На правах рукописи

Нгуен Гуй Лием

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ ТРАНСПОРТНО–ЛОГИСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ФИЗИЧЕСКИХ АНАЛОГИЙ

Специальность 05.13.18 – Математическое моделирование,

численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Иркутск 2016

Работа выполнена на кафедре автоматизированных систем Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (ФГБОУ ВО «ИРНИТУ»)

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Казаков Александр Леонидович

Официальные оппоненты: **Хамисов Олег Валерьевич,**
доктор физико-математических наук, ФГБУН Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН) (г. Иркутск), заведующий отделом прикладной математики №90

Лебедев Павел Дмитриевич,
кандидат физико-математических наук, ФГБУН Институт математики и механики им. Н.Н. Красовского Уральского отделения Российской академии наук (ИММ УрО РАН) (г. Екатеринбург),
научный сотрудник

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет»

Защита состоится 29 ноября 2016 г. в 16.00 на заседании диссертационного совета Д 212.070.07 на базе ФГБОУ ВО «Байкальский государственный университет» по адресу: 664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, д. 24, корп. 9, зал заседаний ученого совета БГУ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Байкальский государственный университет» по адресу: 664003, г. Иркутск, ул. Ленина, 11, БГУ, корпус 2, аудитория 101, (http://bgu.ru/)

Отзывы на автореферат присылать по адресу: 664003, г. Иркутск, ул. Ленина, 11, БГУ, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.070.07.

Автореферат разослан «   » октября 2016 года.

Ученый секретарь диссертационного совета, Т.И. Ведерникова
кандидат технических наук, доцент

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Транспортно-логистическая система (ТЛС) является важной частью социальной и производственной инфраструктуры любого государства, поэтому проблема ее оптимизации с целью получения определенного экономического эффекта остается актуальной и в настоящее время.

Для решения транспортно-логистических задач (ТЛЗ) достаточно часто применяются методы теории графов, а также различные модификации задач линейного и дискретного программирования (Аникин Б.А., Лотарев Д.Т., Уздемир А.П., Лукинский В.С., Лукинский В.В., Малевич Ю.В. и др.). В частности, при решении задачи об оптимальном размещении логистических центров традиционно применяют метод «центра тяжести» и метод кластеризации «k-средних», которые описаны в работах Лукинского В.С и Манделя И.Д. соответственно.

В последние десятилетия с развитием и усложнением структуры ТЛС появилась необходимость более широкого применения различных математических методов для решения возникающих задач оптимизации. Так, методы математического программирования для задач транспортно-складской логистики в своих работах использовали Постан М.Я., Николайчук В.Е., методы дискретной математики для задач планирования – Борндорфер Р. (Borndorfer R.), Гротшил М. (Grötschel M.), Лобеле А. (Lobele A.), а для задач размещения – Алексеева Е.В, Береснев В.Л., Васильев И.Л., Москаленко А.И., Батурин В.А., Гончаров Е.Н., Еремеев А.В., Колоколов А.А., Кочетов Ю.А., Фикельштейн Ю.Ю. Кроме этого отметим следующих авторов: Гартнер Н.Х. (Gartner N.H.), Голден Б.Л. (Golden B.L.) и Вонг Р.Т. (Wong R.T.), которые в своих исследованиях, в частности, обращались к проблемам сетевого анализа, проектирования и управления сетью ТЛС.

Большинство из известных алгоритмов решения ТЛЗ работает с евклидовым расстоянием между объектами, из-за чего возникают трудности учета особенностей рельефа местности и наличия естественных преград (горы, овраги, водоемы и т.д.).

В диссертационной работе предлагается технология решения данной проблемы, основанная на аналогии между распространением света в оптически неоднородной среде и минимизацией интегрального функционала (оптико-геометрический подход), которая позволяет устранить указанные выше недостатки известных методов.

В рамках указанной технологии развиты математические модели ряда объектов и подсистем ТЛС и новые численные методы для решения возникающих при этом задач оптимизации: построение оптимальных упаковок и покрытий равными кругами (для задачи размещения логистических узлов при непрерывном распределении потребителей), размещение дополнительных логистических центров на области обслуживания в условиях кооперации и конкуренции, организация системы коммуникаций с учетом особенностей местности, ремонт автомобильных дорог в условии ограниченного бюджета и т.д. Все вышеперечисленные алгоритмы были реализованы в виде программной системы. Отметим, что разработанный математический аппарат и программная система позволяют решать задачи, имеющие существенное прикладное значение.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования является транспортно-логистическая система. Предмет исследования – математические модели ТЛС и численные методы решения задач оптимизации, возникающих при моделировании.

Цель и задачи исследования. Целью исследования являются разработка математических моделей, численных методов и программных средств исследования оптимизационных задач транспортной логистики; разработка интеллектуальной системы поддержки научных исследований в области транспортной и инфраструктурной логистики.

Для достижения поставленной цели необходимо:

1. свести транспортно-логистические задачи к задачам вариационного исчисления с учетом возможных естественных условий, включая: дорожную сеть, населенные пункты, существующие логистические центры, особенность местности и т.д.;
2. разработать численные методы, основанные на использовании физических аналогий (оптико-геометрический подход: принципы Ферма и Гюйгенса), позволяющих решить задачи при наличии возможных ограничениях;
3. разработать программную систему, реализующую оригинальные авторские численные алгоритмы;
4. в составе интеллектуальной информационной системы (ИИС) поддержки научных исследований в области транспортной и инфраструктурной логистики разработать информационную аналитическую подсистему (ИАС) для взаимодействия с пользователями; экспертную систему (ЭС); и методы интеграции между ИАС, ЭС и вычислительными модулями.

