

На правах рукописи



ЛОРЕШ Максим Андреевич

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ
АЛГОРИТМОВ МУРАВЬИНОЙ КОЛОНИИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ
ЗАДАЧ ОПТИМАЛЬНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ**

**05.13.01 — системный анализ, управление и обработка информации
(в научных исследованиях)**

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Омск - 2006

Работа выполнена в ГОУ ВПО

"Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского"

Научный руководитель: доктор физико-математических
наук, профессор
Колоколов Александр Александрович.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор
Филимонов Вячеслав Аркадьевич,
кандидат физико-математических
наук Пащенко Михаил Георгиевич.

Ведущая организация: Уфимский государственный авиационный
технический университет.

Защита состоится 29 июня 2006 г. в 14 часов на заседании диссер-
тационного совета ДМ 212.179.03 при ГОУ ВПО "Омский государствен-
ный университет им. Ф.М. Достоевского" по адресу: 644077, г. Омск, ул.
Нефтезаводская, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Омского государ-
ственного университета им. Ф.М. Достоевского.

Автореферат разослан "27" мая 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.ф.-м.н., доцент



А.М. Семенов

2006А
14301

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В современных условиях для успешного развития производства и сферы услуг необходимо решать достаточно широкий спектр задач оптимального размещения (предприятий, их филиалов, сервисных центров, складов и т.п.). Во многих случаях такие задачи являются весьма сложными и требуют применения моделей исследования операций и оптимизации, а также методов системного анализа.

Задачи оптимального размещения и методы их решения образуют важное направление в области дискретной оптимизации. Тематика исследований по данным задачам достаточно разнообразна и включает разработку и исследование алгоритмов их решения, изучение структуры и сложности задач, выделение полиномиально разрешимых случаев и построение семейств "трудных" задач для определенных классов алгоритмов [1, 2, 4, 5, 15, 17, 20]. Значительное число исследований посвящено простейшей задаче размещения, задаче о p -медиане и задаче с ограничениями на мощности производства [1, 2, 4, 15, 17]. Данные задачи являются одними из наиболее известных моделей размещения, допускают многочисленные обобщения и представляют практический интерес. Вычислительная сложность, а также большая размерность указанных задач размещения, как правило, не позволяют получать оптимальное решение за приемлемое время, вследствие чего особое значение приобрела разработка методов получения приближенных решений [1, 3, 6, 9, 11, 29].

В последние годы большой интерес проявляется к подходам, идеи которых заимствованы у живой природы, в частности к алгоритмам муравьиной колонии (МК). Ранее алгоритмы МК применялись для решения задачи коммивояжера, квадратичной задачи о назначениях, задачи раскроя и упаковки, задачи маршрутизации и других [3, 8, 11], зарекомендовав себя как эффективный инструмент решения задач оптимизации. Однако этот подход для решения задач оптимального размещения предприятий практически не разрабатывался.

Целью диссертации является разработка алгоритмов муравьиной колонии для решения задач оптимального размещения предприятий, их теоретическое и экспериментальное исследование.

Методы исследования. При выполнении работы использовались модели целочисленного программирования, методы комбинаторной оптимизации, аппарат теории вероятностей, методы экспериментального исследования с использованием современной вычислительной техники.

Научная новизна. В диссертации получили дальнейшее развитие вопросы разработки эвристических алгоритмов для решения NP-трудных задач оптимального размещения. Предложены алгоритмы муравьиной колонии для задачи о p -медиане на минимум, простейшей задачи размещения, задачи с ограничениями на мощности производства. Проведено их теоретическое и экспериментальное исследование, доказана асимптотическая сходимость некоторых из них к оптимальному решению. Предложены гибридные варианты алгоритмов с применением процедуры локального поиска.

Основные результаты диссертации заключаются в следующем.

1. Разработаны алгоритмы муравьиной колонии для решения задачи о p -медиане на минимум, простейшей задачи размещения и задачи размещения с ограничениями на мощности производства. Построены гибридные алгоритмы МК, использующие процедуру локального поиска.

