

МИНИСТЕРСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ПО ДЕЛАМ ГРАЖДАНСКОЙ ОБОРОНЫ, ЧРЕЗВЫЧАЙНЫМ СИТУАЦИЯМ
И ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ СТИХИЙНЫХ БЕДСТВИЙ

Академия Государственной противопожарной службы МЧС России

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)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Хабибулин Ренат Шамильевич

Москва – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1. ПРОБЛЕМЫ ПРИНЯТИЯ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПРИ ОБОСНОВАНИИ ДИСЛОКАЦИИ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ ПОЖАРНОЙ ОХРАНЫ И ОПТИМАЛЬНЫХ МЕСТ ИХ ДИСЛОКАЦИИ.....	12
1.1 Анализ нормативно-правовых документов в области определения необходимого количества и мест дислокации подразделений пожарной охраны .	12
1.2 Анализ статистических данных реагирования подразделений пожарной охраны в Российской Федерации	22
1.3 Обзор научных публикаций по вопросам решения задач определения дислокации подразделений пожарной охраны	27
1.4 Анализ информационных технологий в области определения дислокации подразделений пожарной охраны.....	34
1.5. Формализация проблематики обоснования необходимого количества и оптимальных мест дислокации подразделений пожарной охраны	37
1.6 Выводы по главе 1	38
ГЛАВА 2. АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ОКАЗЫВАЮЩИХ ВЛИЯНИЕ НА ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО МЕСТА ДИСЛОКАЦИИ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ ПОЖАРНОЙ ОХРАНЫ.....	40
2.1 Анализ структуры системы реагирования на пожары в крупных городах	40
2.1.1 Динамическая и статическая диспетчеризация.....	40
2.1.2. Предварительный перечень факторов, оказывающих влияние на выбор мест дислокации подразделений пожарной охраны	42
2.2 Данные, использованные в работе	47
2.2.1 Данные из базы данных «Пожары».....	48
2.2.2 Данные из базы данных «Гарнизон» (Новосибирск)	50
2.2.3 Данные из открытых картографических источников.....	51
2.2.4 Данные о подразделениях пожарной охраны.....	53

2.3	Комплекс моделей оценки факторов, оказывающих влияние на выбор оптимального места дислокации подразделений пожарной охраны.....	53
2.3.1	Модель оценки времени следования пожарных автомобилей по дорогам разных категорий на основе регрессионного анализа.....	54
2.3.2	Модель оценки частот возникновения пожаров на объектах различного назначения.....	58
2.3.3	Модель оценки последствий от пожаров в зданиях различного назначения	64
2.3.4	Модель оценки потребности в защите зданий населенных пунктов.....	68
2.4	Метрики и целевые функции	70
2.5	Модель оценки параметров реагирования подразделений пожарной охраны .	72
2.6	Выводы по главе 2.....	75
ГЛАВА 3 ГИБРИДНЫЕ ЭВРИСТИЧЕСКИЕ АЛГОРИТМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИСЛОКАЦИИ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ ПОЖАРНОЙ ОХРАНЫ		77
3.1	Алгоритмы пространственной оптимизации дислокации подразделений пожарной охраны	77
3.1.1	Задача определения наилучшей дислокации единственного подразделения	82
3.1.2	Задача максимального покрытия.....	88
3.1.3	Задача размещения.....	92
3.1.5	Выводы по теоретической части	95
3.2	Экспериментальная оценка качества предложенных алгоритмов.....	96
3.2.1	Исходные данные	97
3.2.2	Методика исследования.....	99
3.2.3	Результаты вычислительных экспериментов.....	101
3.2.4	Выводы по экспериментальной части.....	110
3.3	Методы гибридизации эвристических алгоритмов обоснования дислокации подразделений пожарной охраны.....	111
3.4	Выводы по главе 3.....	115

ГЛАВА 4. КОМПЬЮТЕРНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ И АПРОБАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО ОБОСНОВАНИЮ ДИСЛОКАЦИИ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ ПОЖАРНОЙ ОХРАНЫ В ГОРОДСКОЙ СРЕДЕ НА ОСНОВЕ ГИБРИДНЫХ ЭВРИСТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ	117
4.1 Специализированное программное обеспечение для поддержки принятия решений по определению необходимого количества подразделений пожарной охраны и их дислокации	117
4.1.1 Описание основных функций информационно-аналитической системы ...	117
4.1.2 Форматы данных	118
4.1.3 Инструменты разработки	122
4.1.4 Общая структура программного обеспечения	125
4.1.5 Модульная архитектура информационно-аналитической системы поддержки принятия решений по обоснованию дислокации подразделений пожарной охраны в городской среде	127
4.2 Алгоритм поддержки принятия решений по обоснованию дислокации подразделений пожарной охраны в городской среде с использованием информационно-аналитической системы на основе гибридных эвристических алгоритмов	135
4.3 Аprobация и анализ эффективности моделей, алгоритмов и специального программного обеспечения	140
4.4 Выводы по главе 4.....	146
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	148
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	150
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	152
ПРИЛОЖЕНИЕ А. СВИДЕТЕЛЬСТВА О ГОСУДАРСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ БАЗ ДАННЫХ И ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ	174

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. ФРАГМЕНТ ЛИСТИНГ ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ GENESIS.BEST_POINTS.PY	177
ПРИЛОЖЕНИЕ В. АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ	183

ВВЕДЕНИЕ

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 размещения 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 оснащенности 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.

ГЛАВА 1. ПРОБЛЕМЫ ПРИНЯТИЯ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПРИ ОБОСНОВАНИИ ДИСЛОКАЦИИ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ ПОЖАРНОЙ ОХРАНЫ И ОПТИМАЛЬНЫХ МЕСТ ИХ ДИСЛОКАЦИИ

1.1 Анализ нормативно-правовых документов в области определения необходимого количества и мест дислокации подразделений пожарной охраны

Конституция Российской Федерации, будучи ключевым нормативным актом, устанавливающим основы конституционного строя, определяет, что государство гарантирует равенство прав и свобод человека, право человека на жизнь, охрану здоровья и медицинскую помощь, защиту прав и свобод человека и гражданина в Российской Федерации (статьи 19, 20, 41, 45).

Статья 53 гласит, что каждый имеет право на возмещение государством вреда, причиненного незаконными действиями (или бездействием) органов государственной власти или их должностных лиц.

Статья 71 определяет, что в ведении Российской Федерации находится установление системы федеральных органов законодательной, исполнительной и судебной власти, порядка их организации и деятельности; формирование федеральных органов государственной власти, в числе которых организация деятельности пожарной охраны как составной части Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (далее – МЧС России).

Таким образом, Конституция РФ определяет равное право каждого гражданина Российской Федерации на защиту жизни и здоровья, и реализацию данных прав. В настоящий момент основными нормативными актами, закрепляющими на территории РФ данные права в части обеспечения пожарной безопасности, являются:

– Федеральный закон от 18.11.1994 г. №69-ФЗ «О пожарной безопасности» (далее – 69-ФЗ);

– Федеральный закон от 22.07.2008 № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» (далее – 123-ФЗ).

69-ФЗ определяет общие правовые, экономические и социальные основы обеспечения пожарной безопасности в Российской Федерации, регулирует отношения в данной области, возникающие между органами государственной власти, органами местного самоуправления, общественными объединениями, юридическими лицами, должностными лицами, гражданами, в том числе индивидуальными предпринимателями.

Статья 4 69-ФЗ устанавливает виды и основные задачи пожарной охраны. Среди последних следует отметить следующие:

спасение людей и имущества при пожарах, оказание первой помощи; организация и осуществление тушения пожаров и проведения аварийно-спасательных работ.

Статьями 16 и 18 69-ФЗ конкретизируются направления реализации названных задач и устанавливается, что к полномочиям органов государственной власти в области пожарной безопасности среди прочего относится создание, реорганизация и ликвидация органов управления, подразделений пожарной охраны. Статьей 19 за органами местного самоуправления закрепляются полномочия по созданию условий для организации добровольной пожарной охраны. Статьей 37 определяется право организаций создавать, реорганизовывать и ликвидировать в установленном порядке подразделения пожарной охраны, которые они содержат за счет собственных средств.

Таким образом, все уровни государственной власти, органы местного самоуправления, а также отдельные организации в пределах своих полномочий и прав участвуют в создании подразделений пожарной охраны различных видов.

Статья 22 69-ФЗ устанавливает понятие пожарно-спасательного гарнизона.

Статьей 27 69-ФЗ определяется действие в РФ единой государственной системы статистического учета пожаров и их последствий.

Организация управления в области пожарной безопасности и координация деятельности пожарной охраны осуществляются федеральным органом исполнительной власти, уполномоченным на решение задач в области пожарной безопасности (статья 4 69-ФЗ).

Вместе с тем 69-ФЗ не содержит норм, на основе каких правил (подходов) следует определять количество и выбирать место дислокации подразделений пожарной охраны.

Данный вопрос регулируется 123-ФЗ, который регламентирует основные положения технического регулирования в области пожарной безопасности и устанавливает минимально необходимые требования пожарной безопасности к объектам защиты (продукции), в том числе к зданиям и сооружениям, производственным объектам.

Согласно статье 76 123-ФЗ здания пожарных депо на территориях населенных пунктов следует размещать исходя из условия, что время прибытия первого подразделения к месту вызова в городских населенных пунктах не должно превышать 10 минут, в сельских населенных пунктах 20 минут.

В связи с ярко выраженной спецификой организации пожарной охраны на территории предприятий статья 97 123-ФЗ устанавливает требования к созданию подразделений пожарной охраны на территории промышленных объектов.

Таким образом, несмотря на то, что вышеприведенные положения 123-ФЗ содержат основные требования, которым должны удовлетворять подразделения пожарной охраны при их создании, данным нормативным актом не регламентировано, чем следует руководствоваться при выборе места дислокации подразделений пожарной охраны.

В целях установления требований к определению числа и мест дислокации подразделений пожарной охраны на территории населенных пунктов и производственных объектов в рамках реализации положений 123-ФЗ разработан

свод правил СП 11.13130.2009 «Места дислокации подразделений пожарной охраны» (далее - СП 11.13130.2009), а в рамках реализации положений 69-ФЗ был издан приказ МЧС России от 15.10.2021 г. №700 «Об утверждении методик расчета численности и технической оснащённости подразделений пожарной охраны».

На рисунке 1.1 приведена структура нормативной базы в области определения мест дислокации и количества подразделений пожарной охраны на территории населенных пунктов и организаций.

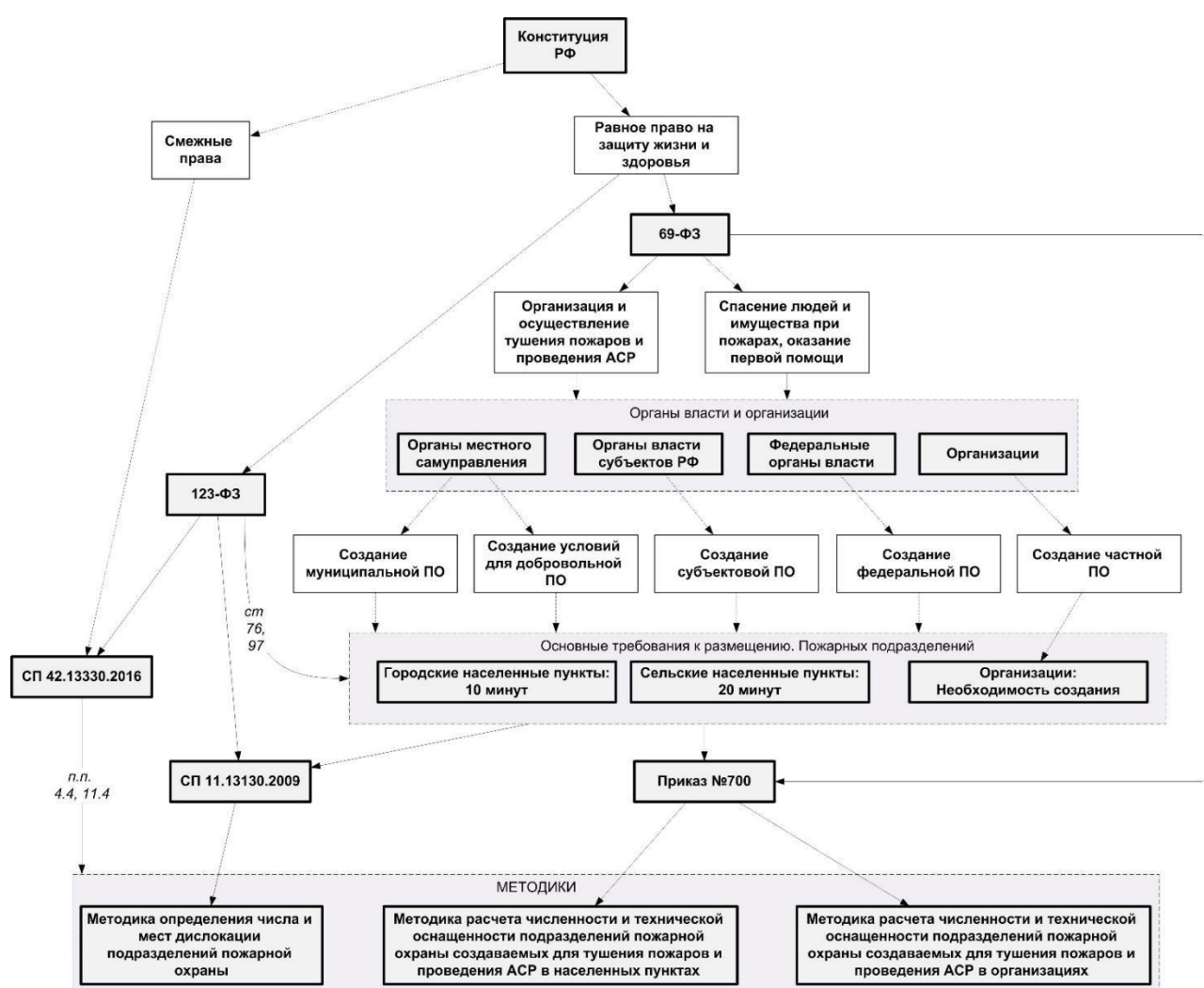


Рисунок 1.1 – Структура требований в области определения дислокации подразделений пожарной охраны

Помимо перечисленных документов, непосредственно касающихся дислокации территориальных подразделений пожарной охраны, существует ряд

нормативных актов, регулирующих смежные вопросы организационного проектирования гарнизонов пожарной охраны.

Первым из них является приказ МЧС России от 13 января 2025 г. № 19 «Об утверждении Положения о пожарно-спасательных гарнизонах и Порядка привлечения сил и средств подразделений пожарной охраны, пожарно-спасательных гарнизонов для тушения пожаров и проведения аварийно-спасательных работ» (приказ вступает в силу с 1 сентября 2025 г. и действует по 31 августа 2031 г.).

Пунктом 6 Порядка привлечения сил и средств подразделений пожарной охраны, пожарно-спасательных гарнизонов для тушения пожаров и проведения аварийно-спасательных работ определяется, что при разработке расписаний выезда и планов привлечения предусматривается разделение территорий населенных пунктов и организаций, охраняемых подразделениями пожарной охраны, на районы выезда, границы которых могут не совпадать с внутренними административными границами, установленными в муниципальных образованиях. При этом должно обеспечиваться сосредоточение сил и средств местного пожарно-спасательного гарнизона в необходимом количестве для проведения боевых действий в максимально короткое время

В целях установления единых требований к технической оснащенности подразделений пожарной охраны, расположенных на территории организаций, принят свод правил СП 232.1311500.2015 «Пожарная охрана предприятий. Общие требования» (далее – СП 232.1311500.2015), которым на основе методики определения числа и мест дислокации подразделений пожарной охраны, изложенной в СП 11.13130.2009, закреплена методика определения численности и технической оснащенности пожарной охраны предприятия для организации и осуществления тушения пожаров.

Проектирование строительства подразделений пожарной охраны также регламентируется нормами градостроительного законодательства. В связи с этим дополнительно рассмотрен свод правил СП 42.13330.2016 «Градостроительство.

Планировка и застройка городских и сельских поселений» (далее - СП 42.13330.2016). Данный нормативно-технический документ содержит ряд положений, представляющих интерес для дальнейшей работы, а именно:

- терминологический аппарат в области градостроительства;
- классификацию населенных пунктов в Российской Федерации (таблица 1.1);
- классификацию категорий улиц и дорог.

Таблица 1.1 – Городские и сельские населенные пункты в зависимости от общей численности постоянного населения

Группы	Городские населенные пункты, тыс.чел.	Сельские населенные пункты, тыс.чел.
Крупнейшие	более 1000	-
Крупные	от 250 до 1000 включительно	свыше 5
Большие	от 100 до 250 включительно	от 1 до 5 включительно
Средние	от 50 до 100 включительно	от 0,2 до 1 включительно
Малые	до 50 включительно	от 0,05 до 0,2 включительно

В основу определения количества и мест дислокации подразделений пожарной охраны (СП 11.13130.2009 «Места дислокации подразделений пожарной охраны») положена идея, что подразделения на территории населенного пункта или организации должны располагаться таким образом, чтобы обеспечить время следования пожарных автомобилей до каждого из объектов на данной территории, удовлетворяющее следующим целям:

1. Ликвидация пожара прежде, чем его площадь превысит площадь, которую может потушить один караул.
2. Ликвидация пожара прежде, чем наступит предел огнестойкости строительных конструкций в помещении пожара.
3. Ликвидация пожара прежде, чем опасные факторы пожара достигнут критических для жизни людей значений.

В зависимости от выбранных целей рассчитывается время достижения целевого значения и определяется максимально допустимое расстояние до

подразделения пожарной охраны, которое гарантирует, что пожарные автомобили придут ранее наступления критического времени.

Из полученных значений для рассматриваемых целей в качестве расчетного выбирается наименьшее. Далее от каждого из объектов строится зона допустимого размещения подразделения пожарной охраны (рисунок 1.2). Оптимальным местом размещения подразделения пожарной охраны считается область, в которой пересекается максимальное количество таких зон. Затем объекты, чьи зоны допустимого размещения пересекаются в выбранной точке, отбрасываются, и выбор места размещения следующего подразделения повторяется вновь до тех пор, пока все объекты не окажутся прикрытыми подразделениями пожарной охраны.

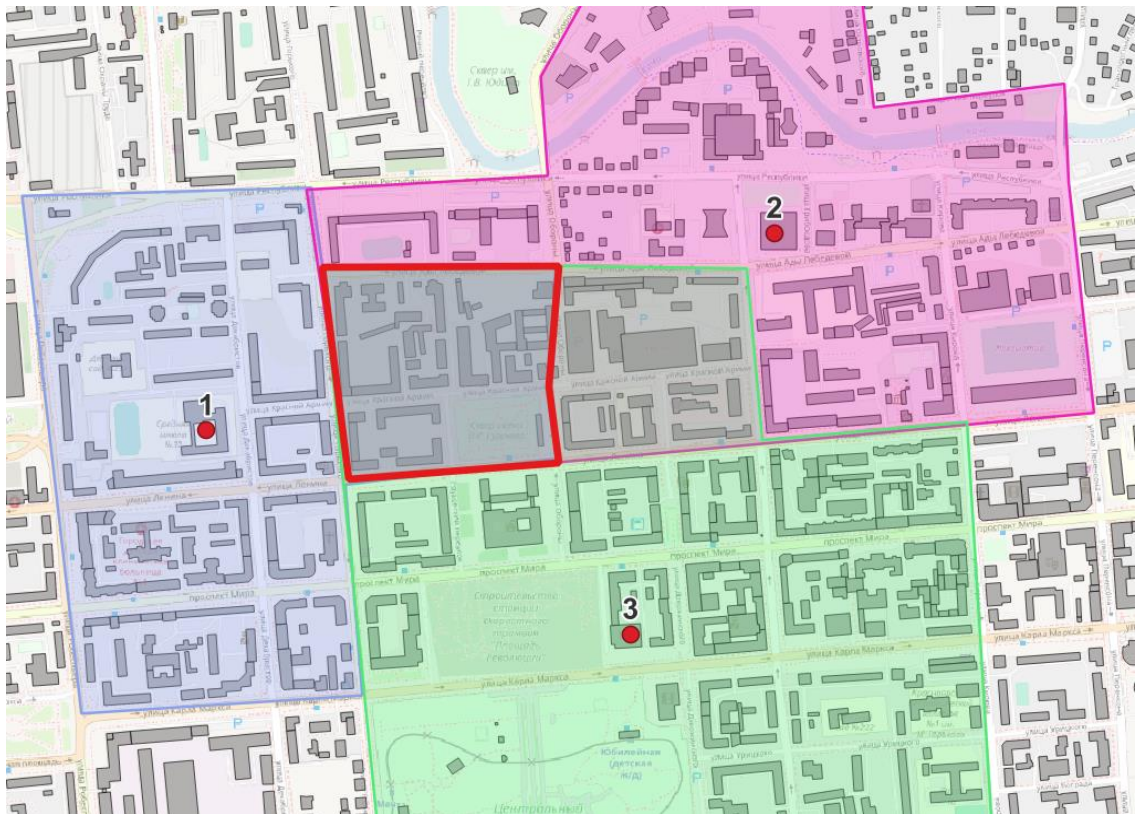


Рисунок 1.2 – Условная схема определения пространственной зоны допустимой дислокации подразделения пожарной охраны. 1, 2, 3 – объекты защиты. Красный полигон – область, при размещении в которой будет обеспечено требуемое время прибытия к любому из объектов защиты

Скорость следования подразделения пожарной охраны на место пожара оценивается для наиболее неблагоприятных влияющих на нее факторов (состояние дорог, особенности ландшафта, климатические особенности периода года и др.).

При этом, для промышленных предприятий согласно п. 6.2 СП 232.1311500.2015 «Пожарная охрана предприятий. Общие требования» используются следующие значения:

- для твердого покрытия 50 км/ч;
- для щебеночно-гравийного покрытия 40 км/ч;
- для грунтового покрытия 30 км/ч.

Методики, утвержденные приказом МЧС России от 15.10.2021 г. №700 «Об утверждении методик расчета численности и технической оснащенности подразделений пожарной охраны», не содержат требований к проведению расчетов достаточного количества и выбору оптимальных мест дислокации подразделений пожарной охраны, регламентируя в большей степени особенности расчета технической оснащенности и численности личного состава подразделений пожарной охраны.

Нормы, изложенные в разделе III «Методики расчета численности и технической оснащенности подразделений пожарной охраны, создаваемых для тушения пожаров и проведения аварийно-спасательных работ в населенных пунктах» и разделе III «Методики расчета численности и технической оснащенности подразделений пожарной охраны, создаваемых для тушения пожаров и проведения аварийно-спасательных работ в организациях», определяют, что количество и места дислокации подразделений пожарной охраны определяются с учетом требований статьи 76 (для населенных пунктов) и статьи 97 (для организаций) 123-ФЗ. Таким образом, можно сделать вывод, что приказ МЧС России от 15.10.2021 г. №700 «Об утверждении методик расчета численности и технической оснащенности подразделений пожарной охраны» является дополнением к методикам, изложенным в СП 11.13130.2009 «Места дислокации подразделений пожарной охраны», не содержащим дополнительных уточнений в

части, касающейся вопросов выбора наиболее выгодной дислокации подразделений пожарной охраны.

В соответствии с общими положениями «Методических рекомендаций по определению мест дислокации подразделений пожарной охраны в населенных пунктах в целях доведения времени прибытия первого подразделения пожарной охраны до нормативных значений», утв. Главным Государственным инспектором Российской Федерации по пожарному надзору Г.Н. Кирилловым от 30.12.2009 г. № 2-60-14-18 (на данный момент отменены), для проектируемых поселений (или их микрорайонов), а также в поселениях, в которых отсутствуют пожарные части, определение мест дислокации подразделений пожарной охраны рекомендовалось осуществлять с использованием СП 11.13130.2009 «Места дислокации подразделений пожарной охраны».

Для функционирующих же поселений и сельских районов места дислокации подразделений пожарной охраны ранее определялись в соответствии с «Методическими рекомендациями по определению мест размещения подразделений пожарной охраны в населенных пунктах в целях доведения времени прибытия первого подразделения пожарной охраны до нормативных значений». Таким образом, они играли важную роль в системе организационного проектирования пожарно-спасательных гарнизонов.

В настоящее время выбор места дислокации подразделений пожарной охраны в функционирующих населенных пунктах осуществляется аналогично проектируемым, в соответствии с СП 11.13130.2009 «Места дислокации подразделений пожарной охраны».

«Методические рекомендации по определению мест размещения подразделений пожарной охраны в населенных пунктах в целях доведения времени прибытия первого подразделения пожарной охраны до нормативных значений» содержали раздел, касающийся расчета скорости следования пожарных автомобилей, который должен проводиться отдельно для каждого населенного пункта. Данный расчет был основан на статистическом анализе фактических

сведений о следовании пожарных автомобилей путем построения гистограммы распределения скоростей и оценки граничной скорости следования пожарных автомобилей $u_{гр}$ как разницы средней скорости μ и среднеквадратичного отклонения σ .

$$u_{гр} = \mu - \sigma \quad (1.1)$$

В прочих приведенных выше документах вопрос расчетного определения скорости следования пожарных автомобилей с учетом местных особенностей не рассматривается.

Проведенный анализ показывает, что на данный момент в Российской Федерации сложилась следующая нормативная база организационного проектирования объектов пожарной охраны (рисунок 1.3).



Рисунок 1.3 – Структура нормативных документов в области определения мест дислокации подразделений пожарной охраны

Задачи организационного проектирования подразделений пожарной охраны можно разделить на два основных блока:

1. Оценка ресурсной оснащённости.

2. Оценка мест дислокации и количества подразделений пожарной охраны.

В зависимости от объекта расчета (населенный пункт или организация) и задачи выбирается документ, требованиями которого следует руководствоваться.

1.2 Анализ статистических данных реагирования подразделений пожарной охраны в Российской Федерации

В ходе работы были проанализированы данные следующих типов:

- сведения о населенных пунктах на территории Российской Федерации;
- сведения о подразделениях пожарной охраны всех типов согласно официальным данным МЧС России;
- сведения о пожарах, задокументированных на территории РФ в период с 2010 по 2020 год.

Согласно набору открытых данных «Численность населения и географические координаты населенных пунктов России по данным региональных медицинских информационно-аналитических центров» (по состоянию на 2021 год) численность населения Российской Федерации составляет 147 624 669 чел. Количество городских населенных пунктов (города и поселки городского типа) составляет 1 753, а количество населенных пунктов сельского типа 154 168. При этом численность городского населения составляет 103 440 823 (70,07% от общего количества), а сельского 44 183 846 (29,93% от общего количества) [74].

В таблице 1.2 представлены данные о численности населения и количестве населенных пунктов в РФ в соответствии с классификацией СП 42.13330.2016 «Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений».

Таблица 1.2 – Сведения о населенных пунктах в РФ по состоянию на 2021 год

Тип	кол-во, ед.	население, чел.
городские крупнейшие (более 1 млн.чел)	19	24 451 725
городские крупные (от 250 до 1000 тыс.чел. включительно)	70	32 216 784
городские большие (от 100 до 250 тыс.чел. включительно)	103	16 127 131
городские средние (от 50 до 100 тыс.чел. включительно)	159	11 080 628
городские малые (до 50 тыс.чел. включительно)	1 372	19 564 555
сельские крупные (свыше 5 тыс.чел.)	1 333	14 003 165
сельские большие (от 1 до 5 тыс.чел. включительно)	7 082	14 133 009
сельские средние (от 200 до 1000 чел. включительно)	27 057	12 080 862
сельские малые (от 50 до 200 чел. включительно)	28 180	3 049 385
малонаселенные (менее 50 чел.)	67 105	917 425

Согласно данным, предоставленным Главным управлением пожарной охраны МЧС России, по состоянию на август 2023 года на территории Российской Федерации насчитывалось 16 788 подразделений пожарной охраны. Из них:

- 3 184 подразделения ФПС;
- 4 481 подразделение ППС субъекта РФ;
- 1 718 подразделений МПО;
- 7 405 подразделений ДПО (ДПК).

База данных учета пожаров и их последствий, использованная в работе, была составлена в соответствии с ранее действовавшими приказами МЧС России № 625 от 24.12.2018 г. «О формировании электронных баз данных учета пожаров и их последствий», № 727 от 26.12.2014 г. «О совершенствовании деятельности по формированию электронных баз данных учета пожаров (загораний) и их последствий» и № 494 от 12.09.2016 г. «О внесении изменений в приложения №№ 1, 2 к приказу МЧС России от 26.09.2016 № 727».

Данная база была сформирована на основе данных из карточек учета пожаров и содержала сведения о 4 800 409 событиях, классифицированных как «пожар», произошедших за период с 2010 по 2020 год включительно. В 2021 году сбор данных был прекращен в связи с переходом на новую технологическую базу.

В различные годы к категории «пожар» относились разные события. Так, до 2018 года к данной категории относились случаи, связанные с горением мусора и травы. В 2018 году в связи с выходом приказа МЧС России от 24.12.2018 г. № 625

«О формировании электронных баз данных учета пожаров и их последствий» такие события перестали включаться в базу данных, поскольку они не представляли интерес с точки зрения оценки реагирования подразделений пожарной охраны, а информация, содержащаяся в соответствующих записях базы данных, искажала сведения о реагировании подразделений пожарной охраны на пожары в жилом и промышленном секторе.

Также были исключены записи с очевидно ошибочными сведениями, касающимися скорости следования подразделений пожарной охраны к месту пожара, поскольку пожарные автомобили не могут двигаться со скоростями более 100 км/ч и менее 10 км/ч на протяжении всего маршрута.

После исключения данных в обзор были включены 2 359 434 записи о пожарах.

Каждая запись содержит набор сведений о реагировании на пожары в соответствии с приложением № 1 к приказу МЧС России от 24.12.2018 г. № 625 «О формировании электронных баз данных учета пожаров и их последствий».

База данных о пожарах была проанализирована с использованием моделей статистического анализа на предмет получения следующих данных:

- общее количество пожаров, ед.,
- пожаров на 1000 чел., ед.,
- погибших на 1000 чел., ед.,
- среднее время прибытия подразделений пожарной охраны $t_{\text{пр.ср.}}$, мин.,
- средняя скорость следования подразделений пожарной охраны $u_{\text{сл.}}$, км/ч,
- средняя площадь пожара $S_{\text{п}}$, м.кв.,
- средний оценочный ущерб от одного пожара, руб.,
- количество подразделений ФПС, ед.,
- количество подразделений ППС субъекта РФ, ед.,
- количество подразделений ДПО (ДПК), ед.,
- количество подразделений кроме ФПС, ед.,
- количество подразделений ПО всего, ед.,

- количество подразделений ПО на 1000 человек, ед.,
- количество населенных пунктов на 1 подразделение ПО, ед.,
- количество пожаров, ед.,
- количество пожаров на 1000 чел., ед.,
- количество погибших на 1000 чел., ед.,
- среднее время прибытия подразделений пожарной охраны $t_{пр.ср.}$, мин.,
- средняя скорость следования подразделений пожарной охраны $u_{сл.}$, км/ч,
- средняя площадь пожара $S_{п}$, м²,
- средний оценочный ущерб от одного пожара, руб.,
- доля пожаров, время прибытия на которых не превышает установленных норм (Индекс прикрытия фактический, далее – ИПФ).

Полученные результаты были проанализированы в разрезе регионов РФ, и дальнейший анализ проводился на основе сравнения показателей внутри отдельно взятых регионов. В таблице 1.3 приведен пример представления основных сведений о полученных параметрах обстановки с пожарами, проанализированными в работе.

Таблица 1.3 – Фрагмент основных сведений о параметрах обстановки с пожарами в регионах Российской Федерации

№	Регион	Подразделений ПО всего, ед.	Погибших на 1000 чел.	$t_{пр.ср.}$, мин	ИПФ-10	ИПФ-20	$S_{п}$ город, м.кв	Ущерб, средн., руб	Подразделений ПО на 1000	Населенных пунктов на 1 подразделение ПО
1	Амурская область	282	1,06	6,13	0,99	0,98	871,97	53397	0,36	2,12
2	Архангельская область	323	0,76	6,82	0,91	0,93	40,45	163046	0,29	9,02
3	Забайкальский край	278	0,76	6,87	0,88	0,92	817,39	15850	0,24	2,79
4	Иркутская область	557	0,69	6,66	0,97	0,98	88,42	76108	0,23	2,65
5	Камчатский край	65	0,60	5,96	0,99	0,99	40,19	73903	0,21	1,29

Проведен корреляционный анализ полученных данных (рисунок 1.4).

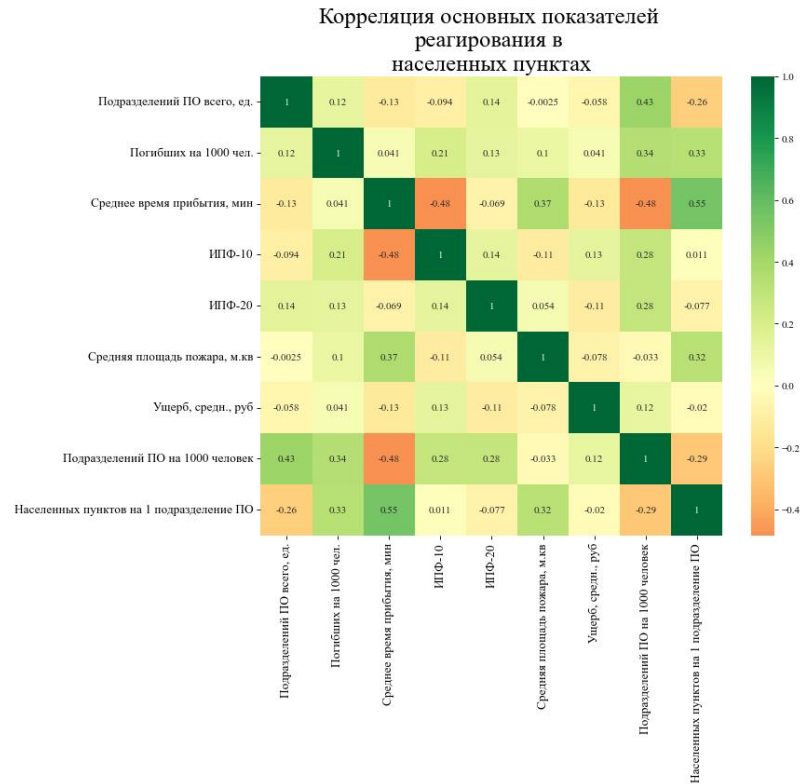


Рисунок 1.4 – Матрица корреляции основных параметров пожаров

Рассматривая результаты корреляционного анализа, можно отметить некоторые закономерности:

1. Прослеживается прямая связь между временем прибытия подразделений пожарной охраны и площадью пожара. Чем больше среднее время прибытия подразделений пожарной охраны в регионе, тем выше средняя площадь пожара (коэффициент корреляции 0,37).

2. Существует обратная связь между временем прибытия подразделений пожарной охраны и индексом прикрытия территории: чем длительнее время прибытия, тем ниже индекс прикрытия, соответственно, территория менее защищена подразделениями пожарной охраны (коэффициент корреляции -0,48).

3. Чем большее количество подразделений пожарной охраны приходится на 1000 человек населения, тем меньше время прибытия (коэффициент корреляции - 0,48).

4. Чем большее количество населенных пунктов приходится на одно подразделение пожарной охраны, тем больше время прибытия (коэффициент 0,55).

Можно заключить, что время прибытия является одним из важных параметров, оказывающих влияние на ход тушения и последствия пожара. Чем больше время прибытия подразделений пожарной охраны, тем больше площадь пожара и общее время тушения пожара.

На снижение времени прибытия в числе прочих оказывает влияние увеличение количества подразделений пожарной охраны, приходящихся на 1000 человек. При этом распыление сил пожарной охраны на защиту большего количества населенных пунктов, наоборот, приводит к увеличению времени прибытия подразделений пожарной охраны и снижению защищенности территорий в целом.

Статистические данные о пожарах подтверждают, что увеличение относительного количества подразделений пожарной охраны положительно сказывается на улучшении индекса прикрытия территории, что в свою очередь влечет снижение времени прибытия первого подразделения.

1.3 Обзор научных публикаций по вопросам решения задач определения дислокации подразделений пожарной охраны

Вопросам расчетного обоснования мест дислокации подразделений пожарной охраны в России уделяется значительное внимание. Изучением данной темы занимались такие исследователи, как Б.М. Пранов [91], А.Н. Денисов [34, 36], В.Я. Вилисов [26], Н.Н. Брушлинский, С.В. Соколов [8- 11, 12, 15- 17, 97, 99], Е.М. Алехин [2, 3, 96], Ю.И. Коломиец [4, 13], М.В. Сибиряков [95, 98], А.В.