Методы исследования. При выполнении исследования применены методы: геометрической оптики, вычислительной математики, математического моделирования, бесконечномерной оптимизации. С другой стороны, для построения экспертных систем использовались методы приобретения знаний, представления знаний, управления процессом поиска решения, разъяснения принятого решения.

Научная новизна. Научная новизна исследования состоит в следующем:

1. предложена оригинальная многоэтапная технология исследования ТЛС;
2. задачи оптимального размещения инфраструктурных логистических объектов впервые сведены к специальным модификациям двух известных математических задач: об упаковке и покрытии равными кругами ограниченных множеств в двумерных метрических пространствах с неевклидовыми метриками;
3. разработана модификация оптико-геометрического подхода, которая основывается на распространении световой волны из источников двух типов: точечного и распределенного вдоль замкнутой кривой. В последнем случае волна может распространяться как во внутреннюю, так и во внешнюю область;
4. предложены и реализованы на программном уровне новые методы построения оптимальных упаковок и покрытий равными кругами неодносвязных множеств в неевклидовой метрике;
5. разработаны новые численные методы для решения задач об оптимальном размещении дополнительных логистических центров в условиях кооперации и конкуренции, об оптимизации системы коммуникаций с учетом региональных

особенностей, об оптимизации ремонта автомобильных дорог в условиях ограниченного бюджета;

6. создана и интегрирована в ИИС программная система «ОТЛП», в основу которой положены оригинальные численные алгоритмы, разработанные в рамках диссертационного исследования.

Достоверность и обоснованность. Достоверность и обоснованность научных результатов обеспечивается применением известных фундаментальных физических принципов для построения математических моделей и разработки численных алгоритмов; корректностью исходных данных для проведения вычислительного эксперимента; согласованностью экспериментальных и теоретических данных.

Практическая значимость. Практическая значимость результатов исследования заключается в следующем: во-первых, разработаны эффективные численные методы решения задач транспортной логистики при наличии ограничений различного рода; во-вторых, предложенный подход к построению и исследованию математических моделей может быть использован в других классах прикладных задач, таких, как задачи безопасности, управления движением, выбора оптимальной мощности универсальных двигательных установок малой тяги; задачи проектировании энергоэффективной системы мониторинга протяженных объектов беспроводными сенсорными сетями и т.д.

Результаты диссертационного исследования использованы в учебном процессе при проведении занятий по дисциплинам «Системология» и «Методы оптимизации». Получены акты о внедрении результатов диссертационной работы в учебный процесс ФГБОУ ВО «ИРНИТУ», а также при проведении научных исследований в Институте Технологии моделирования технического университета им. Ле Куй Дона, Вьетнам.

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях: Всероссийская молодежная, научно-практическая конференция «Винеровские чтения» (ИРНИТУ, г. Иркутск. 2014,2015); XIX и XX Байкальская Всероссийская конференция «Информационные и математические технологии в науке и управлении» (ИСЭМ СО РАН, г. Иркутск. 2014, 2015); Вьетнамо-российская международная научная конференция (Вьетнам, г. Ханой. 2015); III Российско-монгольская конференция молодых ученых по математическому моделированию, вычислительно-информационным технологиям и управлению (Монголия, г. Ханх. 2015); 8-я Всероссийская мультиконференция по проблемам управления (г. Геленджик. 2015); XVI Всероссийская конференция молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям (г. Красноярск. 2015); 5-я Международная конференция по анализу изображений, социальных сетей и текстов (г. Екатеринбург. 2016); Пятая межвузовская научно-практическая конференция молодых ученых «Проблемы информационного и математического моделирования сложных систем» (ИрГУПС, г. Иркутск. 2016).

Научные публикации. Результаты диссертационного исследования опубликованы в 15 научных работах, из них 3 статьи в изданиях, входящих в Перечень ВАК. Получены два свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Личный вклад. Все выносимые на защиту результаты получены лично автором или в неделимом соавторстве.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 144 наименований. Объем работы составляет 135 страниц, 68 рисунков и 15 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследования, на основании чего сформулированы цель и задачи работы; определены объект, предмет, методы и средства исследования; раскрыта научная новизна и практическая значимость полученных результатов; изложены основные научные положения, выносимые на защиту; приведены структура и краткий обзор содержания работы.

В главе 1 проанализировано современное состояние исследований в области математического моделирования в транспортной логистике. При этом дан общий взгляд на применение математических методов для решения задач транспортной логистики, приведен обзор задач оптимизации ТЛС и популярных численных алгоритмов для их решения.

Из приведенного обзора можно видеть, что использование известных математических методов позволяет с высокой эффектностью решать множество задач, возникающих в транспортной логистике. Однако остается ряд открытых вопросов, связанных с учетом естественных условий и ограничений (например, особенности рельефа, наличие запретных или труднопроходимых участков и т.п.), учет которых является важными для прикладных задач.