2. Доказано, что в предложенных алгоритмах МК для задачи о p -медиане при определенных ограничениях на коэффициент испарения феромона текущий рекорд стремится к оптимальному значению целевой функции. Показано также, что для одного из алгоритмов МК вероятность получения оптимального решения алгоритмом искусственного муравья стремится к единице.

3. Показано, что применение процедуры локального поиска не ухудшает свойств асимптотической сходимости исследуемых алгоритмов муравьиной колонии для задачи о p -медиане на минимум. Для одного из

таких гибридных алгоритмов доказано, что при некоторых условиях число шагов алгоритма локального поиска до локального оптимума стремится к нулю.

4. Выполнена реализация предложенных алгоритмов муравьиной колонии, проведено их экспериментальное сравнение на различных сериях тестовых задач. Установлено, что гибридные алгоритмы с процедурой локального поиска более эффективны по качеству получаемых решений.

Практическая ценность. Предложенные алгоритмы муравьиной колонии и схемы переопределения уровня феромона применимы в научных исследованиях и при решении различных задач комбинаторной оптимизации. Разработанные алгоритмы и программы включены в учебный процесс на математическом факультете ОмГУ и могут быть использованы при решении прикладных задач.

Апробация работы. Результаты диссертации докладывались на 12-й Всероссийской конференции "Математическое программирование и приложения" (Екатеринбург, 2003), Всероссийской научной молодежной конференции "Под знаком "Сигма" (Омск, 2003), Российской конференции "Дискретный анализ и исследование операций" (Новосибирск, 2004), The Second International Workshop "Discrete Optimization Methods in Production and Logistics" (Omsk-Irkutsk, 2004), XIII Байкальской международной школе–семинаре "Методы оптимизации и их приложения" (Северобайкальск, 2005), на научных семинарах в Омском филиале Института математики им. С.Л. Соболева СО РАН (Омск).

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 12 работах, список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы (120 наименований). Общий объем диссертации – 113 страниц. В каждой главе используется своя нумерация параграфов, утверждений, теорем и формул.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, описывается основная идея алгоритмов муравьиной колонии, указываются направления теоретических и экспериментальных исследований, кратко излагается содержание работы.

В первой главе даются различные постановки дискретных задач размещения предприятий, приводятся общие схемы некоторых метаэвристик, предлагается обзор известных алгоритмов муравьиной колонии.

В п. 1.1 описываются модели целочисленного линейного программирования и комбинаторные постановки задач размещения предприятий. Основное внимание уделяется задаче о p -медиане на минимум, простейшей задаче размещения и задаче с ограничениями на мощности производства.

Простейшая задача размещения (ПЗР) состоит в следующем. Дано множество пунктов возможного размещения предприятий с номерами из $I = \{1, \dots, m\}$ и список клиентов с номерами из $J = \{1, \dots, n\}$. Предприятия могут производить некоторый продукт в неограниченном количестве. Известны стоимости размещения предприятий c_i в указанных пунктах и затраты t_{ij} на транспортировку продукции от предприятия в пункте i потребителю j , $i \in I, j \in J$. Требуется разместить предприятия и прикрепить к ним клиентов так, чтобы суммарные производственно-транспортные затраты были минимальны. Модель целочисленного линейного программирования (ЦЛП) для ПЗР имеет вид:

$$F(z, X) = \sum_{i \in I} c_i z_i + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} t_{ij} x_{ij} \rightarrow \min \quad (1)$$

$$\sum_{i \in I} x_{ij} = 1, \quad z_i \geq x_{ij}, \quad i \in I, j \in J, \quad (2)$$

$$z_i \in \{0, 1\}, \quad x_{ij} \geq 0, \quad i \in I, j \in J, \quad (3)$$

где x_{ij} – доля спроса клиента j , которую обеспечивает предприятие из пункта i ; $z_i = 1$, если предприятие открыто в пункте i (предприятие i открыто) и 0 – в противном случае, $i \in I, j \in J$.

Задача о p -медиане на минимум отличается от ПЗР тем, что требуется разместить ровно p предприятий и $c_i = 0$ для всех $i \in I$.