Матюшин, А.А. Порошин, А.А. Кондашов, Ю.А. Матюшин, Е.Ю. Удавцов [56, 57, 58- 60, 62- 64, 66, 79, 82, 85, 86, 92, 93], В.В. Харин, Е.В. Бобринев [87, 88, 103-105], В.А. Маштаков [68, 69], М.В. Буйневич, М.Т. Пелех, А.В. Максимов, А.В. Вострых [19-24], А.А. Таранцев [101], П.Ф. Барышев [6, 7], П.А. Матюшев [52-55], Н.В. Мартинович [49, 70], Г.И. Абдурагимов [1], Д.В. Захаров [36], Д.А. Туан [102], К.Т. Нго [75], Ф.К. Хынг [107], Ю.С. Зайченко [35], Г.П. Сурина [100].

Можно выделить две наиболее известных научных школы (авторских коллектива) в области организационного планирования пожарных гарнизонов:

1. Коллектив под руководством доктора технических наук С.В. Соколова (АГПС МЧС России);
2. Коллектив под руководством докторов технических наук А.В. Матюшина и А.А. Порошина (ВНИИПО МЧС России).

Модели и алгоритмы, используемые в рассмотренных работах, можно разделить на два основных блока, соотносящиеся с научными школами. Методическую основу подходов, используемых в АГПС МЧС России, составляет имитационное моделирование деятельности экстренных служб с использованием компьютерных моделей. Такой подход позволяет учитывать обширный перечень параметров функционирования экстренных служб (дислокация подразделений, техническую оснащенность, характер оперативной обстановки и пр.) и определять параметры реагирования подразделений пожарной охраны, которые невозможно установить иными способами. На основе такого подхода реализована компьютерная имитационная система КИС «КОСМАС» (Компьютерная Система Моделирования Аварийных Служб), применяющаяся для решения задач, связанных с анализом и проектированием экстренных служб в России и за рубежом [9, 13, 99].

Основным достоинством данного подхода можно назвать комплексный учет параметров функционирования подразделений пожарной охраны и возможность оценки их взаимного влияния на оперативную обстановку в динамике.

Научной школой ВНИИПО МЧС России в основу методологии проектирования ресурсной оснащенности положено математическое моделирование деятельности пожарной охраны. Разработки специалистов ВНИИПО МЧС России реализованы в СП 11.13130.2009 «Места дислокации подразделений пожарной охраны», СП 232.1311500.2015 «Пожарная охрана предприятий. Общие требования» и т.д. В качестве достоинств математического моделирования можно отметить возможность упростить процесс организационного проектирования пожарно-спасательных гарнизонов и сделать его доступным для конечных пользователей [56-60, 62-64, 61, 66].

Можно выделить следующие типы исходных данных, используемых при проведении расчетов:

- данные о улично-дорожной сети;
- сведения о дислокации функционирующих подразделений пожарной охраны и их оснащении;
- сведения о статистике реагирования подразделений пожарной охраны;
- сведения об объектах, размещенных на территории населенного пункта;
- сведения о пожароопасных характеристиках веществ и материалов.

Предпочтение в ходе работы отдается данным, формируемым непосредственно в процессе проведения расчетов. Возможность использования сторонних данных упоминается редко и касается в подавляющем большинстве случаев улично-дорожной сети населенных пунктов

Наиболее значимыми достижениями в данной области можно назвать:

1. Создание теоретической основы организационного проектирования подразделений пожарной охраны с использованием имитационного и математического моделирования.

2. Создание нормативно-технической базы для оценки количества и мест дислокации подразделений пожарной охраны.

Вопросам расчетного обоснования количества и оптимальных мест дислокации подразделений пожарной охраны уделяется внимание и в зарубежных

научных публикациях. Были рассмотрены публикации авторов из Ирака [154], Ирана [119], ОАЭ [114], Бельгии [121], Бразилии [130], Австралии [137], Нидерландов [153], Чехии [148], Польши [158, 160], Украины [134, 147, 151], Ганы [115], Непала [155].

С точки зрения обширности и глубины научных работ в данной области необходимо отметить работы авторов из США [132, 138, 139, 142, 143, 157], Китая [120, 127, 133, 135, 159, 162] и Турции [109, 128, 140, 144, 145].

Общими чертами зарубежных подходов является стремление использовать модели многофакторной оптимизации, применение современных ГИС и моделей пространственного анализа, а также использование публичных и закрытых наборов пространственных данных. В расчетах широко применяются модели сетевого анализа, основанные на моделях теории графов, а также способы визуализации изохрон. Математическая основа в проводимых исследованиях, как правило, четко оформлена с использованием специальной терминологии.

Также можно отметить, что в последнее время появляется большое количество публикаций, описывающих применение моделей машинного обучения и эвристических алгоритмов, таких как генетический алгоритм и алгоритм имитации отжига. При этом в публикациях не встречаются упоминания о моделях глубокого обучения, таких как нейронные сети.

В публикациях зарубежных исследователей к числу наиболее значимых факторов, влияющих на расчетное обоснование количества подразделений пожарной охраны и выбор оптимальных мест их дислокации, чаще всего относятся: удаленность подразделений пожарной охраны от мест вызова, категория объектов по степени риска возникновения пожара, социальная значимость объектов инфраструктуры, наличие на территории объектов, использующих или хранящих опасные материалы, удаленность от ближайших водоисточников, присутствие высотных зданий и подземных сооружений, экономические издержки, связанные с организацией и содержанием подразделений пожарной охраны, доступность медицинской помощи в случае чрезвычайной ситуации, особенности улично-

дорожной сети, уровень потенциальных пожарных рисков, топографические характеристики местности, а также наличие людей в состоянии повышенной уязвимости (например, пожилые люди, дети, инвалиды).

Кроме того, в ряде научных работ рассматриваются дополнительные аспекты, такие как культурные и политические факторы — например, важность тех или иных территорий с точки зрения населения [154, 114], частота возникновения природных чрезвычайных ситуаций, таких как наводнения и землетрясения [144, 162], а также расположение мест массового скопления людей [135]. Учет этих параметров позволяет повысить точность моделирования и обеспечивает более объективную оценку при планировании размещения сил и средств пожарной охраны.

Особой чертой публикаций исследователей из США является высокий уровень научной проработанности, что проявляется в использовании современных методологий пространственного анализа и моделирования. Характерными особенностями американских исследований являются широкое применение программного обеспечения ArcGIS, разработанного компанией ESRI (рисунок 1.5) [132, 138], а также обилие детализированных картографических материалов и визуализаций. В данных работах активно применяются различные модификации и интерпретации известных оптимизационных моделей, таких как MCLP (Maximal Covering Location Problem – Задача максимального покрытия) и LSCP (Location Set Covering Problem – Задача размещения множества), позволяющие эффективно решать задачи оптимального распределения ресурсов.

Особенностями работ из Китая можно назвать комплексность исследований, обработку в ходе исследований большого количества исходных данных, вовлечение крупных авторских коллективов, большое количество схожих исследований применительно к разным территориям и населенным пунктам [133, 135]. В исследованиях авторы тяготеют к использованию в качестве программной платформы готовых решений компании ESRI (рисунки 1.6, 1.7).

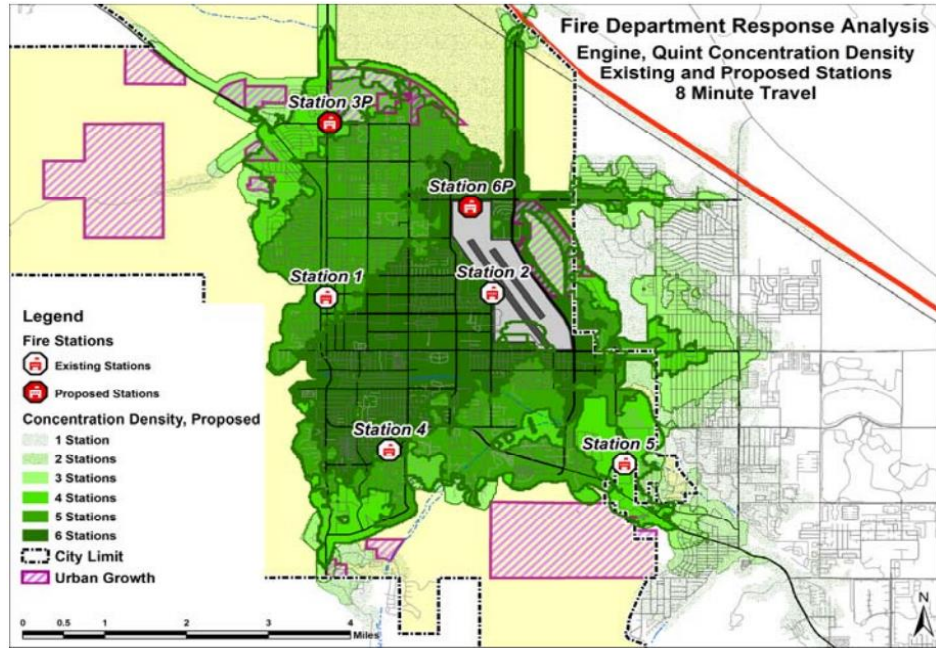


Рисунок 1.5 – Карта наложения 8-минутных зон обслуживания и рекомендуемых мест дислокации новых подразделений пожарной охраны

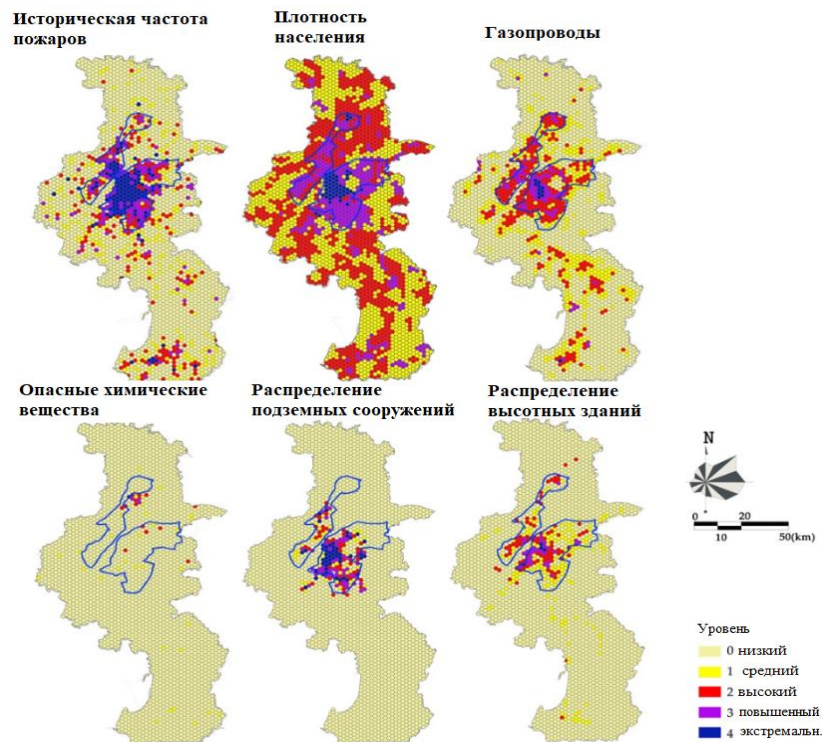


Рисунок 1.6 – Пример визуализации картографических слоев, отражающих разные факторы, влияющие на место дислокации подразделений пожарной охраны [133]

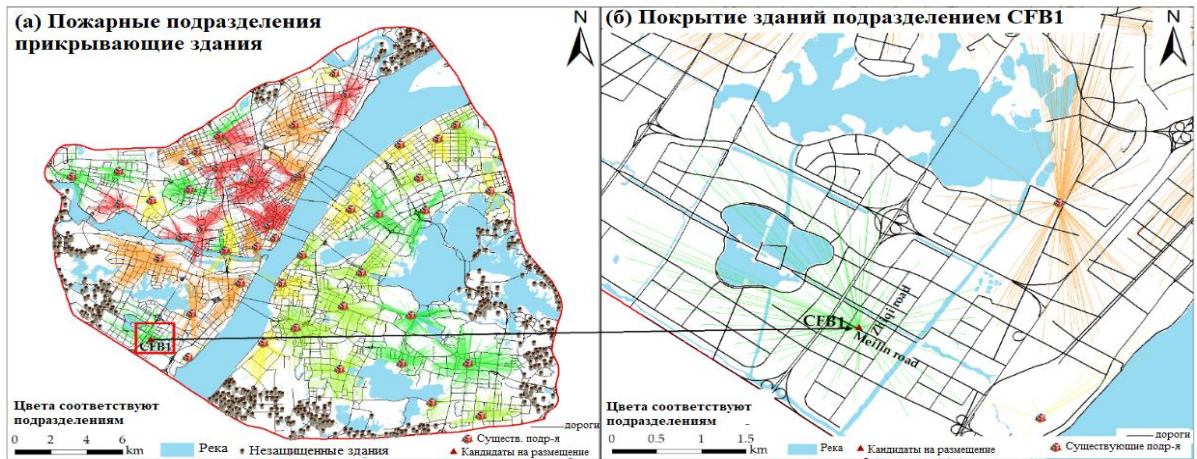


Рисунок 1.7 – Пример визуализации результатов оценки оптимальных мест дислокации подразделений пожарной охраны в городе Ухань [135]

Особенностями работ турецких ученых является применение многофакторных моделей оптимизации в сочетании с моделями экспертного анализа и нечеткой логики (рисунок 1.8), а также рассмотрение в качестве факторов, оказывающих влияние на выбор места дислокации подразделений пожарной охраны, частоту возникновения землетрясений и наличие территорий, подверженных их влиянию (рисунок 1.9) [128, 144].

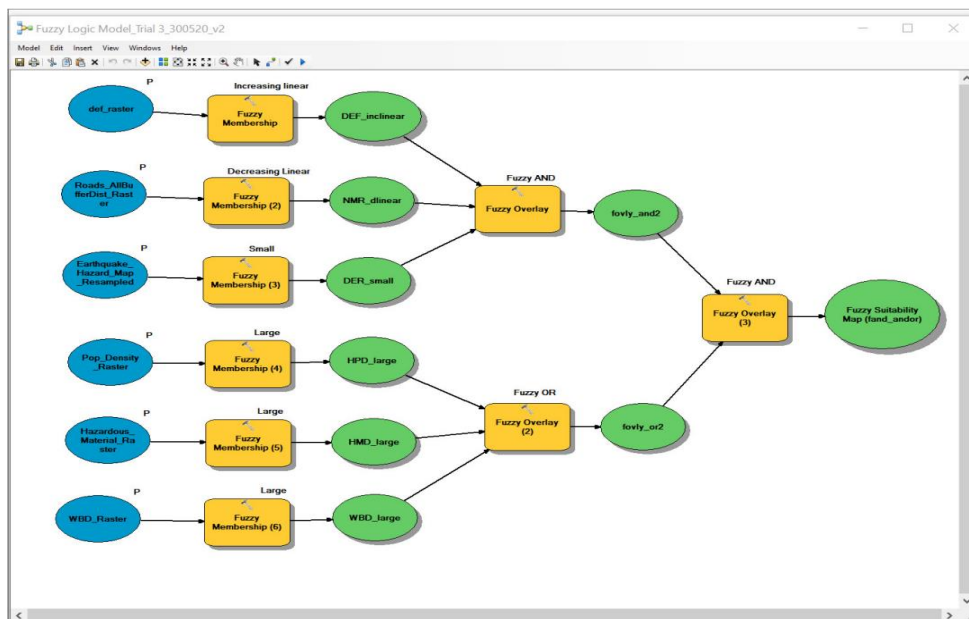


Рисунок 1.8 – Пример построения модели на основе нечеткой логики в работе [144]

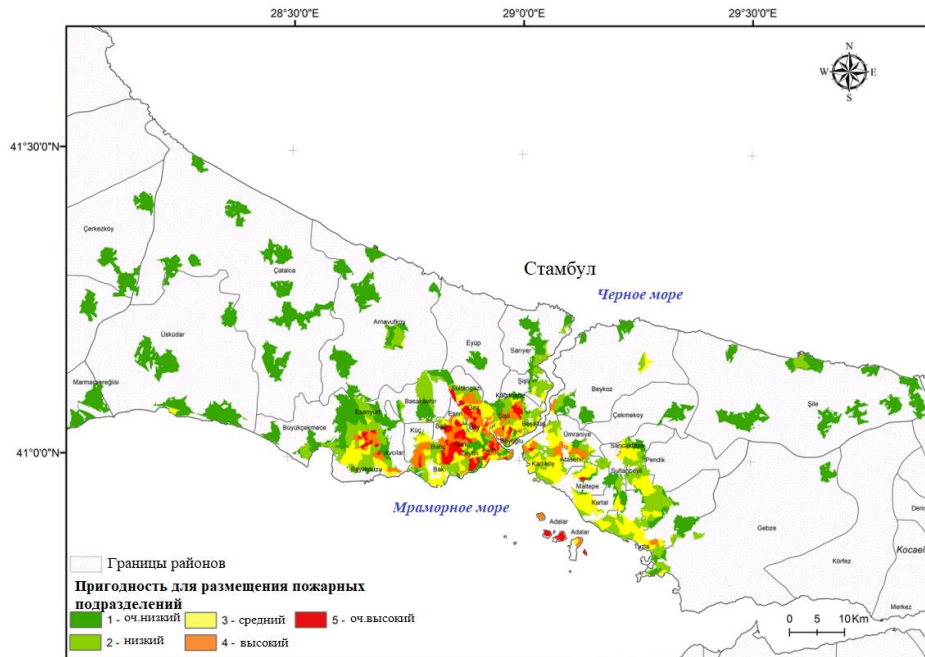


Рисунок 1.9 – Пример результатов расчета оптимальных мест дислокации подразделений пожарной охраны [144]

1.4 Анализ информационных технологий в области определения дислокации подразделений пожарной охраны

Как следует из обзора научных работ, на сегодняшний день в Российской Федерации существуют два примера реализованных информационных технологий в области расчета количества и мест дислокации подразделений пожарной охраны.

Первый – Компьютерная имитационная система «КОСМАС» и созданная для обеспечения ее необходимой информацией система «СТРЭС» (Статистика Работы Экстренных Служб) [9, 13, 99].

В общем виде это сложный комплекс математических моделей, использующих вероятностно-статистические закономерности функционирования экстренной службы и топографические параметры территории, которую она обслуживает. Имитационная система предназначена для исследования процесса функционирования подразделений пожарной охраны города и экспертизы проектных, организационных и управленческих решений, связанных с

деятельностью этих служб. В имитационной системе «КОСМАС» город (территория) представляется в виде графа уличной сети и непрерывного пространства заданной конфигурации, на котором заданы места дислокации различных городских объектов, больниц, подразделений пожарной охраны, районы их обслуживания, техника и персонал, размещенные на каждой станции, и т.п. Уличная сеть в системе представляется в векторном виде. Каждому отрезку может быть присвоена своя скорость движения (которая может меняться в зависимости от времени суток) и направление движения. В качестве базового алгоритма поиска оптимальных маршрутов в транспортной сети используется алгоритм Дейкстры [9, 13].

Ядром компьютерной системы является имитационная модель, в основе которой лежат статистические закономерности случайных процессов, присущие функционированию экстренных служб города [9, 13].

В ходе имитационных экспериментов система «КОСМАС» (рисунок 1.10) способна решать ряд прикладных задач. Например, изменяя параметры системы, можно получать различные характеристики работы экстренных служб и выбирать наиболее целесообразные варианты их организационной структуры [9, 13].

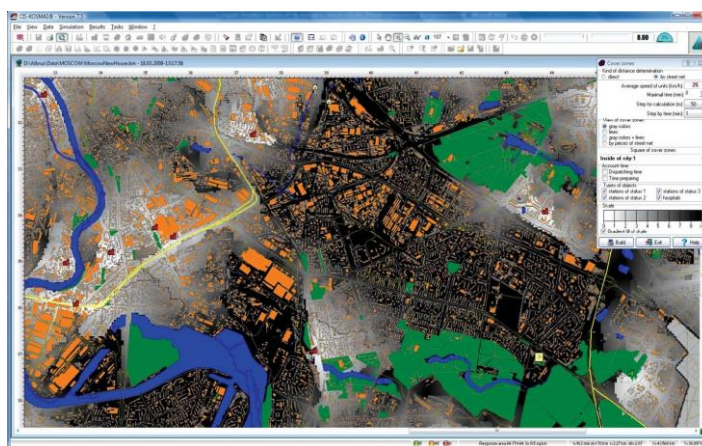


Рисунок 1.10 – Пример зон покрытия территории города Москва (фрагмент) подразделениями пожарной охраны в темных зонах при времени следования более 8 минут [13]

Система открыта для модернизации, поэтому особенности, связанные с деятельностью конкретной службы или территорией, могут быть дополнительно учтены на стадии адаптации. Средняя продолжительность адаптации имитационной системы для конкретной экстренной службы города (территории) составляет 6–7 мес. Обучение персонала пользователей системы длится 2–3 дня [13].

Второй разработкой является созданная в начала 2010-х годов во ВНИИПО МЧС России Автоматизированная Система Организационного Проектирования Пожарной охраны (далее – АСОП ПО) (рисунок 1.11), в основу которой положена методология проектирования гарнизонов пожарной охраны, изложенная в СП 11.13130.2009 «Места дислокации подразделений пожарной охраны» и работе [59, 67, 84].

АСОП ПО может быть использована проектными организациями при формировании планов строительства и развития населенных пунктов в части обоснования требований к местам дислокации и ресурсной оснащенности подразделений пожарной охраны. Также система может использоваться органами управления пожарной охраны для оценки эффективности организации деятельности существующих подразделений пожарной охраны [66].

Разработка АСОП ПО осуществлена с использованием функциональных возможностей платформы ESRI ArcGIS [66].

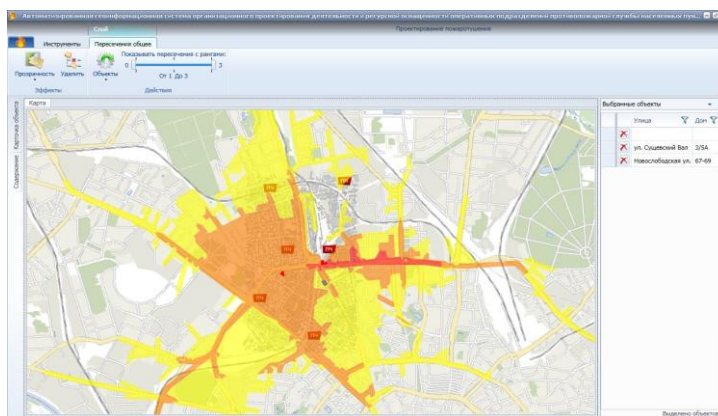


Рисунок 1.11 – Пересечение зон покрытия объектов АСОП ПО

1.5. Формализация проблематики обоснования необходимого количества и оптимальных мест дислокации подразделений пожарной охраны

Задачам расчетного определения количества и оптимальных мест дислокации подразделений пожарной охраны в Российской Федерации посвящено множество работ российских исследователей, описанных в разделе 1.3. Значительное количество из них рассматривает применение ранее созданных подходов и их адаптацию к современным условиям. Часть исследователей в своих научных разработках сосредоточена на поиске новых путей решения данной задачи, в том числе с использованием современных информационных технологий, таких как искусственный интеллект [23, 19, 55, 41].

Остро стоит вопрос применения существующих моделей и алгоритмов для решения масштабных расчетных задач. Несмотря на то, что в ряде публикаций речь идет о проведении расчетов для крупных регионов [99], алгоритмическая сложность таких подходов, как имитационное моделирование деятельности пожарной охраны, может приводить к значительным временным затратам на выполнение расчетов.

Отдельную сложность представляет подготовка исходных данных. В рассмотренных публикациях отмечается, что большая часть данных, необходимых для расчетов, либо должна вводиться вручную, либо требует серьезной обработки. Очевидно, что чем выше требуемая точность расчетов, тем большим объемом исходных данных необходимо располагать.

Авторы [13] указывают, что для адаптации КИС КОСМАС для конкретного региона требуется от 3 до 4 недель работы. При этом едва ли возможно учесть все многообразие факторов, влияющих на эффективность деятельности подразделений пожарной охраны.

Одним из следствий описанных недостатков существующих решений является сложность их применения за пределами научных коллективов. Ни в одной из рассмотренных публикаций не упоминается о внедрении разработанных

решений в гарнизонах пожарной охраны, органах местной исполнительной власти или в центральном аппарате МЧС России, что указывает на трудности, связанные с их распространением и практическим применением.

Общей особенностью большинства публикаций можно считать редкое использование современных подходов к анализу и визуализации данных. Так, научные инструменты, созданные с использованием языков программирования Python и R, не упоминаются ни в одной из работ, несмотря на то, что эти инструменты в настоящее время претендуют на статус стандарта для проведения и оформления научных вычислений. Кроме того, в публикациях не часто упоминаются модели пространственной аналитики из области геоинформационных систем. Лишь немногие авторы приводят сведения об использовании открытых данных о дорожной сети, зданиях и сооружениях, свойствах объектов и материалов, демографических данных и т.д. [48].

Таким образом, проблематикой совершенствования системы организационного проектирования пожарно-спасательных гарнизонов, предлагаемой к решению в данной работе, является, развитие информационно-аналитического обеспечения поддержки принятия решений по обоснованию мест размещения подразделений пожарной охраны в городской среде.

1.6 Выводы по главе 1

Проведенный анализ нормативно-технической базы и научных работ в предметной области исследования показал:

1. Доля пожаров, на которых соблюдаются требования по времени прибытия первого пожарного подразделения, составляет 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. Таким образом, создание новых

подразделений пожарной охраны в оптимальных местах дислокации в населенных пунктах позволит эффективно минимизировать время прибытия подразделений пожарной охраны 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».

2. В Российской Федерации существует нормативно обоснованная система расчетного определения количества и оптимальных мест дислокации подразделений пожарной охраны.

3. В области темы исследования накоплен значительный опыт работ как в России, так и за рубежом. Наиболее развитым и используемым способом решения задач поддержки принятия решений при определении необходимого количества подразделений пожарной охраны и оптимальных мест их дислокации является математическое и имитационное моделирование.

4. Существует перспектива совершенствования системы организационного проектирования городских подразделений пожарной охраны с использованием информационно-аналитической системы поддержки принятия решений по обоснованию дислокации подразделений пожарной охраны.

ГЛАВА 2. АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ОКАЗЫВАЮЩИХ ВЛИЯНИЕ НА ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО МЕСТА ДИСЛОКАЦИИ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ ПОЖАРНОЙ ОХРАНЫ

В рамках разработки модели и алгоритмов поддержки принятия решений по определению необходимого количества подразделений пожарной охраны и оптимальных мест их дислокации, требуется выявить факторы оказывающие наибольшее влияние на параметры реагирования. С целью оценки степени влияния этих факторов необходимо получить ряд частных математических моделей.

2.1 Анализ структуры системы реагирования на пожары в крупных городах

2.1.1 Динамическая и статическая диспетчеризация

Весь массив решений, связанных с направлением подразделений пожарной охраны к месту вызова, можно разделить на две группы:

1. Группа решений, определяемых в первую очередь правилами, указанными в документе предварительного планирования боевых действий.
2. Группа решений, определяемых в первую очередь реально складывающейся в гарнизоне оперативной обстановкой.

Задачи, которые решают данные группы, можно обозначить как «задачи статической диспетчеризации» и «задачи динамической диспетчеризации».

Задачи статической и динамической диспетчеризации подробно рассмотрены в работах [9, 10, 8, 16, 91]. В данном исследовании разделение задач диспетчеризации на статические и динамические необходимо для оценки учета тех или иных факторов, оказывающих влияние на организационное проектирование гарнизонов пожарной охраны.

Принципиальной отличительной чертой задач динамической диспетчеризации является их скоротечный характер. Эффект таких факторов может оказывать влияние на изменение оперативной обстановки непродолжительный период времени. При этом частота их проявления может быть невелика и/или непредсказуема.

К факторам, влияющим на решение задач динамической диспетчеризации, можно отнести плотность дорожного трафика, дорожно-транспортные происшествия, перекрытие проездов, явления природного характера (туман, дождь, снег, гололед) и т.д. Как показали исследования [46, 98], на скорость следования пожарных автомобилей также оказывают влияние время суток и сезон года.

Предсказать возникновение тех или иных факторов (дорожно-транспортные происшествия, выход техники из строя, большое количество одновременных пожаров и т.д.) с достаточной точностью не представляется возможным. Факторы внешней среды оказывают одинаковое воздействие на все подразделения пожарной охраны гарнизона, а потому не могут предоставить какое-либо преимущество при проведении расчетов по оргпроектированию. В связи с этим учет факторов динамической диспетчеризации при решении задач статической диспетчеризации не имеет смысла.

В дальнейшем ходе исследования разработка модели и алгоритмов расчетного определения количества и дислокации подразделений пожарной охраны будет рассматриваться как задача статической диспетчеризации с учетом соответствующих факторов. Более подробно эти факторы будут рассмотрены ниже.

2.1.2. Предварительный перечень факторов, оказывающих влияние на выбор мест дислокации подразделений пожарной охраны

Исходя из пункта 6 Порядка привлечения сил и средств подразделений пожарной охраны, пожарно-спасательных гарнизонов для тушения пожаров и проведения аварийно-спасательных работ, утвержденного приказом МЧС России от 13.01.2025 г. №19, одной из целей организации системы реагирования подразделений пожарной охраны является прибытие первого подразделения $t_{\text{пр}}$ в наиболее удаленную точку района выезда за минимальное время, т.е.:

$$t_{\text{пр}} \rightarrow \min$$

С учетом требований статьи 76 123-ФЗ можно также добавить следующее условие:

$$t_{\text{пр}}^{\text{г}} \leq 10 \text{ мин}$$

$$t_{\text{пр}}^{\text{с}} \leq 20 \text{ мин}$$

где $t_{\text{пр}}^{\text{г}}$ – время прибытия в городских населенных пунктах, мин;

$t_{\text{пр}}^{\text{с}}$ – время прибытия в сельских населенных пунктах, мин.

То есть оптимальной организацией системы реагирования является такая организация, при которой время прибытия в наиболее удаленную точку района выезда осуществляется в максимально короткое время и при этом не превышает 10 минут для городских населенных пунктов и 20 для сельских.

С точки зрения федерального законодательства показатель $t_{\text{пр}}$ в такой формулировке является приемлемым параметром реагирования для решения задач совершенствования организации системы реагирования гарнизона. Однако такой подход не учитывает особенностей реальных населенных пунктов.

Представим пример возможной городской застройки (рисунок 2.1). На территории населенного пункта выделены:

- зона многоэтажной застройки;
- промышленная зона;

– парковая зона.

Предполагается, что прочая территория равномерно застроена жилыми зданиями частного сектора и малоэтажной застройкой, зданиями прочего назначения.

Цифрами отмечены возможные места дислокации подразделения пожарной охраны. Из любой точки возможного дислокации можно попасть в любую другую точку, смежную с ней диагонально или ортогонально.

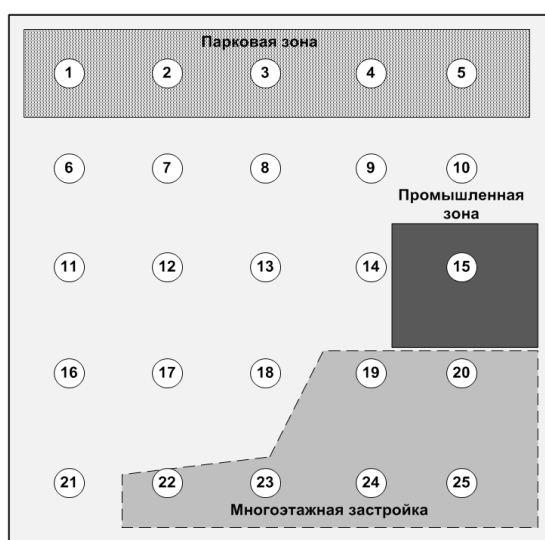


Рисунок 2.1 – Пример городской застройки

С точки зрения минимизации времени прибытия в наиболее удаленную точку района выезда оптимальным вариантом для дислокации подразделения пожарной охраны будет точка 13. Однако в действительности более подходящим было бы дислокация подразделения пожарной охраны в точке 19, т.к. это позволит сократить время прибытия одновременно в промышленную зону, где пожары влекут за собой существенный материальный ущерб, и в зону многоэтажной застройки, где в силу высокой плотности населения пожары случаются чаще. При этом время прибытия в парковую зону имеет меньшее значение в силу того, что пожары здесь происходят редко и, как правило, не влекут серьезного ущерба или человеческих жертв [5, 28].

Таким образом, при оценке качества организации системы реагирования на пожары необходимо учитывать не только время прибытия в наиболее удаленную точку района выезда, а некоторую агрегатную функцию, например, ее среднее или медианное значение. Причем рассматривать следует не абстрактные «точки района выезда», а, например, зоны застройки или конкретные здания, учитывая характер застройки и плотность населения.

Но ключевым параметром по-прежнему остается время прибытия первого подразделения пожарной охраны. Зная его, можно, во-первых, оценить соответствие времени прибытия установленным требованиям, а во-вторых, удовлетворение потребности в защите от пожаров. Иными словами, исходя из времени прибытия подразделений пожарной охраны, можно оценить, насколько обеспечены те или иные объекты и зоны района выезда защитой подразделениями пожарной охраны.

Зная, что эндогенными или фазовыми факторами (искомыми факторами) является время прибытия подразделений пожарной охраны, следует определить, какие внешние (экзогенные) факторы оказывают влияние на искомые величины и какие факторы могут рассматриваться в качестве управлений, т.е., будучи искусственно изменяемыми, могут оказывать влияние на искомые факторы [10].

Известная закономерность гласит, что время следования $t_{сл.}$ прямо пропорционально пройденному расстоянию l и обратно пропорционально скорости движения $u_{сл.}$:

$$t_{сл.} = 60l/u_{сл.} \quad (2.1)$$

Таким образом, основными факторами, оказывающими влияние на время прибытия подразделений пожарной охраны, являются скорость следования и расстояние от мест дислокации подразделений до возможных мест вызова.

На скорость следования, в свою очередь, могут оказывать прямое или косвенное влияние следующие факторы:

– рельеф местности;

- региональные особенности (температуры воздуха, влажность, гористость и т.д.);
- кривизна маршрута;
- категория дорог;
- расстояние;
- топология улично-дорожной сети.

На расстояние, которое пожарный автомобиль преодолевает для прибытия к месту вызова, в наибольшей степени влияют дислокация подразделений пожарной охраны и топология улично-дорожной сети, а также (в некоторой степени) распределение границ районов выезда.

Поскольку оценивается не само время прибытия, а то, насколько оно соответствует требованиям обеспечения допустимого времени прибытия и потребности в защите, необходимо рассмотреть факторы, определяющие целевые значения этих величин.

Нормативные требования к времени прибытия установлены статьей 76 123-ФЗ и пунктом 6 Порядка привлечения сил и средств подразделений пожарной охраны, пожарно-спасательных гарнизонов для тушения пожаров и проведения аварийно-спасательных работ, утвержденного приказом МЧС России от 13.01.2025 г. № 19.

Потребность в защите от пожаров нормативно не определена, поэтому одной из задач данной работы является определение величины потребности в защите в зависимости от ряда показателей.

Первым таким показателем можно считать частоту возникновения пожаров на объектах того или иного типа. Очевидно, что этот показатель варьируется в зависимости от характера объекта.

Учтено, что характер произошедшего пожара может быть различным. Например, пожары в жилых помещениях многоквартирных домов вряд ли способны повлечь больший материальный ущерб, чем пожары на торговых или промышленных предприятиях [77].

Распределение плотности мест возникновения пожаров на территории городов неравномерно (рисунок 2.2).