Для разработки технологии построения математических моделей, учитывающих указанные особенности, предлагается использовать аппарат непрерывной оптимизации и оптико-геометрический подход, основанный на физических принципах распространения световых волн в оптически неоднородной среде.

В главе 2 предложена многоэтапная технология исследования ТЛС. На первом этапе решаются задачи оптимального размещения инфраструктурных логистических объектов в предположении об отсутствии на территории региона таких объектов (например, сотовые вышки определенного оператора, банкоматы конкретного банка и т.п.). Данные задачи посредством методов математического моделирования сведены к специальным модификациям двух известных математических задач: об упаковке и о покрытии равными кругами ограниченных множеств в двумерных метрических пространствах с неевклидовыми метриками. На втором и третьем этапах решаются, соответственно, задачи об оптимальном размещении дополнительных логистических узлов в условиях кооперации и конкуренции и об организации системы коммуникаций между размещенными объектами. Предложены их математические модели в виде задач вариационного исчисления специального вида, позволяющие учитывать региональные особенности. Наконец, на последнем этапе рассматривается задача о поддержании коммуникаций в удовлетворительном состоянии на примере ремонта автомобильных дорог в условиях ограниченного бюджета. Далее опишем построенные математические модели и разработанные для их исследования численные методы.

Пусть в некоторой ограниченной области $D \subseteq \mathbb{R}^2$ заданы непрерывная функция $0 < \alpha \le f(x,y) \le \beta$, определяющая мгновенную скорость движения в точке (x,y). Расстояние между точками a и b определим следующим образом:

$$\rho(a,b) = \min_{G \in G(a,b)} \int_G \frac{dG}{f(x,y)}, \tag{1}$$

Здесь $G(a,b)$ – множество всех непрерывных кривых, лежащих в D и соединяющих a и b. Иными словами, кратчайшим путем между точками будет кривая, на преодоление которой затрачивается наименьшее время.

Задача построения оптимальных упаковок равных кругов. Пусть имеются метрическое пространство X, конгруэнтные круги $C_i, i = 1,...,n$ с центрами $s_i = (x_i, y_i)$ и замкнутое многосвязное множество P:

$$P = \mathrm{cl}\left(D \setminus \bigcup_{k=1}^{m} B_k \right) \subset X \subseteq \mathbb{R}^2 \tag{2}$$

Здесь cl – оператор замыкания, $D \subset X$ – ограниченное множество, $B_k \subset D$, $k = 1,...,m$ – компактные множества с непустой внутренностью. Необходимо найти такой вектор $s = (s_1,...,s_n) \in \mathbb{R}^{2n}$, который обеспечит размещение в области P заданного числа кругов максимального радиуса R.

В общем виде имеем следующую оптимизационную задачу:

$$R \to \max \tag{3}$$

$$\rho(s_i, s_j) \ge 2R, \forall i = \overline{1, n-1}, \forall j = \overline{i+1, n}, \tag{4}$$

$$\rho(s_i, \partial P) \ge R, \forall i = \overline{1, n}, \tag{5}$$

$$s_i \in P, \forall i = \overline{1, n}. \tag{6}$$

Здесь ∂P граница множества P, $\rho(s_i, \partial P)$ – расстояние от точки до замкнутого множества.

Целевая функция (3) максимизирует радиус упаковываемых кругов, ограничение (4) обеспечивает непересечение внутренностей кругов, а ограничения (5)–(6) гарантируют, что каждый круг полностью лежит внутри множества.

Для любого вектора s, удовлетворяющего (4)–(6), определим множества

$$P_i = \left\{ p \in P : \rho(p, s_i) \le \rho(p, s_j), \forall j = 1,...,n, i \ne j \right\}. \tag{7}$$

В литературе такие множества называют областями Дирихле точек s_i во множестве P.

Решение поставленной задачи сводится к решению следующей последовательности подзадач:

1. Для каждого множества P_i определим точку $\overline{s}_i \in P_i$ такую, что $\rho(\overline{s}_i, \partial P_i) = \max_{p \in P_i} \rho(p, \partial P_i)$

2. Определим гарантированное значение радиуса, удовлетворяющего ограничениям (3)–(5): $R = \min_{i=1,...,n} \rho(\overline{s}_i, \partial P_i)$.

3. Для найденного вектора $\overline{s} = (\overline{s}_1,...,\overline{s}_n)$ переопределим множества P_i в соответствии с формулой (7).

Выполнение пунктов 1–3 производится до тех пор, пока изменяются координаты вектора $\overline{s}$.

Для решения первой подзадачи необходимо для каждой области P_i производить построение фронта световой волны, выпущенной с границы ∂P_i до момента времени, когда фронт выродится в точку. Координаты последней и будут искомым решением $\overline{s_i}$. Для решения же третьей подзадачи требуется одновременно выпустить световые волны из точек $\overline{s_i}$ и определить те точки области P, которых две или более волны достигают одновременно.

Алгоритм BWI (*BorderWaveInside*)

1. Граница области аппроксимируется замкнутой ломаной с узлами в точках $A_i, i = \overline{0,m}$ (исходные точки).

2. Из каждой пары точек A_i, A_{i+1}, вдоль нормали к соединяющему их отрезку откладываются отрезки $A_i B_i'$ и $A_{i+1} B_i''$ длиной $f(A_i)\Delta t$ и $f(A_{i+1})\Delta t$ соответственно. Здесь Δt – достаточно малый отрезок времени между соседними фронтами. Заметим, что новых точек получается в два раза больше, чем исходных. Пусть $\mathbf{B}$ – множество всех таких отрезков.