Задача с ограничениями на мощности производства является обобщением ПЗР. В ней известна мощность производства V_i для каждого $i \in I$, а также потребность d_{ij} каждого клиента j в продукции предприятия i , $i \in I$, $j \in J$. Модель ЦЛП для данной задачи записывается следующим образом:

$$F(z, X) = \sum_{i \in I} c_i z_i + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} t_{ij} x_{ij} \rightarrow \min \quad (4)$$

$$\sum_{i \in I} x_{ij} = 1, \quad j \in J, \quad (5)$$

$$\sum_{j \in J} d_{ij} x_{ij} \leq V_i z_i, \quad i \in I, \quad (6)$$

$$z_i, x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad i \in I. \quad (7)$$

В п. 1.2 рассматриваются вопросы вычислительной сложности указанных задач. Кроме того, в данном разделе приводятся общие схемы других метаэвристик: генетических алгоритмов, поиска с запретами, алгоритмов имитации отжига.

В п. 1.3 описывается идея, на которой основаны алгоритмы муравьиной колонии. Появление алгоритмов МК было обусловлено исследованиями поведения реальных муравьев в процессе поиска кратчайшего пути между источником пищи и муравейником. Оказалось, что муравей при движении выделяет вещество, называемое *феромоном*, которое остается за ним на земле в виде следа. След из феромона используется другими членами колонии при поиске источника пищи, причем вероятность выбора пути возрастает с увеличением на нем концентрации феромона.

На каждой итерации алгоритма МК конечное число искусственных муравьев (ИМ) ищут решения задачи. Решения представляют собой пути минимальной стоимости по некоторым состояниям, являющимся частично построенными решениями. Таким образом, ИМ – это жадный алгоритм, который итеративно, шаг за шагом строит решение. На каждом шаге r муравей l определяет множество направлений $A_l^r(\varphi)$ из текуще-

го состояния φ и выбирает одно из них с некоторой вероятностью. Для муравья l вероятность $p_{\varphi\psi}^l$ перехода из состояния φ в состояние ψ зависит от комбинации значений *привлекательности перехода* и *уровня феромона*. Привлекательность вычисляется при помощи некоторой эвристики и показывает *априорную* желательность перехода. Уровень феромона представляет собой число, показывающее насколько часто муравьи двигались из состояния φ в состояние ψ на предыдущих итерациях. Данная величина отражает *апостериорную* желательность перехода. В результате каждый ИМ получает информацию, которая обрабатывается и используется в дальнейшем. Эта информация является аналогом феромона живых муравьев.

В этом же разделе приводится обзор алгоритмов муравьиной колонии для задачи коммивояжера и квадратичной задачи о назначениях.

Необходимо также отметить, что идея "поощрения" и "наказания" некоторых компонент решения использовалась ранее, например, в алгоритме СПА (случайный поиск с адаптацией) для задачи нахождения наиболее информативной подсистемы признаков [7].

В главе 2 описываются разработанные нами алгоритмы МК для задач размещения предприятий.

В п. 2.1 и 2.2 рассматриваются задача о p -медиане на минимум и простейшая задача размещения. Решением s задачи о p -медиане и ПЗР будем называть булев вектор z размерности m такой, что $z_i = 1$, если $i \in I_s$, и 0 – в противном случае, где I_s – множество открытых предприятий (для p -медианы $|I_s| = p$). Пусть далее α_i^k – уровень феромона для i -го предприятия на итерации k , Δf_i^r – изменение значения целевой функции в результате закрытия предприятия i на шаге r алгоритма ИМ, $i \in I$, I_s^r – множество открытых предприятий для решения s на шаге r алгоритма ИМ.

