a genetic algorithm. Int. J. Adv. Manuf. Tech. 2006. № 31 (3–4). С. 360–366.
11. Colorni A., Dorigo M., Maniezzo V. Distributed optimization by ant colonies // Proceedings of the First European Conference on Artificial Life, ECAL'91. Elsevier, Paris, France. 1992. С. 34–142.
12. Карпенко А.П., Чернобровченко К.А. Эффективность оптимизации методом непрерывно взаимодействующей колонии муравьев (CIAC) [Электрон. ресурс] // Наука и Образование. Электронный журнал. 2011. № 2. Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/>
13. Штовба С.Д. Муравьиные алгоритмы // Exponenta Pro, Математика в приложениях, 2003. № 4 (4). С. 70–75.
14. Карелин В.П. Модели и методы теории графов в системах поддержки принятия решений // Вестник Таганрогского института управления и экономики. Т. 2 (20). С. 69–73.
15. Титов Ю.П., Давыдкина Е.А. Расширение возможностей метода муравьиных колоний путем применения нечетких множеств // Тенденции развития науки и образования. 2019. Т. 2. № 54. С. 16–19.
16. Волкова Е.С., Гисин В.Б. Нечеткие множества и мягкие вычисления в экономике и финансах. М.: Издательство КноРус. 2019. 156 с.

17. Судаков В.А. Титов Ю.П. Решение задачи определения времени выполнения работы группой сотрудников с помощью нечетких множеств // Открытое образование. 2019. Т. 23. № 5. С. 74–82.

18. Титов Ю.П. Модификации метода муравьиных колоний для решения задач разработки авиационных маршрутов. Автоматика и телемеханика // Академиздатцентр «Наука» РАН. 2015. № 3 (76). С. 108–124.

## References

1. Dzhamay Ye.V. Zinchenko A.S. Cost management of an engineering enterprise in modern financial conditions. *Sotsial'no-ekonomicheskiye i gumanitarnyye issledovaniya = Socio-economic and humanitarian studies*. 2015; 7: 110-113. (In Russ.)

2. A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide) – Fifth Edition.

3. Mikhaylova L.V., Sazonov A.A., Petrov D.G. Features of the application of network planning methods in project management at engineering enterprises. *Vestnik universiteta = University Herald*. 2017; 1: 10-13. (In Russ.)

4. Putyatina L.M. Dzhamay Ye.V. Tarasova N.V. The structure and content of management analysis at the enterprise in modern conditions. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Seriya: Ekonomika = Bulletin of Moscow State Regional University. Series: Economics*. 2014; 4: 136-139. (In Russ.)

5. Fridlyanov M.A. Methods and techniques of project management in the field of industrial production. *Problemy rynochnoy ekonomiki = Problems of a market economy*. 2017; 3: 17–24. (In Russ.)

6. Bondarenko A.N., Shavrin A.V. PERT method in project management. *Upravleniye proyektami i programmami = Project and program management*. 2016; 1: 68–78. (In Russ.)

7. Zatsarinnyy A.A., Korotkov V.V., Matveyev M. G. Modeling of network planning processes for a portfolio of projects with heterogeneous resources under fuzzy information. *Informatika i yeye primeneniya = Informatics and its applications*. 2019; 13 (2): 92-99. (In Russ.)

8. Batishchev D.I., Gudman E.D., Norenkov I.P., Prilutskiy M.KH. The decomposition method for solving combinatorial problems of ordering and distribution of resources. *Informatsionnyye tekhnologii = Information Technologies*. 1997; 1: 29-33. (In Russ.)

9. Beletskaya S.YU., Asanov YU.A., Povalyayev A.D., Gaganov A.V. A study of the effectiveness of genetic algorithms for multicriteria optimization. *Vestnik VGTU = Vestnik VGTU*. 2015; 1: 24-27. (In Russ.)

10. Kumanan S., G. J. Jose, K. Raja. Multi-project scheduling using a heuristic and a genetic

19. Курейчик В.М., Кажаров А.А. О некоторых модификациях муравьиного алгоритма // Известия ЮФУ. Технические науки. 2008. № 4 (81).

