

На правах рукописи



Малютин Олег Сергеевич

**ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ
ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО ОБОСНОВАНИЮ ДИСЛОКАЦИИ
ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ ПОЖАРНОЙ ОХРАНЫ В ГОРОДСКОЙ СРЕДЕ
НА ОСНОВЕ ГИБРИДНЫХ ЭВРИСТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ**

2.3.4. Управление в организационных системах
(технические науки)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Хабибулин Ренат Шамильевич

Официальные оппоненты: **Ничепорчук Валерий Васильевич**
доктор технических наук, ФИЦ КНЦ СО РАН,
отдел прикладной информатики Института
вычислительного моделирования Сибирского
отделения Российской академии наук –
обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО
РАН, старший научный сотрудник

Никишов Сергей Николаевич
кандидат технических наук, доцент ФГБОУ ВО
Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС
МЧС России, Кафедра пожарной тактики и основ
аварийно-спасательных и других неотложных
работ в составе УНК «Пожаротушение»,
начальник

Ведущая организация: ФГБУ «Всероссийский ордена «Знак Почета»
научно-исследовательский институт
противопожарной обороны МЧС России»

Защита диссертации состоится «24» сентября 2025 года в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 04.2.002.01, созданного на базе Академии ГПС МЧС России по адресу: 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Академии ГПС МЧС России и на сайте:

<https://academygps.ru/upload/iblock/6ad/q5bqo1tejav8718f7qmbsuvt0lwg13vr/Диссертация%20Малютина%20О.С..pdf>

Автореферат разослан «3» июля 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент

Р.Ш. Хабибулин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Актуальность работы продиктована практическими соображениями снижения человеческих и материальных потерь от пожаров за счет уменьшения времени реагирования подразделений пожарной охраны. Размещение подразделений пожарной охраны в оптимальных местах дислокации позволит эффективно минимизировать время их прибытия к месту пожара и таким образом повышать защищенность населения, что будет способствовать соблюдению требований статьи 76 Федерального закона от 22.07.2008 г. №123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности».

Важность создания информационно-аналитических систем поддержки принятия решений по обоснованию дислокации подразделений пожарной охраны в городской среде диктуется как нормативными источниками, так и статистическими данными. Так, в Российской Федерации за период с 2010 по 2020 год доля пожаров, на которых соблюдаются требования по времени прибытия первого пожарного подразделения, составила 91% для городов и 89% для сельской местности. При этом 91% погибших в городах и 53% в сельской местности приходится на пожары, на которых время прибытия пожарных подразделений удовлетворяет требованиям законодательства.

Развитие вычислительных технологий компьютерного моделирования позволяет решать задачи многофакторной оптимизации мест дислокации подразделений пожарной охраны с использованием методов сетевого и пространственного анализа на основе данных о городской застройке и топологии улично-дорожной сети.

Реализация моделей и алгоритмов поддержки принятия решений, в виде специализированного программного обеспечения для ЭВМ, позволило бы существенно повысить эффективность организационного проектирования подразделений пожарной охраны, а также создать единую исследовательскую программную платформу для дальнейшего совершенствования таких моделей и алгоритмов.

Таким образом, актуальность исследования определяется необходимостью развития современных научно-обоснованных инструментов поддержки принятия решений по обоснованию дислокации подразделений пожарной охраны в городской среде на основе гибридных эвристических алгоритмов.

Степень разработанности темы. Проблемам, возникающим при выборе места дислокации для вновь создаваемых подразделений пожарной охраны, посвящено значительное количество исследований, результаты которых имеют важное значение для построения фундаментальных основ организационного проектирования подразделений пожарной охраны в крупных городах.

В части решения вопросов обоснования количества и дислокации подразделений пожарной охраны большой вклад внесли работы Н.Н. Брушлинского, С.В. Соколова, А.Н. Денисова, Е.М. Алехина, Ю.И. Коломиеца, Б.М. Пранова, А.В. Матюшина, А.А. Порошина, А.А. Кондашова, Ю.А. Матюшина, Е.Ю. Удавцова, В.В. Харина, Е.В. Бобринева, В.А. Маштакова, М.В. Буйневича, М.Т. Пелеха, А.В. Максимова, А.В. Вострых, А.А. Таранцева, М.В. Сибирякова, П.Ф. Барышева, П.А. Матюшева, Чарльза Ревелля, Роджера Черча.

В части разработки моделей и алгоритмов оптимизации необходимо отметить исследования Л.А. Гладкова, В.М. Курейчик, В.В. Курейчик, С.И. Родзина, Джоффа Боинга, Пола Вирсански, А.П. Карпенко, Стюарта Киркпатрика, а также многих других специалистов из России, Китая, США, Польши, Ирана, Ирака, Бразилии и Турции.

Объектом исследования является система организационного проектирования пожарно-спасательных гарнизонов.

Предмет исследования – информационно-аналитическое обеспечение поддержки принятия решений по обоснованию мест размещения подразделений пожарной охраны в городской среде.

Цель диссертационной работы – совершенствование системы организационного проектирования пожарно-спасательных гарнизонов на основе разработки информационно-аналитического обеспечения поддержки принятия решений по обоснованию мест дислокации подразделений пожарной охраны в городской среде.

Для достижения данной цели были поставлены следующие **научные задачи исследования**:

1. Провести анализ существующих проблем поддержки принятия решений по обоснованию дислокации подразделений пожарной охраны.

2. Проанализировать и выявить наиболее значимые факторы, влияющие на обоснование дислокации подразделений пожарной охраны.

3. Проанализировать существующие методы и алгоритмы решения задач оптимизации размещения, выявить наиболее пригодные с точки зрения реализации в информационно-аналитической системе поддержки принятия решений по обоснованию дислокации подразделений пожарной охраны в городской среде и разработать методы их гибридизации.

4. Разработать информационно-аналитическую систему поддержки принятия решений по обоснованию дислокации подразделений пожарной охраны в городской среде.

5. Разработать алгоритм поддержки принятия решений по обоснованию дислокации подразделений пожарной охраны в городской среде с использованием информационно-аналитической системы на основе гибридных эвристических алгоритмов.

Научная новизна работы заключается в том, что в ней впервые получены следующие научные результаты:

1. Разработаны модели и алгоритмы поддержки принятия решений по обоснованию мест размещения пожарно-спасательных подразделений (пожарных депо) в городской среде, отличительной особенностью которых является применение комплекса эвристических алгоритмов, основанных на технологиях машинного обучения.

2. Разработана архитектура, информационное и специализированное программное обеспечение информационно-аналитической системы поддержки принятия решений по обоснованию мест размещения пожарно-спасательных подразделений (пожарных депо) в городской среде, отличительной особенностью которой является применение модульной архитектуры позволяющей гибко реализовывать, гибридизировать и настраивать гиперпараметры эвристических алгоритмов.

Теоретическая значимость исследования обоснована развитием алгоритмического, информационного и программного обеспечения для систем управления и поддержки принятия решений при проектировании деятельности пожарно-спасательных гарнизонов по ликвидации пожаров и чрезвычайных ситуаций в городах на основе новых информационных технологий.

Практическая значимость. Практическая значимость исследования заключается в том, что его теоретические положения реализованы в виде информационно-аналитической системы поддержки принятия решений по обоснованию дислокации подразделений пожарной охраны в городской среде на основе гибридных эвристических алгоритмов. Практическая значимость работы подтверждается внедрением результатов исследования при планировании и организации работы по оптимальному распределению (размещению) группировки подразделений противопожарной службы Государственной противопожарной службы для тушения пожаров в населенных пунктах на территории субъектов Российской Федерации.

Методология и методы исследования. Для решения задач исследования применялась методология теории управления организационными системами, применительно к деятельности пожарно-спасательных гарнизонов и методология процессов информатизации систем управления и принятия решений. В качестве методов исследования применены методы машинного обучения, теории алгоритмов, теории вероятностей, математической статистики, а также пространственного анализа и оптимизации, сетевого анализа, теории графов.

Положения, выносимые на защиту.

1. Гибридные эвристические алгоритмы поддержки принятия решений по обоснованию дислокации подразделений пожарной охраны в городской

среде, полученные с использованием адаптированных подходов ансамблирования характерных для методов машинного обучения.