В качестве алгоритмов ИМ использовались алгоритмы ant2-pm для задачи о p -медиане и ant-splp для простейшей задачи разме-

щения, представляющие собой вероятностные модификации жадного алгоритма спуска. На каждом шаге r алгоритма ant2-рп генерируется множество предприятий

$$W^r(\lambda) = \{i \in I_s^r \mid \Delta f_i^r < (1 - \lambda) \min_{i \in I_s^r} \Delta f_i^r + \lambda \max_{i \in I_s^r} \Delta f_i^r\}, \quad (8)$$

где $\lambda \in [0, 1]$. Привлекательность η_i^r вычисляется по формуле

$$\eta_i^r = \begin{cases} -\Delta f_i^r + \max_{i \in W^r(\lambda)} \Delta f_i^r, & i \in W^r(\lambda), \\ \varepsilon, & i \in I_s^r \setminus W^r(\lambda), \end{cases} \quad (9)$$

где параметр $\varepsilon > 0$. Данный параметр необходим для того, чтобы любое предприятие $i \in I_s^r$ имело шанс быть закрытым. Далее случайным образом с распределением вероятностей

$$p_i^r = \frac{\alpha_i^k \cdot \eta_i^r}{\sum_{i \in I_s^r} \alpha_i^k \eta_i^r}, \quad i \in I_s^r, \quad (10)$$

выбирается предприятие $i_0 \in I_s^r$, которое закрывается. Алгоритм ant2-рп начинает работу с множества $I_s^1 = I$ и завершает ее при $|I_s^r| = p$.

На каждом шаге r алгоритма ant-splr для ПЗР генерируется множество $W^r = \{i \in I_s^r \mid \Delta f_i^r > 0\}$, а также $V^r(\lambda) = \{i \in W^r \mid \Delta f_i^r > \lambda \cdot \Delta f_{\max}^r\}$, где $\Delta f_{\max}^r = \max_{i \in W^r} \Delta f_i^r$, параметр λ принадлежит отрезку $[0, 1]$. Привлекательность закрытия предприятия i определяется согласно правилу

$$\eta_i^r = \begin{cases} \Delta f_i^r, & i \in V^r(\lambda), \\ \varepsilon, & i \in W^r \setminus V^r(\lambda), \\ 0, & i \in I_s^r \setminus W^r. \end{cases} \quad (11)$$

На каждом шаге r алгоритма ant-splr с распределением вероятностей (10) выбирается $i_0 \in W^r$, которое закрывается. Алгоритм ant-splr начинает работу с множества $I_s^1 = I$ и завершает ее, если на некотором шаге либо $W^r = \emptyset$, либо $|I_s^r| = 1$.

Для задачи о p -медиане предлагаются алгоритмы муравьиной колонии AC1-рп и AC2-рп с различными схемами переопределения уровня феромона, а также их аналоги AC1-splr и AC2-splr для ПЗР.

На каждой итерации алгоритма AC1 при помощи соответствующего алгоритма ИМ строится L решений задачи. Затем из этих решений выбираются l лучших по значению целевой функции. Далее на основе отобранных лучших решений определяются значения уровня феромона α_i^{k+1} для всех $i \in I$ (причем, чем чаще предприятие i включалось в l таких решений, тем меньше соответствующее α_i^{k+1}). Компоненты вектора α^{k+1} вычисляются следующим образом:

$$\alpha_i^{k+1} = \frac{\alpha_{\min} + q^{\gamma_i^k} (\alpha_i^k - \alpha_{\min})}{\beta_k}, \quad i \in I, \quad (12)$$

где $\beta_k \in (0, 1)$ – коэффициент затухания (испарения феромона) на итерации k ; $\gamma_i^k \in [0, 1]$ – частота появления предприятия i в l лучших решениях, выбираемых на итерации k ; параметр $q \in (0, 1)$. Если на некоторой итерации произошла смена рекорда, то для ненулевых компонент соответствующего вектора z назначается $\alpha_i^{k+1} = \alpha_{\min}$, где $\alpha_{\min} > 0$ – параметр, задающий минимально возможный уровень феромона. Такой способ переопределения феромона будем называть *схемой слабого типа*.