20. Субботин С.А. Олейник Ан.А. Олейник Ал.А. Интеллектуальные мультиагентные методы [Электрон. ресурс]. Фрагмент рабочих материалов монографии Часть III. Режим доступа: [http://www.csit.narod.ru/subject/MA/MA\\_lect.pdf](http://www.csit.narod.ru/subject/MA/MA_lect.pdf)

algorithm. *Int. J. Adv. Manuf. Tech.* 2006; 31(3-4): 360–366.

11. Colorni A., Dorigo M., Maniezzo V. Distributed optimization by ant colonies. *Proceedings of the First European Conference on Artificial Life, ECAL'91*. Elsevier, Paris, France. 1992: 34–142.

12. Karpenko A.P., Chernobrivchenko K.A. Efficiency of optimization by the method of continuously interacting ant colony (CIAC) [Internet]. *Nauka i Obrazovaniye. Elektronnyy zhurnal = Science and Education. Electronic journal*. 2011; 2. Available from: <http://technomag.edu.ru/>. (In Russ.)

13. Shtovba S.D. Ant Algorithms. *Exponenta Pro, Matematika v prilozheniyakh = Exponenta Pro, Mathematics in Applications*. 2003; 4(4): 70-75. (In Russ.)

14. Karelin V.P. Models and methods of graph theory in decision support systems. *Vestnik Taganrogskegogo instituta upravleniya i ekonomiki = Bulletin of the Taganrog Institute of Management and Economics*. 2 (20): 69-73. (In Russ.)

15. Titov YU.P. Davydkina Ye.A. Expanding the capabilities of the ant colony method through the use of fuzzy sets. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya = Trends in the development of science and education*. 2019; 2; 54: 16-19. (In Russ.)

16. Volkova Ye.S. Gisin V.B. Nechetkiye mnozhestva i myagkiye vychisleniya v ekonomike i finansakh = Fuzzy sets and soft calculations in economics and finance. M.: KnoRus Publishing House. 2019; 156 p. (In Russ.)

17. Sudaakov V.A. Titov YU.P. The solution to the problem of determining the execution time of a group of employees using fuzzy sets. *Otkrytoye obrazovaniye = Open Education*. 2019; 23; 5: 74-82. (In Russ.)

18. Titov YU.P. Modifications of the ant colony method for solving the problems of developing air routes. *Automation and telemechanics. Akademizdatstentr «Nauka» RAN = Academic Publishing Center "Science" RAS*. 2015; 3 (76): 108-124. (In Russ.)

19. Kureychik V.M., Kazharov A.A. About some modifications of the ant algorithm. *Izvestiya YUFU. Tekhnicheskkiye nauki = Izvestiya SFU. Technical science*. 2008; 4 (81). (In Russ.)

20. Subbotin S.A. Oleynik An.A. Oleynik

Al.A. Intellektual'nyye mul'tiagentnyye metody  
= Intelligent multi-agent methods [Internet].  
Fragment rabochikh materialov monografii Chast'

III = Fragment of the working materials of the  
monograph. Part III. Available from: [http://www.csit.narod.ru/subject/MA/MA\\_lect.pdf](http://www.csit.narod.ru/subject/MA/MA_lect.pdf). (In Russ.)

**Сведения об авторе**

***Владимир Анатольевич Судаков***

*Д.т.н., Профессор,  
Финансовый университет при Правительстве  
Российской Федерации, Москва, Россия  
Эл. почта: sudakov@ws-dss.com*

***Юрий Павлович Титов***

*К.т.н,  
Федеральный исследовательский центр  
Информатика и Управление РАН,  
Москва, Россия  
Эл. почта: kalengul@mail.ru*

**Information about the author**

***Anatolyevich Sudakov Vladimir***

*Dr. Sci. (Engineering), Professor,  
Financial University under the Government of the  
Russian Federation, Moscow, Russia  
E-mail: sudakov@ws-dss.com*

***Yuri Pavlovich Titov***

*Cand. Sci. (Engineering),  
The Institute of Informatics Problems of the Russian  
Academy of Sciences (IPI RAN),  
Moskva, Russia  
E-mail: kalengul@mail.ru*