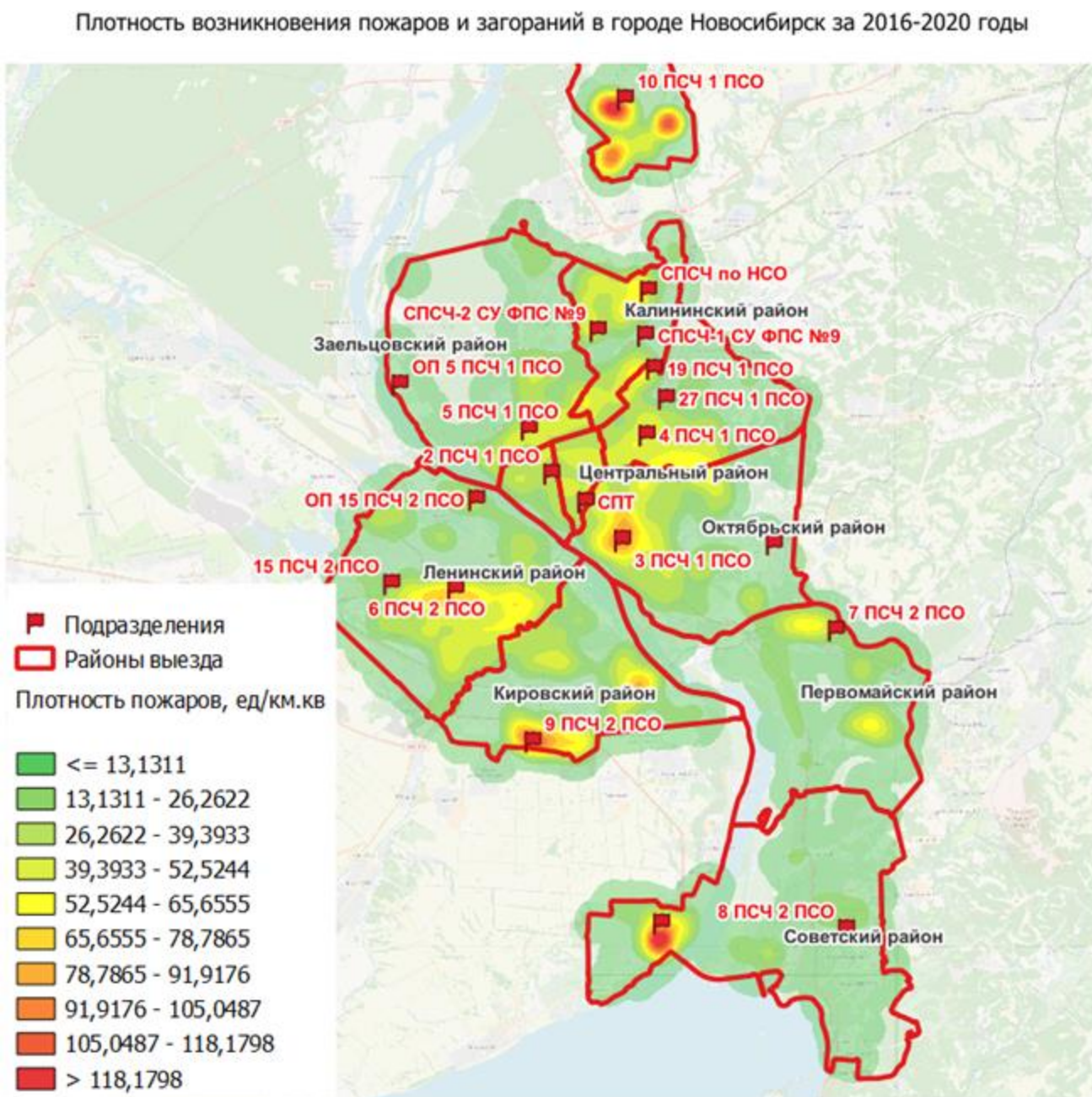


Рисунок 2.2 – Плотность распределения пожаров на территории города Новосибирска

Зная, какими именно зданиями и сооружениями застроена территория населенного пункта, можно оценить, в каких районах следует ожидать наибольшее

количество пожаров, приводящих к наиболее неблагоприятным последствиям. Из этого можно сделать вывод, какие районы города следует обеспечивать защитой подразделениями пожарной охраны в первую очередь. Таким образом, потребность в защите тех или иных районов города определяется характером их застройки.

На рисунке 2.3 представлена структура взаимного влияния вышеназванных факторов.

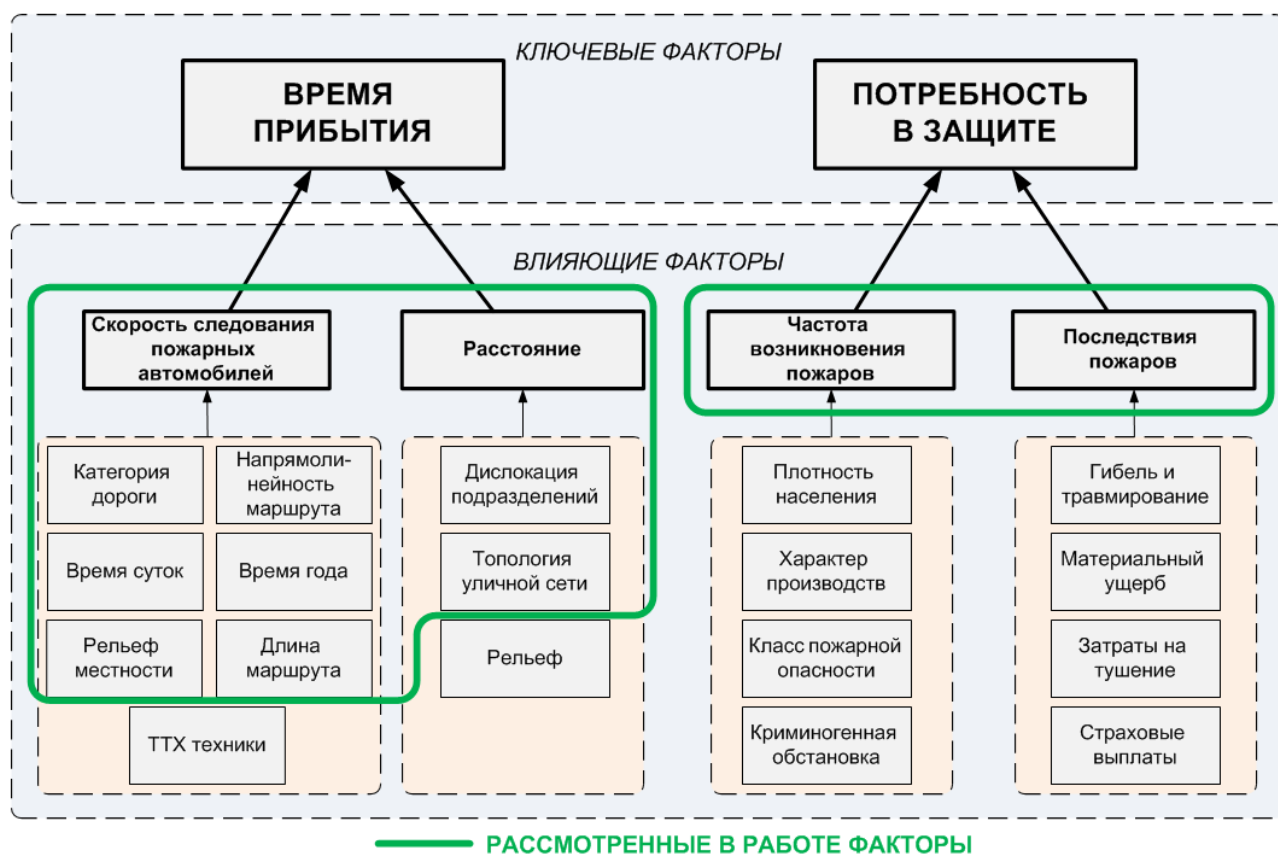


Рисунок 2.3 – Факторы, оказывающие влияние на выбор оптимальной дислокации подразделений пожарной охраны

2.2 Данные, использованные в работе

С целью оценки предложенных факторов были использованы следующие данные.

2.2.1 Данные из базы данных «Пожары»

В качестве источника данных о пожарах, произошедших на территории России, использованы сведения из базы данных «Пожары» за период с 2010 по 2020 годы. Данные были предоставлены департаментом информационных технологий и связи МЧС России в рамках совместной работы в 2022 году.

Исходный набор данных включает в себя сведения о классе функциональной пожарной опасности (далее – КФПО), начиная с 2019 года, что связано с выходом приказа МЧС России № 625 от 24.12.2018 г. «О формировании электронных баз данных учета пожаров и их последствий», внесшего изменения в порядок заполнения карточек пожаров. Количество записей с указанием КФПО в исходном наборе составляет 320 580.

Для расширения набора данных было проведено сопоставление КФПО на основе известных записей о типе объекта, доступных для 99,9% записей. В результате количество записей, содержащих сведения о КФПО, увеличилось до 1 150 220, что составляет 23,4% от общего числа записей в базе данных.

В исследовании анализировались только данные о пожарах, произошедших в зданиях, для тушения которых привлекались подразделения пожарной охраны. Таким образом, были сформулированы следующие требования к записям о пожарах:

1. Количество техники, привлеченной к тушению, должно быть больше нуля.
2. Площадь пожара должна быть больше нуля.
3. Время работы подразделений пожарной охраны должно быть больше нуля.
4. В поле «КФПО» не должно быть значения нуля (код, обозначающий пожар вне здания, в здании, не предназначенном для нахождения людей, или неизвестного типа).

После исключения записей, не соответствующих указанным требованиям, итоговый набор данных составил 1 043 076 записей.

Анализ распределения данных в наборе выявил наличие ряда аномально больших значений для некоторых показателей. Так, 99,9% записей о площади пожара находятся в диапазоне от 1 до 800 м², а 99,9% записей об ущербе не превышают 5 млн рублей, при этом максимальное значение ущерба от пожара составляет 250 млн рублей. В данном случае использование стандартных моделей отбраковки выбросов является ошибочным, так как это может привести к потере значимых данных.

Внутригрупповые описательные характеристики могут сильно различаться. Например, площади пожара в одноэтажных жилых домах несопоставимы со средними площадями пожаров в зданиях сельскохозяйственного назначения.

Исходя из вышесказанного, в работе использован следующий подход к очистке набора данных от выбросов:

1. Данные группируются по полю «КФПО».
2. Из выборки по каждой группе удаляются записи, превышающее значение 99,9% квантиля.

В результате было отброшено 995 (0,095%) записей. Итоговый набор данных состоит из 1 042 081 записей. В таблице 2.1 приведены примеры записей о пожарах.

Таблица 2.1 – Пример исходных данных о пожарах

Дата	КФ ПО	Пло щад ь пож ара, м.кв	Врем я занят ости, мин	Гиб ель	Трав мы	СПАСЕ НО: людей	Пря мой ущер б, руб.	ПА всег о
2011-12-14 02:46:00	Ф1.4	70	11	0	0	0	0	1
2010-11-29 11:23:00	Ф1.4	50	214	0	1	0	19000	2
2019-10-21 00:58:00	Ф1.4	135	99	0	0	0	100000	6
2018-02-21 09:10:00	Ф1.4	10	80	0	0	0	0	2
2018-04-29 00:05:00	Ф1.3	8	12	1	0	0	0	3

2.2.2 Данные из базы данных «Гарнизон» (Новосибирск)

Описанный выше набор данных содержит большое количество записей и атрибутов, что делает его удобным источником данных о реагировании подразделений пожарной охраны на территории России. Однако он имеет ряд недостатков, в числе которых:

- большое количество некорректных данных;
- в базе данных содержатся данные только о пожарах, в то время как для анализа параметров прибытия первого подразделения пожарной охраны не важен тип вызова: подразделения на любой вызов следуют как на пожар;
- отсутствуют сведения, идентифицирующие выезжающие на каждый из вызовов подразделения, что не позволяет оценить, выезжало ли на пожар подразделение из своего района выезда или из соседнего, что, в свою очередь, не всегда позволяет объективно оценить своевременность прибытия.

Во избежание данных проблем можно использовать сведения из баз данных, ведущихся в некоторых главных управлениях России. Так, в распоряжении автора имеется набор данных о выездах пожарных автомобилей в городе Новосибирске за период с января 2016 г. по сентябрь 2020 г., полученный от ГУ МЧС России по Новосибирской области. Всего в исследовании была использована 88 621 запись о выездах пожарных отделений новосибирского пожарно-спасательного гарнизона на различные виды вызовов (не только пожары). При этом для каждой из записей имеются сведения, позволяющие идентифицировать все выезжавшие подразделения, что помогает определить точки начала и конца маршрута следования (таблица 2.2). В расчетах учитывались только те записи о реагировании, где скорости следования лежали в диапазоне от 10 до 100 км/ч. Предполагается, что все пожарные автомобили выезжали из мест постоянной дислокации, так как точных сведений о месте их нахождения в момент получения вызова в наборе данных нет.

Таблица 2.2 – Пример исходных данных базы данных «Гарнизон» о выезде подразделений пожарной охраны

Номер	Дата	Тип	Район выезда	Адрес	Координаты	Подразделение	Тип ПА	t _{сл}
1600001	2016-01-01 00:02:00	Ложное срабатывание	3 ПСЧ 1 ПСО	ул. Большевикская 175/5.	POINT (82.973414538388 55 54.9944420930150 3)	3 ПСЧ 1 ПСО	АЦ	6
1600002	2016-01-01 00:10:00	Прочие	5 ПСЧ 1 ПСО	ул. Жуковского 106/1.	POINT (82.890907860334 42 55.0551255381069 2)	5 ПСЧ 1 ПСО	АЛ	2
1600002	2016-01-01 00:10:00	Прочие	5 ПСЧ 1 ПСО	ул. Жуковского 106/1.	POINT (82.890907860334 42 55.0551255381069 2)	5 ПСЧ 1 ПСО	АЦ	2

2.2.3 Данные из открытых картографических источников

В качестве источника пространственных данных о городской застройке и топологии улично-дорожной сети использован открытый картографический сервис OpenStreetMap (далее – OSM). Получение данных осуществлялось посредством библиотеки языка программирования Python OSMNX [117, 118].

Полученные данные представляются в формате GeoDataFrame, что позволяет обеспечить их взаимодействие с прочими форматами данных, а также сохранить для дальнейшей визуализации и редактирования средствами ГИС приложений, например QGIS (рисунок 2.4).

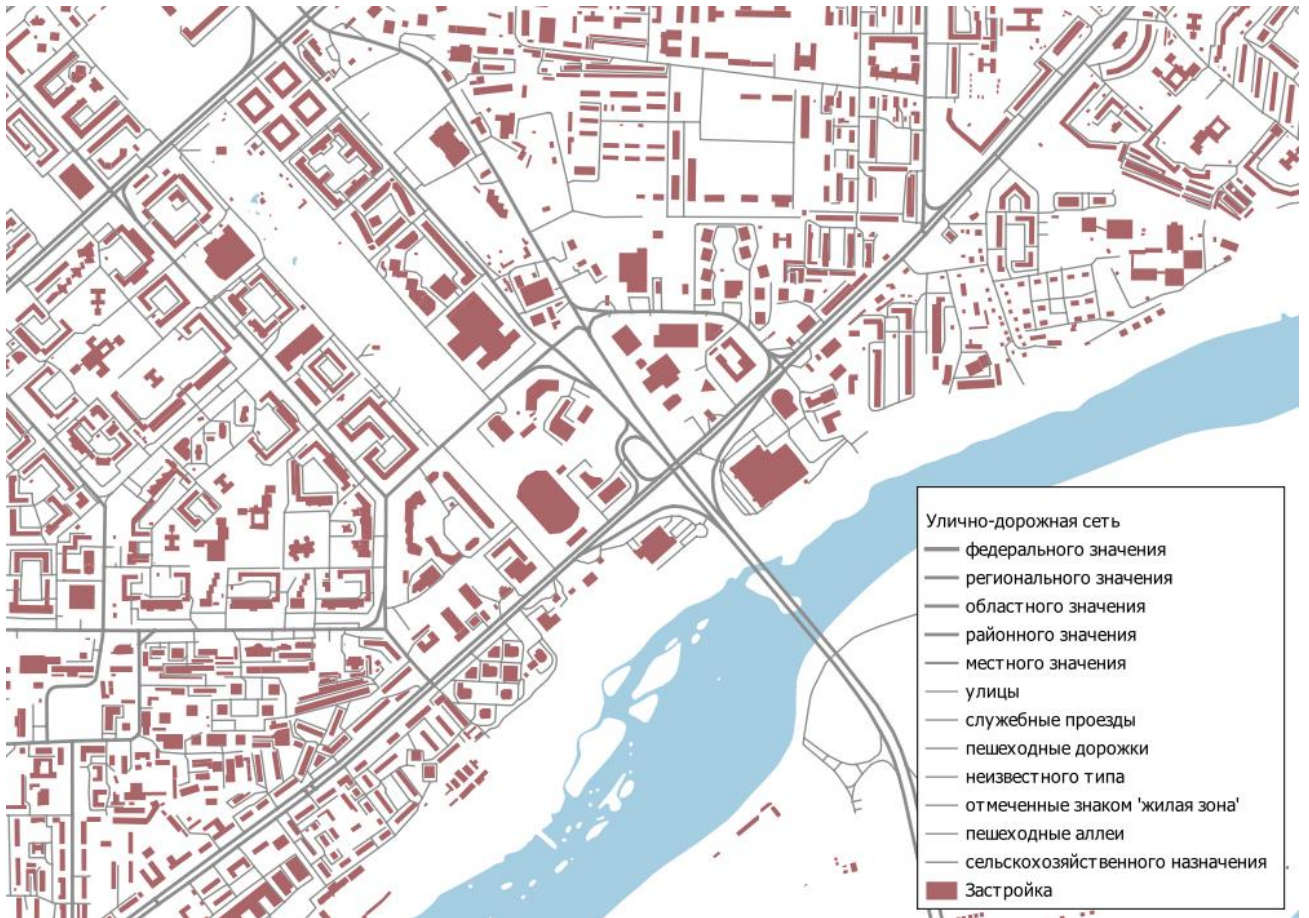


Рисунок 2.4 – Пример данных о застройке и топологии улично-дорожной сети, полученных из OSM и представленных в виде карты города

Библиотекой OSMNX данные о топологии улично-дорожной сети преобразуются в граф (рисунок 2.5) и в дальнейшем хранятся во встроенном формате .ml, являющимся частной реализацией разметки данных xml.

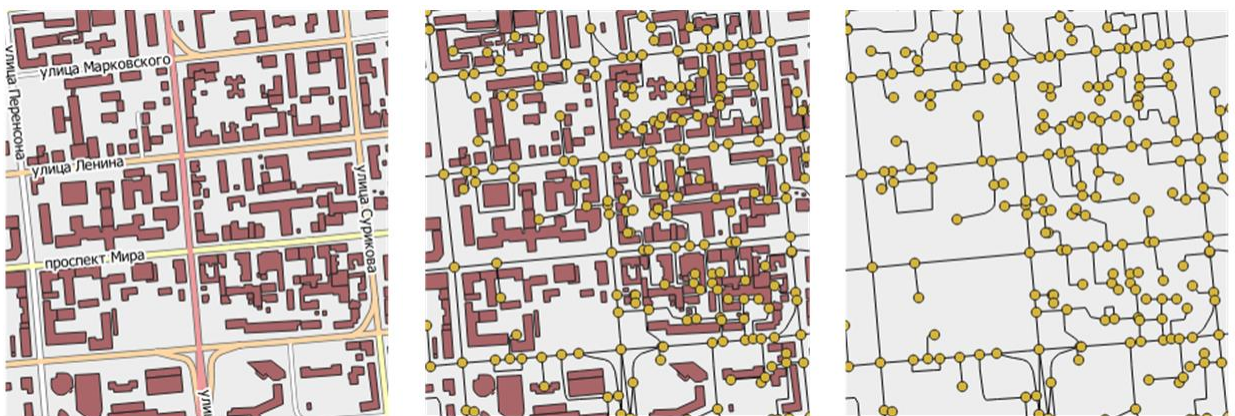


Рисунок 2.5 – Представление топологии улично-дорожной сети в виде графа

Каждое ребро графа улично-дорожной сети (далее – ГДС) имеет атрибут «highway», идентифицирующий тип фрагмента дороги.

2.2.4 Данные о подразделениях пожарной охраны

Данные о местах дислокации и основных характеристиках подразделений пожарной охраны были предоставлены Главным управлением пожарной охраны МЧС России.

2.3 Комплекс моделей оценки факторов, оказывающих влияние на выбор оптимального места дислокации подразделений пожарной охраны

С целью уточнения предложенных в 2.1 факторов была проведена работа по разработке комплекса моделей оценки факторов, оказывающих влияние на выбор оптимального места дислокации подразделений пожарной охраны. Были составлены модели:

- модель оценки времени следования пожарных автомобилей;
- модель оценки частот возникновения пожаров на объектах различного вида;
- модель оценки последствий от пожаров;
- комплексная модель оценки потребности в защите зданий населенных пунктов.

2.3.1 Модель оценки времени следования пожарных автомобилей по дорогам разных категорий на основе регрессионного анализа

В работах [62, 106] проводилась оценка скорости следования пожарных автомобилей в зависимости от групп населенных пунктов. В работе [103] проводился анализ скорости реагирования подразделений пожарной охраны в зависимости от времени суток. Тем не менее, практический опыт и приведенные в работах [48, 72, 95, 98] данные показывают, что в реальности на скорость следования пожарных автомобилей оказывают влияние такие факторы, как категория дорог [45], время суток, месяц и т.д. [46], что снижает точность получаемых прогнозных показателей. Проведенные в данном направлении работы [72] не позволяют в полной мере оценить ожидаемое время прибытия подразделений пожарной охраны. Для повышения точности данных требуется более подробная математическая модель, которая учитывала бы дополнительные факторы и степень оказываемого ими влияния на результаты расчетов.

На основе данных о маршрутах, применяя модели машинного обучения, можно оценить как расчетные скорости движения пожарных автомобилей на различных типах дорог, так и степень влияния таких факторов, как время года, время суток, протяженность маршрута, а также крутизна подъемов и спусков. Хотя учет влияния погодных условий (туман, дождь, гололед и т.д.) представляется вполне обоснованным, на момент проведения работы такие данные отсутствовали. Поэтому данные факторы не были включены в разрабатываемую модель.

Рабочей гипотезой частного исследования стало предположение, что скорость движения пожарных автомобилей в значительной степени зависит от категории участка дороги. Зная скорости движения пожарных автомобилей на разных типах дорог, можно более точно прогнозировать время прибытия подразделений пожарной охраны к месту вызова.

Наиболее простым способом оценки скоростей движения могло бы стать использование данных GPS-треков пожарных автомобилей. Например, в

исследовании [95] аналогичные задачи оценки факторов, влияющих на скорость движения пожарных автомобилей, решались именно таким образом. Однако данные GPS-треков для большинства подразделений пожарной охраны на территории России отсутствуют, что делает необходимым поиск альтернативной модели определения скоростей движения.

Известно, что время следования пожарного автомобиля $t_{сл}$ можно рассчитать по формуле (2.1). При этом любой достаточно протяженный маршрут движения пожарного автомобиля состоит из множества участков дорог разных классов (рисунок 2.6).



Рисунок 2.6 – Участки дорог различного назначения по маршруту следования пожарного автомобиля

Тогда расчетную модель оценки времени следования пожарных автомобилей можно определить как сумму времен следования по каждому из классов дорог с учетом корректирующего коэффициента, учитывающего влияние прочих факторов:

$$t_{сл} = \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{u_i} = \frac{l_1}{k * u_1} + \frac{l_2}{k * u_2} + \dots + \frac{l_n}{k * u_n} \quad (2.2)$$

где $t_{\text{сл}}$ – время следования пожарных автомобилей, мин;
 l_i – протяженность дорог i -го типа, м;
 u_i – скорость следования по i -му классу дорог, м/мин;
 k – корректирующий коэффициент скорости следования пожарного автомобиля.

$$k = (k_{\text{врс}} \cdot k_{\text{врг}} \cdot k_{\text{подъема}} \cdot k_{\text{спуска}} \cdot k_{\text{расст}} \cdot k_{\text{непр}}) \quad (2.3)$$

где $k_{\text{врс}}$ – коэффициент влияния времени суток;
 $k_{\text{врг}}$ – коэффициент влияния времени года;
 $k_{\text{подъема}}$ – коэффициент, учитывающий влияние кумулятивной крутизны подъема местности;
 $k_{\text{спуска}}$ – коэффициент, учитывающий влияние кумулятивной крутизны спуска местности;
 $k_{\text{расст}}$ – коэффициент, учитывающий влияние протяженности маршрута;
 $k_{\text{непр}}$ – коэффициент, учитывающий непрямолинейность маршрута.

Более подробно с ходом и результатами частного исследования можно ознакомиться в публикации [45], выполненной по его итогам.

Основные результаты приведены в таблице 2.3. В качестве «Модели А» выступает модель, полученная подбором всех рассмотренных признаков k . Для сравнения дана оценка точности «Модели А» для случая, когда полученные значения прочих признаков не учитывались, результаты моделирования для случая, когда моделирование проводилось без учета влияния прочих признаков k («Модель Б»), т.е. с учетом только класса дорог, а также результаты полученные с использованием средней скорости следования пожарных автомобилей в Новосибирске.

Таблица 2.3 – Результаты расчета скоростей следования пожарных автомобилей по разным классам дорог для ряда моделей

Класс дороги (тег OSM)	Модель А, км/ч	Модель А (только скорости), км/ч	Модель Б, км/ч	Средняя скорость, км/ч
Крупные автомагистрали (trunk)	39,61	39,61	48,96	29,47
Областного значения (secondary)	29,96	29,96	36,34	29,47
Регионального значения (primary)	29,51	29,51	37,96	29,47
Прочие местного значения (unclassified)	28,79	28,79	36,61	29,47
Районного значения (tertiary)	25,71	25,71	26,14	29,47
Внутри жилых зон (residential)	22,98	22,98	25,33	29,47
Служебные проезды: внутриквартальные, въездные, парковочные и т.д. (service)	22,44	22,44	16,07	29,47
Точность модели:				
Средняя квадратичная ошибка (MSE)	9,36	13,88	10,36	14,01
Средняя абсолютная ошибка (MAE)	1,99	2,52	2,18	2,51
Средняя относительная ошибка (MRE)	<u>0,27</u>	0,32	<u>0,29</u>	0,32

Анализ полученных результатов говорит о том, что наибольшее влияние на время прибытия пожарных автомобилей к месту вызова оказывают различия в скорости следования по дорогам разных классов, что подтверждает предположение, выдвинутое в [98]. Существенное влияние оказывает протяженность маршрута следования. Прослеживается связь между крутизной маршрута и снижением скорости следования пожарных автомобилей на наиболее крутых спусках и возрастанием скорости на крутых подъемах. Влияние времени суток и месяца в целом невелико и колеблется в диапазоне от 0,95 до 1,05, при этом наибольшее влияние данные показатели оказывают в ночные часы и летние месяцы. Влиянием коэффициента непрямолинейности можно пренебречь.

Применение полученных скоростей движения пожарных автомобилей по разным категориям дорог в модели (2.2), позволяет получить среднюю относительную ошибку 27% («Модель А») и 29% («Модель Б»).

«Модель А» может быть использована в решении задач динамической диспетчеризации подразделений пожарной охраны. «Модель Б» может быть использована при решении задач статической диспетчеризации. Полученные данные (рисунок 2.7) можно использовать при проведении расчетов по определению оптимальных мест дислокации подразделений пожарной охраны [45].



Рисунок 2.7 – Результаты расчета скоростей следования ПА по разным категориям дорог («Модель Б»)

2.3.2 Модель оценки частот возникновения пожаров на объектах различного назначения

Для оценки связи характера застройки населенных пунктов с частотой возникновения пожаров в ходе исследования проведен регрессионный анализ плотностей мест возникновения пожаров на территории крупных городов.

Использована выборка из 5 620 записей по пожарам, произошедших в зданиях на территории города Красноярска за период с 2010 по 2020 годы.

В отличие от [71] предложена модель оценки частоты возникновения пожаров в зданиях разных классов на основе регрессионного анализа плотности мест возникновения пожаров, представляющая иной взгляд на анализ частот пожаров.

Основная идея модели заключается в сравнении раstra плотностей реальных пожаров с растром плотностей ожидаемых пожаров, полученным исходя из расчетных частот возникновения пожаров в зданиях различного назначения, и подборе с использованием моделей машинного обучения таких частот, при которых эта разница будет минимальна. Результаты исследования изложены в публикации [47], выполненной по его итогам.

Записи о пожарах были размещены на интерактивной карте QGIS в соответствии с координатами мест возникновения пожаров. Далее с использованием оценки ядерной плотности Kernel Density Estimation (далее – KDE) была построена тепловая карта плотности пожаров для ячеек размером 25 м и зоной охвата 1 км [129] (рисунок 2.8).

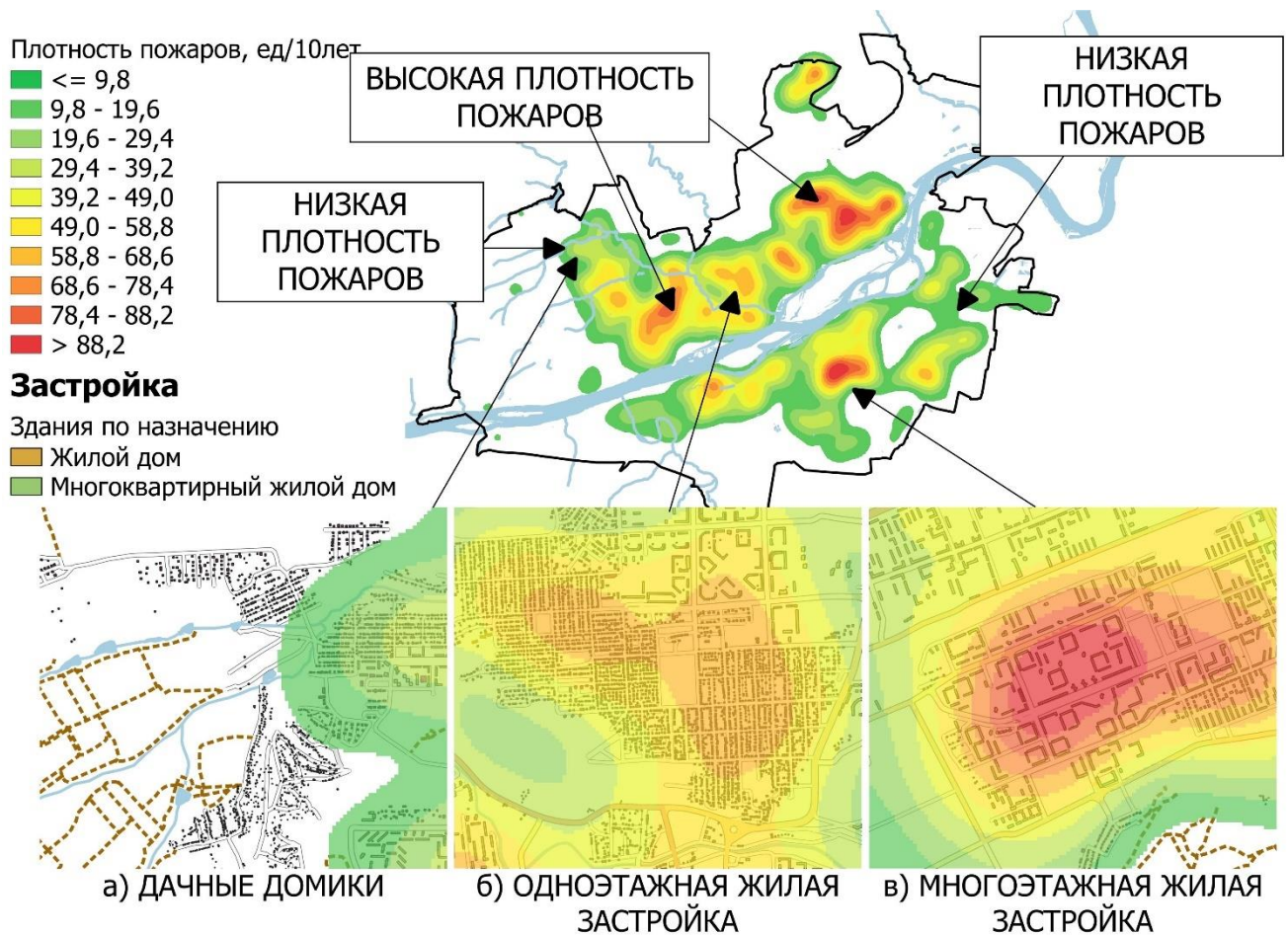


Рисунок 2.8 – Распределение плотностей возникновения пожаров на территории города Красноярска в период 2010-2020 гг.

Анализ полученного распределения показал наличие стойких паттернов пространственного распределения пожаров, связанного с характером застройки. Наибольшая плотность пожаров наблюдается в районах многоэтажной жилой застройки (рисунок 2.8, а, в). Несколько меньшая плотность наблюдается в районах одноэтажной жилой застройки (рисунок 2.8, б).

Была проведена оценка соответствия вероятностей возникновения пожаров, приведенных в Приложении № 3 к Методике определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и пожарных отсеках различных классов функциональной пожарной опасности, утвержденной приказом МЧС России от 14.11.2022 № 1140, вероятностям возникновения пожаров, имеющим место в

действительности. Для этого зданиям в зависимости от их назначения было присвоено значение вероятности возникновения пожара. При этом для ряда зданий, сопоставить которые с конкретным классом не представлялось возможным, было установлено среднее значение по всем классам (0,015 ед/год).

На основании полученных значений была составлена тепловая карта ожидаемой плотности возникновения пожаров с размером ячейки 25 м и зоной охвата 1 км (рисунок 2.9). Чтобы плотности можно было сопоставить между собой, их значения были приведены к общему диапазону в пределах от 0 до 1, где 0 соответствует минимальному значению плотности, а 1 – максимальному.

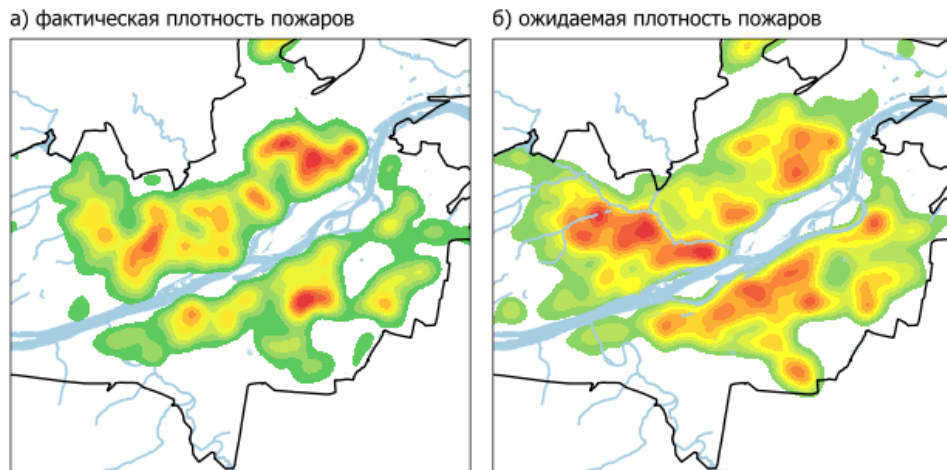


Рисунок 2.9 – Сравнение нормализованных плотностей пожаров
 а – фактическая плотность пожаров, б – ожидаемая плотность пожаров (в соответствии с Методикой определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и пожарных отсеках различных классов функциональной пожарной опасности, утв. приказом МЧС России от 14.11.2022 г. № 1140)

Из рисунка 2.9 видно, что фактическая и ожидаемая плотности пожаров не совпадают.

Частота возникновения пожаров в зданиях различного назначения оказывает существенное влияние на распределение плотностей пожаров. Определив подходящие вероятности возникновения пожаров в зданиях различного

назначения, можно с достаточной точностью предсказать, какова будет плотность пожаров в тех или иных районах города, и на основе этого прогноза вырабатывать решения по определению мест дислокации подразделений пожарной охраны.

Задача частного исследования была поставлена следующим образом: требуется найти такую классификацию зданий S и частоту возникновения пожаров в каждом из классов $p_{кл}$, 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:

$$P_{\phi} = \{p_{\phi 1}, p_{\phi i}\}, i \in I \quad (2.4.1)$$

$$P_o = \{p_{o 1}, p_{o i}\}, i \in I \quad (2.4.2)$$

$$I \subseteq S$$

$$err(P_{\phi}, P_o) \rightarrow \min \quad (2.4.3)$$

Для определения значений частоты возникновения пожаров в контрольных точках I был использован KDE [129]. Тогда фактическая плотность возникновения пожара в любой i -й точке будет:

$$p_{\phi i} = KDE(i, F) \quad (2.5.1)$$

$$F \subseteq S$$

где $p_{\phi i}$ – фактическая плотность возникновения пожара в любой i -й точке, пож/км²;

F – точки возникновения пожаров.