Алгоритм AC2 отличается от AC1 тем, что переопределение уровня феромона на каждой итерации происходит на основе решений, значение целевой функции которых *строго меньше* текущего рекорда. Вне зависимости от того, произошла смена рекорда или нет, для ненулевых компонент рекордного вектора z назначается $\alpha_i^{k+1} = \alpha_{\min}$. Такой способ переопределения феромона будем называть *схемой сильного типа*.

В п. 2.3 предлагается алгоритм AC-crlp для задачи (4)–(7). Здесь решением s является пара (z, X) , где z – булев вектор размерности m , $X = (x_{ij})$ – $m \times n$ матрица перевозок. В данном алгоритме МК информация (уровень феромона) хранится и накапливается в матрице (τ_{ij}) , в которой τ_{ij} соответствует уровню феромона для перевозки x_{ij} , $i \in I, j \in J$.

Искусственный муравей ant-crlp, двигаясь от клиента к клиенту, назначает каждому потребителю j ровно одно предприятие i согласно некоторому вероятностному закону. Если к потребителю j прикреплено предприятие i , то $x_{ij} = 1$, предприятие i считается открытым, и вероят-

ность его использования для обслуживания оставшихся клиентов повышается. Результатом работы алгоритма ant-crlp является вектор z и матрица перевозок X .

Вероятность η_{ij}^r назначения $x_{ij} = 1$ на шаге r вычисляется по формуле, аналогичной (10). Привлекательность определяется следующим образом:

$$\eta_{ij}^r = \begin{cases} \frac{1}{\alpha t_{ij} + \beta(1-z_i)c_i}, & \text{если } \bar{V}_i \geq d_{ij}, \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

где α и β – параметры, \bar{V}_i – остаток мощности предприятия i , $i \in I$.

Алгоритм муравьиной колонии AC-crlp представляет собой модификацию схемы, для которой доказана асимптотическая сходимость [14].

В п. 2.4 обсуждаются вопросы комбинирования алгоритмов МК с методами локального поиска. В алгоритмах МК локальный поиск используется следующим образом. После того, как алгоритм искусственного муравья заканчивает работу, к построенному им решению применяется процедура локального поиска.

Для задачи о p -медиане рассматриваются окрестность Swap и окрестность Лина-Кернигана [29]. Для ПЗР предлагается окрестность Drop, каждый элемент которой является результатом работы жадного алгоритма спуска [28]. Процедура локального поиска для задачи (4)–(7) основана на окрестности Shift, представляющей собой модификацию соответствующей окрестности для обобщенной задачи о назначениях [19].

Результаты второй главы опубликованы в работах [23, 26, 28–30, 32].

В главе 3 рассматриваются теоретические вопросы сходимости предложенных алгоритмов МК. Работы, посвященные вопросам сходимости алгоритмов муравьиной колонии, стали появляться относительно недавно [13, 14, 16, 18], причем все полученные результаты относятся к упрощенным версиям фактически применяемых схем и не дают прямых рекомендаций для практического использования. Однако они представляют интерес для изучения общих свойств исследуемых алгоритмов. В п. 3.1 дается краткий обзор результатов о сходимости алгоритмов муравьиной колонии.

Одним из основных параметров алгоритмов МК для задачи о p -медиане и ПЗР является так называемый коэффициент испарения феромона β_k . В п. 3.2 доказывается, что при определенных ограничениях на коэффициент β_k вероятность нахождения оптимального решения для алгоритмов AC1- pm и AC2- pm при неограниченном увеличении числа итераций равна 1, т.е. справедлива следующая

Теорема 3.1. Пусть в алгоритме AC2- pm для задачи о p -медиане в качестве искусственного муравья используется алгоритм ant2- pm , и пусть для некоторого $N \geq 1$ выполняется условие

$$m \sqrt{\frac{k+1}{k+2}} \leq \beta_k < 1 \quad \text{для всех } k \geq N.$$

Тогда $F(\hat{s}^k) \rightarrow F(s^*)$ почти наверное при $k \rightarrow \infty$, где \hat{s}^k – текущий рекорд, а s^* – оптимальное решение.