2. Информационно-аналитическая система поддержки принятия решений по обоснованию дислокации подразделений пожарной охраны в городской среде на основе гибридных эвристических алгоритмов.

3. Алгоритм поддержки принятия решений по обоснованию дислокации подразделений пожарной охраны в городской среде с использованием информационно-аналитической системы на основе гибридных эвристических алгоритмов.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались на международных научно-технических конференциях: Актуальные проблемы пожарной безопасности: материалы XXXV Международной научно-практической конференции, Москва, 31 мая 2023 года; «Академия государственной противопожарной службы МЧС России: теория. инновации. практика», посвященная 90-летию со дня образования Академии ГПС МЧС России, 19 октября 2023 г; 32-я международная научно-техническая конференция «Системы безопасности – 2023», 30 ноября 2023 г. Москва; XII Международная научно-практическая конференция «Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте» (ИММВ-2024), 14-17 мая 2024 г., Коломна; VII Всероссийская Поспеловская конференция «Гибридные и синергетические интеллектуальные системы», 3-7 июня 2023, Зеленоградск; XXXII Всероссийский семинар «Нейроинформатика, ее приложения и анализ данных», 27 сентября 2024, ИВМ СО РАН, Красноярск; 6th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, November, 13-15 2024 | Lipetsk, Russia.

Публикации. Опубликовано 12 научных работ, из них 5 – в изданиях, рекомендованных ВАК, 1 – в изданиях, входящих в международную систему цитирования (Scopus), 6 – в материалах научно-практических конференций, получено 2 свидетельства Роспатента о государственной регистрации баз данных и программы для ЭВМ.

Личный вклад автора. В совместных публикациях результаты, связанные с разработкой информационно-аналитической системы поддержки принятия решений по обоснованию дислокации подразделений пожарной охраны, получены автором лично. Специализированное программное обеспечение разработано в соавторстве с Хабибулиным Р.Ш., Матеровым Е.Н., Бабенышевым С.В., Батуро А.Н., Сергеевым И.Ю. и является неделимым.

Внедрение результатов работы. Результаты диссертационной работы внедрены в:

– Академии Государственной противопожарной службы МЧС России в учебно-методические материалы по дисциплинам «Системы поддержки принятия решений», «Моделирование процессов и систем» преподаваемым на

факультете пожарной и техносферной безопасности по направлению подготовки 09.03.02 Информационные системы и технологии (уровень бакалавриата);

– Сибирской пожарно-спасательной академии Государственной противопожарной службы МЧС России при подготовке учебно-методических материалов, по дисциплине «Управление силами и средствами на месте пожара и ЧС» специальность 20.04.01 «Техносферная безопасность, профиль Пожарная безопасность»;

– Главном управлении МЧС России по Красноярскому краю при определении наиболее эффективных мест размещения и количества подразделений НПС на территории города Красноярска;

– 1 ПСО ФПС ГПС Главного управления МЧС России по Ханты-Мансийскому округу – Югре при проведении расчета количества и технической оснащённости подразделений пожарной охраны, создаваемых для тушения пожаров и проведения аварийно-спасательных работ на территории города Сургута.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы составляет 188 страниц. Работа иллюстрирована 60 рисунками, содержит 27 таблиц, 3 приложения. Список литературы включает в себя 163 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, определены цель, задачи, объект и предмет исследования. Показана научная новизна работы, ее теоретическая и практическая значимость. Представлены положения, выносимые на защиту, и сведения о внедрении и апробации результатов исследования.

Первая глава диссертационной работы носит обзорный характер и посвящена введению в проблемную область исследования.

На основе анализа нормативно-правовых документов составлен обзор основных законодательно закрепленных требований в области оценки количества и дислокации подразделений пожарной охраны, действующих в настоящее время в Российской Федерации. Согласно действующему законодательству ключевым фактором, который следует учитывать при определении оптимальных мест дислокации подразделений пожарной охраны является время прибытия первого подразделения пожарной охраны. В соответствии со статьей 76 Федерального закона от 22.07.2008 №123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» подразделения пожарной охраны следует размещать таким образом, чтобы время прибытия первого подразделения пожарной охраны составляло не менее 10 минут для городских населенных пунктов и не менее 20 минут для сельских.

Корреляционный анализ статистических данных реагирования подразделений пожарной охраны, проведенный на основе данных о 2 359 434 пожарах, произошедших в Российской Федерации за период с 2010 по 2020 годы (рисунок 1), показал наличие корреляции в диапазоне от 0,37 до 0,55 между временем прибытия первого подразделения пожарной охраны и такими показателями, как средняя площадь пожара, доля пожаров, время прибытия для которых удовлетворяет требованиям статьи 76 ФЗ-123, количеством подразделений пожарной охраны, приходящихся на 1000 человек (коэффициент корреляции -0,48), и количеством населенных пунктов, приходящихся на одно подразделение пожарной охраны (коэффициент 0,55).

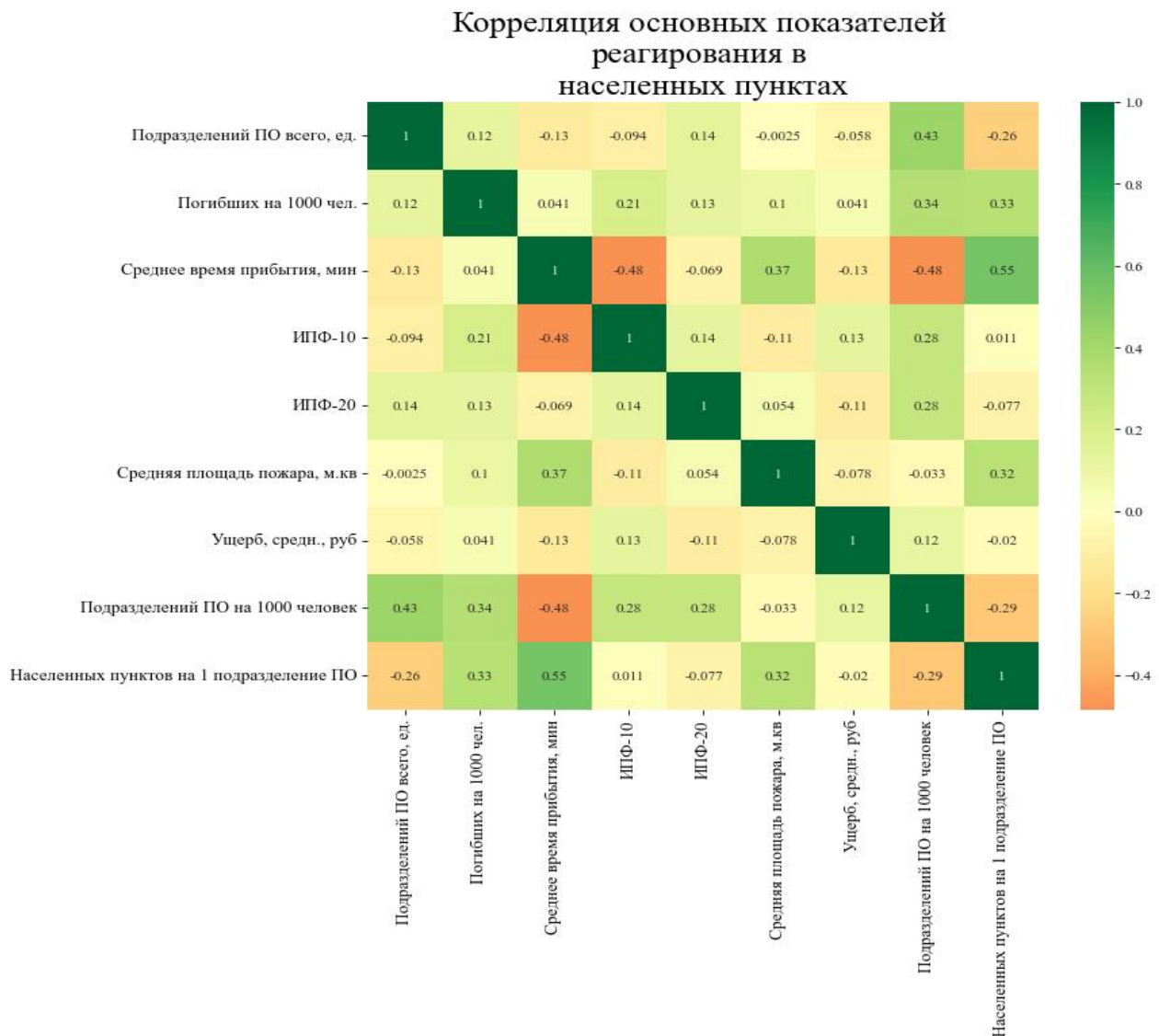


Рисунок 1 – Матрица корреляции основных параметров пожаров
в субъектах РФ за 2010 - 2020 годы

Статистический анализ показал, что доля пожаров, на которых соблюдаются требования по времени прибытия первого пожарного подразделения, составила 91% для городов и 89% для сельской местности. При

этом 91% погибших в городах и 53% в сельской местности приходится на пожары, на которых время прибытия пожарных подразделений удовлетворяло требованиям законодательства.