А ожидаемая плотность возникновения пожаров в каждой точке:

$$p_{o i} = KDE(i, J, P_{зд}) \quad (2.5.2)$$

$$P_{зд} = \{p_{зд 1}, p_{зд j}\}, j \in J \quad (2.5.3)$$

$$J \subseteq S \quad (2.5.4)$$

$$p_{зд j} = p_{кл}(c_j), c_j \in C \quad (2.5.5)$$

где $p_{o i}$ – ожидаемая плотность возникновения пожаров в любой i -й точке, пож/км²;

J – точки центров зданий;

$P_{зд}$ – частота возникновения пожаров в каждом из j -х зданий, пож/год;

c_j – класс j -го здания;

C – множество возможных классов зданий;

$p_{кл}$ – частота возникновения пожара в каждом из C классов зданий, пож/год.

В таблице 2.4 приведены результаты исследования и их сравнение с фактическими показателями.

Таблица 2.4 – Сравнение теоретических и фактических значений частоты возникновения пожаров в зданиях различных КФПО

КФПО+	Количество зданий, ед.	Теоретическая частота, пож/год	Фактическая частота, пож/год
Ф1.1	605	$5,12 \cdot 10^{-3}$	$9 \cdot 10^{-4}$
Ф1.2	565	$6,01 \cdot 10^{-3}$	$5,72 \cdot 10^{-3}$
Ф1.3	6059	$1,68 \cdot 10^{-2}$	$4,7 \cdot 10^{-2}$
Ф1.4	18587	$2 \cdot 10^{-3}$	$5,2 \cdot 10^{-3}$
Ф1.5*	13463	$5,99 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-3}$
Ф2.1	35	$1,64 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-2}$
Ф2.2	7	$3,9 \cdot 10^{-3}$	$5,19 \cdot 10^{-2}$
Ф2.3**	0	$4,21 \cdot 10^{-3}$	0
Ф2.4**	0	$4,21 \cdot 10^{-3}$	0
Ф3.1	2902	$7,24 \cdot 10^{-3}$	$9,49 \cdot 10^{-3}$
Ф3.2	173	$7,4 \cdot 10^{-3}$	$2,68 \cdot 10^{-2}$
Ф3.3	14	$6,7 \cdot 10^{-3}$	0
Ф3.4**	0	$4,21 \cdot 10^{-3}$	0
Ф3.5**	0	$4,21 \cdot 10^{-3}$	0
Ф3.6	87	$1 \cdot 10^{-2}$	$1,9 \cdot 10^{-2}$
Ф3.7	61	$6,35 \cdot 10^{-3}$	$2,98 \cdot 10^{-3}$
Ф4.1	222	$6 \cdot 10^{-3}$	$4,5 \cdot 10^{-3}$
Ф4.2	180	$6,4 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-4}$
Ф4.3	5794	$1,54 \cdot 10^{-3}$	$1,22 \cdot 10^{-3}$
Ф4.4	11	$7,42 \cdot 10^{-3}$	0
Ф5.1	3767	$1,42 \cdot 10^{-3}$	$5,79 \cdot 10^{-3}$
Ф5.2	4035	$4,59 \cdot 10^{-3}$	$1,15 \cdot 10^{-2}$
Ф5.3**	0	$4,21 \cdot 10^{-3}$	0
Ф0	1525	$3,81 \cdot 10^{-4}$	$1,26 \cdot 10^{-2}$

** для зданий, предназначенных для сезонного проживания (дачи и садовые домики), введен дополнительный класс – Ф1.5.*

*** для ряда КФПО теоретическую частоту возникновения пожаров установить не удалось в связи с отсутствием сведений об объектах соответствующего класса на территории города Красноярска. Для таких зданий установлено среднее значение частоты возникновения пожаров.*

Из таблицы 2.4 видно, что наибольшая вероятность возникновения пожаров – в зданиях класса Ф1.3 (многоквартирные жилые дома), наименьшая – в зданиях Ф1.5 (дачные домики, предназначенные для сезонного проживания).

Полученные теоретические и фактические значения для ряда объектов заметно отличаются, что, очевидно, стало следствием малого количества пожаров в зданиях соответствующих классов. Это не позволяет построить достаточно точную модель определения вероятности возникновения пожаров. Однако модели, построенные на вычисленных значениях вероятностей возникновения пожаров, уступают по точности построения пространственных распределений ожидаемой плотности пожаров моделям, полученным в результате применения моделей машинного обучения [47].

Для повышения точности предложенной модели необходимо проведение дополнительных углубленных исследований, выходящих за рамки данной работы.

2.3.3 Модель оценки последствий от пожаров в зданиях различного назначения

Оценке последствий пожаров посвящены работы [77, 29], однако в них не содержится достаточно детализированных данных. В [29] приведены сведения об ущербе от пожаров, площадях, количестве погибших и других параметрах, но данные представлены в обобщенном виде, последствия пожаров в жилых зданиях рассматриваются без разделения на одноэтажные и многоэтажные дома. В то же время в [77] указывается, что в многоквартирных жилых домах средний ущерб на

один пожар составляет 62 тыс. рублей, а количество травмированных – 0,05 чел./пожар, тогда как для многоквартирных жилых домов эти показатели равны 31 тыс. рублей и 0,09 чел./пожар соответственно. В [77] приводятся данные о количестве погибших и травмированных, а также о материальном ущербе от пожаров, при этом сведения о жертвах пожаров едва ли могут считаться достаточным показателем, так как для ряда классов объектов, согласно приведенным данным, случаев гибели и травмирования людей не зафиксировано, что не исключает вероятности возникновения таких событий в будущем.

Таким образом, для получения данных, необходимых для использования в настоящем исследовании, был проведен самостоятельный анализ информации о пожарах в России. В ходе анализа применялись модели статистического исследования, использовались сведения за период с 2010 по 2020 год, полученные из базы данных «Пожары».

В качестве основы для классификации объектов был выбран класс функциональной пожарной опасности (КФПО).

Предполагается, что масштаб последствий пожара связан с его размерами и сложностью. Поэтому были проанализированы показатели, связанные со временем тушения пожара, его площадью, количеством привлеченных сил и средств, а также количеством погибших и пострадавших людей. На основе этого были выбраны следующие параметры:

- количество погибших при пожаре $N_{\text{гиб}}$, чел;
- количество травмированных при пожаре $N_{\text{травм}}$, чел;
- количество спасенных людей $N_{\text{спас}}$, чел;
- количество привлеченной к тушению пожара техники $N_{\text{тех}}$, ед.

Данные о пожарах были сгруппированы по классу КФПО+, для каждой группы были определены средние внутригрупповые значения показателей последствий.

При детальном рассмотрении агрегированных показателей и непосредственно записей о пожарах в базе данных «Пожары» выяснилось, что

некоторые показатели не всегда отражают реальную ситуацию. Например, для категории Ф1.5 (дачные домики, предназначенные для сезонного проживания) среднее время тушения составляет 229,23 мин, в то время как для Ф1.4 (одноквартирные жилые дома) – 85,03 мин. Эти данные явно противоречат реальности, так как дачные домики на большей части территории России представляют собой простые сооружения, тушение которых, как правило, не требует значительных усилий. Вероятно, это несоответствие связано с меньшим вниманием, уделяемым сотрудниками подразделений пожарной охраны при заполнении данных о пожарах на объектах данной категории.

Схожие несоответствия между имеющимися сведениями и реальностью можно увидеть и для таких параметров, как площадь пожара, количество спасенных людей и ущерб от пожара. Поэтому для построения более адекватной модели был рассмотрен альтернативный подход.

Исходя из соображения, что показатели $N'_{гиб\ i}$, $N'_{травм\ i}$ и $N'_{тех\ i}$, содержащиеся в базе данных, по тем или иным причинам должны быть максимально близки к реальности, была выбрана модель (2.6), учитывающая только их. Полученные с ее помощью значения оценочного коэффициента последствий пожаров w представляются наиболее непротиворечивыми:

$$w_i = N'_{гиб\ i} + N'_{травм\ i} + N'_{тех\ i} \quad (2.6)$$

где $N'_{гиб\ i}$ – нормализованное значение $N_{гиб}$ для i -го класса объектов в диапазоне $[0:\max(N_{гиб})]$;

$N'_{травм\ i}$ – нормализованное значение $N_{травм}$ для i -го класса объектов в диапазоне $[0:\max(N'_{травм\ i})]$;

$N'_{тех\ i}$ – нормализованное значение $N_{тех}$ для i -го класса объектов в диапазоне $[0:\max(N_{тех})]$.

Для расчета коэффициента последствий пожаров использовалась выборка из базы данных «Пожары» объемом 1 308 200 записей, для которых указано значение КФПО объекта пожара. При этом дачные домики были выделены в

дополнительный класс Ф1.5 в соответствии с выводами, полученными ранее при оценке частоты возникновения пожаров.

В таблице 2.5 приведены результаты вычисления оценочного коэффициента последствий пожаров (2.6), для классификации объектов по КФПО.

Таблица 2.5 – Значения оценочного коэффициента последствий пожаров

КФПО	$N'_{\text{гиб, чел}}$	$N'_{\text{травм, чел}}$	$N'_{\text{тех, ед}}$	w_i
Ф1.1	0,62	0,22	4,9	1,942
Ф1.2	0,08	0,16	4,1	1,002
Ф1.3	0,12	0,16	3,0	0,844
Ф1.4	0,11	0,05	2,5	0,638
Ф1.5	0,06	0,04	2,5	0,555
Ф2.1	0,73	0,97	4,1	2,726
Ф2.2	0,00	0,02	3,6	0,665
Ф2.3	0,00	0,01	3,2	0,568
Ф2.4	0,00	0,03	3,1	0,576
Ф3.1	0,01	0,02	2,8	0,514
Ф3.2	0,01	0,06	3,4	0,671
Ф3.3	0,00	0,02	3,5	0,635
Ф3.4	0,02	0,06	3,4	0,692
Ф3.5	0,02	0,04	3,0	0,588
Ф3.6	0,01	0,02	2,4	0,458
Ф3.7	0,01	0,06	3,9	0,770
Ф4.1	0,01	0,03	4,0	0,743
Ф4.2	0,00	0,05	5,7	1,057
Ф4.3	0,02	0,04	3,6	0,702
Ф4.4	0,00	0,00	2,8	0,492
Ф5.1	0,03	0,05	3,7	0,741
Ф5.2	0,02	0,03	2,6	0,505
Ф5.3	0,01	0,01	2,1	0,395

На рисунке 2.10 показана карта города Красноярска, на которой разными цветами обозначены постройки с различным КФПО.



Рисунок 2.10 – Распределение значений коэффициента последствий пожаров на территории города Красноярска (центральная часть)

2.3.4 Модель оценки потребности в защите зданий населенных пунктов

Модель оценки потребности в защите от пожаров на основе оценки риска возникновения пожаров и последствий от пожаров предлагается описывать следующим выражением:

$$M_{\text{спр}} = \frac{\sum_j^J w_j \cdot p_{\text{зд}j}}{\sum_i^I w_i \cdot p_{\text{зд}i}}, i \in I, j \in J \quad (2.7)$$

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;

$p_{здi}, p_{здj}$ – частота возникновения пожаров i -м здании, частота возникновения пожаров j -м здании, пож/год.

В таблице 2.6 приведены полученные значения потребности в защите от пожаров. На рисунке 2.11 показана карта потребности в защите от пожаров в соответствии с полученными значениями.

Таблица 2.6 – Расчетные значения потребности в защите от пожаров

КФПО	Теоретическая частота возникновения пожаров, пож/год	Оценочный коэффициент последствий от пожаров	Потребность в защите от пожаров
Ф1.1	$5,12 \cdot 10^{-3}$	1,942	$9,94 \cdot 10^{-3}$
Ф1.2	$6,01 \cdot 10^{-3}$	1,002	$6,03 \cdot 10^{-3}$
Ф1.3	$1,68 \cdot 10^{-2}$	0,844	$1,415 \cdot 10^{-2}$
Ф1.4	$2 \cdot 10^{-3}$	0,638	$1,26 \cdot 10^{-3}$
Ф1.5	$5,99 \cdot 10^{-5}$	0,555	$3,3 \cdot 10^{-5}$
Ф2.1	$1,64 \cdot 10^{-3}$	2,726	$4,47 \cdot 10^{-3}$
Ф2.2	$3,9 \cdot 10^{-3}$	0,665	$2,59 \cdot 10^{-3}$
Ф2.3	$4,21 \cdot 10^{-3}$	0,568	$2,39 \cdot 10^{-3}$
Ф2.4	$4,21 \cdot 10^{-3}$	0,576	$2,43 \cdot 10^{-3}$
Ф3.1	$7,24 \cdot 10^{-3}$	0,514	$3,73 \cdot 10^{-3}$
Ф3.2	$7,4 \cdot 10^{-3}$	0,671	$5 \cdot 10^{-3}$
Ф3.3	$6,7 \cdot 10^{-3}$	0,635	$4,26 \cdot 10^{-3}$
Ф3.4	$4,21 \cdot 10^{-3}$	0,692	$2,92 \cdot 10^{-3}$
Ф3.5	$4,21 \cdot 10^{-3}$	0,588	$2,48 \cdot 10^{-3}$
Ф3.6	$1 \cdot 10^{-2}$	0,458	$4,59 \cdot 10^{-3}$
Ф3.7	$6,35 \cdot 10^{-3}$	0,770	$4,89 \cdot 10^{-3}$
Ф4.1	$6 \cdot 10^{-3}$	0,743	$4,53 \cdot 10^{-3}$
Ф4.2	$6,4 \cdot 10^{-3}$	1,057	$6,77 \cdot 10^{-3}$
Ф4.3	$1,54 \cdot 10^{-3}$	0,702	$1,09 \cdot 10^{-3}$
Ф4.4	$7,42 \cdot 10^{-3}$	0,492	$3,66 \cdot 10^{-3}$
Ф5.1	$1,42 \cdot 10^{-3}$	0,741	$1,05 \cdot 10^{-3}$
Ф5.2	$4,59 \cdot 10^{-3}$	0,505	$2,32 \cdot 10^{-3}$
Ф5.3	$4,21 \cdot 10^{-3}$	0,395	$1,66 \cdot 10^{-3}$
Ф0	$3,81 \cdot 10^{-4}$	0,804	$3,1 \cdot 10^{-4}$

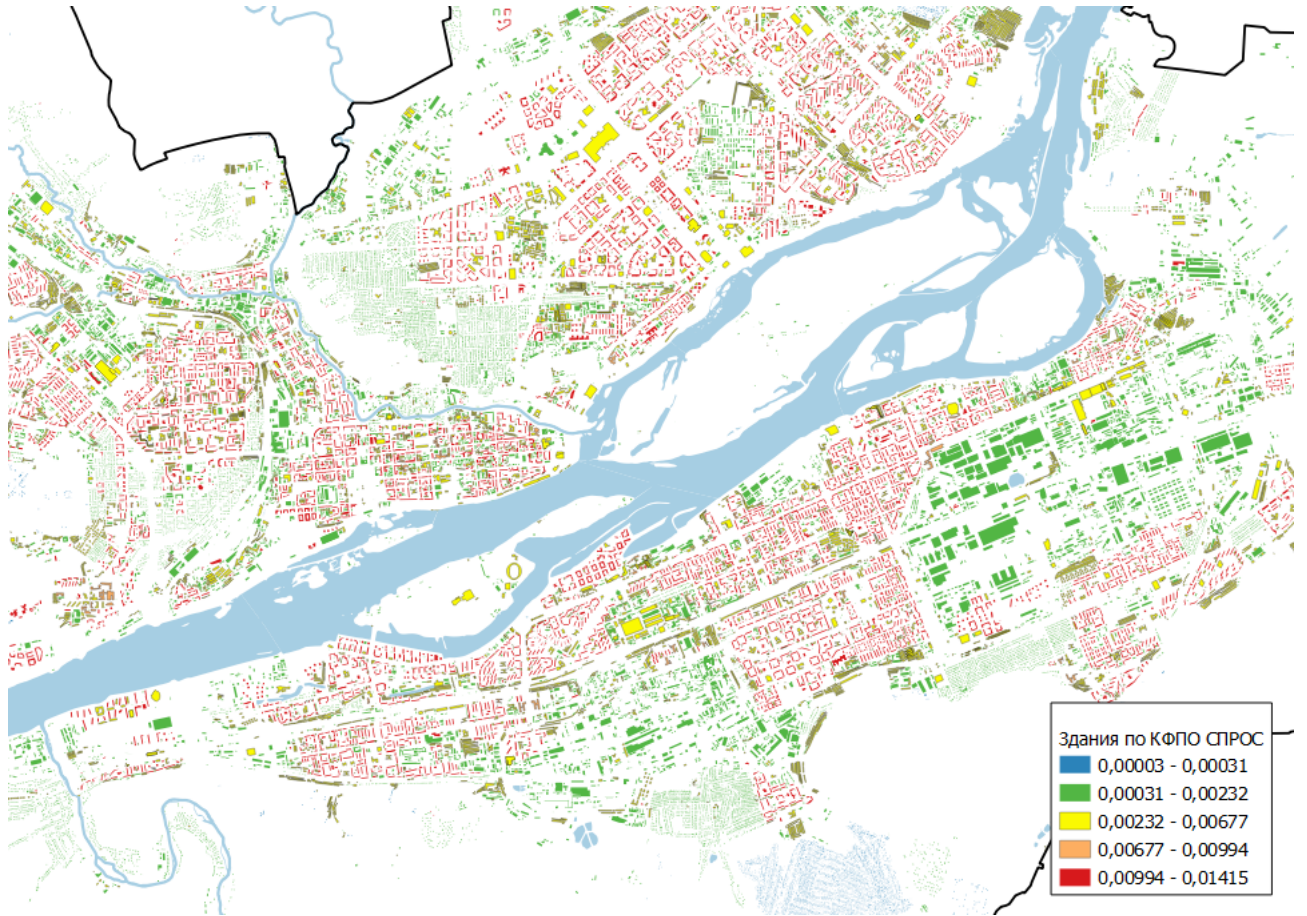


Рисунок 2.11 – Распределение потребности в защите от пожаров на территории города Красноярска (центральная часть)

2.4 Метрики и целевые функции

Основной метрикой, используемой при оценке параметров реагирования подразделений пожарной охраны предложена оценка защищенности зданий, основанная на модели оценки потребности в организации защиты от пожаров $M_{\text{спр}}$ (2.7).

Метрика $M_{\text{спр}}$ используется исключительно для задач пространственной оптимизации дислокации подразделений пожарной охраны и имеет абстрактную размерность. Для сравнительной оценки ожидаемых параметров реагирования

подразделений пожарной охраны дополнительно могут быть использованы метрики индекса прикрытия, среднего и максимального времени прибытия

Метрика индекса прикрытия:

$$\text{ИП-(Т)} = \frac{|J|}{|I|} \quad (2.8)$$

где $J \in I$ – множество зданий, для которых $t_{сл} \leq T$;

T – пороговое значение времени прибытия, мин.

Исходя из формулировки (3.4) следует, что метриками, используемыми для оценки защищенности городских населенных пунктов, является ИП-10, а сельских территорий ИП-20.

Среднее время прибытия подразделений пожарной охраны:

$$\overline{t_{пр}} = \frac{1}{|I|} \sum_i^I \tau_{сли} \quad (2.9)$$

где I – множество зданий в рассматриваемом населенном пункте;

$t_{сли}$ – время следования из ближайшего подразделения пожарной охраны к i -му зданию, мин.

Максимальное время прибытия (к самому удаленному зданию)

$$t_{max} = \max \tau_{сли} \forall i \in I \quad (2.10)$$

где I – множество зданий в рассматриваемом населенном пункте;

$t_{сли}$ – время следования из ближайшего подразделения пожарной охраны к i -му зданию, мин.

Любая из предложенных метрик может выступать в роли целевой функции оптимизации дислокации подразделений пожарной охраны.

2.5 Модель оценки параметров реагирования подразделений пожарной охраны

Предложенная ранее модель оценки потребности в защите зданий населенных пунктов опирается на данные о времени прибытия подразделений пожарной охраны к каждому из зданий населенного пункта. Для оценки времени прибытия разработана модель оценки параметров реагирования подразделений пожарной охраны, опирающаяся на алгоритмы поиска кратчайшего пути. Существует ряд подобных алгоритмов, однако в данной работе не ставилась задача исследования параметров данного класса алгоритмов, поэтому выбран наиболее общий и часто употребляемый для задач поиска кратчайшего пути на графах, алгоритм Дейкстры в его интерпретации как алгоритм поиска в ширину [9, 13].

Алгоритм Дейкстры в ходе моделирования опирается на взвешенный граф, в котором ребра имеют численное значение, называемое весом. Применительно к моделированию параметров реагирования подразделений пожарной охраны весом ребер является время следования пожарных автомобилей по каждому из ребер. В свою очередь время следования вычисляется как функция (2.1) исходя из длины ребра и скорости следования пожарных автомобилей, зависящей, как было показано в п. 2.3.1 в первую очередь от класса дороги. Таким образом, располагая ГДС и расчетными скоростями следования пожарных автомобилей по каждому из классов дорог, можно используя алгоритм Дейкстры в интерпретации поиска в ширину, смоделировать ожидаемое время прибытия подразделений пожарной охраны во все узлы графа (при условии их связности).

В таблице 2.7 приведен пример данных, полученных в результате компьютерного моделирования для города Астрахань.

Таблица 2.7 – Пример результатов компьютерного моделирования параметров прибытия подразделений пожарной охраны для города Астрахань

Идентификатор здания	Идентификатор узла ГДС	Время прибытия первого подразделения, мин	Идентификатор первого прибывшего подразделения
100	1789232	3,45	1 ПСЧ 1 ПСО
101	33954782	4,56	4 ПСЧ 1 ПСО
102	97438211	12,4	9 ПСЧ 1 ПСО

На рисунках 2.12 и 2.13 показан пример визуализации результатов моделирования параметров реагирования подразделений пожарной охраны для города Астрахань.

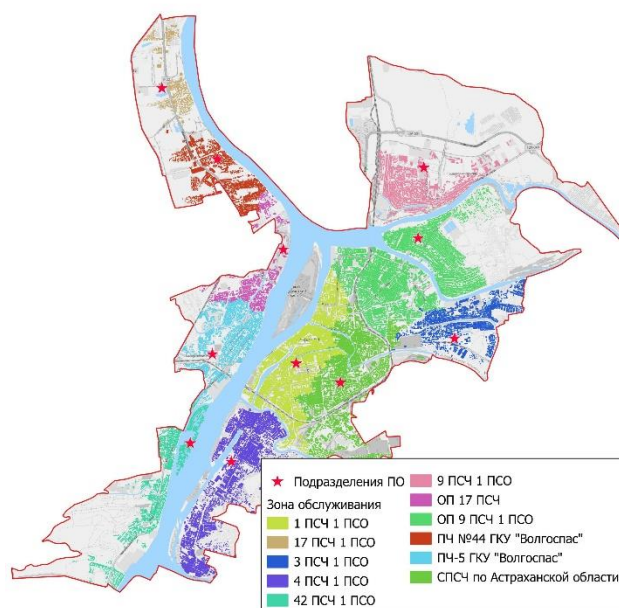


Рисунок 2.12 – Оценка оптимальным образом распределенных границ районов выезда подразделений пожарной охраны

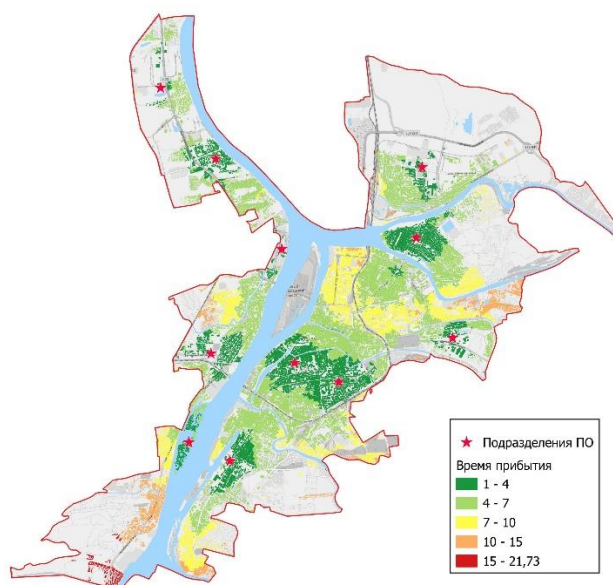


Рисунок 2.13 – Оценка времени прибытия подразделений пожарной охраны

Используя полученные результаты моделирования, можно оценить параметры реагирования подразделений пожарной охраны. В таблице 2.8 приведены оценки данного показателя для города Астрахань исходя из скоростных режимов, перечисленных в таблице 2.3.1.

Таблица 2.8 – Оценка параметров реагирования подразделений пожарной охраны в городе Астрахань для различных скоростных режимов

Класс дороги (тег OSM)	Модель А, км/ч	Модель Б, км/ч	Средняя скорость, км/ч
$M_{\text{ср}}$, %	86,96	91,25	87,92
ИП-10, %	87,66	91,4	89,87
ИП-20, %	100	100	100
$\bar{t}_{\text{пр}}$, МИН	6,47	5,92	5,95
t_{max} , МИН	18,28	17,61	17,62

2.6 Выводы по главе 2

1. Анализ факторов, учитываемых исследователями при решении задач определения оптимальных мест дислокации подразделений пожарной охраны показал, что основными из них являются расстояние от места дислокации до мест вызова с учетом кратчайшего маршрута следования; оснащенность подразделений пожарной охраны; оперативная обстановка в районе выезда; характер застройки; особенности улично-дорожной сети. Однако часть из данных факторов является динамическими факторами и, соответственно, непредсказуемыми, что затрудняет их использование при решении задач статической диспетчеризации.

В ходе исследования составлен перечень постоянных (прогнозируемых) факторов, влияющих на выбор оптимальных мест дислокации подразделений пожарной охраны. Основными из них являются: расчетная скорость движения пожарных автомобилей по дорогам различного класса, вероятность возникновения пожаров и степень тяжести их последствий в зданиях различного назначения.

2. С использованием моделей машинного обучения определены оптимальные расчетные значения скорости движения пожарных автомобилей по различным типам дорог, а также поправочные коэффициенты для времени суток, месяца, крутизны дорог и коэффициента непрямолинейности. Показано, что наибольшее влияние на скорость движения оказывают тип дорог и протяженность маршрута, тогда как остальными параметрами в практических расчетах можно пренебречь. Вместе с тем, влияние времени суток и времени года на скорость движения пожарных автомобилей представляет отдельный интерес для дальнейшего изучения в последующих работах.

Скорость движения для города Новосибирска составила от 16 км/ч по служебным и внутриквартальным проездам до 49 км/ч для крупных автомагистралей. При этом, если включить в модель учет влияния таких факторов, как время года и суток, протяженность маршрута, крутизну подъема и спуска, то

соответствующие скорости движения пожарных автомобилей будут находиться в диапазоне от 22 до 40 км/ч.

3. Показано наличие стойких паттернов пространственного распределения пожаров, связанного с характером застройки.

4. С использованием алгоритма имитации отжига и KDE получены значения частоты возникновения пожаров в зданиях различных классов функциональной пожарной опасности (КФПО). Наибольшая частота возникновения пожаров наблюдается в зданиях класса Ф1.3 ($1,68 \cdot 10^{-2}$ пож/год), наименьшая – в зданиях Ф5.3 (0,395 пож/год).

5. На основе данных о последствиях пожаров на территории России за период с 2010 по 2020 годы получены значения оценочного коэффициента последствий пожаров. Наибольшее значение коэффициента наблюдается в зданиях класса Ф2.1 (2,726), наименьшее – в зданиях Ф1.5 ($5,99 \cdot 10^{-5}$ пож/год).

6. Предложена модель оценки последствий пожаров, учитывающая время прибытия подразделений пожарной охраны, частоту возникновения пожаров и их последствия на объектах различного назначения.

7. Приведены основные метрики, используемые при оценке параметров реагирования подразделений пожарной охраны, к которым отнесены: потребность в защите от пожаров, индекс прикрытия, агрегированные показатели времени прибытия первого подразделения пожарной охраны.

8. Предложена для реализации модель оценки параметров реагирования подразделений пожарной охраны, основанная на моделировании времени прибытия первого подразделения пожарной охраны с учетом топологии улично-дорожной сети.

ГЛАВА 3 ГИБРИДНЫЕ ЭВРИСТИЧЕСКИЕ АЛГОРИТМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИСЛОКАЦИИ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ ПОЖАРНОЙ ОХРАНЫ

3.1 Алгоритмы пространственной оптимизации дислокации подразделений пожарной охраны

Из анализа, проведенного в главе 1, следует, что на сегодняшний день основным способом расчетной оценки требуемого количества подразделений пожарной охраны является математическое моделирование [10, 12, 14]. Основным же подходом к выбору мест дислокации подразделений пожарной охраны является пространственная оценка удаленности от объектов защиты, описанная в работах [64, 59, 66] и закрепленная в СП 11.13130.2009 «Места дислокации подразделений пожарной охраны».

Задача размещения является NP-трудной, т.е. нахождение ее точного решения за линейное время представляется неприемлемо трудоемким. Сложность решения задачи размещения 1 подразделения пожарной охраны в графе улично-дорожной сети составляет $O(N^2)$, т.е. для размещения подразделения на графе из 100 узлов потребуется 10 000 операций вычисления, для графа из 1 000 узлов – 1 млн. операций. Если предположить, что одна операция на выполнение требует 0,01 сек, то для решения задач размещения одного подразделения в графе из 1000 узлов потребуется 166 мин или 2,7 часа. Сложность же размещения K подразделений составляет $O(N^{K+2})$, т.е. для нахождения точного размещения 3 подразделений на графе улично-дорожной сети из 1000 узлов потребуется 2,7 млн. часов, что делает нахождение точного решения невозможным.

Опыт решения подобных задач за рубежом [110, 113, 117, 118, 139, 142, 144, 159, 162] показывает, что задача определения дислокации подразделений пожарной

охраны может быть решена с использованием оптимизационных моделей из области теории графов и эвристических алгоритмов.

В целом весь класс таких задач можно разделить на два основных направления:

1. Задача максимального покрытия (MCLP – *Maximal Covering Location Problem*) [123].

2. Задача размещения (LSCP – *Location Set Covering Problem*) [153].

Задача MCLP направлена на определение оптимальной дислокации заранее заданного количества подразделений. Задача LSCP возникает, когда требуется определить оптимальную дислокацию такого количества подразделений, при котором будет достигнут определенный целевой показатель, например, доля прикрытой территории, требуемое время прибытия, нагрузка на одно подразделение и т.д. При этом MCLP можно рассматривать как частный случай LSCP, поскольку поиск оптимальной дислокации заданного количества подразделений по сути является промежуточным этапом в оценке требуемого количества подразделений. Частным случаем MCLP является задача определения наилучшей дислокации единственного подразделения (далее – BLP, от англ. *Best Location Problem*), также известная как задача Вебера.

На рисунке 3.1 представлена иерархия решения задач BLP, MCLP и LSCP (в целом – задачи пространственной оптимизации дислокации подразделений пожарной охраны).



Рисунок 3.1 – Иерархия задач пространственной оптимизации дислокации подразделений пожарной охраны

С целью теоретического обоснования рассмотрим сетку размером 11x21 ячеек, представляющую собой регулярный невзвешенный граф, в котором каждая ячейка связана с каждой соседней (окрестность Мура 1-го порядка).

Рассмотрим задачу BLP. Цифрами показано расстояние от мест дислокации подразделений пожарной охраны до соответствующей ячейки. В данном случае оптимальным местом дислокации будет являться центр сетки – такая ячейка, расстояние от которой до любой другой ячейки минимально (рисунок 3.2) [113].

10	9	8	7	6	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	6	7	8	9	10	
10	9	8	7	6	5	4	4	4	4	4	4	4	4	5	6	7	8	9	10	
10	9	8	7	6	5	4	3	3	3	3	3	3	4	5	6	7	8	9	10	
10	9	8	7	6	5	4	3	2	2	2	2	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	9	8	7	6	5	4	3	2	2	2	2	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	9	8	7	6	5	4	3	3	3	3	3	3	3	4	5	6	7	8	9	10
10	9	8	7	6	5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	5	6	7	8	9	10
10	9	8	7	6	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	6	7	8	9	10

Рисунок 3.2 – Оптимальная дислокация единственного подразделения на сетке 21x11 клеток. Цифрами показано расстояние от подразделения до клетки

Далее рассмотрим задачу MCLP для двух подразделений (рисунок 3.3.).

5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	5
5	4	3	3	3	3	3	3	3	4	5	4	3	3	3	3	3	3	4	5	
5	4	3	2	2	2	2	2	3	4	5	4	3	2	2	2	2	3	4	5	
5	4	3	2	1	1	1	2	3	4	5	4	3	2	1	1	1	2	3	4	5
5	4	3	2	1	А	1	2	3	4	5	4	3	2	1	Б	1	2	3	4	5
5	4	3	2	1	1	1	2	3	4	5	4	3	2	1	1	1	2	3	4	5
5	4	3	2	2	2	2	2	3	4	5	4	3	2	2	2	2	3	4	5	
5	4	3	3	3	3	3	3	3	4	5	4	3	3	3	3	3	3	4	5	
5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	5	4	4	4	4	4	4	4	4	5	
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

Рисунок 3.3 – Оптимальная дислокация двух подразделений на сетке размером 11x21 клеток

И, наконец, задачу LSCP для обеспечения максимальной длины пути до любой ячейки не более 3. Из рисунка 3.4 видно, что для достижения данной цели требуется не менее 6 подразделений. Удаление любого из подразделений приведет к тому, что цель не будет достигнута

3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
3	2	2	2	2	2	3	3	2	2	2	2	2	3	3	2	2	2	2	2	3
3	2	1	1	1	2	3	3	2	1	1	1	2	3	3	2	1	1	1	2	3
3	2	1	А	1	2	3	3	2	1	Г	1	2	3	3	2	1	Д	1	2	3
3	2	1	1	1	2	3	3	2	1	1	1	2	3	3	2	1	1	1	2	3
3	2	2	2	2	2	3	3	2	2	2	2	2	3	3	2	2	2	2	2	3
3	2	2	2	2	2	3	3	2	2	2	2	2	3	3	2	2	2	2	2	3
3	2	1	1	1	2	3	3	2	1	1	1	2	3	3	2	1	1	1	2	3
3	2	1	Б	1	2	3	3	2	1	В	1	2	3	3	2	1	Е	1	2	3
3	2	1	1	1	2	3	3	2	1	1	1	2	3	3	2	1	1	1	2	3
3	2	2	2	2	2	3	3	2	2	2	2	2	3	3	2	2	2	2	2	3

Рисунок 3.4 – Оптимальная дислокация подразделений пожарной охраны на сетке размером 21x11 клеток при условии, что расстояние до любой из клеток не должно превышать 3

Приведенные примеры демонстрируют, что подходы BLP, MCLP и LSCP с успехом могут применяться по крайней мере к упрощенной модели некоторой территории в виде регулярной сетки.

Таким образом, основная гипотеза, выдвигаемая в данной части исследования, может быть сформулирована следующим образом: для определения дислокации подразделений пожарной охраны на территории населенного пункта за приемлемое вычислительное время могут быть использованы эвристические алгоритмы.

Задачи BLP, MCLP и LSCP являются NP-трудными, т.е. получить их точное решение можно только за экспоненциальное вычислительное время. Вычислительная сложность задачи MCLP равна $O(a^n)$, где a – количество возможных мест дислокации подразделений пожарной охраны, а n – количество подразделений пожарной охраны. Классическое решение задачи BLP сводится к определению центра графа – такого узла, путь из которого до любого другого узла графа минимален. Для этого требуется найти кратчайшие пути между всеми вершинами графа [113].

Точное решение задач MCLP и LSCP также основывается на матрице кратчайших путей между всеми вершинами графа и в той или иной форме сводится к полному перебору всех возможных комбинаций дислокации [113].

Таким образом, вычислительная сложность задачи BLP будет составлять $O(N^2)$, а задач MCLP и LSCP $O(N^{a+2})$, где N – количество вершин графа, a – количество подразделений. Для графа с 1000 вершин, когда вершины-кандидаты для дислокации подразделений пожарной охраны заранее не заданы, а всего требуется разместить три подразделения пожарной охраны, для получения точного решения потребуется выполнить $1000^5 = 1 \cdot 10^{15}$ операций. Для практических целей подобная вычислительная сложность неприемлема.