Отметим, что теорема имеет место также для алгоритма AC1- pm . Кроме того, для алгоритма AC2- pm , в котором используется схема перепределения феромона сильного типа, верно следующее следствие.

Следствие 3.1. Если в алгоритме AC2- pm выполняются условия теоремы 3.1, причем $\sum \log \beta_k = -\infty$, то для каждого запуска алгоритма AC2- pm найдется такое оптимальное решение s^* , что для алгоритма ant2- pm имеет место сходимость $P^k(s^*) \rightarrow 1$ при $k \rightarrow \infty$.

В п. 3.3 рассматриваются гибридные схемы алгоритмов МК с процедурой локального поиска, для которых справедливы следующие два утверждения.

Утверждение 3.1. Применение процедуры локального поиска не ухудшает свойств асимптотической сходимости предложенных алгоритмов для задачи о p -медиане.

Утверждение 3.2. Пусть в алгоритме AC2- pm используется алгоритм ant2- pm с процедурой локального поиска и $\sum \log \beta_k = -\infty$. Тогда математическое ожидание числа шагов алгоритма локального поиска

до локального оптимума стремится к нулю при $k \rightarrow \infty$.

Данное утверждение верно также для алгоритма AC2-splr с алгоритмом искусственного муравья ant-splr.

Результаты третьей главы опубликованы в работах [25, 28].

В главе 4 излагаются результаты экспериментальных исследований, проведенных на основе предложенных в предыдущих главах алгоритмов муравьиной колонии. В 4.1 и 4.2 приводятся результаты экспериментального исследования алгоритмов для простейшей задачи размещения и задачи о p -медиане. Эксперимент выполнялся на тестовых примерах размерности $m = n = 100$ из электронной библиотеки "Дискретные задачи размещения" Института математики СО РАН [20]. Данные задачи являются трудными для некоторых точных алгоритмов, а также для алгоритмов локального поиска. Кроме того, рассматривались примеры из OR-Library [10].

Вычислительный эксперимент проводился с целью выяснения качества получаемых алгоритмами решений на различных сериях тестовых задач. Значительный интерес представляет также информация о влиянии используемой информации (феромона), а также процедуры локального поиска на качество получаемых решений. Результаты эксперимента показали, что использование феромона улучшает качество получаемых решений, а предложенные алгоритмы муравьиной колонии с процедурой локального поиска более эффективны на рассматриваемых сериях тестовых задач.

Кроме того, важным является вопрос о количестве шагов алгоритма локального поиска до локального оптимума. В главе 3 доказано, что в алгоритме AC2 со схемой переопределения уровня феромона сильного типа при определенных ограничениях на коэффициент испарения число шагов локального поиска уменьшается с увеличением номера итерации. В экспериментальных исследованиях аналогичное поведение наблюдалось и для схемы переопределения уровня феромона слабого типа. Данные факты говорят о том, что использование "феромона" уменьшает общее время работы алгоритмов. Это означает, что предложенные

алгоритмы муравьиной колонии не только получают решения с меньшими отклонениями от оптимальных, но и работают быстрее по сравнению с обычной мультистартовой процедурой, основанной на локальном поиске. Следует отметить, что число шагов локального поиска до локального оптимума может быть экспоненциальным [6].

В п. 4.3 излагаются результаты вычислительного эксперимента для задачи размещения предприятий с ограничениями на мощности производства. Эксперимент проводился на тестовых примерах размерности $m = n = 100$ из электронной библиотеки "Дискретные задачи размещения" Института математики СО РАН [20]. Для данных задач оптимальные решения не известны, а найдены нижняя и верхняя оценки значений целевой функции, вычисленные при помощи алгоритмов, в которых используется релаксация Лагранжа [9]. Кроме того, рассматривались примеры из электронной библиотеки OR-Library [10]. Для этих задач оптимальные решения известны.