3. Если найдется пара отрезков $VW \in \mathbf{B}$, $YZ \in \mathbf{B}$ таких, что $W = Z$, то все точки начального фронта, лежащие между V и Y, исключаются из рассмотрения.

4. Строятся прямые $B_i'B_i''$, $i = \overline{0,m-1}$, проходящие через точки B_i' и B_i''.

5. Точки пересечения прямых $B_i'B_i''$ и $B_{i+1}'B_{i+1}''$, $i = \overline{0,m-2}$ образуют множество точек нового фронта.

6. Если найдется пара пересекающихся отрезков $VW \in \mathbf{B}$, $YZ \in \mathbf{B}$, то все точки, лежащие между V и Y на начальном фронте, исключаются из рассмотрения, а точка пересечения принимается за точку нового фронта.

7. Если построенное многообразие является незамкнутой кривой, то решением является «середина» данной линии, т.е. точка, расстояния от которой до концов одинаково. Если остается единственная точка на строящемся фронте, то данная точка является решением. В противном случае построенный фронт принимается за начальный и выполняется шаг №1.

Шаги 3 и 6 обеспечивают корректное построение фронта при образовании «ласточкиного хвоста».

В случае, когда область P_i не является односвязной, иначе говоря, в ней присутствуют непроходимые для световой волны барьеры, для решения первой подзадачи необходим дополнительный алгоритм конструирования волновых фронтов, распространяющихся с границы барьера во внешнюю область (BorderWaveOutside–BWO).

Данный алгоритм отличается от BWI выбором направления нормали – здесь она направлена во внешнюю область. Тогда общий алгоритм решения подзадачи 1 с учетом возможной многосвязности имеет следующий вид.

Алгоритм BWI–MCD (*BorderWaveInside Multiply–connected domain*)

1. С помощью алгоритма BWI строятся фронты световой волны, выпущенной с границы области. С помощью алгоритма BWO строятся фронты световых волн, выпущенных с границ всех барьеров. Работа алгоритмов продолжается до

первого соприкосновения BWI–волны с одной из BWO–волн. Построенные фронты сохраняются.

2. Множество точек, которых не достигла ни одна из волн, разбивается на максимальные односвязные подмножества S_j (сегменты), которые сохраняются в списке сегментов S. При этом сегменты, полученные на предыдущей итерации, удаляются.

3. Выполняется одна итерация алгоритмов BWI и BWO, начиная с сохраненных фронтов.

Процесс 2–3 продолжается до тех пор, пока множество точек, которых не достигла ни одна из волн, непусто. Геометрически, решением является точка, которую последней достигнут BWI-волна и все BWO-волны.

На рис. 1 представлены некоторые итерации алгоритма BWI-MCD: слева показан процесс конструирования первого фронта с границы множества – внутрь и с границы барьера – наружу, по центру – фронты на последней итерации, справа – вписанный круг максимального радиуса.

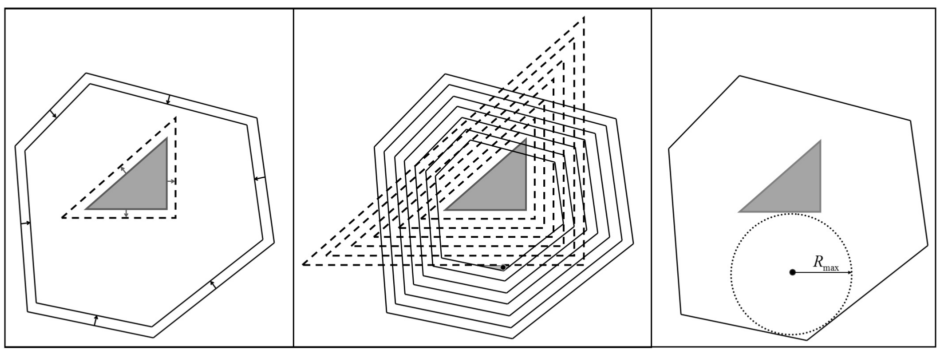

Рис. 1 – Иллюстрация механизма работы алгоритма BWI–MCD

Таким образом, алгоритм решения задачи (2)–(5) *AGOPEC–MCS* (*Algorithm of General Optimal Packing of Equal Circles*) имеет вид:

Шаг №1. Методом случайной генерации задается вектор $s=(s_1,...,s_n)$, удовлетворяющий ограничению (5) и определяющий начальное расположение центров упаковываемых кругов. Радиус R полагается равным нулю.

Шаг №2. Область P разбивается на подмножества P_i, $i=1,...,n$ согласно определению (6).

Шаг №3. Для каждого P_i, $i=1,...,n$ с помощью алгоритма BWI–MCD решается подзадача 1. В результате для каждого P_i, $i=1,...,n$ находятся координаты центра упакованного круга $\overline{s}_i$ и его максимально возможный радиус r_i.

Шаг №4. Вычисляется величина $R=\min\limits_{i=1,...,n}\rho(\overline{s}_i,\partial P_i)$.

Шаги 2–4 повторяются до тех пор пока R увеличивается, после чего текущий вектор $\overline{s}$ сохраняется в качестве приближения к глобальному максимуму задачи.