Требуется найти такой способ решения задач BLP, MCLP и LSCP, который позволил бы получить максимально точное решение за приемлемое для практических расчетов вычислительное время.

3.1.1 Задача определения наилучшей дислокации единственного подразделения

Дан граф $G = \{V, U\}$, где $V = \{v\}$ – множество вершин графа, $U = \{u\}$ – множество ребер графа. Каждой вершине v можно сопоставить значение некоторой целевой функции $f(v)$. Требуется найти такой узел v , для которого $f(v) \rightarrow \min$. Алгоритм может быть применен также для задачи поиска максимума или иного агрегатного значения $f(v)$.

В настоящее время существует большое количество различных подходов, позволяющих решить эту задачу.

Наиболее эффективным является ограничение множества возможных мест дислокации подразделений. Отбросив вершины, в которых по тем или иным причинам дислокация подразделений невозможно или нецелесообразно, можно существенно сократить количество требуемых вычислительных операций. Однако этот подход применим лишь в редких случаях, так как для большинства населенных пунктов, с которыми предстоит иметь дело, заранее не известны места дислокации подразделений. Кроме того, может оказаться, что не вся площадь населенного пункта будет в требуемой степени прикрыта подразделениями пожарной охраны.

Схожий подход заключается не в определении узлов, в которых дислокация подразделений возможно, а в отбросе узлов, в которых дислокация, очевидно, невозможно. Так, можно сказать, что для задачи ВЛР лучший узел должен находиться близко к центру графа и не может находиться на периферии. Однако такой подход связан с высоким субъективным влиянием лица, принимающего решения, и не допускает строгого алгоритмического описания.

Как показывают работы [30, 39, 119, 152, 156], хороший результат демонстрируют эвристические алгоритмы локального поиска, такие как алгоритм скалолаза и алгоритм имитации отжига.

Алгоритм скалолаза (Hill Climbing, HC)

Основная идея алгоритма НС заключается в пошаговой проверке значения $f(v_i)$ для каждой вершины v_i , начиная от некоторой произвольным образом выбранной, и переходе от вершины с худшим значением $f(v_i)$ к вершине с лучшим значением $f(v_i)$. Расчет ведется до тех пор, пока в окрестностях текущей вершины не будет вершин с лучшим значением $f(v_i)$. Такая вершина и будет решением.

На рисунке 3.5 показан маршрут поиска наилучшего узла с использованием НС для ненаправленного графа.



Рисунок 3.5 – Визуализация маршрута поиска центра графа с использованием НС

НС позволяет получать точное решение для задачи поиска центра ненаправленного графа, являющегося идеальным случаем графа улично-дорожной сети (далее – ГДС). Однако в реальности ГДС является направленным, что приводит к тому, что при расчете $f(v)$ могут появляться локальные оптимумы и плато (случаи, когда несколько смежных вершин имеют одинаковое значение $f(v)$). На рисунке 3.7 красными точками показаны все узлы ГДС города Сосновоборска (Красноярский край), являющиеся локальными минимумами, для функции $f(v)$,

отражающей среднее время следования подразделения пожарной охраны из узла v в прочие узлы графа, т.е.:

$$f(v) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t(v, v_i) \quad (3.1)$$

где n – количество узлов графа, для которых рассчитывается время прибытия,
 $n = |V|-1$;

$t(v, v_i)$ – функция определения времени следования подразделения пожарной охраны из узла v в узел v_i по кратчайшему маршруту (такому маршруту, для которого $t(v, v_i) \rightarrow \min$).

Дополнительно на рисунке 3.6 цветом выделены узлы, выбор которых в качестве стартовых для алгоритма НС ведет к тому или иному узлу – локальному оптимуму ГДС.



Рисунок 3.6 – Локальные оптимумы в ГДС

Применение алгоритма Hill Climbing (НС) в чистом виде для решения задачи VLP ограничено особенностями топологии реальной улично-дорожной сети. Возникновение локальных оптимумов в таком графе обусловлено тем, что в ряде случаев транспорт, следующий по проезжей части, должен совершить значительный крюк для достижения всех доступных узлов из-за невозможности разворота (например, на мостах или в тоннелях).

Также следует обратить внимание на правило выбора стартового узла для алгоритма НС. В описанном выше подходе стартовый узел выбирается произвольно. Однако это означает, что в некоторых случаях выбранный узел может оказаться заведомо неприемлемым, например, если он расположен на периферии графа или близко к ней. Между тем известно, что решением задачи VLP является центр графа. Таким образом, если в качестве стартового узла выбрать узел, максимально близкий к центру, это позволит, с одной стороны, сократить количество итераций расчета (что может ускорить вычисления для крупных графов), а с другой – избежать попадания в часть локальных оптимумов графа.

Из сказанного следует, что можно рассмотреть два возможных пути устранения недостатков алгоритма НС:

1. Усовершенствование алгоритма для поиска возможности оценки всех или как можно большего количества локальных оптимумов (охват локальных оптимумов).
2. Рассмотрение альтернативных способов выбора стартового узла (вместо случайного выбора).

Алгоритм пулеметного подъема (Shotgun Hill Climbing, SHC)

Наиболее очевидным решением в направлении охвата локальных оптимумов является применение пулеметного подъема (SHC). Этот подход прост: вместо однократного выполнения алгоритма НС он выполняется n раз для n различных случайно выбранных стартовых узлов графа. Работа [156] показывает, что такой подход хотя и не гарантирует нахождения точного решения, может быть эффективным. При этом он интуитивно понятен для конечного пользователя.

Алгоритм обезьяньего поиска (Monkey Search Algorithm, MSA)

Существует множество эвристических подходов, основанных на аналогиях из живой природы – биоэвристик [42, 43]. В данной работе в качестве дополнительного способа улучшения НС в направлении охвата локальных оптимумов выбран алгоритм обезьяньего поиска (MSA). Этот алгоритм был предложен в 2008 году Р. Жао и В. Тангом [163]. Алгоритм использует агентный подход, где в роли агента выступает обезьяна, представляющая гипотетическая дислокация подразделения пожарной охраны. В работе [43] описана основная идея алгоритма: «Обезьяна исходит из того, что чем выше гора, тем больше пищи на ее вершине. Местность, которую исследуют обезьяны, представляет собой ландшафт функции $f(v)$, так что решению соответствует самая высокая гора. Из своего текущего положения обезьяна движется вверх до тех пор, пока не достигнет вершины горы. Затем обезьяна делает серию локальных прыжков в случайном направлении в надежде найти более высокую гору, и движение вверх повторяется. После выполнения некоторого числа подъемов и локальных прыжков обезьяна полагает, что достаточно исследовала ландшафт в окрестности своего начального положения. Для исследования новой области пространства поиска обезьяна выполняет длинный глобальный прыжок. Указанные действия повторяются заданное число раз. Решением задачи объявляется самая высокая из вершин».

Алгоритм искусственной пчелиной колонии (Artificial Bee Colony, ABC)

Алгоритм искусственной пчелиной колонии (ABC) был предложен Д. Карабогой и Б. Баструком в 2007 году [136]. В этом алгоритме поисковыми агентами являются пчелы из искусственного улья. Все пчелы делятся на две группы: пчелы-разведчики и рабочие пчелы. Пчелы-разведчики случайным образом перемещаются по исследуемому пространству, их цель – обнаружить места, где наиболее вероятно нахождение наибольших объемов нектара. Затем рабочие пчелы более тщательно исследуют обнаруженные места и определяют окончательное расположение нектара. Применительно к задаче VLP под местами размещения нектара понимаются узлы V графа G , в которых возможна дислокация

подразделений пожарной охраны. Оценка производится с использованием функции $f(v)$. Поиск наиболее подходящей дислокации выполняется рабочими пчелами с использованием алгоритма НС, началом для которого являются b_w лучших вершин, найденных b_s пчелами-разведчиками.

Поиск по центру диаметра графа (Best Node Half Diameter, BNHD)

В направлении альтернативных способов выбора стартового узла можно предложить подход, основанный на выборе узла, лежащего посередине диаметра графа, как гипотетически наиболее близкого к центру графа. Диаметр графа называется кратчайший путь между наиболее удаленными друг от друга вершинами графа (периферией графа). Таким образом, узел, лежащий посередине диаметра, должен быть максимально близок к центру графа, который является узлом с минимальным расстоянием до наиболее удаленного узла.

Алгоритм имитации отжига (Simulated Annealing Algorithm, SAA)

Основная идея алгоритма SAA заключается в имитации физического процесса, происходящего при кристаллизации вещества, например, при остывании металлов. Предполагается, что атомы вещества уже близки к формированию кристаллической решетки, но при этом сохраняется возможность перемещения отдельных атомов между ячейками. Чем выше температура, тем активнее движение атомов. Постепенное снижение температуры приводит к уменьшению вероятности переходов атомов в состояния с более высокой энергией. Устойчивая кристаллическая решетка соответствует минимальному уровню энергии системы, поэтому атом либо переходит в состояние с меньшей энергией, либо остается в текущем положении. Этот процесс продолжается до достижения целевой температуры или получения искомого результата. SAA является метаалгоритмом и может быть применен к широкому классу оптимизационных задач [31, 42].

3.1.2 Задача максимального покрытия

Далее в соответствии с иерархией задач оптимизации пространственного положения подразделений пожарной охраны (рисунок 3.2) рассмотрим алгоритмы решения задачи MCLP.

Формально задачу MCLP можно сформулировать следующим образом:

Дан граф $G \{V, U\}$, где $V = \{v\}$ – множество вершин графа, $U = \{u\}$ – множество ребер графа. Требуется определить такое множество узлов $N = \{n\}$, $N \subseteq V$, в которых размещено $|N|$ подразделений пожарной охраны, при котором некоторая оптимизируемая функция $f(N)$ была бы минимальна, т.е. $f(N) \rightarrow \min$. Возможно также решение задачи MCLP для поиска максимума или иного агрегатного значения $f(N)$.

Пример решения задачи MCLP для дислокации двух подразделений пожарной охраны показан на рисунке 3.4.

Ключевой особенностью MCLP является динамический характер функции $f(N)$, определяемый взаимным влиянием расположения N . Так, на рисунке 3.7 показан пример такого влияния.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
1	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4	3	2	2	2	2	2	3	4	5	6	7	
2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	2	1	1	1	2	3	4	5	6	7	
3	4	3	3	3	3	3	3	3	4	4	3	2	1	A	1	2	3	4	5	6	7	
4	4	3	2	2	2	2	2	3	4	4	3	2	1	1	1	2	3	4	5	6	6	
5	4	3	2	1	1	1	2	3	4	4	3	2	2	2	2	2	3	4	5	5	5	
6	4	3	2	1	B	1	2	3	4	4	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	
7	4	3	2	1	1	1	2	3	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	4	
8	4	3	2	2	2	2	2	3	4	5	5	5	4	3	2	2	2	2	2	2	3	4
9	4	3	3	3	3	3	3	3	4	5	6	5	4	3	2	1	1	1	2	3	4	
10	4	4	4	4	4	4	4	4	4	5	6	5	4	3	2	1	B	1	2	3	4	
11	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	6	5	4	3	2	1	1	1	2	3	4	

а

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
3	3	3	3	3	3	4	4	3	3	3	3	3	3	4	4	3	3	3	3	3	3
4	2	2	2	2	3	4	4	3	2	2	2	2	3	4	4	3	2	2	2	2	2
5	1	1	1	2	3	4	4	3	2	1	1	1	2	3	4	4	3	2	1	1	1
6	1	B	1	2	3	4	4	3	2	1	B	1	2	3	4	4	3	2	1	A	1
7	1	1	1	2	3	4	4	3	2	1	1	1	2	3	4	4	3	2	1	1	1
8	2	2	2	2	3	4	4	3	2	2	2	2	2	3	4	4	3	2	2	2	2
9	3	3	3	3	3	4	4	3	3	3	3	3	3	3	4	4	3	3	3	3	3
10	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
11	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

б

Рисунок 3.7 – Изменение оптимального размещения подразделения В в зависимости от размещения подразделений А и Б

Видно, что в зависимости от того, как дислоцированы подразделения A и B , изменяется оптимальное место дислокации третьего подразделения B . Для размещения, показанного на рисунке 3.7а, оптимальным будет дислокация подразделения B в точке с координатами (5, 6) в левой части сетки. Для размещения, показанного на рисунке 3.7б, оптимальным будет дислокация в точке с координатами (11, 6) посередине сетки.

То есть для решения MCLP требуется одновременно подбирать оптимальные места дислокации всех подразделений (за исключением существующих, место дислокации которых стационарно). Таким образом, применение описанных выше алгоритмов локального поиска (НС, SHC, MSA, BNHD) для задачи MCLP не подходит.

Исследования [42, 43, 119, 140, 152, 161] показывают, что для решения задачи MCLP чаще всего применяются такие алгоритмы, как генетический алгоритм и алгоритм имитация отжига.

Генетический алгоритм (Genetic Algorithm, GA)

ГА хорошо изучен. Исследования показывают, что ГА демонстрирует высокую точность при решении комбинаторных задач (MCLP относится к такого рода задачам) [31, 44].

Основная идея простого ГА применительно к решению задачи MCLP для подразделений пожарной охраны заключается в следующем. Каждая особь p_i в популяции P является возможным вариантом расстановки $|N|$ подразделений пожарной охраны. Тогда в хромосоме особи каждый ген будет содержать сведения о дислокации одного подразделения пожарной охраны n_i , а сама хромосома будет эквивалентна N , т.е. $p_i = N_i$. Мутация гена заключается в изменении идентификатора узла дислокации n_i подразделения. Конкретные правила отбора, скрещивания и мутации предполагается уточнить на этапе экспериментальной оценки алгоритма.

Вопрос корректности расчета для малых $|N|$ также неизвестен. Кроме того, можно предположить, что при небольших относительно $|N|$ количествах мутирующих генов существует риск чрезмерного увеличения времени расчета.

Данные соображения также требуется проверить в экспериментальной части работы.

Алгоритм имитации отжига (Simulated Annealing Algorithm, SAA)

Как показывают исследования [119, 152], алгоритм SAA может быть с успехом применен для решения задач MCLP (как и для решения задач BLP). При этом, в отличие от GA, SAA может быть применен для MCLP, в том числе и при количестве подразделений, равном единице.

В случае, когда количество подразделений превышает единицу, количество мест дислокации подразделений, подвергаемых изменению, определяется соответствующим гиперпараметром алгоритма.

Алгоритм «Генезис» (Genesis, GNS)

Алгоритм вдохновлен идеей деления клеток по мере развития живого организма и до некоторой степени перекликается с алгоритмом кластеризации графов больших размеров, предложенной в [78]. Клетки занимают наиболее выгодную позицию за счет взаимного отталкивания, заполняя тем самым некоторый доступный объем и приходя в равновесное состояние. Всякий раз после деления клеток происходит их перераспределение внутри доступного объема. Таким образом, количество клеток по мере деления увеличивается от первой и единственной протоклетки до некоторого конечного количества. Применительно к задаче MCLP количество клеток соответствует количеству подразделений пожарной охраны, ядро клетки – месту дислокации подразделения пожарной охраны, тело клетки – его зоне обслуживания.

На рисунке 3.8 показана оптимальная дислокация подразделений пожарной охраны на территории условного населенного пункта по мере увеличения количества подразделений пожарной охраны.

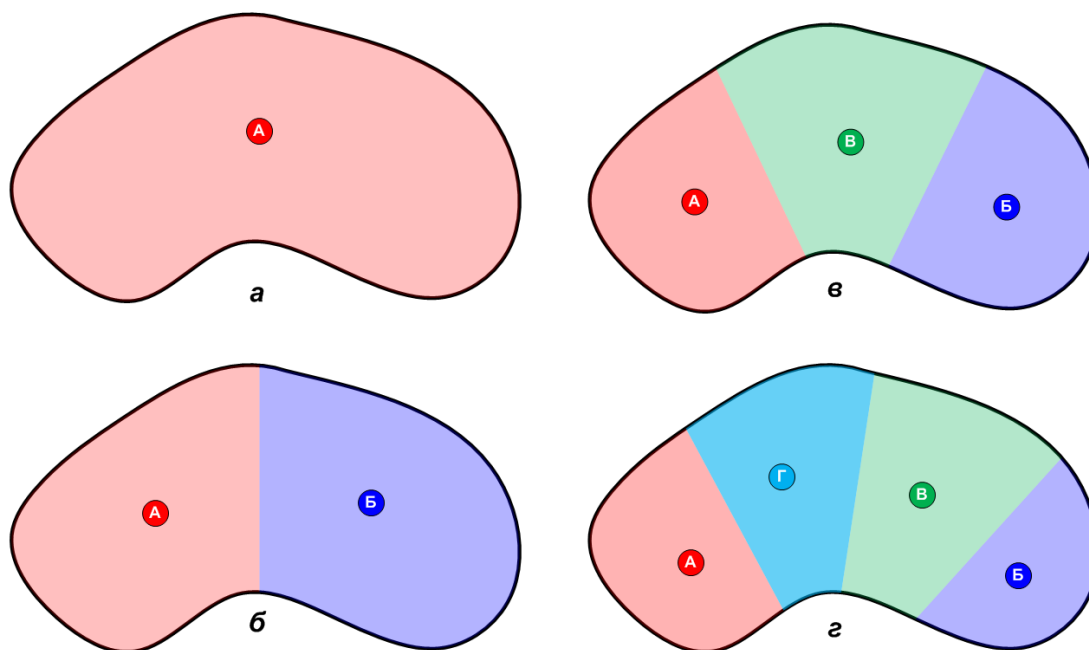


Рисунок 3.8 – Пошаговая оптимизация дислокации.

а, б, в, г – дислокация 1, 2, 3, 4 подразделений соответственно

Алгоритм GNS может быть представлен и в сокращенной форме для случая, когда предварительная дислокация N подразделений заранее известно или задано произвольным образом.

Гибрид GA+GNS

Как видно из рисунка 3.7, основным недостатком алгоритмов локального поиска является высокая вероятность попадания в локальные оптимумы. Генетический алгоритм (GA), напротив, гипотетически способен находить наилучшее расположение подразделений, не «скатываясь» в локальные оптимумы. Однако определение точной дислокации подразделений пожарной охраны может потребовать большого количества эпох.

Можно предположить, что, объединив сильные стороны GA и различных вариантов алгоритма НС в виде сокращенной формы GNS, можно достичь высокой точности результата при небольших временных затратах. В этом случае GA выполнял бы «грубую» оценку дислокации подразделений пожарной охраны, а GNS – «чистовую», то есть окончательную.

3.1.3 Задача размещения

В соответствии с иерархией задач оптимизации пространственного положения подразделений пожарной охраны (рисунок 3.2) рассмотрены алгоритмы решения задачи LSCP.

Задачу LSCP можно сформулировать следующим образом:

Дан граф $G \{V, U\}$, где $V = \{v\}$ – множество вершин графа, $U = \{u\}$ – множество ребер графа. Требуется определить минимальный размер множества подразделений пожарной охраны, при оптимальном размещении которых на множестве узлов $N = \{n\}$, $N \in V$ будет достигнуто целевое значение T некоторой функции $t(N)$.

При этом функция, оптимизирующая дислокацию подразделений $f(N)$, не обязательно должна быть равна $t(N)$. Возможна ситуация, когда подразделения пожарной охраны дислоцируются, исходя из соображения минимизации среднего времени прибытия, а целевым значением будет обеспечение времени прибытия не более 10 минут.

Генетический алгоритм (Genetic Algorithm, GA) и алгоритм имитации отжига (Simulated Annealing Algorithm, SAA)

Гипотетически GA может быть применен для решения задачи LSCP за счет расширения функции мутации $f_{mutation}(p)$ возможностью увеличения или сокращения количества генов, т.е. созданием или удалением подразделений. Однако для корректной работы такой формы GA потребуется модифицировать функцию приспособленности $f(p)$, включив в нее оценку количества подразделений. Это вызывает сложности, продиктованные тем, что размерность значений функции приспособленности и размера хромосомы различны, а известного способа корректного сопоставления их между собой найдено не было. Кроме того, даже разные функции приспособленности имеют различные размерности (минуты, проценты и т.д.). Поэтому применение GA для решения задачи LSCP носит ограниченный характер.

Аналогичная сложность возникает и при применении алгоритма SAA.

Алгоритм «Генезис» (Genesis, GNS)

Поскольку в алгоритме GNS заложен механизм оценки $f(N)$ для каждого шага деления (добавления нового подразделения пожарной охраны), то он гипотетически может быть применен для решения задачи LSCP. В этом случае условием останова GNS будет достижение целевого значения оптимизируемого параметра.

Узким местом алгоритма GNS применительно как для MCLP, так и для LSCP является точность используемого алгоритма решения BLP. Поэтому в экспериментальной части исследования требуется найти алгоритм BLP, который позволит получить максимальную точность при минимальной вычислительной сложности.

Жадное добавление (Greedy Adding)

Алгоритм жадного добавления (ADD) — это итеративный метод выбора размещения, который на каждом шаге добавляет размещение одного подразделения, максимизирующее или минимизирующее целевую функцию [124].

В п.6.3. СП 11.13130.2009 описывается пример применения ADD для решения задачи о покрытии множества (в данном случае покрытия множества объектов защиты) основанный на итеративном выборе в качестве мест размещения пожарных депо, областей в которых пересекаются пространственные зоны размещения пожарного депо для максимального количества объектов предполагаемого пожара. На каждой итерации, объекты предполагаемого пожара, противопожарная защита которых обеспечена новым размещенным депо, исключают из списка этих объектов. Процедура повторяется до тех пор, пока из списка объектов предполагаемого пожара не будут исключены все рассматриваемые объекты.

Во многих случаях ADD может дать точное решение. Однако, так бывает не всегда. На рисунке 3.9 показан пример размещения, полученный для десяти объектов предполагаемого пожара с равными зонами размещения пожарного депо.

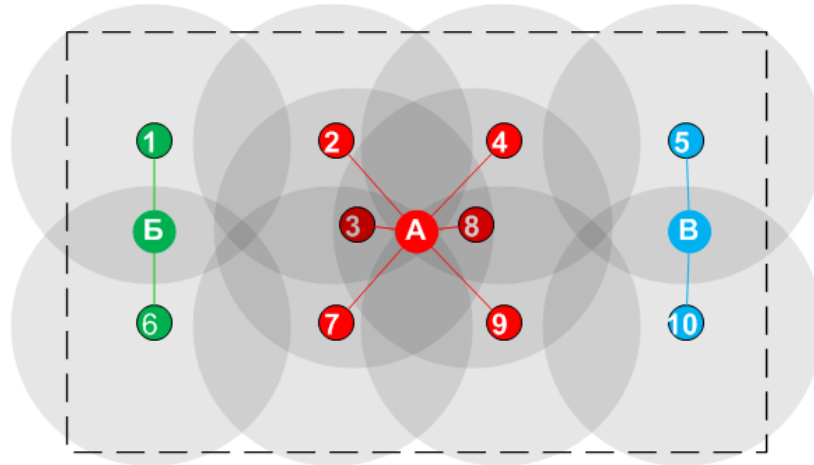


Рисунок 3.9 – Размещение полученной с использованием ADD.

Исходя из логики, описанной выше оптимальным местом размещения здания первого пожарного депо (депо А), является точка, лежащая в области пересечения пространственных зон объектов 2,3,4,7,8,9, т.е. 6 объектов (рисунок 3.9). Тогда, следующие пожарные депо следует расположить в местах пересечения пространственных зон объектов 1,6 (депо Б) и 5,10 (депо В). Итого, требуется 3 пожарных депо.

В действительности же, оптимальным будет создание всего 2 новых пожарных депо (рисунок 3.10), созданных в точках пересечения пространственных зон 1,2,3,6,7 объектов (депо А) и 4,5,8,9,10 (депо Б).

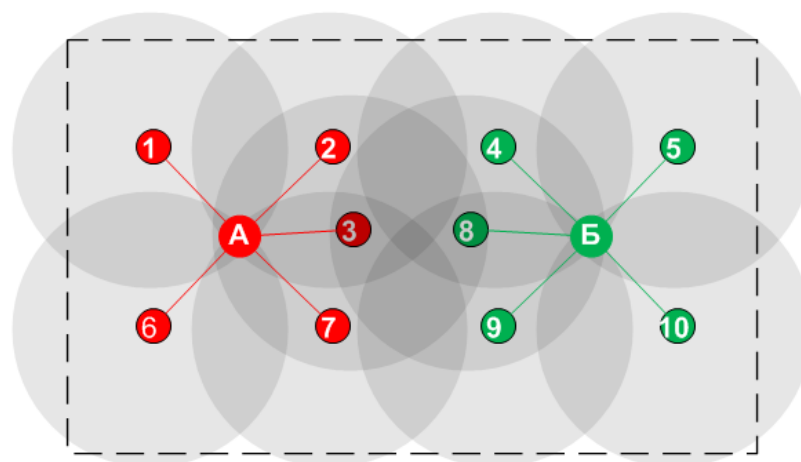


Рисунок 3.10 – Оптимальное размещение

Таким образом как достоинство ADD можно отметить детерминированный характер алгоритма, простоту реализации и понимания конечным пользователем, а

также низкую вычислительную сложность. Также достоинством ADD следует признать его универсальность – он может быть применен для решения задач BLP, MCLP, LSCP.

Как недостаток ADD можно отметить потенциальную ошибку алгоритма (по крайней мере на небольшом количестве объектов защиты), а также отсутствие механизма выбора наилучшего размещения в случае, если в ходе расчета появилось несколько областей пересечения одинакового количества пространственных зон размещения пожарного депо (рисунок 3.11). Выбор места размещения первого подразделения может повлиять на результат расчета. Без явного определения правил выбора размещения в таких случаях, результат расчета становится непредсказуемым [125].

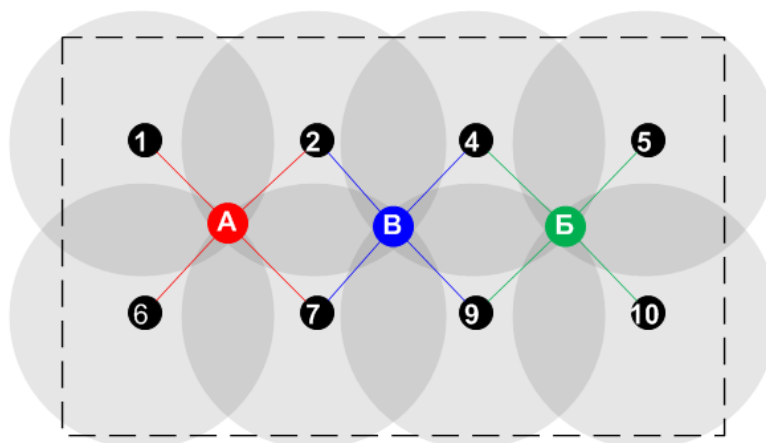


Рисунок 3.11 – Оптимальное размещение

3.1.5 Выводы по теоретической части

Теоретическое исследование позволило сформулировать основные задачи поиска оптимальной дислокации подразделений пожарной охраны и составить набор алгоритмов, которые могут быть пригодны для решения каждой из задач (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Предварительная оценка применимости алгоритмов к решению задач пространственной оптимизации дислокации подразделений пожарной охраны

Алгоритм	Задача		
	BLP	MCLP	LSCP
HC	+	-	-
SHC	+	-	-
MSA	+	-	-
ABC	+	-	-
BNHD	+	-	-
SAA	+	+	-
GA	-	+	+/-
GNS	-	+	+
GA+GNS	-	+	+
ADD	+	+	+

Из таблицы 3.1 видно, что не существует универсального алгоритма, который мог бы решать все задачи оптимизации дислокации подразделений пожарной охраны.

Сведения из таблицы 3.1 являются частными гипотезами, подтверждение или опровержение которых требуется для проверки основной гипотезы данной части исследования – предположения о том, что для определения дислокации подразделений пожарной охраны на территории населенного пункта за приемлемое вычислительное время могут быть использованы эвристические алгоритмы.

3.2 Экспериментальная оценка качества предложенных алгоритмов

В ходе вычислительных экспериментов требуется:

1. Подтвердить или опровергнуть частные гипотезы о применимости алгоритмов пространственной оптимизации, предложенные в теоретической части исследования (таблица 3.1).
2. Оценить их эффективность с точки зрения соотношения точность/время вычисления.
3. Выбрать лучшее решение задач BLP, MCLP, LSCP – универсальное для всех задач или наилучшее для каждой отдельно взятой.

3.2.1 Исходные данные

В исследовании использованы следующие исходные данные: граф улично-дорожной сети города Красноярска по состоянию на 1 апреля 2024 года. Для корректного учета прибытия подразделений пожарной охраны в случаях необходимости следования через смежную сельскую территорию ГДС взят в пределах буферной зоны, равной 1 километру.

Для ускорения вычислений ГДС был упрощен в соответствии с [117].

Для данного региона нет сведений о скорости следования пожарных автомобилей по разным типам дорог, и имеющиеся в распоряжении данные не позволяют их определить. Поэтому для расчетов использованы данные о скоростном режиме, полученные в п.2.4 (табл. 2.3, Модель Б) [45].

Используемые скорости следования пожарных автомобилей скорректированы пропорционально средним скоростям для Красноярска.

Для города Новосибирска средняя скорость следования пожарных автомобилей составляет 30,28 км/ч. Расчетная скорость для Красноярска, по данным за период 2010-2020 годов, составляет 32,73 км/ч. Исходя из пропорций, расчетные скорости для Красноярска составят (таблица 3.2):

Таблица 3.2 – Расчетные скорости следования пожарных автомобилей

Категория дорог	Исходные скорости, км/ч	Расчетные скорости, км/ч
Магистральные городские дороги и улицы общегородского значения	49	53
Магистральные улицы районного значения	37	40
Улицы и дороги местного значения	26	28.1
Служебные проезды: внутриквартальные, въездные, парковочные и т.д.	16	17.3
Пешеходные зоны и территории, не являющиеся проезжей частью, но теоретически пригодные для передвижения пожарных автомобилей	5	5.4

В ходе исследования была проанализирована застройка города Красноярск по состоянию на 1 апреля 2024 года. Сведения о зданиях на территории города подвергнуты дополнительной обработке и очистке – исправлены атрибуты идентификации класса здания по назначению.

Для проведения вычислительных экспериментов наборы данных разбиты на 7 наборов ГДС-Здания в соответствии с районами города (рисунок 3.12). В расчетный подграф включены только сильносвязанные компоненты графа в пределах буферной зоны 1 километр. В таблице 3.3 представлены основные параметры расчетных наборов для каждого из районов города Красноярск.

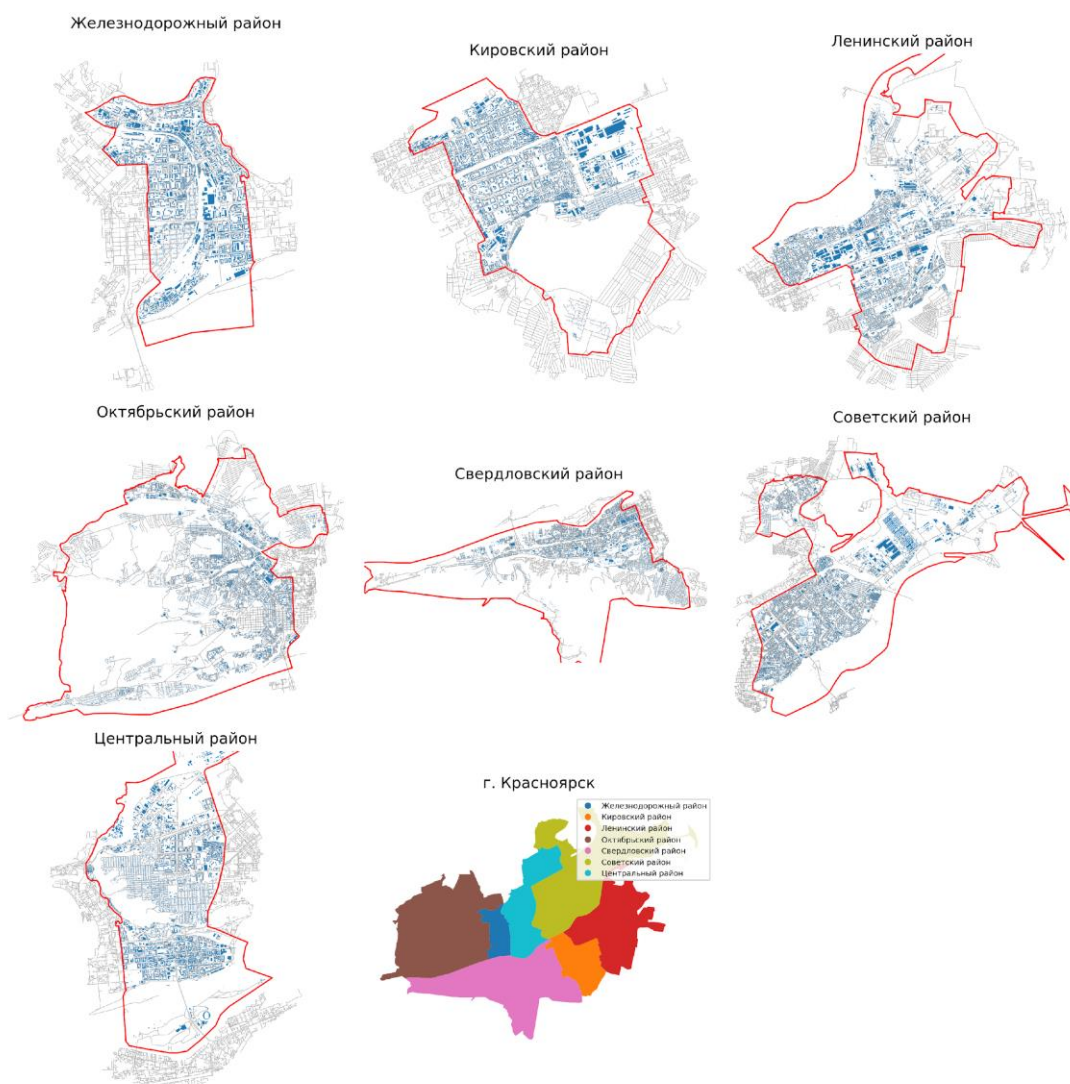


Рисунок 3.12 – ГДС и застройка города Красноярск по районам

Таблица 3.3 – Количество типов данных в каждом из наборов по районам города Красноярска

Район	Количество узлов ГДС		Количество ребер ГДС		Количество зданий
	Всего	В границах района	Всего	В границах района	
Железнодорожный	3515	1824	8411	4409	2898
Кировский	5100	1482	12939	3819	3382
Ленинский	5953	4218	15022	10674	4812
Октябрьский	7008	5233	17201	12752	11798
Свердловский	5490	4368	13597	10839	15159
Советский	9377	5664	22942	13856	8101
Центральный	5641	2787	13763	6660	6440

3.2.2 Методика исследования

Проведены три блока вычислительных экспериментов – по одному для каждой из задач: BLP, MCLP и LSCP. С использованием каждого из алгоритмов, представленных в таблице 3.1, выполнено решение соответствующей задачи пространственной оптимизации. Для задачи BLP также проведено решение алгоритмом полного перебора, и полученный результат рассматривается в качестве точного. Целевой метрикой для оптимизации в задачах BLP и MCLP являлась $M_{\text{ср}}$ (3.3). Для задачи LSCP выбрана метрика ИП₅ (3.4).

Оценены точность и время работы алгоритмов. По итогам проведения вычислительных экспериментов сделан вывод о применимости каждого из алгоритмов, выбран лучший из них, а также сформирован общий вывод о применимости подхода, описанного в начале главы. Проверена гипотеза о том, что для определения дислокации подразделений пожарной охраны на территории населенного пункта за приемлемое вычислительное время могут быть использованы эвристические алгоритмы.

Расчеты выполнены с использованием языка программирования Python, на котором реализованы все описанные алгоритмы, и интерактивных блокнотов Jupyter.

Количество вычислительных экспериментов каждого из алгоритмов n определялось как отношение времени t' , потребовавшегося для получения точного решения путем полного перебора, ко времени t выполнения одного расчета алгоритма:

$$n = \frac{t'}{t} \quad (3.5)$$

Оценка точности алгоритмов проводилась двумя способами:
доля правильных результатов, полученных с использованием алгоритма от общего количества вычислений:

$$C_1 = \frac{n'}{n} \quad (3.5.1)$$

где n' – количество правильных результатов.