Составлен литературный обзор, который показал, что модели и алгоритмы пространственной оптимизации подразделений пожарной охраны, используемые в России, можно разделить на следующие блоки: математическое моделирование (32% от общего количества рассмотренных отечественных публикаций), статистический анализ (19%), имитационное моделирование (17%), прочие методы (32%). При этом лишь в двух публикациях (4%) упоминается применение методов машинного обучения.

Общими чертами зарубежных подходов является стремление использовать модели многофакторной оптимизации (75% от общего количества рассмотренных зарубежных публикаций), применение современных ГИС (52%) и моделей пространственного анализа (35%), а также использование публичных (45%) и закрытых наборов пространственных данных (21%).

Проведен анализ информационных технологий в области размещения подразделений пожарной охраны, позволивший сделать вывод, что существует возможность их совершенствования за счет применения современных информационных технологий.

Формализована проблематика совершенствования системы организационного проектирования пожарно-спасательных гарнизонов, за счет развития информационно-аналитического обеспечения поддержки принятия решений по обоснованию мест размещения пожарно-спасательных подразделений (пожарных депо) в городской среде.

Во второй главе диссертационной работы проводится анализ факторов, оказывающих влияние на выбор оптимального размещения подразделений пожарной охраны. Предлагается комплекс моделей оценки факторов, влияющих на выбор оптимального места дислокации подразделений пожарной охраны, а также модель оценки параметров реагирования подразделений пожарной охраны.

Дается описание системы реагирования подразделений пожарной охраны, позволяющее сделать вывод, что рассматривать задачу определения оптимального размещения подразделений пожарной охраны следует с позиций дифференциации характера застройки населенных пунктов и топологии улично-дорожной сети.

Составлен перечень факторов, оказывающих влияние на выбор оптимального размещения подразделений пожарной охраны, которые могут быть исследованы на основе статистических сведений о реагировании подразделений пожарной охраны: скорость следования пожарных автомобилей по дорогам различного класса, вероятности возникновения пожаров и степень тяжести последствий от них в зданиях различного назначения (рисунок 2).

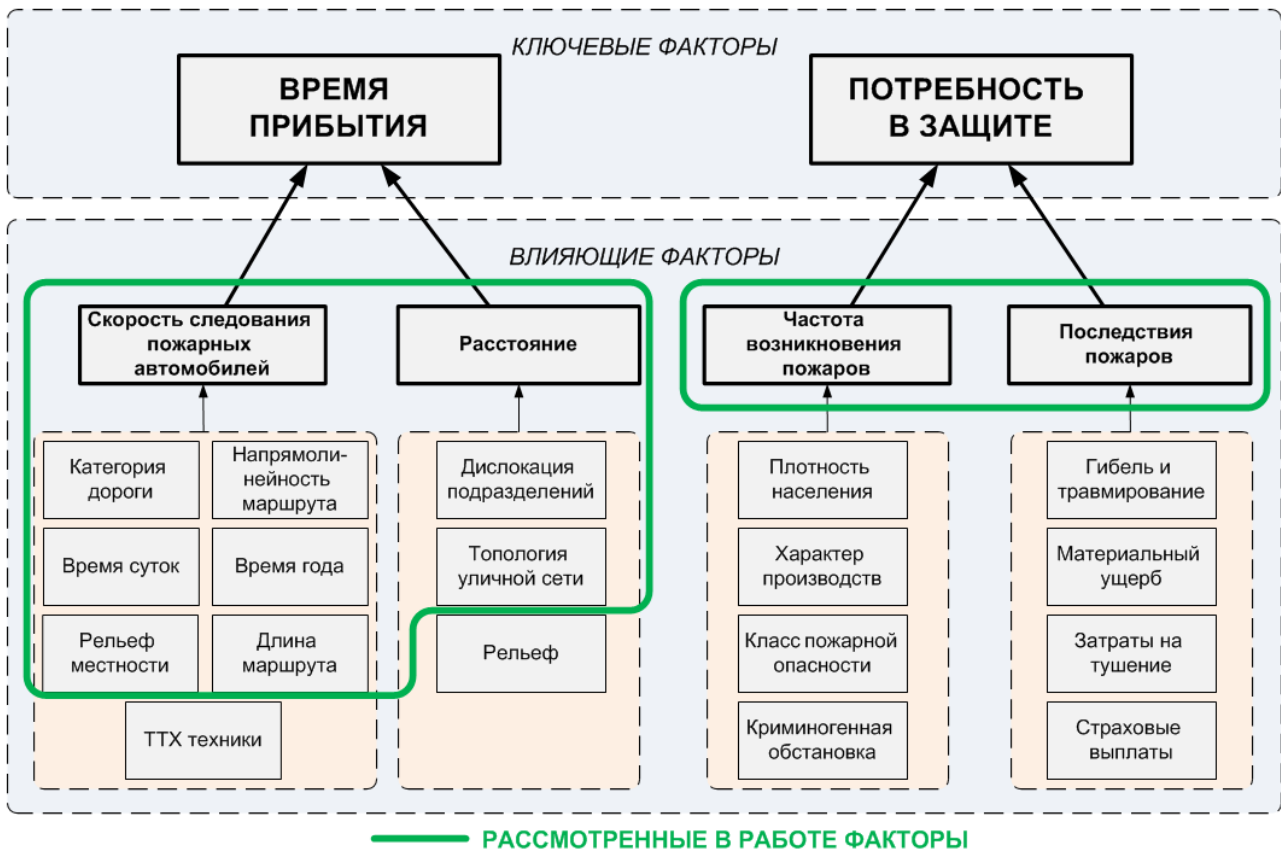


Рисунок 2 – Факторы, оказывающие влияние на выбор оптимальной дислокации подразделений пожарной охраны

Описываются исходные данные, использованные в работе, и методы их предварительной подготовки. В качестве источника сведений о пожарах, произошедших на территории России, использованы сведения из БД «Пожары» за период 2010-2020 годы.

Для оценки скоростей следования пожарных автомобилей по разным классам дорог использован набор данных о выездах пожарных автомобилей в городе Новосибирске за период 2010-2020 годы.

Разработан комплекс математических моделей оценки факторов, оказывающих влияние на выбор оптимального места дислокации подразделений пожарной охраны, включающий:

- модель оценки скоростей следования пожарных автомобилей по дорогам разных категорий;
- модель оценки частоты возникновения пожаров на объектах различного назначения;
- модель оценки последствий от пожаров в зданиях различного назначения;
- модель оценки потребности в защите зданий населенных пунктов.

Модель оценки скоростей следования пожарных автомобилей по дорогам разных категорий имеет вид:

$$t_{\text{сл}} = \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{u_i} = \frac{l_1}{k * u_1} + \frac{l_2}{k * u_2} + \dots + \frac{l_n}{k * u_n} \quad (1)$$

где l_i – протяженность дорог i -го типа, u_i – скорость следования по i -му типу дорог, k – корректирующий коэффициент скорости следования ПА в зависимости от параметров следования (протяженность маршрута, время года и суток, непрямолинейность маршрута, перепады высот).

В результате решения регрессионной задачи по определению коэффициентов u_i и k с использованием генетического алгоритма и алгоритма имитации отжига определено, что наибольшее влияние на время прибытия подразделений пожарной охраны к месту вызова оказывают различия в скорости следования по дорогам разных категорий. Получены результаты моделирования скоростей следования пожарных автомобилей по разным категориям дорог (рисунок 3), которые используются в дальнейших исследованиях и при разработке специализированного программного обеспечения.