Одним из основных результатов для алгоритма AC-cplp является то, что для 64 из 100 тестовых задач библиотеки "Дискретные задачи размещения" при помощи указанного алгоритма улучшены существующие рекорды. Кроме того, несколько рекордов удалось повторить. Необходимо отметить, что основной вклад в трудоемкость алгоритма ant-cplp вносит процедура локального поиска, поэтому вопрос о количестве шагов локального поиска до локального оптимума особенно важен. В ходе экспериментальных исследований было установлено, алгоритм AC-cplp не только получал решения лучшего качества, но и успевал выполнять большее число итераций, чем обычная мультистартовая процедура, основанная на локальном поиске (за одинаковое время работы). Это говорит о том, что и в данном случае использование "феромона" не только улучшило качество получаемых решений, но и уменьшило число шагов алгоритма локального поиска до локального оптимума.

На примерах из библиотеки OR-Library алгоритм AC-srlp также показал небольшие средние отклонения (порядка 1%) от оптимальных значений целевой функции.

Результаты четвертой главы опубликованы в работах [23, 24, 26–32].

В заключении приводятся основные результаты диссертации.

Список литературы

- [1] Агеев А.А. Точные и приближенные алгоритмы для задач размещения: обзор последних достижений // Материалы конференции.– Новосибирск: Изд-во ИМ СО РАН, 1998. – С. 4–10.
- [2] Береснев В.Л., Гимади Э.Х., Дементьев В.Т. Экстремальные задачи стандартизации. – Новосибирск, 1978. – 333 с.
- [3] Валеева А.Ф. Применение метаэвристики муравьиной колонии к задачам двумерной упаковки // Информационные технологии, N 10, 2005. – С. 36–43.
- [4] Колоколов А.А., Косарев Н.А., Рубанова Н.А. Исследование отсечений Бендерса в декомпозиционных алгоритмах решения некоторых задач размещения // Омский научный вестник, 2005. – Т.2(31). – С. 76–80.
- [5] Колоколов А.А., Леванова Т.В. Алгоритмы декомпозиции и перебора L -классов для решения некоторых задач размещения // Вестник Омского ун-та.– Омск: ОмГУ, 1996. – N 1. – С. 21–23.
- [6] Кочетов Ю.А., Младенович Н., Хансен П. Локальный поиск в комбинаторной оптимизации: достижения и перспективы // Материалы конф. "Проблемы оптимизации и экономические приложения". – Омск: Изд-во Наследие. Диалог Сибирь, 2003. – С. 43–47.
- [7] Лбов Г.С. Выбор эффективной системы зависимых признаков // Вычислительные системы, 1965, вып. 19. – С. 21–34.

- [8] Мухачева Э.А. Обзор и перспективы развития комбинаторных методов решения задач раскроя и упаковки // Материалы российской конференции "Дискретный анализ и исследование операций". – Новосибирск, 2002. – С. 80–87.
- [9] Пащенко М.Г. Лагранжевы эвристики для задачи размещения с ограничениями на мощности // Труды XI международной Байкальской школы–семинара. Иркутск, Байкал, 5–12 июля 1998г., Т.1. – С. 175–178.
- [10] Beasley J.E. An algorithm for solving large capacitated warehouse location problems // European Journal of Operational Research. – 1988. – V. 33. – P. 314–325.
- [11] Dorigo M., Di Caro G., Gambardella L.M. Ant Algorithms for Discrete Optimization // Artificial Life. – 1999. – V. 5(2). – P. 137–172.
- [12] Dorigo M., Maniezzo V., Colony A. Ant System: An Autocatalytic Optimizing Process // Report No. TR-91-016. – Milan: Politecnico di Milano, 1991.
- [13] Gutjahr W.J. A graph-based Ant System and its convergence // Future Generation Computer Systems. – 2000. – V. 16. – P. 873–888.
- [14] Gutjahr W.J. ACO algorithms with guaranteed convergence to the optimal solution // Information Processing Letters. – 2002. – V. 82(3). – P. 145–153.
- [15] Krarup J., Pruzan P.M. The simple plant location problem: survey and synthesis // European Journal of Operational Research. – 1983. – V.12, N1. – P. 36–81.
- [16] Neumann F., Witt C. Runtime Analysis of a Simple Ant Colony Optimization Algorithm // Technical Report, Reihe CI 200/06, SFB 531, Universität Dortmund, 2006.