отношение наилучшего значения целевой метрики к значению, полученному полным перебором:

$$C_2 = \frac{M}{M'} \quad (3.5.2)$$

где M – наилучшее значение целевой метрики, полученное с использованием алгоритма;

M' – значение целевой метрики, полученное с использованием полного перебора. В роли целевой метрики выступала $M_{\text{ср}}$ (3.3).

3.2.3 Результаты вычислительных экспериментов

Алгоритмы для решения задачи BLP

Для каждого из алгоритмов выбраны реализации с гиперпараметрами, продемонстрировавшими наилучшие результаты:

- HC: без гиперпараметров;
- MSA: глобальных прыжков – 2; локальных прыжков – 5; максимальное расстояние локальных прыжков – 1000 м;
- HC+BNHD: без гиперпараметров;
- MSA+BNHD: глобальных прыжков – 2; локальных прыжков – 10; максимальное расстояние локальных прыжков – 1500 м;
- ABC: пчел-разведчиков – 100; рабочих пчел – 5;
- SHS: подъемов – 10;
- SAA: начальная температура – 1; конечная температура – 0,0001; условие остановки – на протяжении 2000 шагов расчета, расчетная метрика не улучшается (таблица 3.4).

Таблица 3.4 – Результаты вычислительных экспериментов для алгоритмов BLP

Район	Узлов	Full*	ADD	HC	MSA	HC+BNHD	MSA+BNHD	ABC	SHS	SAA
		Время								
Железнодорожный	3515	692,2	23,8	7,6	85,8	2,6	161,3	35,3	74,3	816,7
Кировский	5100	1523,9	34,8	5,5	88,0	11,9	149,4	47,8	76,2	1071,3
Ленинский	5953	2039,3	31,5	8,7	105,3	3,9	212,0	66,8	101,7	1515,0
Октябрьский	7008	2843,3	63,1	10,2	144,8	12,9	267,6	70,1	118,4	1806,4
Свердловский	5490	1782,8	66,5	8,6	105,2	3,6	291,7	54,6	87,2	803,8
Советский	9377	5118,7	60,3	8,8	155,5	5,4	317,2	86,3	123,7	1397,1
Центральный	5641	1779,7	59,2	6,9	98,8	7,3	163,8	57,9	78,6	1151,0
Среднее:		2254,3	48,5	8,0	111,9	6,8	223,3	59,8	94,3	1223,0

Продолжение таблицы 3.4

Район	Узлов	Full*	ADD	НС	MSA	НС+BNHD	MSA+BNHD	ABC	SHS	SAA
$C_1, \%$										
Железнодорожный	3515	100	100	7,5	71,4	72,1	100	88,2	33,3	100
Кировский	5100	100	0	5,4	87,5	77,6	80	76,9	62,5	100
Ленинский	5953	100	0	5,7	50	63,3	100	40	14,3	99,1
Октябрьский	7008	100	100	0	80	92,3	100	88,9	16,7	99,2
Свердловский	5490	100	100	1,4	66,7	40,9	100	63,6	28,6	99,9
Советский	9377	100	0	1,4	25	1,8	66,7	28,6	16,7	99,6
Центральный	5641	100	0	17,2	100	100	100	100	62,5	100
Среднее:		100	42,9	5,5	68,7	64,0	92,4	69,5	33,5	99,7
$C_2, \%$										
Железнодорожный	3515	100	100	81,4	95,7	72,1	100	99,9	96,4	100
Кировский	5100	100	99,3	70,7	99,5	77,6	99,5	99,9	91,3	100
Ленинский	5953	100	93,8	54,9	95,5	63,3	100	96,9	92,3	99,1
Октябрьский	7008	100	100	47,7	92,3	92,3	100	99,7	93,7	99,2
Свердловский	5490	100	100	51,2	80,3	40,9	100	98,9	98,3	99,9
Советский	9377	100	93,4	50,9	83,7	1,8	98,5	95,1	88,6	99,6
Центральный	5641	100	99,8	68,8	100	100	100	100	94	100
Среднее:		100	98,0	60,8	92,4	64,0	99,7	98,6	93,5	99,7

* – эталонное значение, полученное путем полного перебора

Как видно из таблицы 3.4, наиболее быстрыми являются алгоритм НС, а также его вариация с поиском по центру диаметра графа НС+BNHD. Эти алгоритмы требуют в 300–400 раз меньше времени, чем полный перебор. НС позволил получить точный ответ в среднем в 5,5% случаев, в то время как НС+BNHD – в 64%. При этом отношение лучшего полученного ответа к эталонному составляет 60,8% для НС и 64,0% для НС+BNHD. Низкую точность по C_1 также продемонстрировал алгоритм SHS – в среднем 33,5% (рисунки 3.13, 3.14).

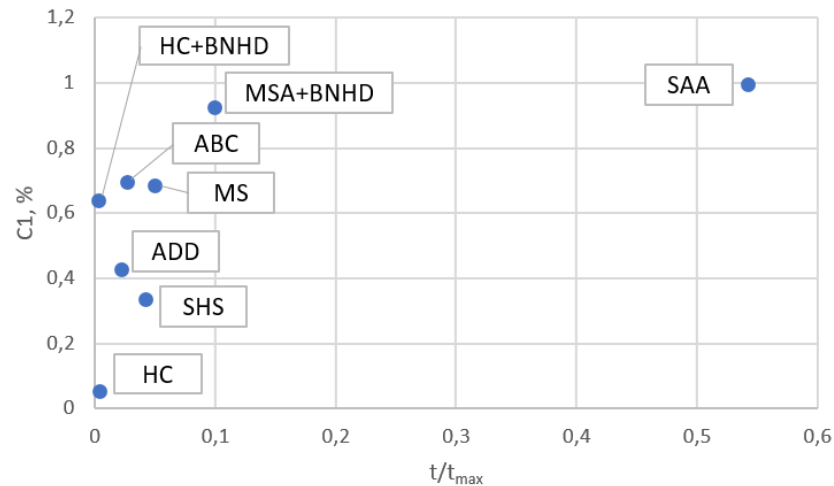


Рисунок 3.13 – Сравнение показателей алгоритмов VLP, по метрике C_1

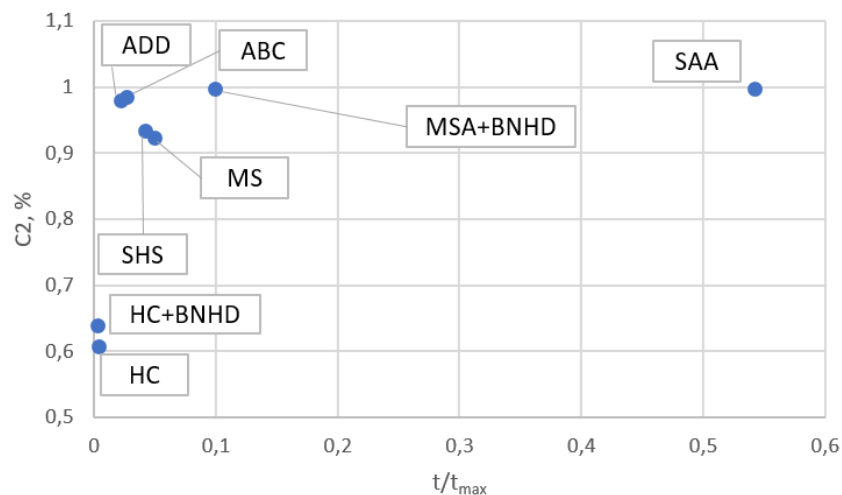


Рисунок 3.14 – Сравнение показателей алгоритмов VLP, по метрике C_2

Наилучшую точность по C_1 показал алгоритм MSA+BNHD – для 5 из 7 районов города Красноярска он позволил получить точный ответ в 100% экспериментов. Для поиска лучшего ответа алгоритм потребовал до 10 раз меньше времени, чем полный перебор.

Результат, близкий к эталонному (99,7% по C_1 и C_2), также был получен с использованием SAA. Однако данный алгоритм потребовал лишь в 3 раза меньше времени, чем полный перебор, а в случае с ГДС Железнодорожного района время выполнения превысило время, необходимое для полного перебора.

Время вычисления алгоритмами HC, HC+BNHD и SAA слабо зависит от размера графа. В то же время MSA, MSA+BNHD, ABC и SHS требуют тем больше времени на вычисления, чем больше размер ГДС.

Алгоритм ADD позволил получить точность определения лучшего узла (C_1) равную 42,9%, однако в данном случае это не слишком важно, т.к. лучший полученный с использованием ADD узел в среднем имеет метрику $M_{spr} = 98\%$ от оптимального варианта, что в сочетании с низкими временными затратами делает алгоритм пригодным для проведения оценочных расчетов при приемлемом снижении точности.

Алгоритмы решения задачи MCLP

Для каждого из алгоритмов MCLP были выбраны реализации с гиперпараметрами, показавшими наилучшие результаты:

- SAA: начальная температура – 1; конечная температура – 0,0001; условие остановки – на протяжении 2000 шагов расчета расчетная метрика не улучшается;
- GA: размер популяции – 50; размер элитной группы – 15; количество эпох – 30; показатель мутации – 0,5; максимальное количество мутаций – 3; условие остановки – на протяжении 20 эпох расчетная метрика не улучшается;
- GNS: количество итераций расчета – 3;
- GA+GNS: размер популяции – 50; размер элитной группы – 15; количество эпох – 30; показатель мутации – 0,5; максимальное количество мутаций – 3; количество итераций расчета – 3; условие остановки – на протяжении 20 эпох расчетная метрика не улучшается.

С использованием каждого из алгоритмов проведено определение оптимальной дислокации трех подразделений пожарной охраны на территории каждого из ГДС районов города Красноярск (таблица 3.5).

Таблица 3.5 – Результаты вычислительных экспериментов для алгоритмов MCLP

Район	SAA		GA		GNS		GA+GNS		ADD	
	<i>t, сек</i>	<i>M_{спр}</i>	<i>t, сек</i>	<i>M_{спр}</i>	<i>t, сек</i>	<i>M_{спр}</i>	<i>t, сек</i>	<i>M_{спр}</i>	<i>t, сек</i>	<i>M_{спр}</i>
Железнодорожный	913	94,9	280	92,4	8	83,1	286	94,8	26	92,6
Кировский	1374	96,7	418	95,9	11	61,4	422	96,5	32	94,5
Ленинский	1624	82,7	503	80,0	18	60,0	515	83,4	31	74,1
Октябрьский	1972	61,3	583	58,2	20	50,7	606	61,6	64	61,1
Свердловский	1521	71,9	444	67,3	14	49,9	449	71,4	67	71,9
Советский	2357	62,7	769	57,8	25	55,5	813	59,9	58	61,8
Центральный	1580	96,6	490	95,5	19	94,7	482	96,1	59	95,6

Как видно из таблицы 3.5, наилучшие результаты продемонстрировали алгоритмы SAA и GA+GNS. Алгоритмы GA и ADD показали результат на 2–4% хуже, а GNS – на 6–19%. При этом наибольшее время для получения результатов потребовалось алгоритму SAA. Алгоритмы GA и GA+GNS потребовали от 28 до 66% этого времени, а алгоритм GNS – всего 1–3%. Алгоритм ADD потребовал в 10 раз меньше времени чем алгоритмы SAA и GA+GNS, уступив при этом в точности всего 2-4%.

Таким образом, по соотношению точность/время наилучший результат продемонстрировал алгоритм ADD, наибольшую точность – алгоритмы SAA и GA+GNS. При этом алгоритм GA+GNS на 65% быстрее чем SAA (рисунок 3.15).

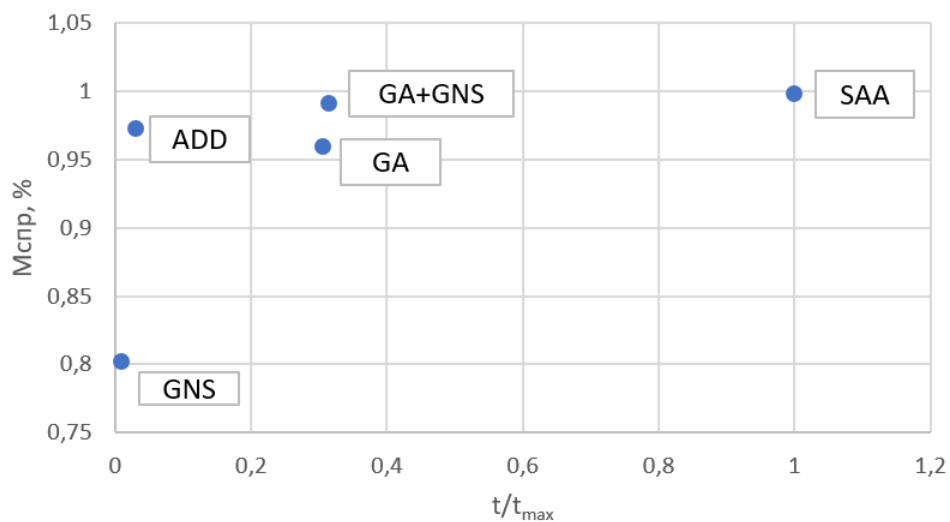


Рисунок 3.15 – Сравнение показателей алгоритмов MCLP

Алгоритмы LSCP

Для каждого из алгоритмов LSCP были выбраны реализации с гиперпараметрами, показавшими наилучшие результаты:

– GNS: количество итераций расчета – 3; используемый алгоритм BLP – HC+BNHD;

– GA+GNS: размер популяции – 75; размер элитной группы – 15; количество эпох – 10; показатель мутации – 0,5; максимальное количество мутаций – 3; количество итераций расчета – 3; используемый алгоритм BLP – HC+BNHD.

С использованием каждого алгоритма проведено по три вычислительных эксперимента для каждого района города Красноярска с целью определения требуемого количества и дислокации подразделений пожарной охраны для обеспечения ИП-5 = 98% (таблица 3.6). В качестве метрики оптимизации дислокации подразделений использована $M_{спр}$, а для оценки количества подразделений – ИП-5.

Пороговое значение индекса прикрытия (3.4) при проведении вычислительных экспериментов выбрано равным 5 минутам, так как рассматриваемые графы дорожной сети районного уровня слишком малы для дислокации подразделений пожарной охраны, исходя из времени прибытия 10 минут. Зачастую такие районы полностью покрываются одним подразделением, что делает решение задач MCLP и LSCP не нужным.

Таблица 3.6 – Результаты вычислительных экспериментов для алгоритмов LSCP

Район	Узлов	GNS	GA+GNS	ADD
		<i>t, сек</i>		
Железнодорожный	3515	52,11	301,68	23,54
Кировский	5100	114,54	481,84	44,8
Ленинский	5953	199,81	1111,61	35,02
Октябрьский	7008	802,58	3527,31	65,38
Свердловский	5490	183,04	1181,32	49,87
Советский	9377	566,47	2417,8	46,05
Центральный	5641	77,96	218,66	48,72

Продолжение таблицы 3.6

Район	Узлов	GNS	GA+GNS	ADD
		<i>t, сек</i>		
<i>Подразделений</i>				
Железнодорожный	3515	<u>3</u>	<u>3</u>	<u>3</u>
Кировский	5100	<u>3</u>	<u>3</u>	<u>3</u>
Ленинский	5953	<u>4</u>	5	5
Октябрьский	7008	<u>12</u>	<u>12</u>	14
Свердловский	5490	9	<u>7</u>	9
Советский	9377	10	<u>8</u>	9
Центральный	5641	3	<u>2</u>	<u>2</u>

С использованием алгоритмов GNS (рисунок 3.16), GA+GNS (рисунок 3.17) и ADD (рисунок 3.18) поставленная задача была решена. Меньшее количество подразделений пожарной охраны было предложено алгоритмом GA+GNS (в 6 случаях из 7). Алгоритм ADD продемонстрировал худший результат (минимальное количество получено в 3 случаях из 7, при этом в 2 случаях ошибка составила 2 подразделения), он оказался самым быстрым.

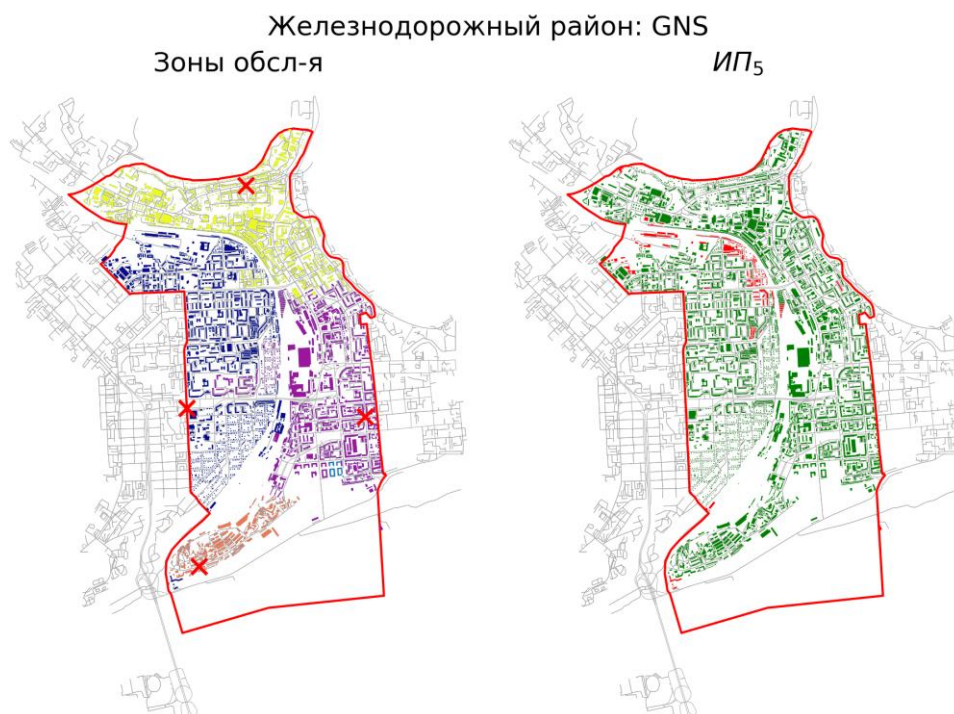


Рисунок 3.16 – Результат расчета с использованием алгоритма GNS

Время, затраченное на вычисления с использованием алгоритма ADD, в среднем на 93% меньше, чем время, потребовавшееся для расчетов с помощью алгоритма GA+GNS и на 71% меньше, чем время, потребовавшееся для расчетов с помощью алгоритма ADD (рисунок 3.19).

Таким образом, на основе результатов проведенных вычислительных экспериментов алгоритм GA+GNS продемонстрировал лучшие показатели по сравнению с прочими алгоритмами.

Вместе с тем необходимо отметить, что комбинация метрики оптимизации $M_{\text{спр}}$ и метрики оценки количества подразделений ИП₅ приводит к нестабильным результатам расчетов. Также существует потенциал для сокращения времени расчетов алгоритма GA+GNS за счет подбора наиболее подходящих гиперпараметров. Поэтому в заключительной части исследования для повышения качества результатов необходимо уточнить особенности работы алгоритма GA+GNS.

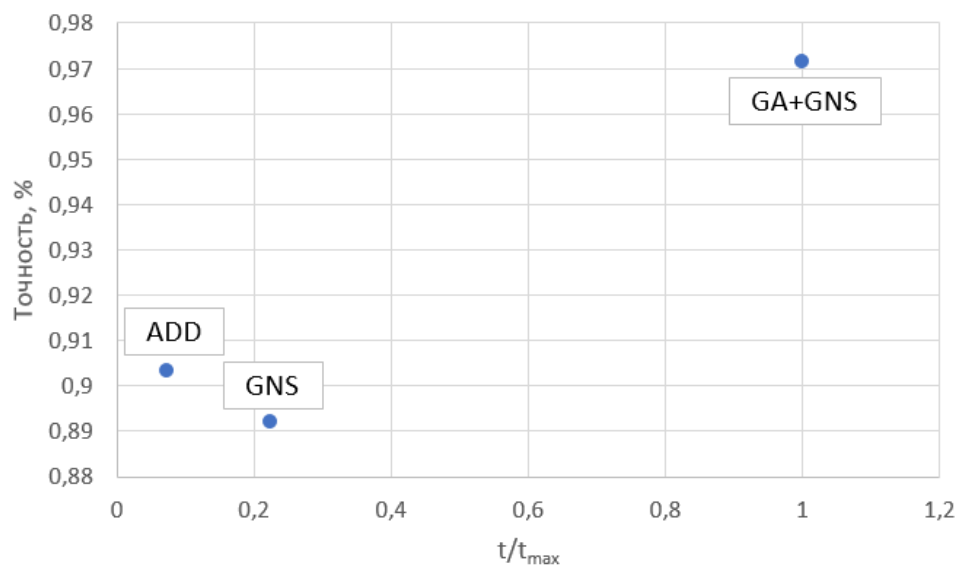


Рисунок 3.19 – Сравнение показателей алгоритмов LSCP

3.2.4 Выводы по экспериментальной части

Универсальным алгоритмом, который позволяет бы решать любую задачу пространственной оптимизации дислокации подразделений пожарной охраны является алгоритм жадного добавления (ADD).

Среди алгоритмов BLP наиболее точным является алгоритм MSA+BNHD. При этом алгоритм HC+BNHD, уступая в точности MSA+BNHD, имеет существенное преимущество в скорости проведения расчетов.

Среди алгоритмов MCLP наибольшую точность продемонстрировал алгоритм GA+GNS. Однако в случаях, когда требуется выполнить быстрый оценочный расчет, допустимо использование алгоритма GNS.

Алгоритм GNS слабо зависит от размера графа, что делает его применимым для решения задач оптимизации дислокации подразделений пожарной охраны в крупных населенных пунктах.

Среди алгоритмов LSCP наилучшие результаты для решения задачи LSCP показал гибридный алгоритм GA+GNS с использованием алгоритма HC+BNHD. Такой гибрид позволяет получать результаты, превосходящие по точности GA, при этом требуя меньше вычислительного времени.

Итоговая оценка применимости алгоритмов решения задач пространственной оптимизации дислокации подразделений пожарной охраны приведена в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Окончательная оценка применимости алгоритмов к решению задач пространственной оптимизации дислокации подразделений пожарной охраны

Алгоритм	Задача		
	BLP	MCLP	LSCP
HC	+	-	-
SHC	++	-	-
MSA	+++	-	-
ABC	+++	-	-
HC+BNHD	+	-	-

Продолжение таблицы 3.4

Алгоритм	Задача		
	BLP	MCLP	LSCP
MSA+BNHD	+++	-	-
SAA	+	+	-
GA	-	++	-
GNS	-	++	++
GA+GNS	-	+++	+++
ADD	++	++	++

3.3 Методы гибридизации эвристических алгоритмов обоснования дислокации подразделений пожарной охраны

Эксперименты с эвристическими алгоритмами показали, что для решения задач BLP, MCLP и LSCP может быть применен широкий спектр различных алгоритмов, каждый из которых подходит для определенного класса задач. Выбор конкретного алгоритма и его гиперпараметров должен основываться на особенностях проводимого расчета, таких как требуемая точность, доступное время вычислений и масштаб задачи. При этом перечень пригодных для решения алгоритмов не ограничивается рассмотренными в данной работе. Как показывают исследования [32, 33, 42–44], существует множество различных эвристических подходов к решению оптимизационных задач, которые могут быть адаптированы для задач пространственной оптимизации дислокации подразделений пожарной охраны.

В области машинного обучения для повышения качества моделей применяется так называемая технология ансамблирования моделей. Основная идея ансамблирования заключается в попытке получить на основе объединения некоторого количества «слабых» моделей единую «сильную» модель. Данный метод хорошо себя зарекомендовал и считается одним из важнейших инструментов повышения качества моделей машинного обучения.

Основными методами ансамблирования принято считать: Бэггинг, Бустинг и Стекинг [126].

Подходы, положенные в основу этих методов, могут быть использованы и для гибридизации эвристических алгоритмов. Существенным отличием в данном случае является отсутствие этапа обучения моделей – вместо них выступают эвристические алгоритмы, выполняющие поиск решения непосредственно в процессе работы. Таким образом методы гибридизации эвристических алгоритмов можно описать следующим образом.

1. Бэггинг. Применение множества алгоритмов к разным подвыборкам данных и агрегация их результатов (рисунок 3.20). В качестве подвыборок могут выступать, например, подвыборки наборов зданий, различным образом модифицированные графы улично-дорожной сети, различные метрики и вспомогательные алгоритмы (например алгоритмы поиска кратчайшего пути).

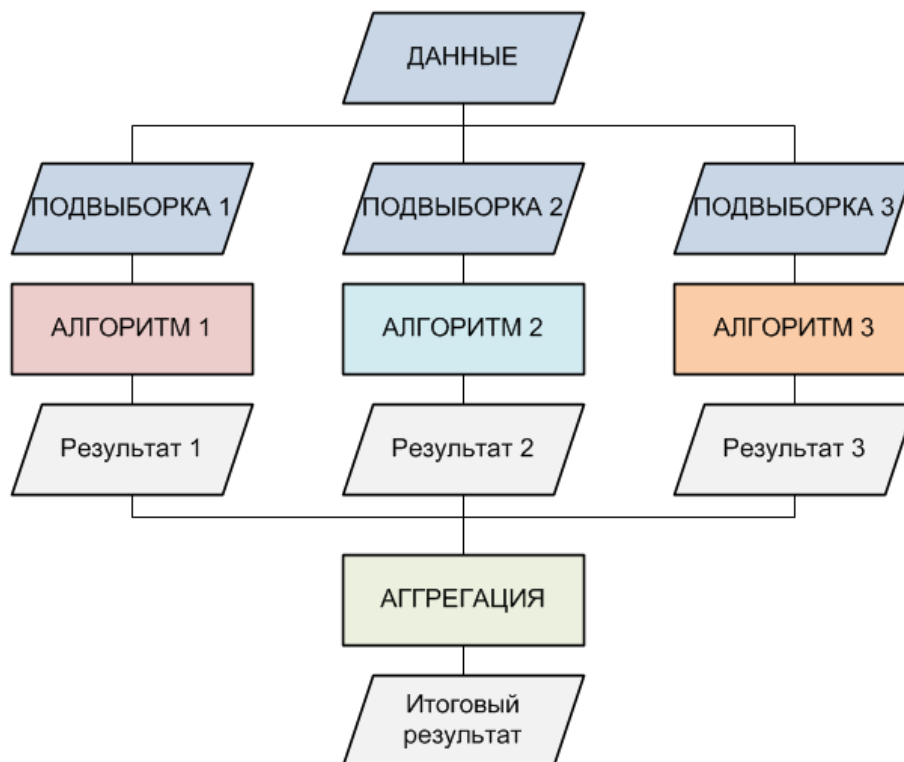


Рисунок 3.20 – Пример реализации бэггинга

2. Бустинг. Последовательное применение алгоритмов, где каждая новая исправляет ошибки предыдущей (рисунок 3.21).

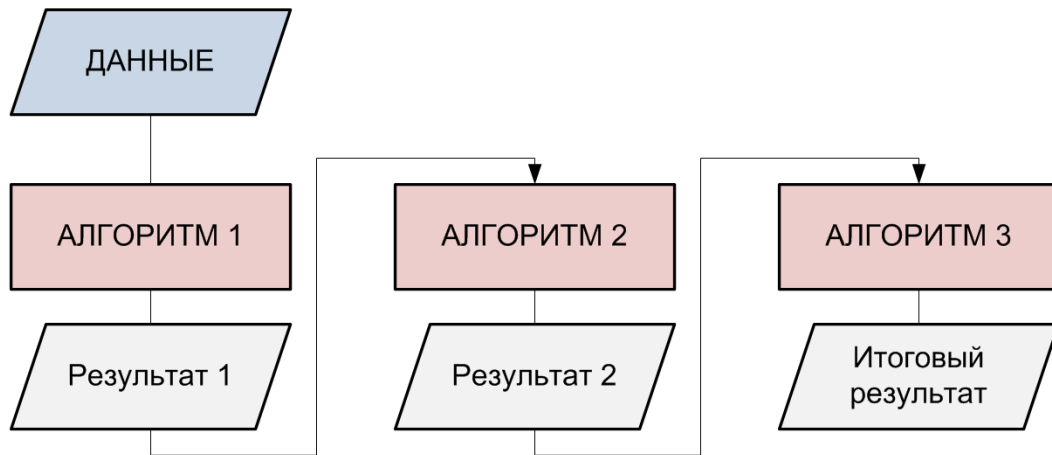


Рисунок 3.21 – Пример реализации бустинга

3. Стекинг. Из результатов нескольких базовых алгоритмов по некоторому правилу выбирается лучший (рисунок 3.22).

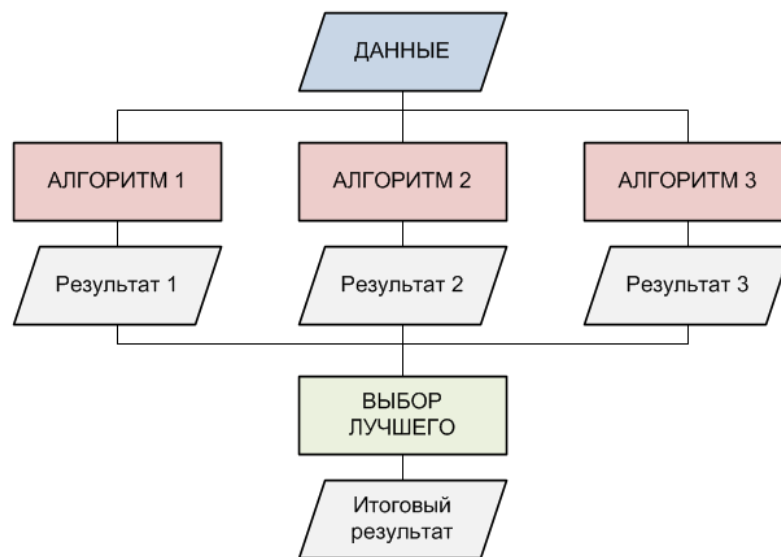


Рисунок 3.22 – Пример реализации стекинга

Приведенный перечень можно дополнить еще одним способом гибридизации, часто применяемым к алгоритмам любой природы, называемым «Смешивание» [116].

4. Смешивание. В сам алгоритм привносятся элементы, заимствованные из других алгоритмов. Смешивание может опираться на использование алгоритмов, которые объединяют в себе решения более низкоуровневых задач в соответствии с

иерархией (рисунок 3.1). Например, алгоритм MSA может включать в себя алгоритм НС для уточнения результатов, а алгоритм GNS при решении задачи LSCP может использовать решения задач VLP и MCLP. Эта идея может быть развита дальше: на основе частного алгоритма GNS можно создать более универсальный комплексный алгоритм, способный решать задачи более общего характера. Такой алгоритм инкапсулирует частные эвристические алгоритмы поиска, такие как VLP и MCLP, что позволяет эффективно комбинировать их преимущества. Решение задачи LSCP в этом случае осуществляется итеративно – процесс продолжается до тех пор, пока не будет достигнута цель расчета, например, требуемое время прибытия подразделений пожарной охраны или покрытие определенной доли территории (рисунок 3.23).

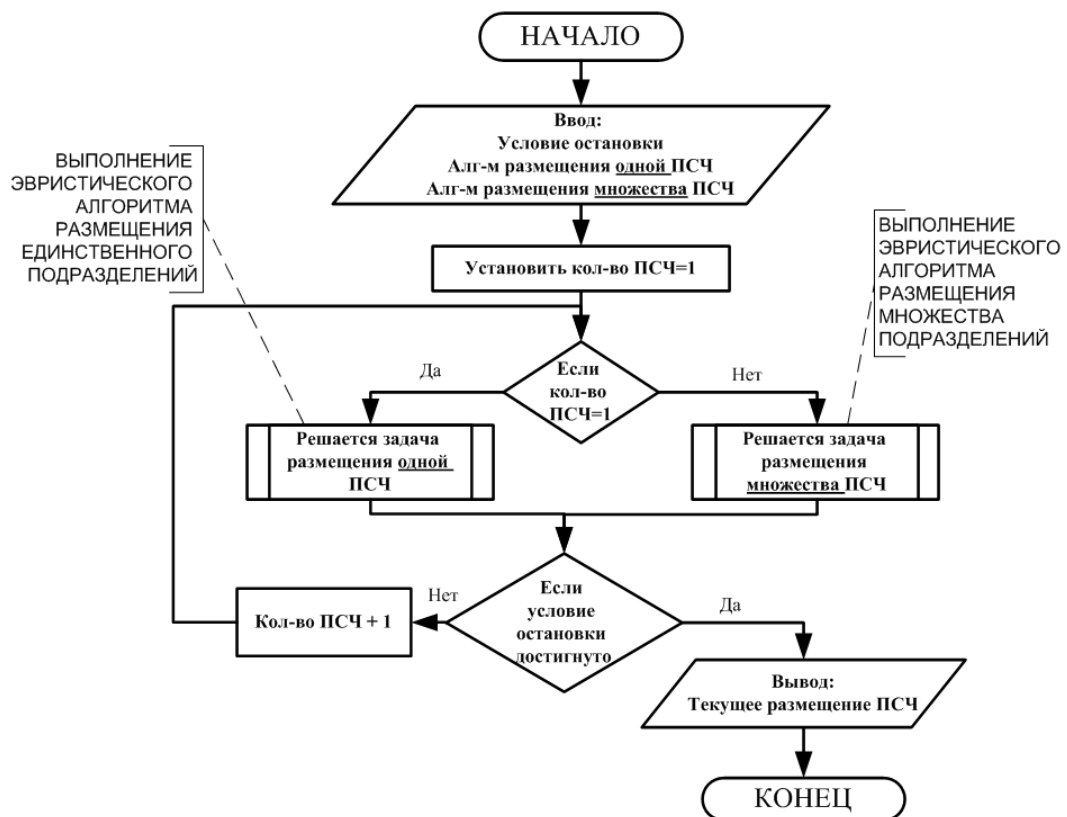


Рисунок 3.23 – Укрупненная блок-схема комплексного гибридного эвристического алгоритма определения необходимого количества подразделений пожарной охраны и оптимальных мест их дислокации

На рисунке 3.18 обозначены: F – условие остановки, VLP – алгоритм решения задач наилучшего места дислокации единственного подразделения, $MCLP$ – алгоритм решения задач максимального покрытия, N – количество подразделений пожарной охраны, S – параметры оперативного реагирования.

Таким образом, использование гибридных подходов и комбинирование различных эвристических алгоритмов открывает новые возможности для повышения точности и эффективности решения задач пространственной оптимизации. Это особенно важно для задач, связанных с определением дислокации подразделений пожарной охраны, где точность и скорость расчетов играют критическую роль.

3.4 Выводы по главе 3

1. В 95% случаев точную дислокацию подразделений пожарной охраны можно определить с использованием эвристических алгоритмов с вычислительной сложностью $O(K\sqrt{N})$. Можно заключить, 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, была подтверждена.

2. При решении задачи VLP наименьшее расчетное время потребовал алгоритм HC , а также его вариация с поиском по центру диаметра графа $HC+BNHD$. Эти алгоритмы требуют в 300-400 раз меньше времени, чем полный перебор. HC позволил получить точный ответ в среднем в 11,21% случаев, в то время как $HC+BNHD$ в 85%. При этом отношение лучшего полученного ответа к эталонному составляет 85% для обоих алгоритмов. Наилучшую точность по C_1 показал алгоритм $MSA+BNHD$ – для 6 из 7 районов города Красноярска он позволил получить точный ответ в 100% экспериментов.

3. При решении задачи MCLP наилучшие результаты продемонстрировал алгоритм GA+GNS. Алгоритм SAA показал результат на 4–8% хуже, GA – на 1–5%, а GNS – на 6–19%. При этом наибольшее время для получения результатов потребовалось алгоритму SAA. Алгоритмы GA и GA+GNS потребовали от 28 до 66% этого времени, а алгоритм GNS – всего 1–3%.

4. При решении задачи LSCP время, затраченное на вычисления с использованием алгоритма GNS, в среднем на 58,4% меньше, чем время, необходимое для расчетов с помощью алгоритма GA+GNS. При этом использование GA+GNS позволяет получить значительно меньшее количество подразделений при сохранении целевого уровня защиты населенного пункта.

5. Универсальным алгоритмом, который позволил бы решать любую задачу пространственной оптимизации дислокации подразделений пожарной охраны является алгоритм жадного добавления. При этом точность определения дислокации выше у алгоритмов на основе гибридов генетического алгоритма, однако разница в целом незначительна – 1-2%.