Рисунок 3 – Результаты моделирования скоростей следования пожарных автомобилей по разным категориям дорог в городе Новосибирск с января 2016 г. по сентябрь 2020 г.

С использованием оценки ядерной плотности (*KDE* - от англ. *Kernel Density Estimation*) проведен сравнительный анализ тепловых карт фактической и ожидаемой плотностей возникновения пожаров в соответствии с данными о частотах пожаров утвержденными приказом МЧС России от 14 ноября 2022 г. № 1140 «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и пожарных отсеках различных классов

функциональной пожарной опасности». Установлено, что распределение плотностей пожаров носит закономерный характер, связанный с характером и плотностью застройки города. Наибольшая плотность пожаров наблюдается в районах многоэтажной жилой застройки. Также высокая плотность наблюдается в районах одноэтажной жилой застройки. Низкая плотность пожаров отмечается в районах с низкой плотностью или отсутствием застройки (рисунок 4).

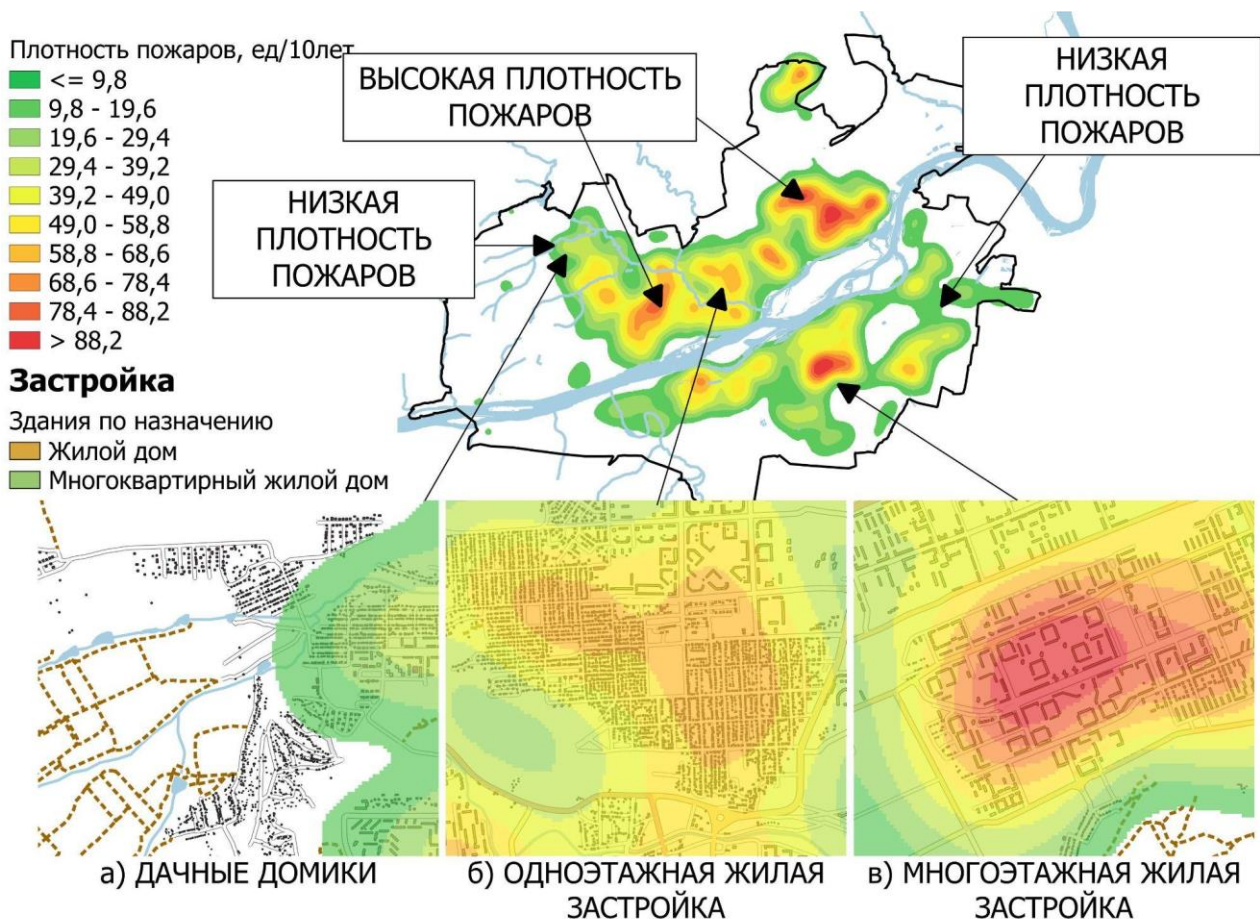


Рисунок 4 – Распределение плотностей возникновения пожаров на территории города Красноярска в период 2010-2020 гг.

Предложена модель оценки частот возникновения пожаров в зданиях разных классов на основе регрессионного анализа плотности мест возникновения пожаров. Основная идея модели заключается в сравнении тепловой карты плотностей реальных пожаров с тепловой картой ожидаемых пожаров, полученных исходя из взвешенных по частотам возникновения пожаров точек зданий различного назначения и подборе с использованием генетического алгоритма и алгоритма имитации отжига таких частот, при которых эта разница будет минимальна.

Задача частного исследования ставилась следующим образом: требуется найти такую классификацию зданий C и частоты возникновения пожаров в каждом из классов $p_{\text{кл}}$, при которых значение некоторой функции ошибки err между фактической P_{ϕ} и ожидаемой P_o плотностями пожаров, нормализованных к диапазону $(0:1)$, в некотором множестве контрольных точек I , выбранных в пространстве S территории населенного пункта, будет минимальна:

$$P_{\phi} = \{p_{\phi 1}, p_{\phi i}\}, i \in I \quad (2)$$

$$P_o = \{p_{o 1}, p_{o i}\}, i \in I \quad (3)$$

$$err(P_{\phi}, P_o) \rightarrow \min \quad (4)$$

Для определения значений плотности пожаров в контрольных точках I был использован KDE. Тогда фактическая плотность возникновения пожара в любой i -й точке будет:

$$p_{\phi i} = KDE(i, F), i \in I \quad (5)$$

где F – точки возникновения пожаров.

А ожидаемая плотность пожаров в каждой точке:

$$p_{o i} = KDE(i, J, P_{\text{зд}}) \quad (6)$$

$$P_{\text{зд}} = \{p_{\text{зд} 1}, p_{\text{зд} j}\}, j \in J \quad (7)$$

$$p_{\text{зд} j} = p_{\text{кл}}(c_j), c_j \in C \quad (8)$$

где J – точки центров зданий; $P_{\text{зд}}$ – частоты возникновения пожаров в каждом из j -х зданий; c_j – класс j -го здания; C – множество возможных классов зданий; $p_{\text{кл}}$ – вероятность возникновения пожара в каждом из C классов зданий.

В результате применения модели к сведениям о пожарах в городе Красноярске получены значения частот возникновения пожаров на объектах различных классов функциональной пожарной опасности (далее – КФПО), которые используются в дальнейших исследованиях и при разработке специализированного программного обеспечения.

Предложена модель оценки последствий от пожаров:

$$w_{3i} = N'_{\text{гиб } i} + N'_{\text{травм } i} + N'_{\text{тех } i} \quad (9)$$

где $N'_{\text{гиб } i}$ – нормализованное значение количества погибших при пожарах людей для i -го класса объектов в диапазоне $[0:\max(N_{\text{гиб}})]$; $N'_{\text{травм } i}$ – нормализованное значение количества травмированных при пожарах людей для i -го класса объектов в диапазоне $[0:\max(N'_{\text{травм } i})]$; $N'_{\text{тех } i}$ – нормализованное значение количества привлеченной к тушению пожара техники для i -го класса объектов в диапазоне $[0:\max(N_{\text{тех}})]$.

В результате применения модели к сведениям о пожарах в РФ получены значения размера последствий для зданий различных КФПО, которые используются в дальнейших исследованиях и при разработке специализированного программного обеспечения.