Шаг №5. Значение счетчика количества генерации начальных положений $Iter$ увеличивается на единицу. Если значение $Iter$ достигло наперед заданной величины, то работа алгоритма завершается, в противном случае осуществляется переход к Шагу №1.

Задача построения оптимальных покрытий равными кругами. Пусть дано односвязное множество $M \subset D$ с непрерывной границей ∂M. Покрытием $P_n(r)$ множества M из n кругов $C_k(O_k, r)$ радиуса r называется объединение $C_1(O_1,r) \cup C_2(O_2,r) \cup \ldots \cup C_n(O_n,r)$ такое, что

$$\forall k = \overline{1,n}: \; C_k(O_k,r) \subseteq D, O_k \subseteq M, \; P_n \cap M = M. \tag{8}$$

Оптимальным покрытием P_n^* множества M будем называть покрытие, состоящее из кругов минимального радиуса.

Требуется найти такое разбиение M на n сегментов $M_k, k = \overline{1,n}$ и расположение центров покрывающих их кругов $O_k, k = \overline{1,n}$, чтобы радиус последних был минимальным:

$$R_{\min} = \max_{k=\overline{1,n}} \rho\left(O_k, \partial M_k\right) \to \min, \tag{9}$$

где $\rho(O_k, \partial M_k)$ – расстояние от центра O_k круга C_k до замкнутой границы соответствующего сегмента M_k, определяется по формуле (1).

Для решения задачи (8)–(9) предлагается алгоритм, суть которого заключается в последовательном разбиении покрываемого множества на сегменты относительно начального набора центров покрывающих кругов на основе диаграммы Вороного; нахождении наилучшего центра покрывающего круга для каждого сегмента; пересегментации относительно новых центров.

Задачи размещения дополнительных логистических объектов в условиях кооперации и конкуренции. Пусть в точках $B_i(x_i, y_i) \in D$, $i = \overline{1,N}$ располагаются потребители с известным объемом потребления $b_i, i = \overline{1-N}$, а в точках $A_k(x_k, y_k)$, $k = \overline{1,m}$ – обслуживающие их логистические центры (предприятия, склады), при этом каждый потребитель входит в логистическую зону обслуживания того центра, товар из которого может быть доставлен за наименьшее время.

Необходимо определить расположение $Q_j(x_j, y_j), j = \overline{1,M}$ новых центров, которые являются конкурентами для существующих (но не конкурируют между собой), обеспечивающее захват максимально возможной доли рынка.

Обозначим $T_{i,k} = T_i(A_k) = \rho(B_i, A_k)$ и $T_{i,m+j} = T_i(Q_j) = \rho(B_i, Q_j)$ – минимальное время доставки товара потребителю B_i со складов A_k либо Q_j соответственно, вычисляющееся по формуле (1), причем $i = \overline{1,N}$, $k = \overline{1,m}$, $j = \overline{1,M}$. В этом случае минимально возможное время доставки товара до i–го потребителя определяется как $T_i = \min\limits_{1 \le p \le m+M} T_{i,p}$, и он входит в логистическую зону предприятия $\hat{p} = \arg\min\limits_{1 \le p \le m+M} T_{i,p}$.

Требуется найти оптимальные расположение дополнительных узлов $Q_j(x_j, y_j), j = \overline{1,M}$ и осуществить новое разбиение множества потребителей на $m+M$ подмножеств, определив номера $I_k = \left\{ i : T_{i,k} \le T_{i,p}, p = \overline{1, m+M} \right\}$ потребителей, обслуживаемых складом $A_k(x_k, y_k)$, $k = \overline{1,m}$, и множество номеров $I_{m+j} = \left\{ i : T_{i,m+j} \le T_{i,p}, p = \overline{1, m+M} \right\}$ потребителей, обслуживаемых складом

$Q_j(x_j, y_j), j=\overline{1,M}$, таким образом, чтобы суммарный объем потребления объединенной логистической зоны $\bigcup_{j=1}^{M} I_{m+j}$ был максимальным:

$$\sum_{j=1}^{M} \sum_{i \in I_{m+j}} b_i \to \max . \qquad (10)$$

Параметрами максимизации здесь являются координаты предприятий Q_j и состав подмножеств потребителей I_k, I_{m+j}.

В случае, когда открытие новых предприятия направлено не на захват рынка, а на повышение качества обслуживания, и, соответственно, они работают в кооперации с существующими, задача примет вид

$$\sum_{k=1}^{m} \sum_{i \in I_k} T_i + \sum_{j=1}^{M} \sum_{i \in I_{m+j}} T_i \to \min . \qquad (11)$$

Для решения задачи о размещении новых предприятий в условиях конкуренции предлагается метод последовательного присоединения с мультистартом.

Для решения задачи о размещении новых предприятия в условиях кооперации предлагается модифицированный метод последовательного улучшения с мультистартом. Идея метода заключается в итеративном улучшении получаемого решения при помощи последовательной сегментации области на логистические зоны обслуживания для каждого предприятия и нахождении оптимального расположения новых складов в соответствующих зонах, при этом расположения существующих предприятий не изменяются. Генерация начальных положений повторяется несколько раз, в результате определяются локальные минимумы, среди которых выбирается наилучший.