Поэтому для реализации в виде программного решения предлагается использовать следующие алгоритмы:

- для случая, когда требуется провести оценочные, быстрые вычисления: алгоритм жадного добавления;
- для более высокой точности:
 - BLP: MSA+BNHD или ABC;
 - MCLP: GA+GNS с использованием алгоритма HC+BNHD (алгоритм BLP);
 - LSCP: комплексный гибридный алгоритм, реализующий GA+GNS (алгоритм MCLP) с использованием алгоритма HC+BNHD (алгоритм BLP).

ГЛАВА 4. КОМПЬЮТЕРНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ И АПРОБАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО ОБОСНОВАНИЮ ДИСЛОКАЦИИ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ ПОЖАРНОЙ ОХРАНЫ В ГОРОДСКОЙ СРЕДЕ НА ОСНОВЕ ГИБРИДНЫХ ЭВРИСТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ

4.1 Специализированное программное обеспечение для поддержки принятия решений по определению необходимого количества подразделений пожарной охраны и их дислокации

4.1.1 Описание основных функций информационно-аналитической системы

Разрабатываемая система является прототипом прикладного программного обеспечения для автоматизации решения задач пространственной оптимизации мест дислокации и расчета численности подразделений пожарной охраны. Оно предназначено для верификации предложенных в главе алгоритмов оптимизации дислокации подразделений пожарной охраны и уточнении разрабатываемой модели поддержки принятия решений.

Основными задачами приложения являются:

- проведение вычислительных экспериментов по расчетному решению задач VLP, MCLP и LSCP;
- модульная гибридизация алгоритмов;
- настройка гиперпараметров алгоритмов;
- измерение метрик алгоритмов в процессе расчета;
- визуализация результатов расчета;
- загрузка и предварительная обработка исходных данных.

Система должно реализовывать функции ГИС, включая возможность работы с пространственно распределенными данными, такими как карта населенного

пункта, границы районов выезда, места дислокации подразделений пожарной охраны, точки возникновения пожаров и т.д.

Функции итогового программного решения включают:

- получение исходных данных для расчета;
- модификацию имеющихся исходных данных;
- моделирование показателей реагирования подразделений пожарной охраны в зависимости от их расположения на местности;
- определение оптимального места дислокации подразделений пожарной охраны в пределах заданной территории;
- моделирование минимально необходимого количества подразделений пожарной охраны на территории с учетом целевого расчетного показателя;
- моделирование дополнительного количества подразделений пожарной охраны для достижения целевого расчетного показателя.

Система должна предоставлять пользователю возможность указания подразделений, дислокацию которых не следует изменять в процессе расчета.

4.1.2 Форматы данных

В основу модели данных положен подход, используемый в ГИС. Принципы построения модели пространственных данных населенного пункта, следующие:

1. Все объекты населенного пункта представляются в виде пространственно ориентированных объектов с собственными метаданными и географической привязкой.
2. Каждый класс пространственных объектов представлен отдельным слоем данных [37, 73, 76].

Исходя из результатов работы, описанных в предыдущей части, был сделан вывод, что для работы приложения потребуется использовать следующие классы данных:

- граф улично-дорожной сети;
- сведения о зданиях в районе выезда;
- границы населенных пунктов;
- дислокация подразделений пожарной охраны.

Все эти классы данных являются пространственно-ориентированными и имеют географическую привязку. Таким образом, модель данных должна иметь пространственную основу и храниться в пространственно-ориентированном формате.

Пространственные данные могут быть классифицированы по различным критериям, но наиболее распространенным является разделение на векторные и растровые данные.

Векторные данные – это данные, которые представляют собой точки, линии и полигоны. Они обычно используются для представления объектов, таких как дороги, здания, границы и т.д. Векторные данные хранятся в виде координат точек, которые образуют линии и полигоны.

Растровые данные – это данные, представленные в виде сетки ячеек, каждая из которых содержит значение, отражающее определенный аспект территории. Растровые данные часто используются для представления изображений, таких как спутниковые снимки, аэрофотоснимки и карты рельефа.

В данной работе используются следующие векторные данные: места дислокации подразделений пожарной охраны, полигоны зданий, границы населенных пунктов и т.д. (таблица 4.1). Примером растровых данных являются карты плотностей пожаров, которые были подробно рассмотрены в главе 2.

Особым типом пространственных данных является пространственно-ориентированный граф. Этот тип данных помимо векторного представления ребер и вершин содержит описание характера их связей (топологию). Примером такого типа данных, используемых в данной работе, является граф улично-дорожной сети (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Описание классов пространственных данных, используемых в приложении

№	Класс данных	Описание	Дополнительные атрибуты
1.	Граф улично-дорожной сети (ГДС)	Данные, отражающие пространственное расположение и взаимные связи участков улично-дорожной сети городов	- тип дорог (глава 2); - длина дорог
2.	Здания	Данные, содержащие описание пространственного положения зданий и сооружений, а также их основных характеристик	- распределение зданий по КФПО + (глава 2); - этажность; - площадь; - адрес; - наименование.
3.	Границы населенного пункта и его районов	Данные, содержащие описание пространственного положения границ некоторой территории, в пределах которых осуществляется поиск оптимальной дислокации подразделений пожарной охраны	- наименование; - принадлежность (для границ зон обслуживания подразделений пожарной охраны)
4.	Дислокация подразделений пожарной охраны	Данные, содержащие сведения о дислокации существующих подразделений пожарной охраны, а также подразделений пожарной охраны, чья оптимальная дислокация получено в ходе расчетов	- наименование

Форматы хранения пространственных данных могут быть различными в зависимости от типа данных и целей их использования. Наиболее распространенные форматы и их сравнительная характеристика приведены в таблице 4.2 [122].

Таблица 4.2 – Сравнительный анализ распространенных форматов хранения пространственных данных

№	Формат	Тип данных	Достоинства	Недостатки
1.	Shapefile	Векторный	Широко распространен и поддерживается многими ГИС-приложениями	Файловая структура может быть сложной для понимания, особенно в случае с большим количеством данных
2.	GeoPackage	Любой	Все данные хранятся в одном файле, размер не ограничен, имеется возможность совместной работы	Поддерживается не всеми ГИС-приложениями

Продолжение таблицы 4.2

№	Формат	Тип данных	Достоинства	Недостатки
3.	GeoJSON	Векторный	Легкий для чтения и записи	Может быть менее эффективным для хранения больших объемов данных
4.	KML/KMZ	Векторный	Поддерживается многими приложениями, включая Google Earth	Может быть медленным для загрузки и обработки больших объемов данных, большой размер файла
5.	GML	Любой	Поддержка различных типов данных и стандартизированный формат	Может быть сложным для понимания и использования без специальных знаний, большой размер файла
6.	Tiff	Растр	Стандартный формат для растровых изображений	Большие файлы могут занимать много места и требовать длительного времени для обработки
7.	JPEG	Растр	Широко поддерживаемый формат для растровых изображений с высоким уровнем сжатия	Потеря качества изображения при сжатии
8.	GeoTIFF	Растр	Расширение TIFF с географической информацией	Может быть сложным для обработки без специального программного обеспечения
9.	ECW	Растр	Высокая степень сжатия	Может потребовать специального программного обеспечения для просмотра и редактирования
10.	MrSID	Растр	Высокая степень сжатия и поддержка больших объемов данных	Может быть сложным в использовании без специального программного обеспечения
11.	PostGIS	Любой	Возможность многопользовательского доступа и управления данными	Требует установки и настройки базы данных PostgreSQL

Проведенный сравнительный анализ наиболее распространенных форматов хранения пространственных данных показал, что наиболее подходящим форматом для использования в разрабатываемом программном обеспечении является GeoPackage. Этот формат поддерживает различные типы пространственных данных, включая векторные и растровые, а также метаданные, стили отображения и другие дополнительные атрибуты.

Одной из ключевых особенностей GeoPackage является возможность хранения данных в одном файле, что упрощает обмен данными и их использование в различных приложениях. Кроме того, формат обеспечивает высокую степень сжатия данных.

GeoPackage поддерживает многопользовательский доступ к данным. Он позволяет настраивать различные уровни доступа, ограничивая доступ к определенным частям данных [122].

В одном файле GeoPackage могут храниться данные одного из классов используемых данных. При этом слои данных могут различаться. Например, в файле с дислокацией подразделений пожарной охраны может храниться слой со сведениями о существующих подразделениях пожарной охраны, а также ряд слоев с дислокацией подразделений, полученных в результате моделирования.

4.1.3 Инструменты разработки

В ходе исследования был проанализирован массив сведений об особенностях различных платформ разработки программного обеспечения. Основное внимание уделялось рассмотрению существующих платформ и их инструментов.

В таблице 4.3 приведен сравнительный анализ показателей рассмотренных языков программирования и их возможностей применительно к поставленной в работе задаче.

Таблица 4.3 – Сравнение языков программирования, рассмотренных в ходе работы

Показатель	Язык программирования			
	Python	R	C#	JavaScript
Наличие инструментов работы с графами	+	+	+/-	-
Наличие инструментов работы с данными OSM	+	+	+	-
Простота освоения	+	+/-	-	+
Размер сообщества	+	+	-	+

Продолжение таблицы 4.3

Показатель	Язык программирования			
	Python	R	C#	JavaScript
Удобство разработки	+	+/-	-	+
Удобство распространения конечных результатов	+/-	+	+	+
Простота визуализации	+	+	-	+
Скорость вычислений	+	+/-	++	+
Удобство среды разработки	+	+	-	+
Требования к квалификации	+	+/-	-	-
Удобство работы с картографическими данными	+	+	-	+
Внедрение в существующие прикладные решения	+	-	+	-
Тип компиляции	При выполнении	При выполнении	Предварительная	При выполнении
Кроссплатформенность	+	+	-	+

Язык Python – это язык общего назначения, простой в освоении, не требующий глубоких знаний в программировании. Он имеет обширное сообщество пользователей и широко применяется в научных расчетах [27]. Python обладает мощными инструментами для анализа данных, включая работу с графами. Для разработки на Python не требуется сложной настройки среды, а редактор Python встроен во многие приложения, включая QGIS. Python использует заранее скомпилированные библиотеки C++, что обеспечивает высокую скорость вычислений, несмотря на интерпретируемость языка [18].

Основным аналогом Python является язык R, который набирает популярность в научных расчетах, благодаря простоте работы с данными и оформления результатов. R имеет мощные инструменты для работы с пространственными данными и анализа графов. Однако R требует установки специфической среды разработки и не имеет встроенных редакторов в готовых приложениях [50, 108].

В отличие от Python, C# – промышленный язык, подходящий для создания мощных приложений. Однако он предъявляет высокие требования к разработчикам и требует значительных трудозатрат. C# недостаточно подходит для научных

вычислений и ориентирован на Windows, что является недостатком в условиях перехода на Linux [90].

JavaScript – скриптовый язык, используемый для веб-разработки. Он обладает мощными инструментами визуализации, включая географические карты, и прост в распространении. Однако JavaScript не имеет встроенных инструментов для научных вычислений и работы с графами, а библиотеки для этого часто платные [25].

На основе анализа выбран Python как наиболее подходящий язык программирования. Для работы с графами выбрана библиотека NetworkX, предоставляющая инструменты для анализа и визуализации графов [112]. Для работы с ГДС используется OSMnx, надстройка над NetworkX, предназначенная для работы с дорожными сетями [117, 118]. Для табличных данных выбраны библиотеки Pandas и Geopandas, которые являются стандартом для работы с такими данными [146, 131]. Визуализация данных осуществляется с помощью Matplotlib, поддерживающей графики, диаграммы и карты [141].

Средой разработки выбран текстовый редактор Visual Studio Code, поддерживающий работу с Python и Jupyter Notebook, что удобно для выполнения расчетных задач [149]. Для управления библиотеками Python используется менеджер проектов Anaconda, позволяющий создавать виртуальные окружения и избегать конфликтов версий [111].

Для работы с картографическими данными выбрана QGIS – свободная ГИС с открытым исходным кодом, поддерживающая множество форматов и платформ [51]. Для документирования результатов используется Quarto, позволяющая создавать динамический контент и публиковать документы в различных форматах [150].

Дополнительно используются библиотеки Python: warnings (работа с предупреждениями), descartes (операции с пространственными данными), shapely (структуры пространственных данных).

4.1.4 Общая структура программного обеспечения

Проведен анализ функционала выбранных инструментов разработки программного обеспечения, форматов пространственных данных и полученных ранее моделей и алгоритмов. Это позволило синтезировать структуру информационно-аналитической системы поддержки принятия решений по обоснованию дислокации подразделений пожарной охраны в городской среде обеспечения, представленную на рисунке 4.1.

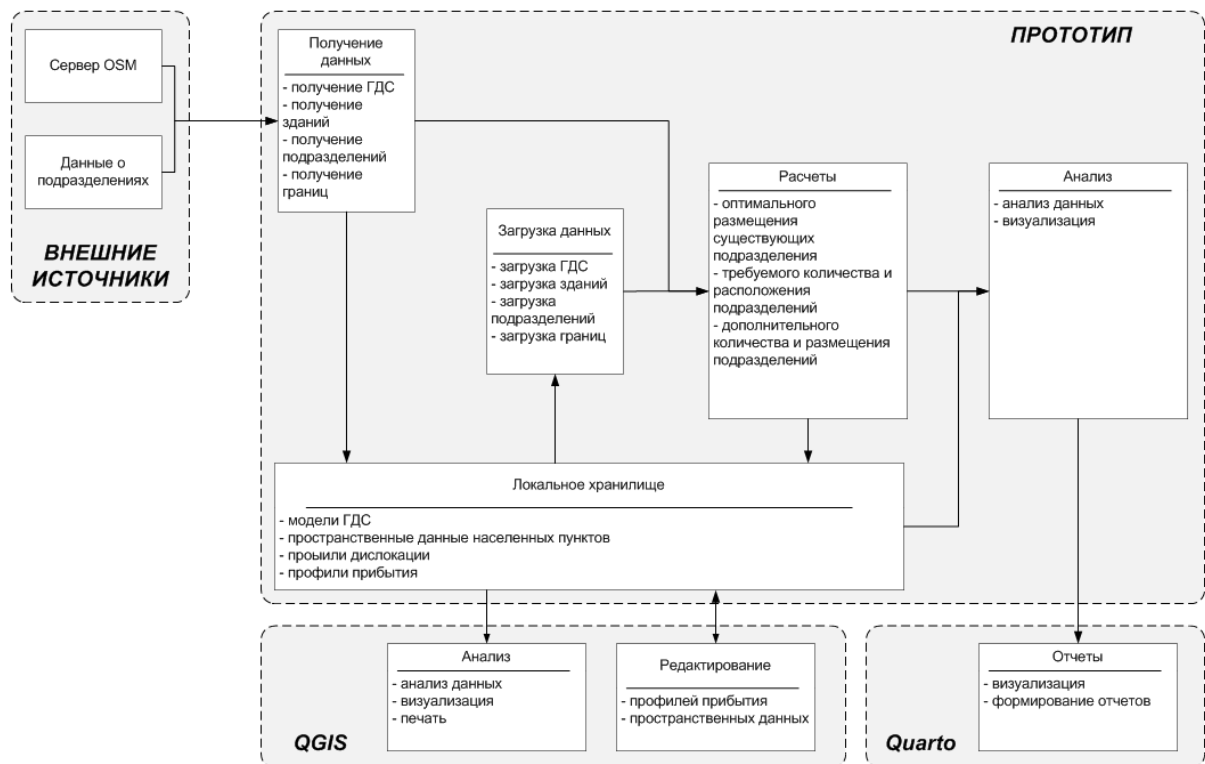


Рисунок 4.1 – Структура информационно-аналитической системы поддержки принятия решений по обоснованию дислокации подразделений пожарной охраны в городской среде

В соответствии с этой схемой логика работы решения в целом следующая.

Исходные данные в виде пространственных данных графа дорожной сети, зданий и дислокации существующих подразделений пожарной охраны получают

блоком получения данных из внешних источников – сервера OSM, а также при помощи загрузки табличных файлов.

После предварительной обработки эти данные сохраняются в локальное хранилище (на жесткий диск) и/или передаются в блок расчетов. Данные могут быть загружены блоком загрузки из локального хранилища (если они ранее уже были получены и не требуется их актуализация), после чего они также передаются блоку проведения расчетов.

Блок проведения расчетов, получая необходимые исходные данные, выполняет требуемые вычисления, после чего передает результаты в блок анализа и при необходимости сохраняет их в локальное хранилище.

Блок анализа получает результаты проведенных ранее расчетов из блока расчетов или локального хранилища, после чего выполняет требуемые манипуляции с данными. Полученные результаты в текущем режиме демонстрируются пользователю в виде схем, диаграмм, графиков, текстовых выводов и таблиц. В случае, если результаты расчетов полностью удовлетворяют пользователя, они передаются в блок формирования итоговых отчетов с использованием Quarto.

Приложение QGIS манипулирует данными, загружаемыми из локального хранилища – анализирует их средствами ГИС и позволяет их редактировать. Результаты возвращаются в локальное хранилище, после чего могут быть использованы блоком загрузки данных.

4.1.5 Модульная архитектура информационно-аналитической системы поддержки принятия решений по обоснованию дислокации подразделений пожарной охраны в городской среде

Основная идея системы заключается в том, что она позволит реализовывать любые подходы, модели и алгоритмы пространственной оптимизации – не только те, что использованы в данной работе [65].

В ходе предварительного прототипирования архитектуры информационно-аналитической системы на основе выводов, полученных в главе 3, было установлено, что наиболее подходящей является модульная архитектура (рисунок 4.6). Модульная структура позволяет разделить функциональность приложения на независимые блоки, что упрощает разработку, тестирование и внедрение новых алгоритмов. Это также обеспечивает возможность гибкой гибридизации алгоритмов, что особенно важно для решения сложных задач, требующих комбинации различных моделей. Например, можно интегрировать алгоритмы локального поиска с генетическим алгоритмом или алгоритмом имитации отжига, что повышает точность и скорость моделирования.

Кроме того, модульная архитектура позволяет легко расширять функциональность системы, добавляя новые модули для работы с дополнительными типами данных или реализации новых подходов к оптимизации. Это делает приложение не только универсальным, но и способным адаптироваться к новым требованиям и технологическим изменениям (рисунок 4.2).

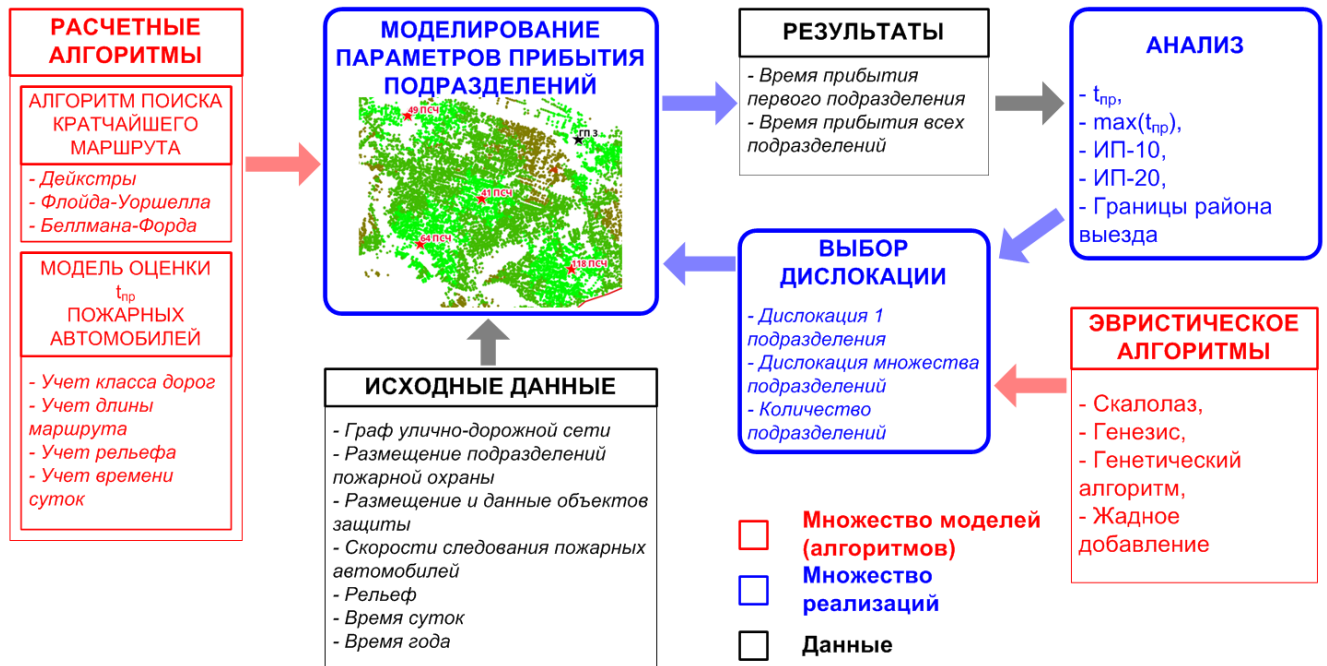


Рисунок 4.2 – Модульная архитектура гибридации алгоритмов в информационно-аналитической системе поддержки принятия решений по обоснованию дислокации подразделений пожарной охраны в городской среде

Основными блоками архитектуры информационно-аналитической системы поддержки принятия решений по обоснованию дислокации подразделений пожарной охраны в городской среде, определены:

- блок расчетных алгоритмов, включающий в себя множество моделей и алгоритмов поиска кратчайшего пути и модели оценки времени прибытия подразделений пожарной охраны;

- блок исходных данных, включающий в себя различные модели пространственных данных и константы, используемые системой при выполнении моделирования;

- блок моделирования параметров прибытия подразделений пожарной охраны;

- результаты работы блок моделирования параметров прибытия подразделений пожарной охраны, в зависимости от логики решения задачи, могут

быть различные, но в целом достаточно времени прибытия первого подразделения пожарной охраны или времени прибытия всех подразделений;

– блок анализа, включающий в себя оценку метрик приведенных в п.2.4 или иных характеристик прибытия подразделений пожарной охраны, например оптимальных границ районов выезда;

– блок эвристических алгоритмов, в зависимости от логики решения задачи использующий те или иные эвристики или их гибриды (п. 3.1);

– блок выбора дислокации, на основе эвристических алгоритмов определяющий оптимальную дислокацию, которая в дальнейшем передается в блок моделирования для дальнейшего итеративного вычисления.

Курсивом на рисунке 4.6 отмечены элементы, подразумевающие выбор, т.е. непосредственно при разработке решения для конкретной ситуации можно использовать любой из предложенных вариантов или их комбинацию. Также можно разрабатывать дополнительные элементы, например за счет гибридизации эвристических алгоритмов, методы которой описаны в п. 3.3.

Исходя из предложенной архитектуры и с учетом специфики выбранных и описанных выше инструментов, состав библиотеки Python был определен следующим образом (таблица 4.4):

Таблица 4.4 – Состав библиотеки Python

Модуль	Подмодуль	Описание
genesis (ядро библиотеки, общие функции для решения задач BLP, MCLP, LSCP)	blp.py	Реализации алгоритмов BLP
	core.py	Базовые классы функций
	lscp.py	Реализации алгоритмов LSCP
	mclp.py	Реализации алгоритмов MCLP
	metrics.py	Реализации функций расчета метрик
	point_selectors.py	Реализации функций выбора узлов
	states.py	Реализации функций расчета параметров прибытия
	stop_cases.py	Реализации функций правил остановки
	swiss_knife.py	Глобальные настройки уровня библиотеки
	tools.py	Набор общих инструментов (например перевод скоростей движения ПА из км/ч в м/мин)
	utils.py	Набор утилит, необходимых в разработке

Продолжение таблицы 4.4

Модуль	Подмодуль	Описание
fire_units (частные функции для решения задач пространственной оптимизации подразделений пожарной охраны)	blp.py	Реализации алгоритмов BLP
	lscp.py	Реализации алгоритмов LSCP
	mclp.py	Реализации алгоритмов MCLP
	metrics.py	Реализации функций расчета метрик
	states.py	Реализации функций расчета параметров прибытия
	settings.py	Настройки уровня модуля
graphs (набор специальных алгоритмов для работы с графами)	settings.py	Настройки уровня модуля
	speeds.py	Функции расчета и установки скоростей следования пожарных автомобилей для ребер ГДС
	tools.py	Дополнительный набор инструментов

Ядром системы является модуль *genesis* – в нем реализованы базовые классы приложения и их частные реализации основных способов решения задач BLP, MCLP и LSCP. Для решения задач пространственной оптимизации на графах данного модуля достаточно. Однако для реализации конкретных методик пользователь может разрабатывать собственные решения, основанные на имеющихся в *genesis* классах. Например, для реализации описанных в данной работе моделей и алгоритмов в библиотеку добавлен модуль *fire_units*, который позволяет непосредственно решать задачи пространственной оптимизации подразделений пожарной охраны с учетом специфики законодательства Российской Федерации.

Дополнительным модулем является *graphs*, содержащий специальные инструменты для манипуляции ГДС – загрузки, дополнения ребер сведениями о скоростях и времени следования, обрезки, склеивания и выполнения операций из области теории графов.

На рисунке 4.3 представлены базовые абстрактные классы разрабатываемого приложения и их связи между собой. На диаграмме в соответствии с UML 2.2 [92] дано описание назначения классов.

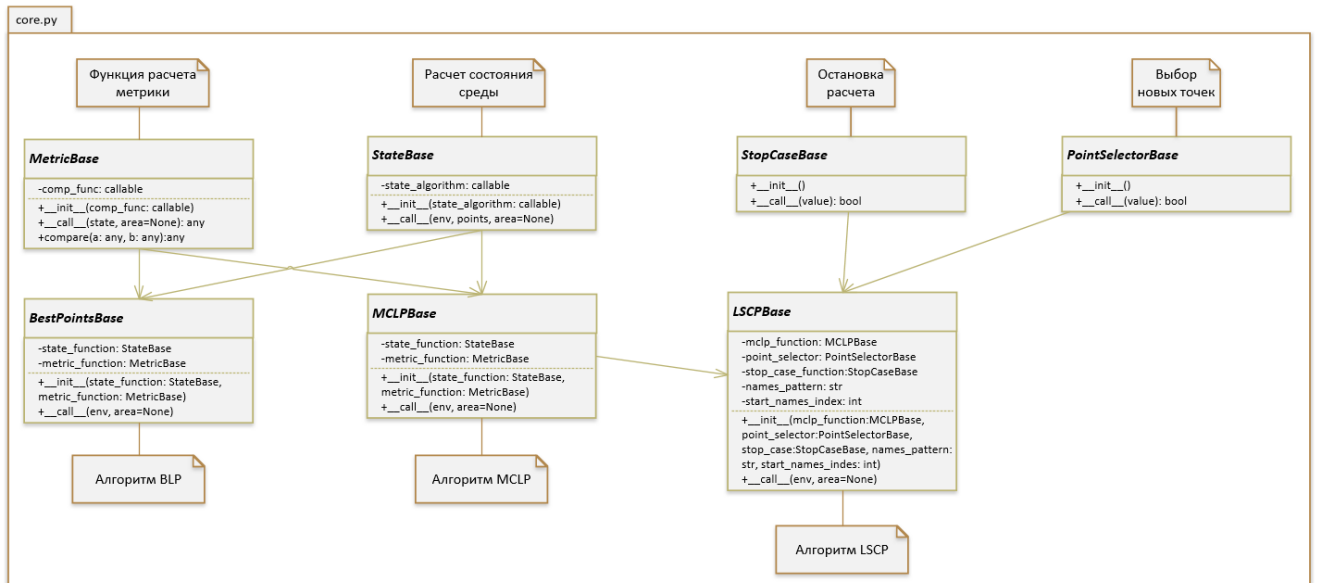


Рисунок 4.3 – UML-диаграмма базовых классов

Основными являются абстрактные классы `BestPointBase`, `MCLPBase`, `LSCPBase`, отвечающие за решение задач BLP, MCLP и LSCP соответственно. К дополнительным компонентам приложения относятся классы: `MetricBase`, `StateBase`, `StopCaseBase`, `PointSelectorBase`.

Абстрактные классы определяют программные интерфейсы функций, что гарантирует корректное взаимодействие между всеми классами, унаследованными от них.

Для реализации решения, выполняющего конкретные задачи с учетом определенной специфики, необходимо разработать классы-наследники. В разрабатываемом приложении классы-наследники реализуют логику расчета задач с использованием алгоритмов и метрик, описанных в главе 3.

На рисунке 4.4 показан пример реализации алгоритма решения задачи BLP алгоритмом полного перебора. В данном решении класс `FirstArrivalUnitsState` наследует абстрактному классу `StateBase` и реализует логику расчета времени прибытия первого подразделения пожарной охраны во все вершины. Класс `Demand` наследует абстрактному классу `MetricBase` и реализует логику расчета метрики удовлетворенности спроса на основе модели (формула 3.2). Класс `BestNodesFull`

наследует абстрактному классу `BestPointsBase` и реализует в данном случае моделирование лучшего узла алгоритмом полного перебора. При этом `BestNodesFull` принимает при инстанцировании экземпляры классов `FirstArrivalUnitsState` и `Demand`.

Такой подход к проектированию системы обеспечивает высокую гибкость и масштабируемость приложения. Благодаря использованию абстрактных классов и наследования, разработчики могут легко добавлять новые алгоритмы и метрики, не нарушая существующую архитектуру. Это особенно важно для задач пространственной оптимизации, где требования и условия могут изменяться в зависимости от конкретного сценария использования.

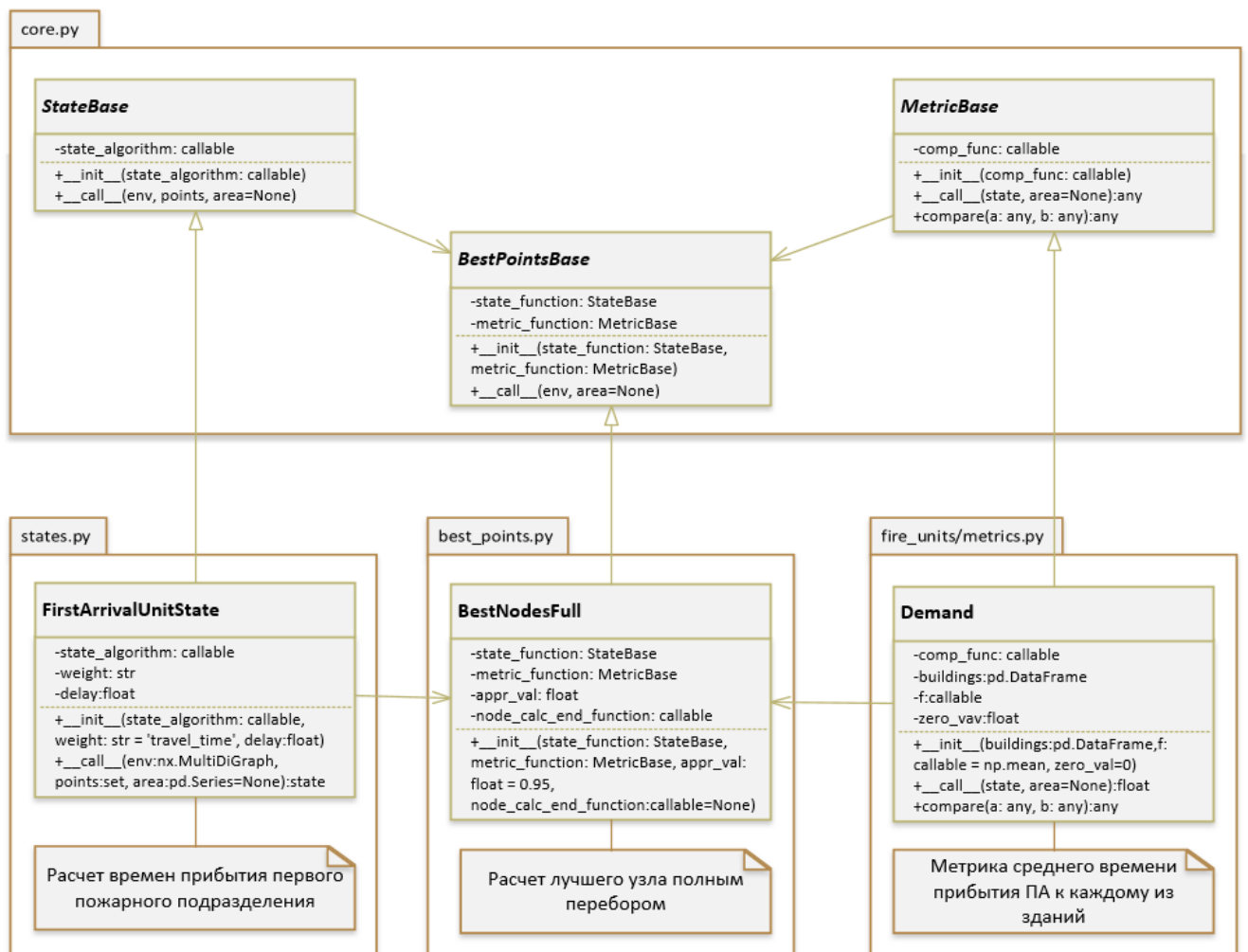


Рисунок 4.4 – Реализация алгоритма решения задачи VLP алгоритмом полного перебора

На рисунке 4.5 показан пример реализации алгоритма MCLP на основе гибрида алгоритмов GNS+НС для метрики удовлетворенности спроса и условия остановки по количеству итераций без улучшений. Классы FirstArrivalUnitState и Demand реализованы аналогично решению, описанному выше для задачи VLP. Класс BestNodeHillClimbing унаследован от абстрактного класса BestPointsBase и реализует логику алгоритма НС. Класс NSameStopCase унаследован от абстрактного класса StopCaseBase и реализует функцию правила остановки по условию, что на протяжении n итераций метрика Demand не улучшается. Класс BestNodesKoptG унаследован от абстрактного класса MCLPBase и реализует логику алгоритма «Генезис» для задачи MCLP.

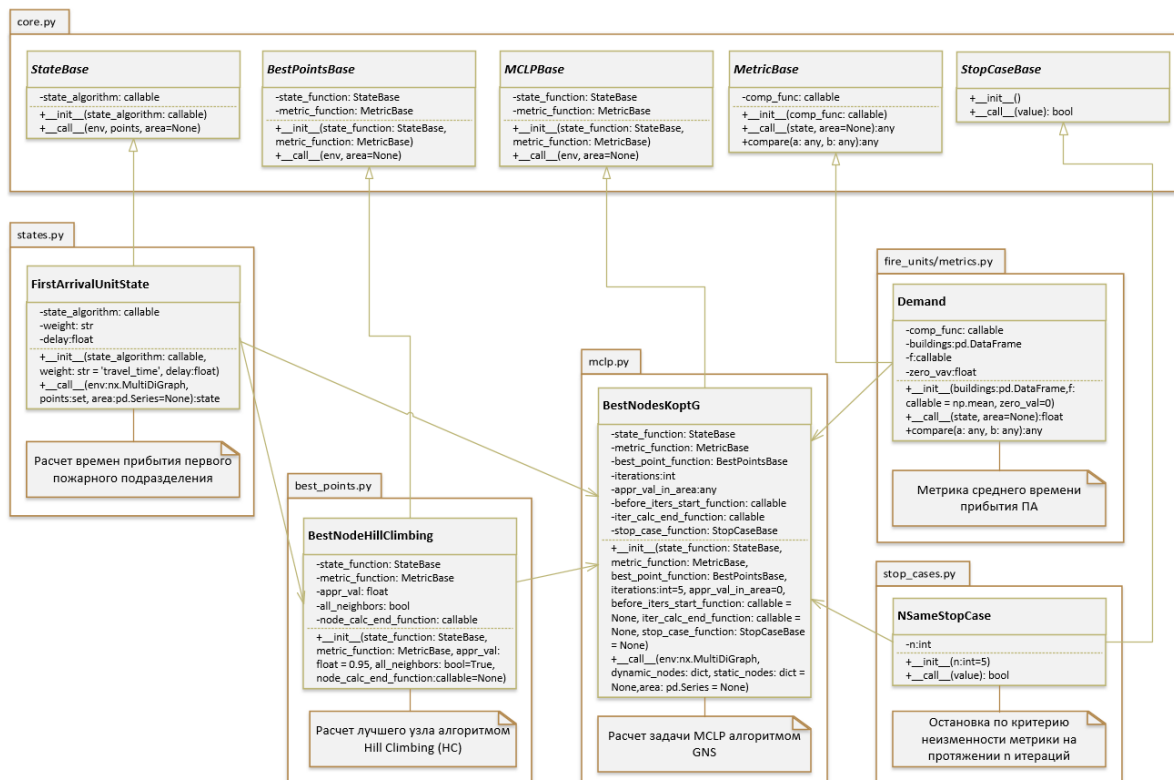


Рисунок 4.5 – Реализация алгоритма «Генезис» для решения задачи MCLP

На рисунке 4.6 представлен пример реализации алгоритма «Генезис» (GNS). В данном случае классы FirstArrivalUnitState, Demand, BestNodeHillClimbing, NSameStopCase, BestNodesKoptG реализованы аналогично решениям, описанным выше для задач VLP и MCLP. Класс FarNodeSelector унаследован от абстрактного

класса `PointSelectorBase` и реализует функцию выбора очередного узла при итерации алгоритма LSCP для дислокации новой ПСЧ, исходя из его удаленности от имеющейся дислокации. Класс `LSCPCommon` унаследован от абстрактного класса `LSCPBase` и реализует логику комплексного гибридного эвристического алгоритма, представленную на рисунке 3.6.