Предложена модель оценки потребности в защите от пожаров зданий населенных пунктов:

$$M_{\text{спр}} = \frac{\sum_j^J w_j \cdot p_{\text{зд}j}}{\sum_i^I w_i \cdot p_{\text{зд}i}} \quad (10)$$

где I – множество зданий в рассматриваемом населенном пункте; $J \in I$ – множество зданий, для которых $t_{\text{сл}} \leq T$; $t_{\text{сл}}$ – время следования из ближайшего подразделения пожарной охраны к зданию, мин; T – пороговое значение времени прибытия в соответствии со статьей 76 123-ФЗ, мин; w_i, w_j – оценочный коэффициент последствий от пожаров в i -м здании, оценочный коэффициент последствий от пожаров в j -м здании; $p_{\text{зд}i}, p_{\text{зд}j}$ – частота возникновения пожаров i -м здании, частота возникновения пожаров j -м здании, пож/год.

Третья глава диссертационной работы посвящена описанию процесса разработки гибридных эвристических алгоритмов определения необходимого количества подразделений пожарной охраны и оптимальных мест их дислокации.

Приводится классификация и теоретическое обоснование эвристических алгоритмов пространственной оптимизации. Предложена иерархия задач пространственной оптимизации, опирающаяся на различия в подходах к определению различного количества подразделений и задач: определения наилучшей дислокации единственного подразделения (*BLP* – от англ. *Best Location Problem*), задача максимального покрытия (*MCLP* – от англ. *Maximal Covering Location Problem*), задача размещения, т.е. покрытие минимальным количеством максимальной территории (*LSCP* – от англ. *Location Set Covering Problem*, проблема размещения для заданного покрытия). Описаны разработанные гибридные эвристические алгоритмы оптимизации размещения подразделений пожарной охраны на территории населенных пунктов.

В качестве частных алгоритмов рассмотрен ряд биоэвристик и их гибридов и проведено компьютерное моделирование с целью оценки их применимости для поставленных задач (таблица 1). Моделирование проводилась на графах районов города Красноярска, для каждого из которых проведена серия вычислительных экспериментов решения задач оптимизации размещения единственного подразделения, размещения множества подразделений и покрытия минимальным количеством максимальной территории. С использованием каждого алгоритма проведено по три вычислительных эксперимента по определению требуемого количества и оптимального размещения подразделений пожарной охраны.

Таблица 1 – Оценка применимости эвристических алгоритмов к решению задач пространственной оптимизации размещения подразделений пожарной охраны

Алгоритм	Задача пространственной оптимизации		
	<i>BLP</i>	<i>MCLP</i>	<i>LSCP</i>
Скалолаз	+	-	-
Пулеметный подъем	++	-	-
Обезьяний поиск	+++	-	-
Пчелиной колонии	+++	-	-
Скалолаз + Поиск по центру диаметра графа	+	-	-
Обезьяний поиск + Поиск по центру диаметра графа	+++	-	-
Имитация отжига	+	+	-
Генетический алгоритм	-	++	-
Генезис	-	++	++
Генетический алгоритм + Генезис	-	+++	+++
Жадное добавление	++	++	++

Алгоритм скалолаза продемонстрировал скорость работы в 200 раз выше, чем полный перебор, при точности 85,9%. Алгоритм обезьяньего поиска продемонстрировал среднюю точность 94,2% при временных затратах в 6,1 раз меньше, чем полный перебор. Генетический алгоритм и его гибрид с алгоритмом Генезис позволил получить наилучшую точность из рассмотренных алгоритмов, уступая во времени расчета алгоритму Генезис в 28 раз.

Для случая, когда требуется провести оценочные, быстрые вычисления наилучшие результаты продемонстрировал Алгоритм жадного добавления, для всех трех классов задач.

Наиболее подходящими для более точного решения каждого класса задач являются:

- *BLP*: Алгоритм обезьяньего поиска + Поиск по центру диаметра графа или Алгоритм искусственной пчелиной колонии,
- *MCLP*: Генетический алгоритм + Генезис с использованием соответствующих алгоритмов *BLP* в зависимости от требуемой точности,
- *LSCP*: Генетический алгоритм + Генезис с использованием соответствующих алгоритмов *BLP*, в зависимости от требуемой точности.

Установлено, что для случаев проведения оценочных (приблизительных) расчетов допустимо использование алгоритма Генезис без его гибридизации.

Полученные результаты позволили реализовать методы гибридизации эвристических алгоритмов обоснования дислокации подразделений пожарной охраны: бэггинг, бустинг, стекинг и смешивание. С точки зрения новизны,

особый интерес представляет предложенный впервые комплексный гибридный эвристический алгоритм по определению необходимого количества подразделений пожарной охраны и оптимальных мест их дислокации за счет итеративного выполнения операций, решающих частные задачи размещения одного подразделения и множества подразделений, и подбор с их помощью оптимального размещения до тех пор, пока не будет выполнено условие остановки.

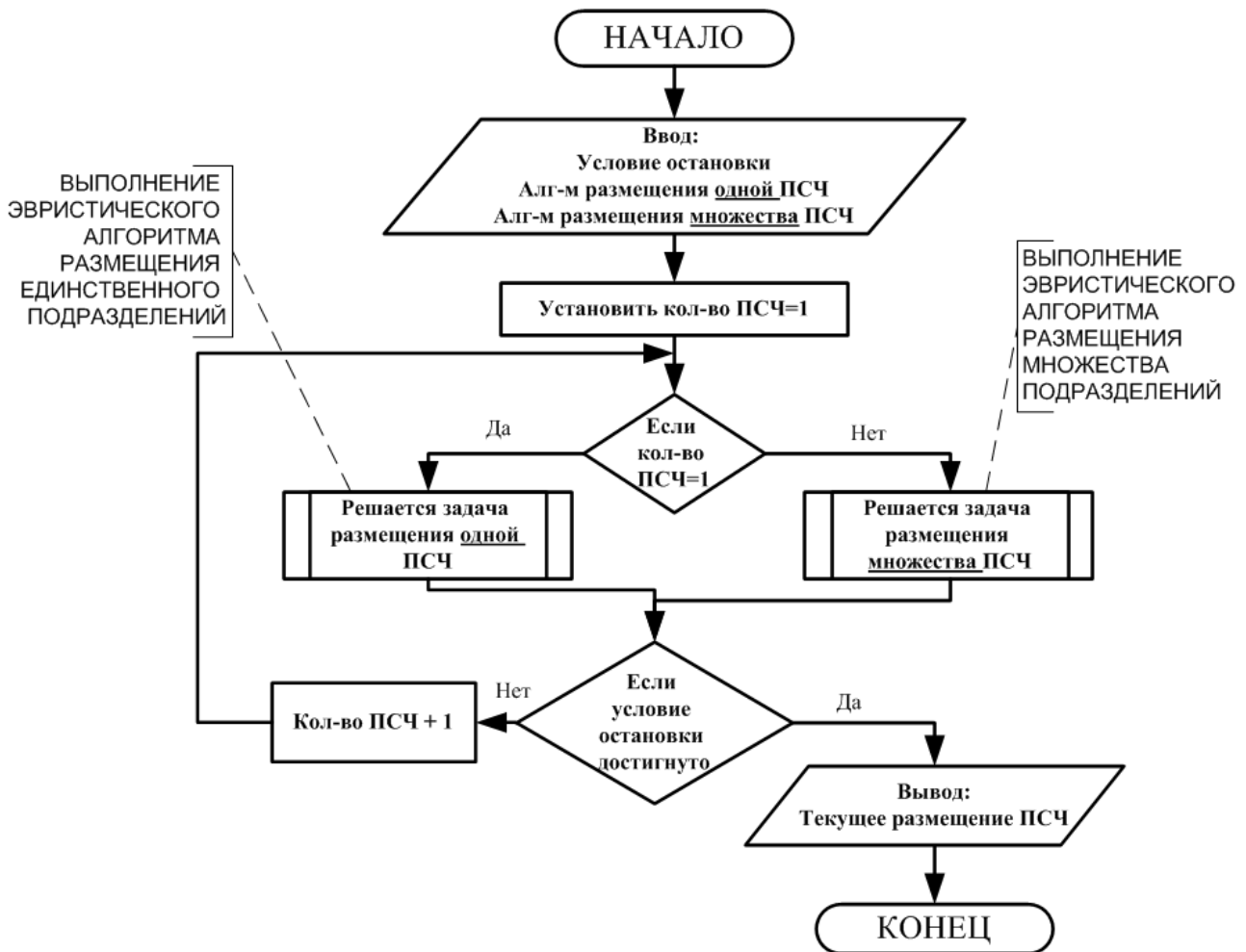


Рисунок 5 – Укрупненная блок-схема комплексного гибридного эвристического алгоритма определения необходимого количества подразделений пожарной охраны и оптимальных мест их дислокации

Визуализация результатов моделирования с использованием предложенного алгоритма показана на рисунке 6.