Задача оптимизации системы коммуникаций с учетом региональных особенностей. Пусть имеется m объектов $A_1, ..., A_m$, которые необходимо обеспечить коммуникациями (дороги, трубопроводы, линии электропередачи и т.п.), при этом суммарная их стоимость должна быть минимально возможной. Отметим, что стоимость здесь величина условная и может определяться не только длиной ребер, но и, к примеру, временем их преодоления, а также зависеть от выполнения определенных требований, в частности, включать плату за прохождение по определенным участкам. Выделим две подзадачи:

а) отыскание кратчайших маршрутов между всеми объектами – требуется решить серию задач (1), где в качестве точек a и b выступают $A_1, ..., A_m$, перебрав все их сочетания. В результате получим граф $W(U, \Gamma^*)$, в котором $U = \bigcup_{i=\overline{1,m}} A_i$ – множество вершин, а Γ^* – множество ребер, причем для каждого ребра (i,k) однозначно определен его вес $w(i,k) = \rho(A_i, A_k), i,k=\overline{1,m}, i \neq k$;

б) построение минимального остовного дерева – нахождение такого связного подграфа $M \subset W$, содержащего все вершины, что суммарный вес его ребер минимален

$$w(M) = \sum_{(i,k)\in M} w(i,k) \to \min. \tag{12}$$

Нетрудно видеть, что при $f(x, y) \equiv 1$ в формуле (1) данная задача будет классической задачей о построении минимального остовного дерева.

Для решения задачи (12) предлагается алгоритм построения обобщенного минимального остовного дерева, в результате работы которого за конечное число шагов будет построено кратчайшее дерево, т.е. определено множество кривых, соединяющих заданные точки и доставляющих минимум функционалу (12).

В ряде случаев минимальное остовное дерево можно улучшить за счет введения дополнительных «перекрестков» – точек Штейнера. Иначе говоря, необходимо определить множества дополнительных вершин $B = \bigcup B_j$ и дополнительных ребер B^* такие, что $w(M^*) \le w(M)$, где $M^* \subset W(U \cup B, \Gamma^* \cup B^*)$.

Отметим, что в случае, когда задано ограничение на максимальное число дополнительных «перекрестков», работа алгоритма может быть досрочно завершена, если оно достигнуто.

В результате работы алгоритма будет построено дерево S, которое, по крайней мере, не хуже минимального остовного дерева M, хотя и далеко не всегда является деревом Штейнера. Однако указанное обстоятельство компенсируется тем, что вычислительная трудность алгоритма не превышает $O(m^2)$, где m – число вершин в граф, т.е. предложенный алгоритм находит решение за полиномиальное время.

Задача оптимизации ремонта автомобильных дорог в условиях ограниченного финансирования. Будем предполагать, что в первоочередном ремонте нуждается тот участок дороги, по которому труднее всего проехать, иначе говоря, на котором «концентрация дефектов» является максимальной.

Пусть для некоторого участка дороги $D \subseteq R^2$ построена ограниченная неотрицательная непрерывная функция $f(x,y)$, характеризующая в точке $M(x,y)$ значимость дефекта (например, глубину: чем больше значение функции, тем серьезнее дефект).

Граница участка D состоит из двух параллельных кривых ℓ_1, ℓ_2 равной длины и двух отрезов прямой r_1, r_2, соединяющих соответствующие концы кривых. Полагаем, что кривые ℓ_1, ℓ_2 являются гладкими и заданы параметрически

$$\ell_1 : \begin{cases} x = x_1(t), \\ y = y_1(t), \end{cases} \quad \ell_2 : \begin{cases} x = x_2(t), \\ y = y_2(t), \end{cases} \quad 0 \le t \le T.$$

Дефекты рассматриваются как ограниченные односвязные множества, которые отделены друг от друга неповрежденными участками. Стоимость их ремонта считаем пропорциональной объему необходимых для этого работ: если имеется дефект H_i, то его устранение обойдется в $\int\limits_{H_i} f(x,y)\,dxdy$ условных рублей.

При бюджете C требуется найти участок дороги $D^* = D(t_*, t^*)$, стоимость ремонта которого равна C, и который имеет минимальную длину, т.е. решить следующую задачу условной минимизации:

$$\int\limits_{D^*} f(x,y)dxdy = M, \quad \int\limits_{t_*}^{t^*} \sqrt{(x')^2 + (y')^2}\,dt \to \min_{t_*, t^*}.$$

В главе 3 представлено описание разработанного программного обеспечения. Первая программная система – Интеллектуальная информационная система (ИИС) – предназначена для поддержки исследований в области транспортной логистики. Вторая – система «ОТЛП» – включает разработанные в диссертации модели и методы. ОТЛП включается в ИИС как отдельный модуль.

Основным управляющим компонентом ИИС является экспертная система (ЭС), использование которой позволяет в интерактивном режиме осуществлять выбор методов и средств, подходящих для решения конкретных задач. При этом для используемых в рамках ИИС модулей, методов и программных средств, реализующих необходимые вычисления, созданы формализованные описания, представленные в базе знаний фреймового типа. Кроме того, реализованы модули импорта концептуальной модели во внутренние структуры данных; редактирования информации об объектах инфраструктурной логистики; настройки ЭС; формирования базового сценариев исследования; преобразования выбранного базового сценария в текст базы знаний; анализа сценария с использованием системной базы знаний и интерактивного диалога с пользователем.