- [17] Sridharan, R. The capacitated plant location problem // European Journal of Operational Research. – 1995. – V 87. – P. 203–213.
- [18] Stützle T., Dorigo M. A Short Convergence Proof for a Class of ACO Algorithms // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. – 2002. – V. 6(4). – P. 358–365.
- [19] Yagiura, M., Ibaraki, T., Glover, F. An ejection chain approach for generalized assignment problem // INFORMS Journal on computing. – 2004. – V. 16. – P. 133–151.
- [20] <http://www.math.nsc.ru/AP/benchmarks/index.html>

РАБОТЫ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- [21] Леванова Т.В., Лореш М.А. Алгоритм муравьиной колонии и имитации отжига для простейшей задачи размещения // Материалы российской конференции "Дискретный анализ и исследование операций", Новосибирск, 2002. – С. 235.
- [22] Леванова Т.В., Лореш М.А. Алгоритм муравьиной колонии для задачи о р-медиане // Информационный бюллетень Ассоциации математического программирования. № 10. Научное издание. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. – С. 172–173.
- [23] Леванова Т.В., Лореш М.А. Алгоритмы муравьиной колонии и имитации отжига для задачи о р-медиане // Автоматика и телемеханика, N 3, 2004. – С. 80–88.
- [24] Леванова Т.В., Лореш М.А. Алгоритм муравьиной колонии для задачи размещения предприятий с ограничениями на мощности производства // Материалы российской конференции "Дискретный анализ и исследование операций", Новосибирск, 2004. – С. 189.

- [25] Леванова Т.В., Лореш М.А. О сходимости одного алгоритма муравьиной колонии для задачи о р-медиане // Труды XIII Байкальской международной шк.-сем. Северобайкальск, 2005. – Т. 1. – С.535–541.
- [26] Леванова Т.В., Лореш М.А., Никитин А.Г. Алгоритмы муравьиной колонии и имитации отжига для одной задачи размещения предприятий // Материалы ежегодного научного семинара аспирантов и студентов-выпускников "Под знаком "Сигма". – Омск: ООО "Издатель-Полиграфист", 2003. – С. 21–26.
- [27] Лореш М.А. Некоторые метаэвристики для задачи о р-медиане // Материалы Всероссийской научной молодежной конференции "Под знаком "Сигма", Омск, 2003. – С. 11–12.
- [28] Лореш М.А. Алгоритмы муравьиной колонии для простейшей задачи размещения: Препринт. – Омск: "Полиграфический центр"КАН", 2006. – 19 с.
- [29] Kochetov Y., Alekseeva E., Levanova T., Loresh M. Large neighborhood local search for the p-median problem // Yugoslav Journal of Operations Research. – 2005. – V. 15, N1. – P. 53–63.
- [30] Levanova T.V., Loresh M.A. Ant colony and simulated annealing algorithms for the p-median problem // Proceedings of The Second International Workshop "Discrete Optimization Methods in Production and Logistics", Omsk-Irkutsk, 2004. – P. 70–74.
- [31] Levanova T.V., Loresh M.A., Nikitin A.G. Some local search algorithms for uncapacitated facility location problem // Proc. of XXXIII annual conference "AIRO 2002", L'Aquila, 2002. – P. 170.
- [32] Loresh M.A., Levanova T.V. The Ant Colony algorithm for the Capacitated Plant Location Problem // EWGLA XV Meeting, Saarbrücken, 2004. – P. 39–40.

Отпечатано с оригинал-макета,
предоставленного автором

Лицензия ПЛД №58-47 от 21.04.1997.

Подписано в печать 25.05.06	Формат 60×84/16
Бумага офсетная	Ризография
Усл. печ. л. 1,25	Уч.-изд. л. 1,3
Тираж 100 экз.	Заказ №185

Отпечатано в "Полиграфическом центре КАН"
644050, г. Омск, пр. Мира, д. 34, тел.: (3812) 65-47-31

2006A

14301

14301