На основе результатов, полученных в ходе исследований, сделан вывод, что основная гипотеза, проверявшаяся в данной части исследования, заключающаяся в том, что для определения дислокации подразделений пожарной охраны на территории населенного пункта за приемлемое вычислительное время могут быть использованы эвристические алгоритмы,

подтверждена. Это позволило предложить к реализации в информационно-аналитической системе поддержки принятия решений по обоснованию дислокации подразделений пожарной охраны в городской среде эффективные алгоритмы определения необходимого количества подразделений пожарной охраны и оптимальных мест их дислокации.

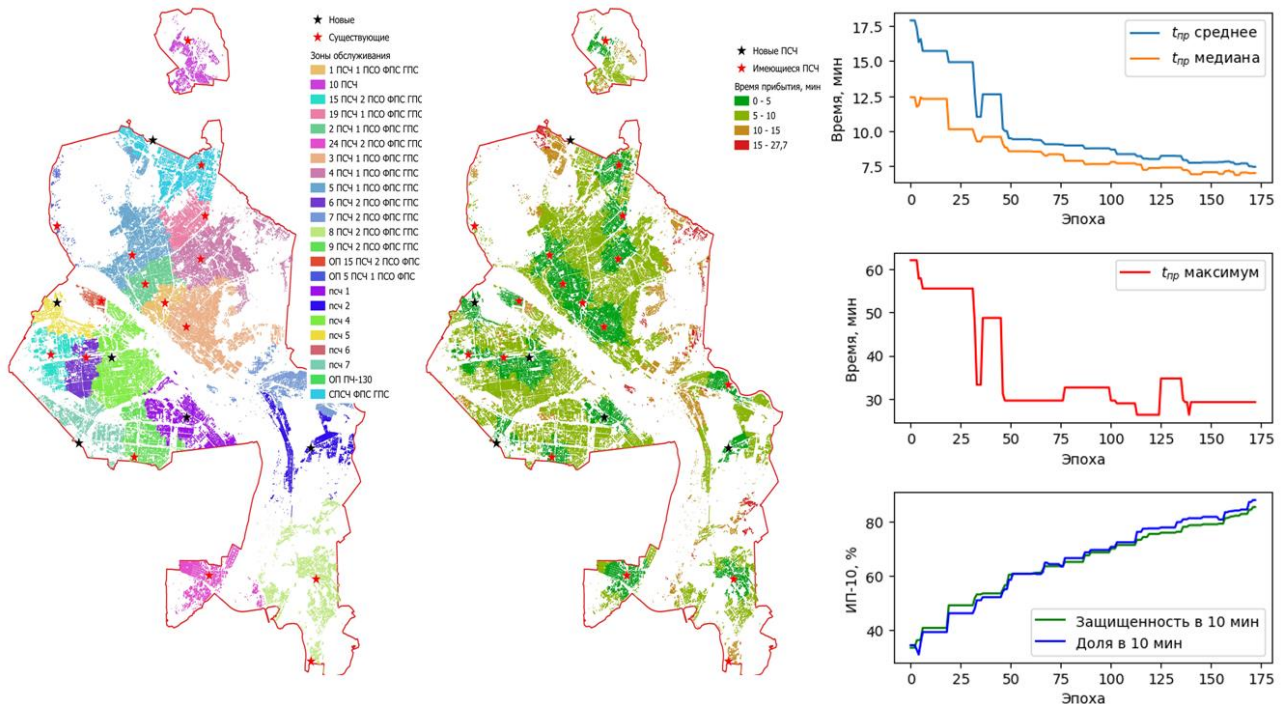


Рисунок 6 – Пример визуализации результатов моделирования (на примере города Красноярска)

Четвертая глава диссертационной работы посвящена вопросам компьютерной реализации и апробации информационно-аналитической системы поддержки принятия решений по обоснованию дислокации подразделений пожарной охраны в городской среде на основе гибридных эвристических алгоритмов.

На основе полученных ранее результатов предложен алгоритм поддержки принятия решений по определению необходимого количества подразделений пожарной охраны и оптимальных мест их дислокации, основанный на применении гибридных эвристических алгоритмов определения пространственного размещения подразделений пожарной охраны и модели оценки потребности в защите от пожаров зданий населенных пунктов (10) (рисунок 7).

С учетом особенностей предложенного алгоритма разработана информационно-аналитическая система поддержки принятия решений по обоснованию дислокации подразделений пожарной охраны в городской среде на основе гибридных эвристических алгоритмов.

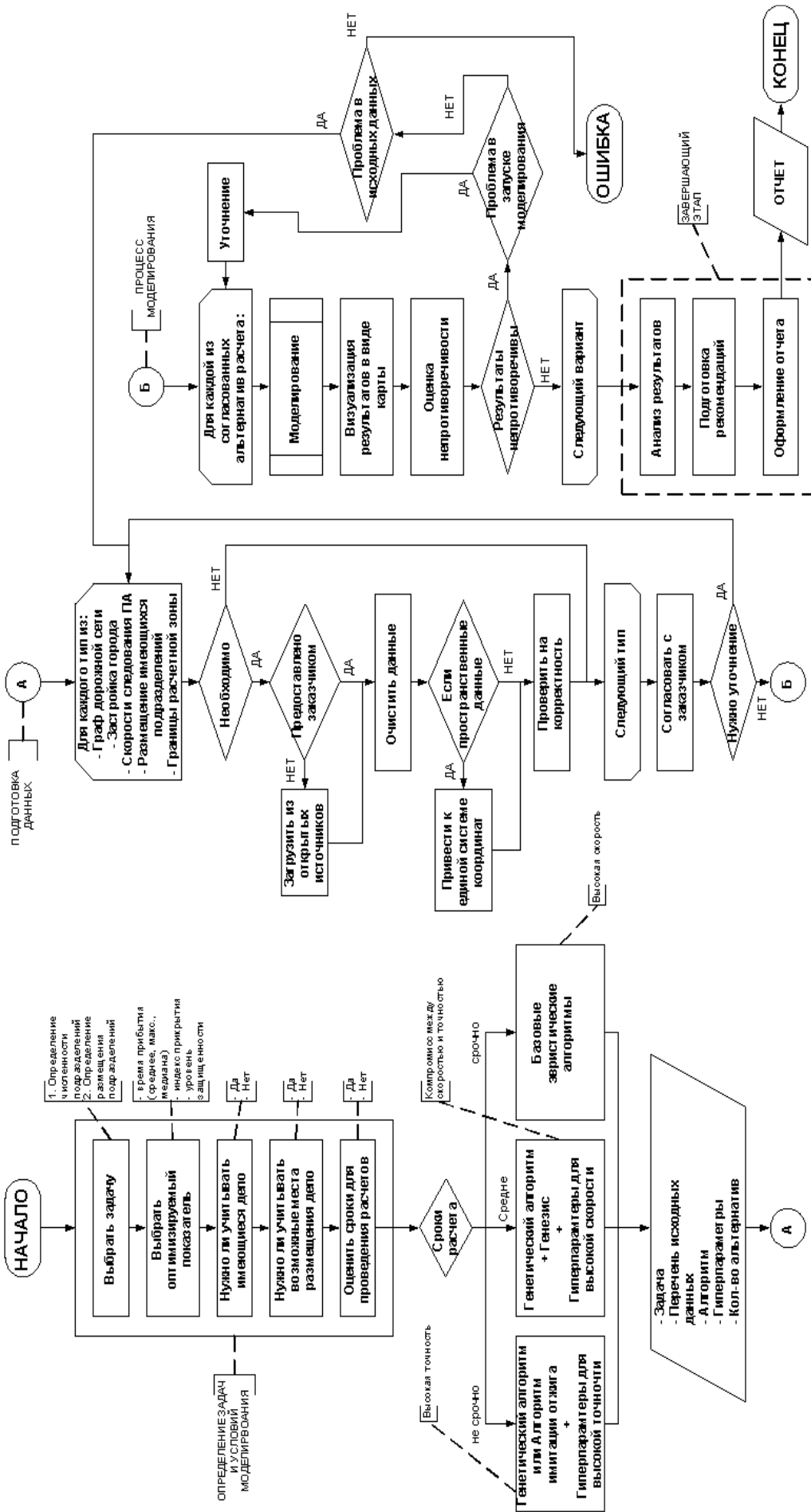


Рисунок 7 – Блок-схема алгоритма поддержки принятия решений по определению необходимого количества подразделений пожарной охраны и оптимальных мест их дислокации