Архитектура программной системы «ОТЛП» показана на рис. 2.

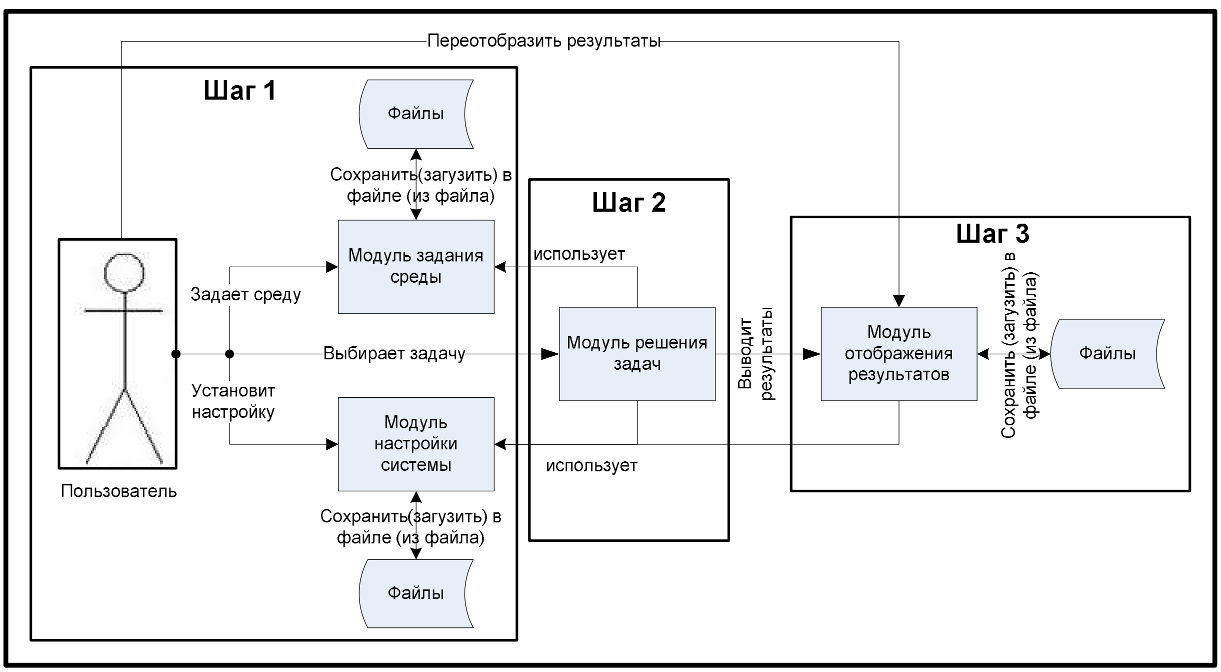

Рис. 2. Общая архитектура программной системы для решения задачи оптимизации ТЛС

Модуль «Задание среды» предназначен для работы с функцией среды $f(x,y)$. Задать значения функции $f(x,y)$ можно в специальной таблице или загрузив их из Excel-файла. Модуль «Волна» предназначен для реализации распространения световой волны в заданной среде и хранения списка волн, выпущенных из различных источников. Модуль «Решение задач» реализует алгоритмы, основанные на распространении световой волны как из точечного источника, так и с замкнутой кривой. Модуль «Отображение результатов» предназначен для построения двухмерных и трехмерных изображений результатов вычислений.

В главе 4 представлены решения модельных примеров с использованием предложенных алгоритмов: построения оптимальных упаковок равных кругов; построения оптимальных покрытий равными кругами; оптимального размещения логистических объектов в условиях кооперации и конкуренции; оптимизации ремонта автомобильных дорог в условиях ограниченного финансирования; оптимизации системы коммуникаций с учетом особенностей рельефа местности.

Кроме того, представлены результаты решения прикладных задач: определение оптимального расположения дополнительных больниц в условиях кооперации и конкуренции в районе Нам Дан (провинции Нге Ан, Вьетнам; построение системы автобусных маршрутов между коммунами в районе Нам Дан; определение оптимального расположения заданного количества радиолокационных станцией с наименьшей мощностью, покрывающих г. Ханой, Вьетнам.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Предложена многоэтапная технология исследования.
2. Задачи оптимального размещения инфраструктурных логистических объектов сведены к специальным модификациям двух известных математических задач: об упаковке равных кругов и покрытии равными кругами ограниченных множеств в двумерных метрических пространствах с неевклидовыми метриками.
3. Для построения оптимальных упаковок равных кругов и покрытий равными кругами многосвязных множеств в неевклидовой метрике созданы новые вычислительные алгоритмы.
4. На основе оригинальных модификаций оптико-геометрического подхода разработаны вычислительные алгоритмы для решения задач об оптимальном размещении дополнительных логистических центров в условиях кооперации и конкуренции, об организации системы коммуникаций с учетом региональных особенностей, об оптимизации ремонта автомобильных дорог в условиях ограниченного бюджета.
5. Создана и интегрирована в ИИС программная система «ОТЛП», в основу которой положены численные алгоритмы, разработанные в рамках диссертационного исследования.
6. Проведена экспериментальная проверка на ряде модельных и прикладных задач программной системы «ОТЛП». Решены следующие задачи: найдено оптимальное расположение дополнительных больниц в районе Нам Дан (провинции Нге Ан, Вьетнам) в условиях кооперации и конкуренции; установлено оптимальное расположение заданного количества радиолокационных станций с наименьшей мощностью, покрывающих г. Ханой; построена система автобусных маршрутов между населенными пунктами в районе Нам Дан минимальной суммарной длины.