Предложена модульная архитектура информационно-аналитической системы поддержки принятия решений по обоснованию дислокации подразделений пожарной охраны в городской среде (рисунок 8), позволяющая гибко реализовывать, гибридизировать и настраивать гиперпараметры эвристических алгоритмов.

Информационно-аналитическая система реализована как библиотека языка программирования Python с использованием методологий объектно-ориентированного и функционального проектирования, а также модульного тестирования. Программное ядро определяет базовые абстрактные классы и частные реализации эвристических алгоритмов. Для решения задач пространственной оптимизации на графах данного модуля достаточно. Однако для реализации частных методик пользователь может разрабатывать собственные решения. Например, для реализации описанных в данной работе моделей и алгоритмов в библиотеку добавлен модуль, который позволяет непосредственно решать задачи пространственной оптимизации подразделений пожарной охраны.

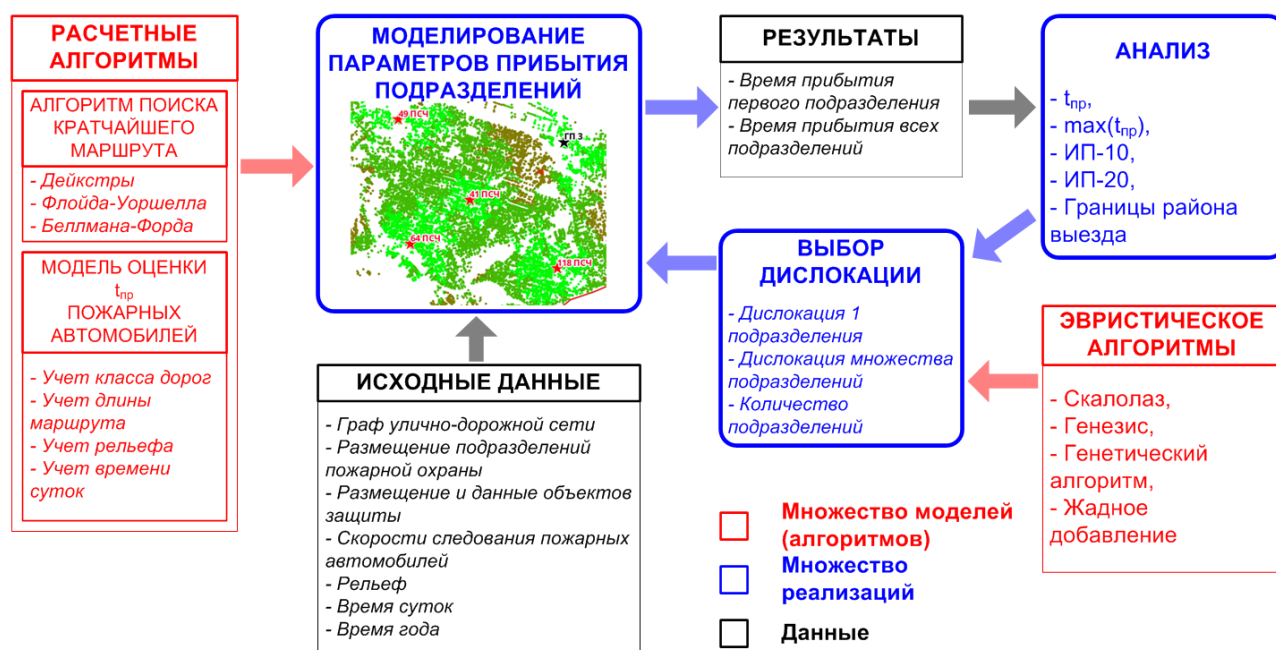


Рисунок 8 – Модульная архитектура гибридизации алгоритмов в информационно-аналитической системе

Разработана структура (рисунок 9) и пользовательский интерфейс информационно-аналитической системы поддержки принятия решений по обоснованию дислокации подразделений пожарной охраны в городской среде (рисунок 10).



Рисунок 9 – Структура информационно-аналитической системы

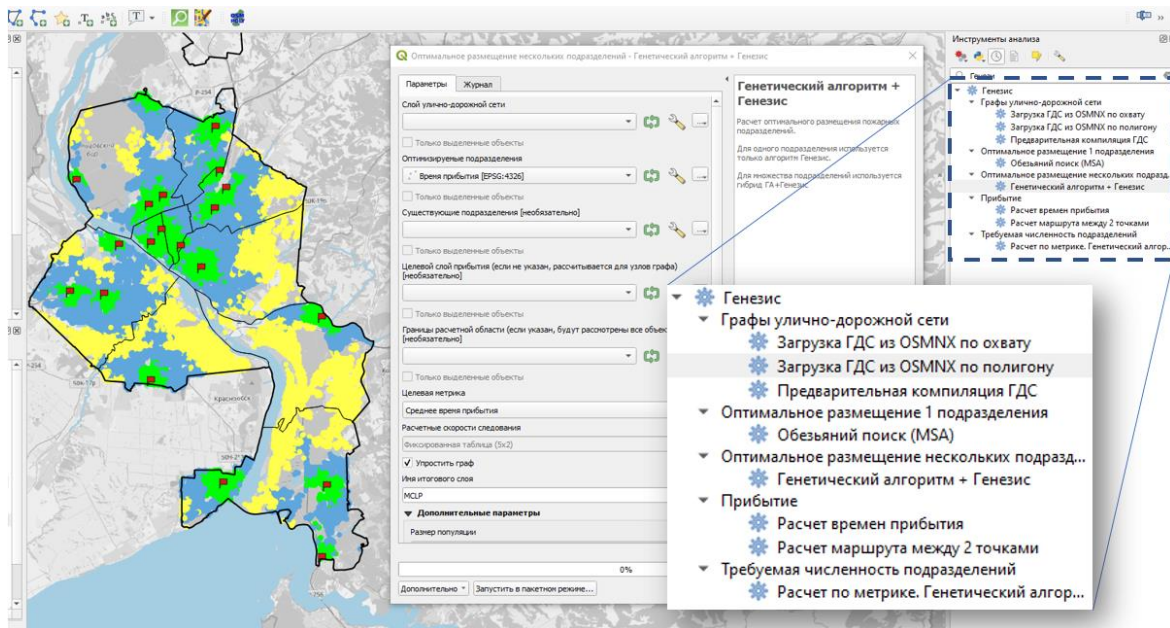


Рисунок 10 – Пользовательский интерфейс информационно-аналитической системы

С целью оценки эффективности предложенных решений проведено компьютерное моделирование для 5 крупных городов России. Решались задачи для обеспечения потребности в защите и индекса прикрития (далее – ИП), для случаев с учетом и без учета функционирующих подразделений пожарной охраны. В таблице 2 представлены результаты компьютерного моделирования потребности в подразделениях пожарной охраны для г. Санкт-Петербург, полученные с использованием разработанной в ходе работы информационно-

аналитической системы и известной компьютерной имитационной системы, предназначенной для исследования, экспертизы и проектирования экстренных служб КИС КОСМАС.