Основные результаты опубликованы в следующих работах:

Издания, входящие в Перечень ВАК РФ:

1. **Нгуен Г.Л.** Оптимизация системы коммуникаций с учетом региональных особенностей: математическая модель и численный метод / Г.Л. Нгуен, А.Л. Казаков, А.А. Лемперт // Вестник Иркутского гос. технического ун-та. – 2014. – № 12 (95). – С. 17–22.
2. **Нгуен Г.Л.** Об одном алгоритме построения упаковки конгруэнтных кругов в неодносвязное множество с неевклидовой метрикой / Г.Л. Нгуен, А.Л. Казаков, А.А. Лемперт // Вычислительные методы и программирование. – 2016. – Т.17. – С. 177–188.
3. **Нгуен Г.Л.** Алгоритм построения оптимальных покрытий равными кругами невыпуклых многоугольников с неевклидовой метрикой / Г.Л. Нгуен, А.Л. Казаков, А.А. Лемперт // Вестник Иркутского гос. технического ун-та. – 2016. – № 5 (112). – С. 45–55.

Издания, включенные в РИНЦ:

4. **Нгуен Г.Л.** Информационная система поддержки исследований в инфраструктурной логистике / Г.Л. Нгуен, А.Б. Столбов // Программные системы: Теория и приложения. – 2015. – № 3 (26). – С. 3–20.

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ:

5. **Нгуен Г.Л.** Программный модуль оптимального размещения логистических центров / Г.Л. Нгуен, А.Л. Казаков, А.А. Лемперт // Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ. № 2015616554 от 15 июня 2015 г. М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности. 2015.
6. **Нгуен Г.Л.** Программный модуль построения оптимальных покрытий и упаковок в оптически неоднородной среде / Г.Л. Нгуен, А.Л. Казаков, А.А. Лемперт // Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ. № 2016614997 от 13 мая 2016 г. М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности. 2016.

Прочие издания:

7. **Нгуен Г.Л.** Интеллектуальная информационная система поддержки комплексных исследований транспортных процессов и объектов / Г.Л. Нгуен, А.Л. Казаков, А.А. Лемперт, А.Б. Столбов // Информ. и матем. технологии в науке и управлении. Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2014. – Т. 3. – С. 57–61.
8. **Нгуен Г.Л.** Программная система поддержки исследований в инфраструктурной логистике на основе знаний / Г.Л. Нгуен, А.Б. Столбов // Информ. и матем. технологии в науке и управлении. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2015. Т. 3. С. 159–166.
9. **Нгуен Г.Л.** Оптимизация размещения дополнительных логистических центров в условиях конкуренции и кооперации / Г.Л. Нгуен, А.Л. Казаков, А.А. Лемперт, В.Н. Фам // Журнал по науке и технике (Journal of Science and Technology). – Ханой: ГТУ им Ле Куй Дона, 2015. – №. 171. – С. 20–31.
10. **Нгуен Г.Л.** О подходе к формализации знаний в транспортной предметной области / Г.Л. Нгуен, А.Б. Столбов // Винеровские чтения 2014. Материалы Всерос. молодежной научно-практ. конф. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ,

2014. – С. 9–11.

11. **Нгуен Г.Л.** О задаче размещения логистических объектов в условиях взаимодействия с существующими / Г.Л. Нгуен // Винеровские чтения 2015. Материалы Всерос. молодежной научно-практ. конф. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2015. – С. 48–49.

12. **Нгуен Г.Л.** Построение оптимальных покрытий и упаковок с неевклидовой метрикой с приложением к задачам логистики / Г.Л. Нгуен, А.Л. Казаков, А.А. Лемперт // Материалы 8-й Всероссийской мультиконференции по проблемам управления. Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2015. – Т. 1. – С. 186–188.

13. **Нгуен Г.Л.** Построение оптимальных упаковок для компактных множеств в неевклидовой метрике / Г.Л. Нгуен, А.Л. Казаков, А.А. Лемперт // Тезисы Российско-монгольской конф. молодых ученых по матем. моделированию, вычисл.-информ. технологиям и управлению. Иркутск–Ханх: Изд-во ИДСТУ СО РАН, 2015. – С. 47.

14. **Нгуен Г.Л.** О задаче оптимального размещения логистических центров в неравномерно заселенной области / Г.Л. Нгуен // Материалы XVI Всерос. конф. молодых ученых по матем. моделированию и информ. технологиям. Новосибирск: ИВТ СО РАН, 2015. – С. 44–45.

15. **Нгуен Г.Л.** On an optimal packing problem of the equal circles in non-simply set / H.L. Nguyen, A.L. Kazakov, A.A. Lempert // Proceedings and program of the international Workshop «Contingency management, intelligent, agent–based computing and cyber security in critical infrastructures». Irkutsk, 2016. – P. 32–34.

Подписано в печать 26.09.2016. Формат 60 х 90 / 16.
Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 1,0.
Тираж 100 экз. Зак. 228. Поз. плана 8н.

Отпечатано в типографии издательства
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный
исследовательский технический университет»
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83