Таблица 2 – Сравнение результатов компьютерного моделирования

Условия расчета	ИП-10, %	Требуется создать подразделений	Всего подразделений	Среднее время следования первого подразделения, мин
КИС КОСМАС				
Существующее размещение	84,4	-	68	7,1
Для ИП-10 = 90%	90,2	5	73	6,7
Для ИП-10 = 95%	95,2	11	79	5,8
Для ИП-10 = 99%	98,7	46	114	5,3
Разработанное специализированное программное обеспечение				
Существующее размещение	85,8	-	68	7,6
Для ИП-10 = 90%	90,7	6	74	6,9
Для ИП-10 = 95%	95,2	14	82	6,2
Для ИП-10 = 99%	99,0	47	115	5,6

Из таблицы 2 видно, что при заданных процентах покрытия число и места дислокации пожарных депо в двух системах почти идентичны, результаты моделирования совпадают на 95-97 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные и практические результаты, полученные в процессе разработки моделей и алгоритмов поддержки принятия решений по определению необходимого количества подразделений пожарной охраны и их дислокации, а также их практическая реализация в специализированном программном обеспечении заключаются в следующем:

1. Проведен кластерный анализ параметров реагирования подразделений пожарной охраны в Российской Федерации за 2010-2020 г.г. Показано, наличие умеренной связи количества подразделений пожарной охраны, приходящегося на 1000 человек с количеством погибших на пожарах людей, приходящихся на 1000 человек населения (0,34) и обратной связи со средним временем прибытия первого подразделения пожарной охраны.

2. На основе проведенного с использованием методов машинного обучения и аналитики больших данных анализа системы реагирования на пожары в крупных городах России выявлены наиболее значимые факторы, оказывающие влияние на обоснование дислокации подразделений пожарной

охраны. Рассмотрен комплекс моделей оценки факторов, оказывающих влияние на выбор оптимального места дислокации подразделений пожарной охраны и предложена модель оценки параметров реагирования подразделений пожарной охраны.

3. Анализ существующих методов и алгоритмов решения задач оптимизации размещения показал, что такие эвристические алгоритмы как Жадное добавление, Генетический алгоритм, Алгоритм искусственной пчелиной колонии, Алгоритм скалолаза, а также их гибриды могут быть с успехом реализованы в информационно-аналитической системе поддержки принятия решений по обоснованию дислокации подразделений пожарной охраны в городской среде. Показано, что применение гибридных эвристических алгоритмов позволяет снизить вычислительную сложность расчета оптимальных мест дислокации подразделений пожарной охраны с $O(N^2)$ до $O(\sqrt{N})$ для задачи размещения одного подразделения и с $O(N^{K+2})$ до $O(K\sqrt{N})$ для задачи размещения K подразделений.

4. Разработана информационно-аналитическая система поддержки принятия решений по обоснованию дислокации подразделений пожарной охраны в городской среде реализующая модульную архитектуру и предоставляющая возможность адаптации широкого спектра существующих и перспективных подходов к обоснованию дислокации подразделений пожарной охраны без существенной переработки программного ядра, в том числе с применением рассмотренных в работе гибридных эвристических алгоритмов.

5. Разработан алгоритм поддержки принятия решений по обоснованию дислокации подразделений пожарной охраны в городской среде с использованием информационно-аналитической системы на основе гибридных эвристических алгоритмов. Описаны основные этапы проведения расчетов, анализа и поддержки принятия решений.

6. Проведена серия вычислительных экспериментов с использованием предложенной в работе информационно-аналитической системы поддержки принятия решений по обоснованию дислокации подразделений пожарной охраны в городской среде. Показана приемлемая точность разработанной информационно-аналитической системы по сравнению с существующими решениями.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. Малютин, О. С. Обзор подходов, методов и алгоритмов обоснования управленческих решений по снижению времени прибытия подразделений пожарной охраны к месту вызова / О. С. Малютин, Р. Ш. Хабибулин // Пожаровзрывобезопасность. – 2023. – Т. 32, № 5. – С. 60-77.

2. Малютин, О.С. Оптимизация границ районов выезда с использованием языка программирования Python и библиотеки OSMNX / О. С. Малютин, С. В. Бабенышев, Е. Н. Матеров // Сибирский пожарно-спасательный вестник. – 2023. – № 1(28). – С. 38-55.

3. Малютин, О. С. Корреляционный анализ параметров функционирования пожарно-спасательных подразделений / О. С. Малютин, Р. Ш. Хабибулин // Инженерный вестник Дона. – 2024. – № 3(111). – С. 118-138.

4. Малютин, О. С. Методика определения частоты возникновения пожаров в зданиях на основе методов оценки плотности и имитации отжига / О. С. Малютин, Р. Ш. Хабибулин // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2024. – № 5(241). – С. 131-142.

5. Малютин, О. С. Анализ параметров функционирования пожарно-спасательных подразделений в крупных городах России / О. С. Малютин, В. В. Морозов, Р. В. Мироненко // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2024. – № 4. – С. 120-132.

**Научные публикации в изданиях, входящих
в международные системы цитирования:**

6. O. Malyutin and R. Khabibulin, Modular Approach to Hybridization of Heuristic Algorithms for Spatial Optimization of Fire Units Placement, 2024 6th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), Lipetsk, Russian Federation, 2024.

Программа для ЭВМ, патент на полезную модель, базы данных

7. Малютин О.С. Библиотека для решения задач пространственной оптимизации с использованием гибридных эвристических алгоритмов: свидетельство Роспатента о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024689027, 04.12.2024 / О.С. Малютин, Р.Ш. Хабибулин

8. Малютин О.С. Библиотека для решения задач поиска оптимального пространственного размещения пожарных подразделений: свидетельство Роспатента о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024689028, 04.12.2024 / О.С. Малютин, Е.Н. Матеров, С.В. Бабенышев, И.Ю. Сергеев, А.Н. Батуро

Публикации в других изданиях

9. Малютин, О. С. Расчет требуемого количества и размещения территориальных подразделений пожарной охраны с учетом требований действующего законодательства Российской Федерации / О. С. Малютин // Актуальные проблемы пожарной безопасности: материалы XXXV Международной научно-практической конференции, Москва, 31 мая 2023 года. – Москва: ВНИИПО МЧС России, 2023.

10. Малютин, О. С. Анализ суточного изменения скоростей движения пожарных автомобилей для определения мест оптимального размещения подразделений ГПС / О. С. Малютин, Р. Ш. Хабибулин // Академия

Государственной противопожарной службы МЧС России: Теория. Инновации. Практика: Материалы научно-практической конференции с международным участием, посвященной 90-летию со дня образования Академии ГПС МЧС России. В 5-ти частях, Москва, 19 октября 2023 года. – Москва: Академия Государственной противопожарной службы, 2023.

11. Малютин, О. С. Анализ скоростей движения пожарных автомобилей в зависимости от назначения дорог с использованием машинного обучения / О. С. Малютин, Р. Ш. Хабибулин // Материалы международной научно-технической конференции "Системы безопасности". – 2023. – № 32. – С. 44-50.

12. Малютин, О. С. Применение генетического алгоритма для подбора параметров модели определения времени прибытия пожарных подразделений / О. С. Малютин, Р. Ш. Хабибулин // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте (ИММВ-2024) : Сборник научных трудов XII Международной научно-практической конференции. В 2-х томах, Коломна, 14–17 мая 2024 года. – Смоленск: Универсум, 2024. – С. 380-389.

13. Малютин, О. С. Многокритериальная оптимизация размещения пожарно-спасательных подразделений с использованием генетического алгоритма / О. С. Малютин, Р. Ш. Хабибулин // Гибридные и синергетические интеллектуальные системы: сборник статей по материалам научной VII Всероссийской Пospelовской конференции, Калининград, 03–07 июня 2024 года. – Калининград, Санкт-Петербург: Русская христианская гуманитарная академия им. Ф.М. Достоевского, 2024. – С. 287-293.

14. Малютин О.С., Хабибулин Р.Ш., Модульный подход к гибридизации эвристических алгоритмов пространственной оптимизации размещения пожарных подразделений / О. С. Малютин, Р. Ш. Хабибулин // Нейроинформатика, её приложения и анализ данных: Материалы XXXII Всероссийского семинара, 27 сентября 2024 года / Под ред. М.Г. Садовского, отв. за вып. М.Ю. Сенашова; – Красноярск: Институт вычислительного моделирования СО РАН, 2024. – С 60-69.