Такой подход позволяет гибко адаптировать алгоритм под различные условия и требования, обеспечивая высокую точность и эффективность расчетов. Кроме того, использование модульной архитектуры упрощает внедрение новых моделей и алгоритмов, что делает приложение универсальным инструментом для решения задач пространственной оптимизации.

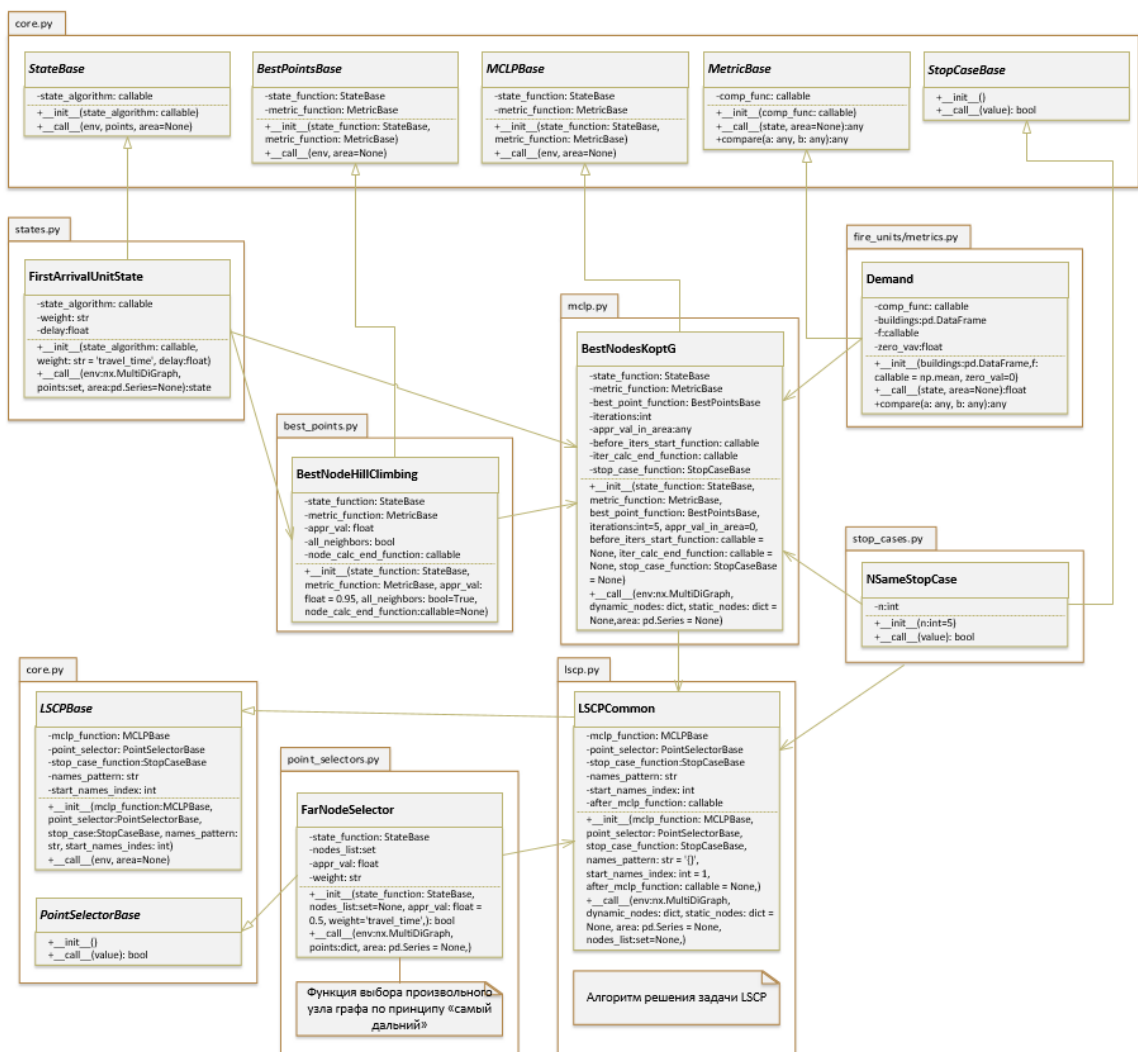


Рисунок 4.6 – Реализация алгоритма «Генезис» для решения задачи LSCP

Аналогично приведенным примерам реализуются прочие алгоритмы и подходы, описанные в главе 3.

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

На основе выводов по главе 3 и основных функций разрабатываемой информационно-аналитической системы поддержки принятия решений по обоснованию дислокации подразделений пожарной охраны в городской среде, разработан алгоритм поддержки принятия решений по обоснованию дислокации подразделений пожарной охраны в городской среде с использованием информационно-аналитической системы на основе гибридных эвристических алгоритмов. Этот алгоритм опирается на применение гибридных эвристических алгоритмов.

Общий ход принятия решений предлагается следующим:

1. Определение задач моделирования.
2. Выбор инструментов расчета и перечня требуемых исходных данных.
3. Подготовка исходных данных.
4. Проведение моделирования.
5. Анализ результатов.
6. Подготовка рекомендаций по итогам моделирования.

На этапе определения задач моделирования (рисунок 4.7) осуществляется выбор из возможных направлений моделирования: определение количества подразделений пожарной охраны или их оптимальной дислокации.

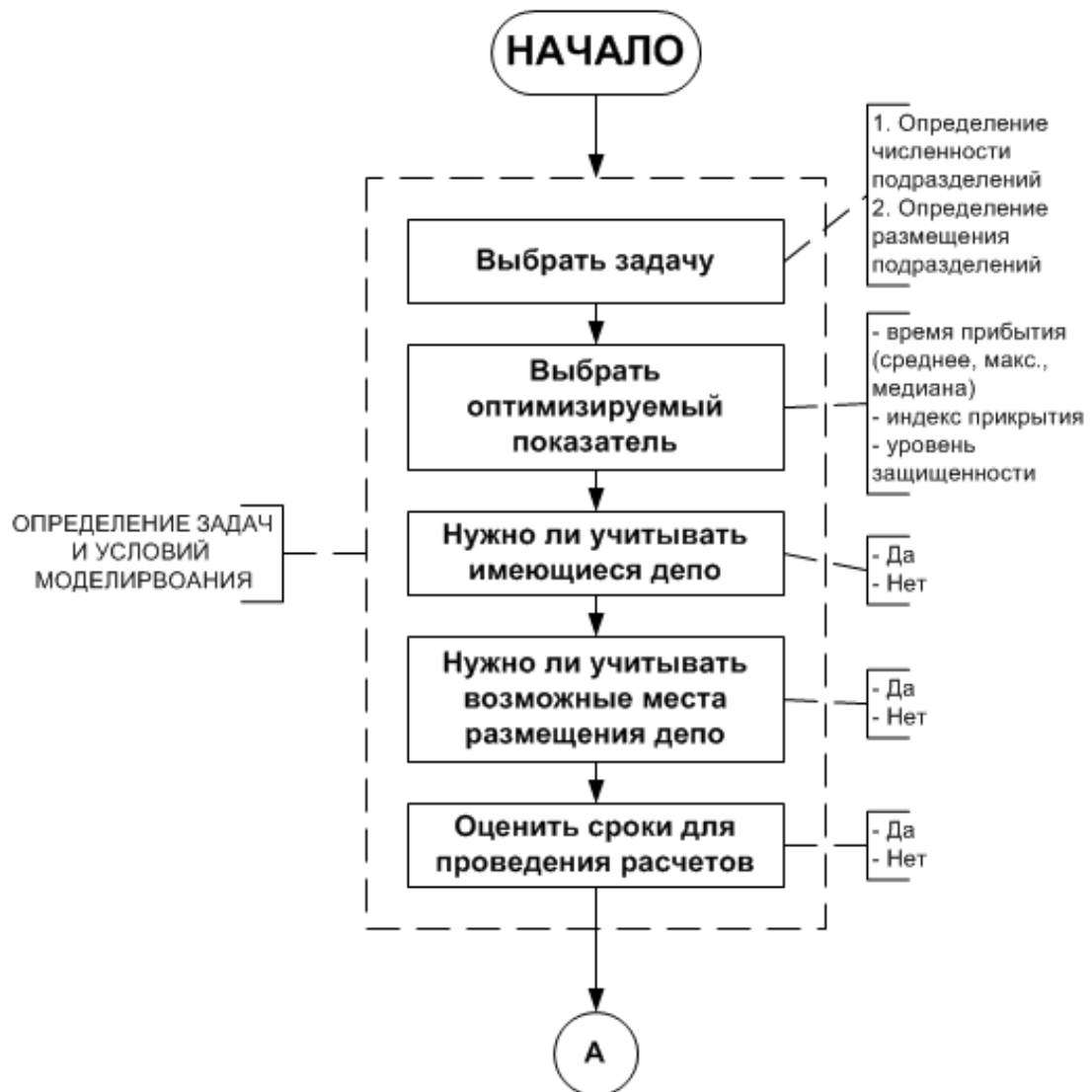


Рисунок 4.7 – Блок-схема этапа определения задач

Далее выбирается оптимизируемый показатель ожидаемых параметров оперативного реагирования: среднее (максимальное, медианное и т.д.) время прибытия, индекс прикрытия территории (или отдельного класса объектов), необходимость учета существующих подразделений, перечень возможных мест дислокации создаваемых подразделений и ориентировочное время, допустимое для проведения расчетов.

Исходя из обозначенных задач моделирования, определяется, какие гибриды алгоритмов лучше всего использовать (рисунок 4.8).



Рисунок 4.8 – Блок-схема этапа выбора инструментов расчета и перечня требуемых исходных данных

Критерием выбора служит субъективная оценка времени, которое может потребоваться для проведения расчета. Если эта оценка укладывается в обозначенные временные рамки, выбираются алгоритмы с высокой точностью; в противном случае – алгоритмы со средней или низкой точностью.

Исходя из поставленных задач, определенных условий проведения моделирования и выбранных алгоритмов, определяется перечень требуемых исходных данных, их объем, качество и формат представления.

Для каждого из определенных типов требуемых исходных данных осуществляется оценка их доступности (рисунок 4.9). Данные либо предоставляются заказчиком, либо получаются из открытых источников (если это возможно). Пространственные данные, помимо этого, приводятся к единой системе географических координат, чтобы избежать ошибок при вычислениях. Также осуществляется согласование качества используемых данных с заказчиком.

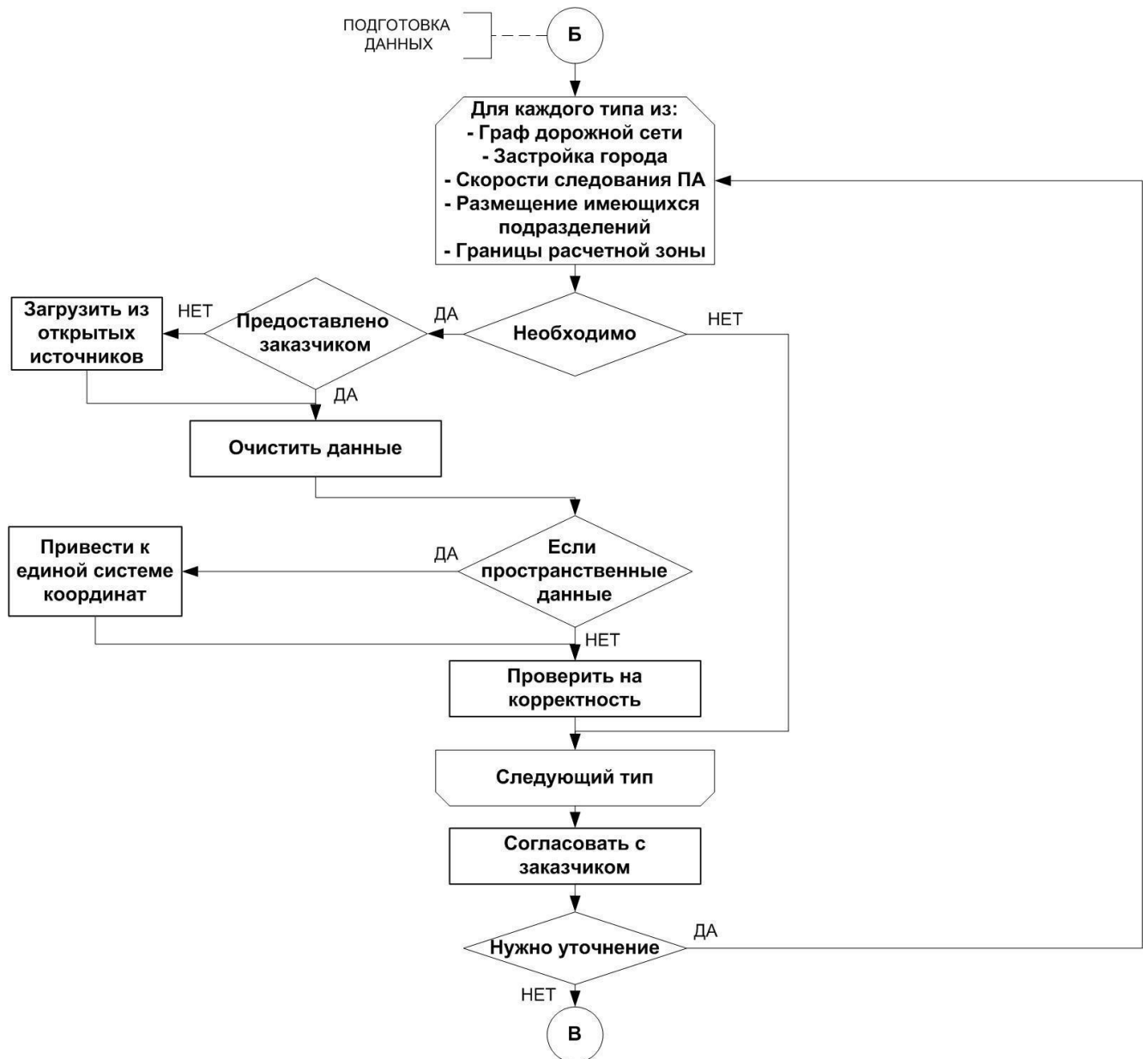


Рисунок 4.9 – Блок-схема этапа подготовки исходных данных

Для каждой из согласованных альтернатив моделирования выполняется процесс моделирования (рисунок 4.10). Результаты моделирования визуализируются в виде интерактивной карты, затем оценивается непротиворечивость полученных результатов.

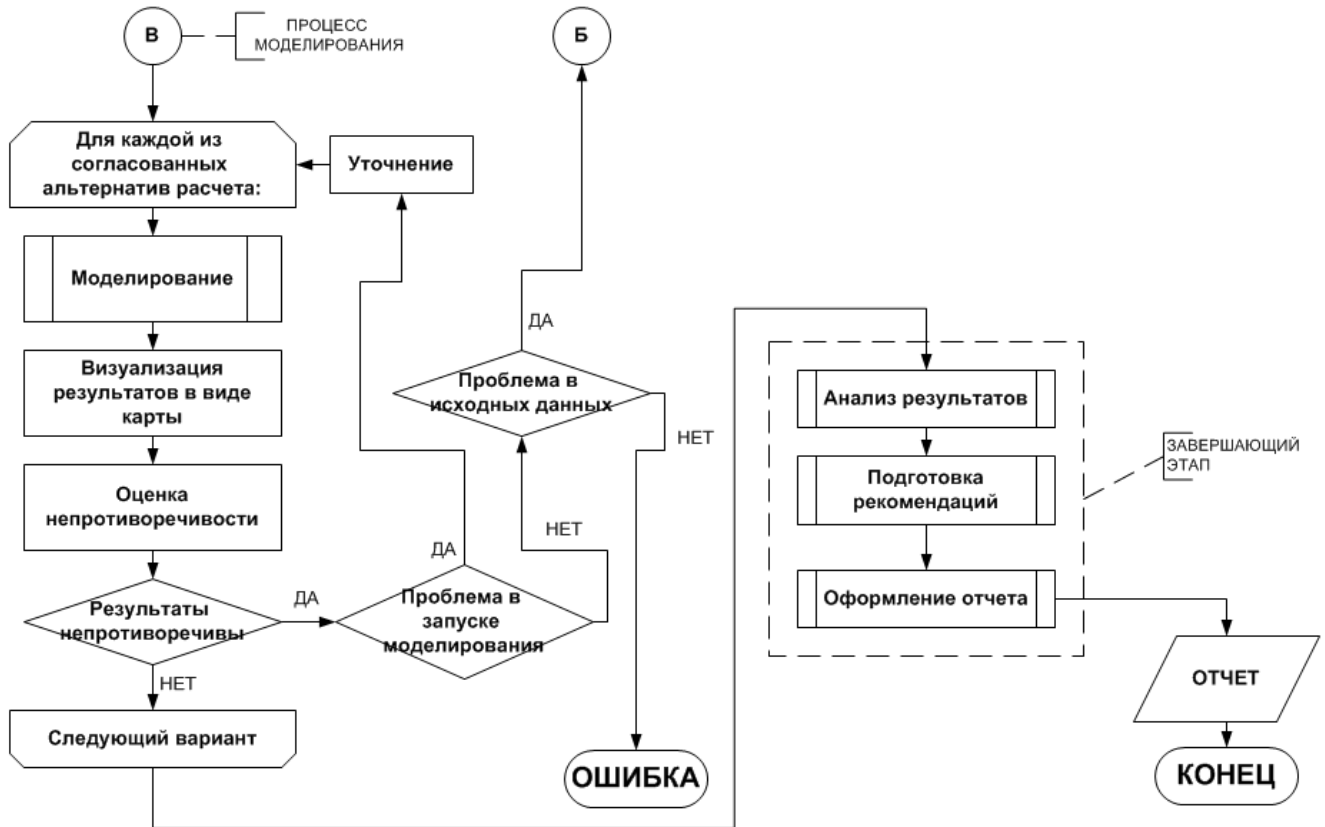


Рисунок 4.10 – Блок-схема завершающей части

В случае получения результатов, не согласующихся с действительностью или содержащих очевидные ошибки, выполняется процедура поиска причин ошибки. Если причина заключается в ошибке запуска моделирования, уточняются исходные параметры, такие как правильность выбора алгоритмов, их гиперпараметров и наборов исходных данных. Если источником проблемы является ошибка в исходных данных, происходит их уточнение, для чего выполняются необходимые процедуры этапа получения исходных данных (рисунок 4.10). Если причину неточности установить не удастся, моделирование прекращается и выполняется более углубленный поиск ошибки с привлечением технических специалистов.

Если моделирование прошло штатно и полученные результаты непротиворечивы, осуществляется процедура анализа. Проводится сравнение результатов, полученных для разных альтернатив расчета, отмечаются

положительные и отрицательные стороны каждого из них, и предлагается трактовка, на основе которой заказчик сможет принять окончательное решение.

При необходимости могут быть проведены уточняющие расчеты или изменено представление итогового решения.

4.3 Апробация и анализ эффективности моделей, алгоритмов и специального программного обеспечения

Для апробации полученных в работе результатов был выбран следующий подход.

В качестве населенных пунктов выбраны 5 крупных городов Российской Федерации с численностью населения свыше одного миллиона жителей (таблица 4.5).

Таблица 4.5 – Характеристики городов РФ, использованных в расчетах

Город	Численность населения, тыс.чел.	Площадь, кв.км.	Имеется подразделений пожарной охраны, ед.	Средняя скорость следования пожарных автомобилей, км/ч
Москва (только городские районы)	11 969	1076	97	28,7
Новосибирск	1 618	515	17	30,3
Красноярск	1 066	379	13	35,6
Казань	1 205	728	17	31,4
Екатеринбург	1 515	1256	19	22,7

Сведения о численности населения были получены из данных Министерства здравоохранения РФ, размещенных на сайте открытых данных «Инфраструктура научно-исследовательских данных» АНО «ЦПУР» [74]. Площадь города и полигон границ были получены из OpenStreetMap с использованием сервиса Overpass. Средняя скорость следования пожарных автомобилей вычислена на основе данных, содержащихся в базе данных учета пожаров и их последствий (глава 1).

Для каждого города было произведено моделирование требуемого количества подразделений пожарной охраны с использованием GA+GNS для четырех сценариев:

1. Без учета имеющихся подразделений и метрикой $M_{\text{спр}}$.
2. С учетом имеющихся подразделений и метрикой $M_{\text{спр}}$.
3. Без учета имеющихся подразделений и метрикой ИП_{10} .
4. С учетом имеющихся подразделений и метрикой ИП_{10} .

Для всех сценариев целью расчета являлось достижение $\text{ИП}_{10} = 90\%$.

Результаты моделирования приведены в таблице 4.6. Пример визуализации результатов показан на рисунке 4.11.

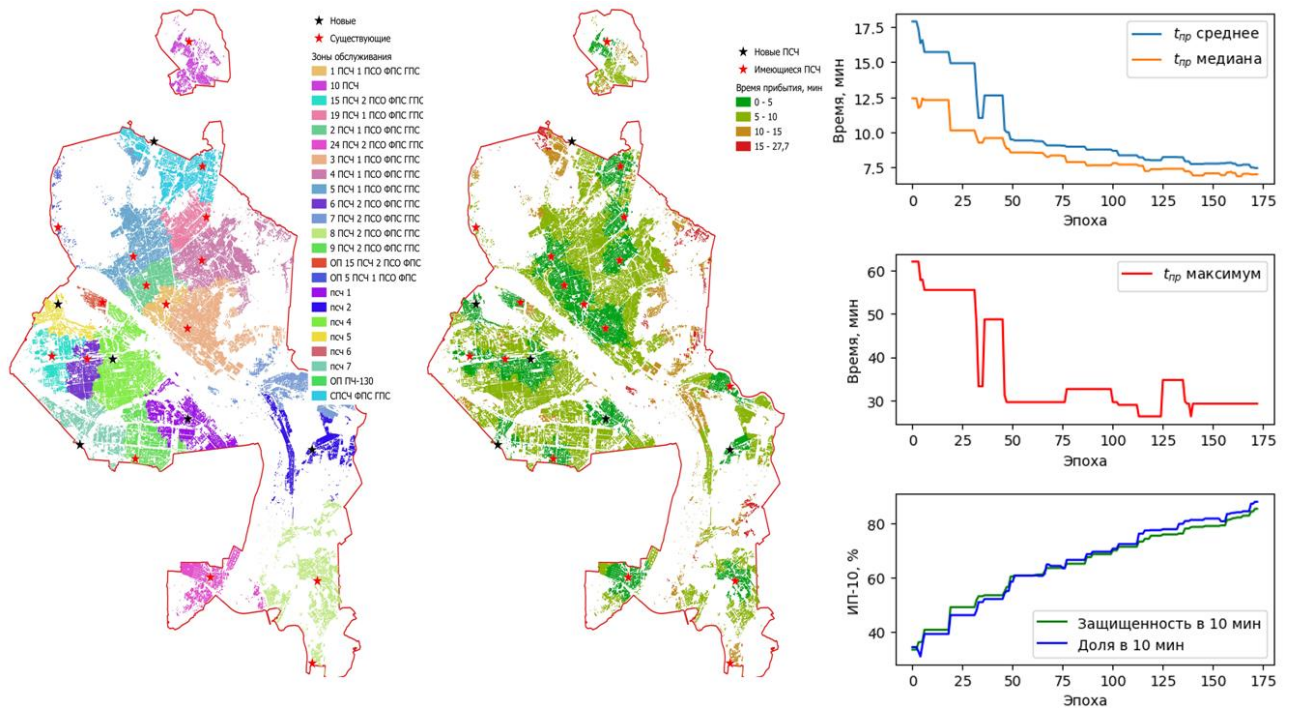


Рисунок 4.11 – Пример визуализации результатов моделирования для города Новосибирска

Таблица 4.6 – Результаты компьютерного моделирования потребности в подразделениях пожарной охраны

Город	Подразделений пожарной охраны	$M_{\text{спр}}$		ИП-10	
		1 Без учета имеющихся	2 С учетом имеющихся	3 Без учета имеющихся	4 С учетом имеющихся
Москва	97	47	99	42	100
Новосибирск	17	15	25	14	23
Красноярск	13	9	15	9	16
Казань	17	17	26	16	25
Екатеринбург	19	29	42	24	37

На рисунке 4.12 показан график изменения метрики ИП-10 по ходу увеличения количества подразделений.

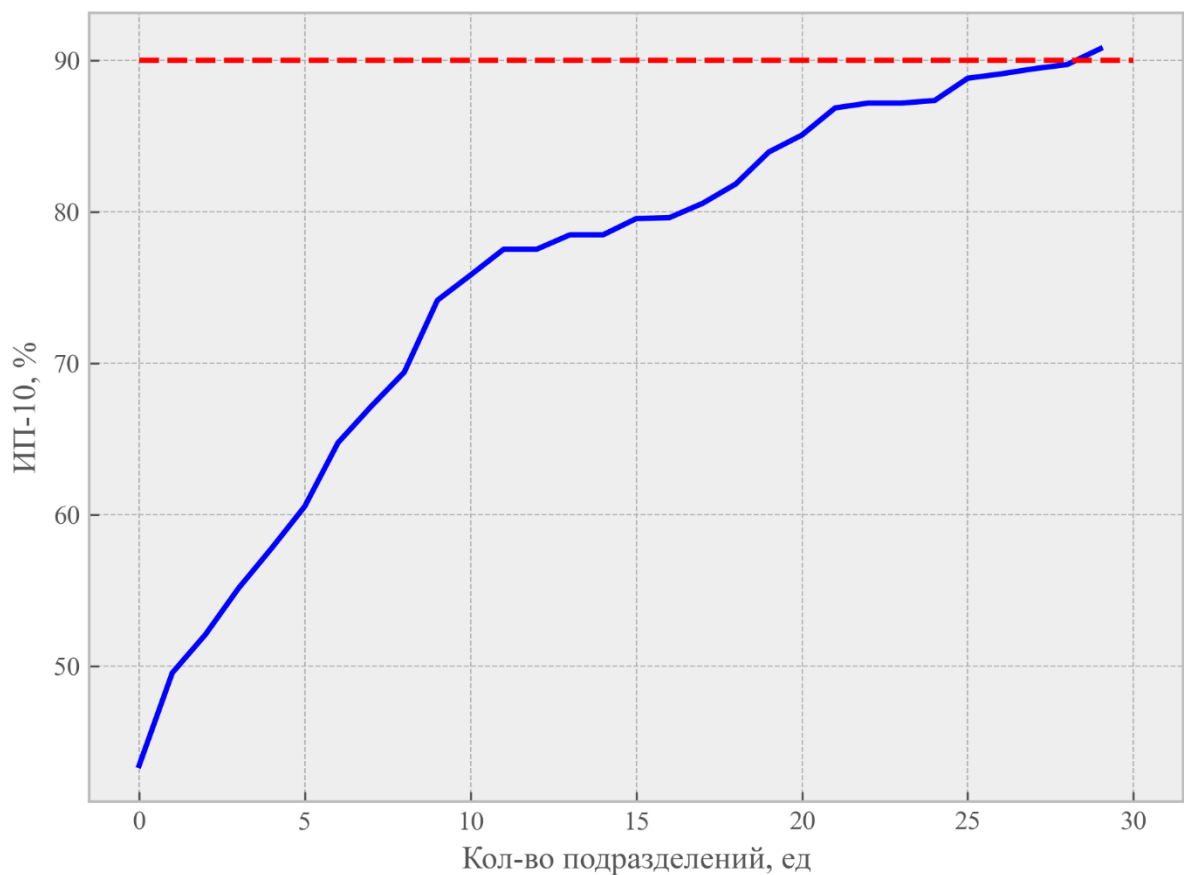


Рисунок 4.12 – Рост метрики ИП-10 по мере увеличения количества подразделений пожарной охраны на примере Екатеринбурга при расчете по сценарию №3

По результатам проведенных вычислений можно заключить:

1. Использование метрики $M_{\text{ср}}$ приводит к увеличению количества подразделений пожарной охраны по сравнению с расчетом ИП-10 на 10%.

2. Чем больше целевое значение ИП-10, тем больше требуется подразделений пожарной охраны для его достижения.

Во всех случаях требуемое количество подразделений пожарной охраны, рассчитанное с учетом имеющихся, превышает количество, рассчитанное без их учета, на 30–50%.

Это явление стало следствием ряда факторов:

1. Как правило, подразделения пожарной охраны создаются не в оптимальных местах.

2. Как было показано выше, определение оптимального места для дислокации подразделений пожарной охраны зависит от их количества.

3. По мере развития городов их параметры изменяются, что приводит к смещению оптимальных мест дислокации подразделений пожарной охраны.

Рассмотрим механизм возникновения такой ситуации. Для примера взят населенный пункт прямоугольной формы, для обеспечения максимальной (приемлемой) степени защиты которого достаточно создать два подразделения пожарной охраны, расположенных так, как это показано на рисунке 4.13а. Однако в случае, если на территории населенного пункта уже имеется подразделение пожарной охраны, расположенное в месте, не совпадающем ни с одним из оптимальных вариантов (рисунок 4.13б), то для обеспечения требуемого уровня защиты все равно потребуются создать два дополнительных подразделения (рисунок 4.13в). Более того, даже в случае, если на территории населенного пункта расположено больше подразделений и все они находятся в неоптимальных местах, все равно может сложиться ситуация, при которой придется создать два дополнительных подразделения (рисунок 4.13г).

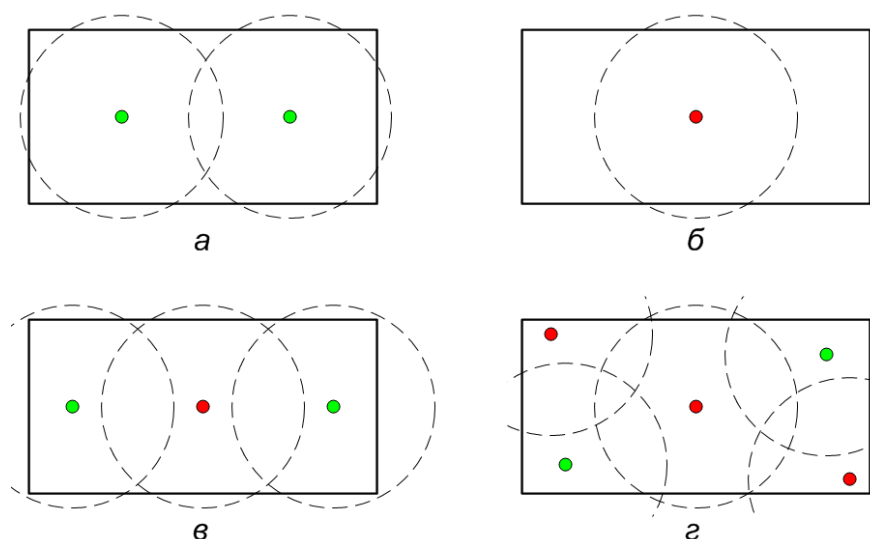


Рисунок 4.13 – Проблема стартовой дислокации подразделений пожарной охраны

С целью оценки адекватности предложенных решений проведен дополнительный расчет для ряда городов и регионов Российской Федерации и сопоставлен с результатами аналогичного расчета полученного с использованием разработанной в ходе работы системы и существующей компьютерной имитационной системы, предназначенной для исследования, экспертизы и проектирования экстренных служб КИС «КОСМАС» (таблицы 4.7 – 4.9).

Таблица 4.7 – Сравнение результатов компьютерного моделирования (г. Санкт-Петербург)

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
Информационно-аналитическая система, разработанная в работе				
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

Таблица 4.8 – Сравнение результатов компьютерного моделирования (Астраханская область)

Условия расчета	ИП-20, %	Требуется создать подразделений	Всего подразделений	Среднее время следования первого подразделения, мин
КИС КОСМАС				
Существующее размещение	64,1	-	124	8,5
Для ИП-20 = 70%	70,5	7	131	7,9
Для ИП-20 = 80%	80,1	19	150	7,2
Для ИП-20 = 90%	90,0	42	192	6,8
ГИС				
Существующее размещение	67,0	-	124	14,9
Для ИП-20 = 70%	70,2	3	127	14,1
Для ИП-20 = 80%	80,2	15	142	11,7
Для ИП-20 = 90%	90,0	31	173	9,4

Таблица 4.9 – Сравнение результатов компьютерного моделирования (г. Волгоград)

Условия расчета	ИП-10, %	Требуется создать подразделений	Всего подразделений	Среднее время следования первого подразделения, мин
КИС КОСМАС				
Существующее размещение	75,2	-	17	10,7
Для ИП-10 = 80%	80,2	3	20	10,5
Для ИП-10 = 90%	90,2	10	30	8,4
ГИС				
Существующее размещение	84,7	-	17	7,6
Для ИП-10 = 80%	84,7	-	17	7,6
Для ИП-10 = 90%	90,0	5	22	7,0

Из таблиц 4.7 – 4.9 видно, что при заданных процентах покрытия число и места дислокации пожарных депо в двух системах почти идентичны, результаты моделирования совпадают на 95-97 %. Незначительные отличия можно объяснить различиями в подходе к установлению скоростей следования пожарных автомобилей по разным классам дорог.

4.4 Выводы по главе 4

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

2. Описаны основные функции информационно-аналитической системы поддержки принятия решений по обоснованию дислокации подразделений пожарной охраны в городской среде с использованием информационно-аналитической системы на основе гибридных эвристических алгоритмов. Описаны форматы и типы пространственных данных, которые могут быть использованы при решении задач определения дислокации подразделений пожарной охраны. Предложен формат данных GeoPackage как наиболее удобный на текущий момент.

3. Предложена модульная архитектура информационно-аналитической системы поддержки принятия решений по обоснованию дислокации подразделений пожарной охраны в городской среде.

4. Проведена апробация предложенных в работе моделей и алгоритмов в формате серии вычислительных экспериментов по определению количества подразделений пожарной охраны для городов Москва, Красноярск, Екатеринбург, Новосибирск и Казань.

5. Результаты компьютерного моделирования показали, что предложенные модель и алгоритмы могут быть успешно использованы для решения задач оптимизации дислокации подразделений пожарной охраны.

6. Показано, что использование метрики $M_{\text{спр}}$ приводит к увеличению требуемого количества подразделений пожарной охраны по сравнению с расчетом ИП-10 на 5–10%.

7. Показано, что, чем ближе текущее значение оптимизируемой метрики к максимально возможному значению, тем больше требуется подразделений пожарной охраны для ее улучшения. Так, для увеличения индекса прикрытия

ИП-10 в городе Екатеринбург до 65% требуется 5 подразделений, при этом для достижения ИП-10 80% требуется вдвое больше – 10 подразделений.

8. Описана проблема стартовой дислокации подразделений пожарной охраны и показано, что она не имеет однозначного решения, так как и создание чрезмерного количества подразделений, и их физический перенос экономически невыгодны. Этот факт является комплексной проблемой, требующей отдельного исследования, выходящего за рамки данной работы.

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 обезьяньего поиска, 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.

Результаты исследования позволили получить новые научно-подтвержденные инструменты поддержки принятия решений по обоснованию дислокации подразделений пожарной охраны в городской среде на основе гибридных эвристических алгоритмов, практическое использование которых позволит повысить эффективность проектирования подразделений пожарной охраны, а также предоставит исследовательскую платформу для дальнейшего совершенствования методов, подходов и алгоритмов.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ABC	– Алгоритм искусственной пчелиной колонии (Artificial Bee Colony)
BLP	– Задача определения наилучшей дислокации единственного подразделения (Best Location Problem)
BNHD	– Поиск по центру диаметра графа (Best Node Half Diameter)
GA	– Генетический алгоритм (Genetic Algorithm)
GNS	– Алгоритм «Генезис»
HC	– Алгоритм скалолаза (Hill Climbing)
KDE	– Оценка ядерной плотности (Kernel Density Estimation)
LSCP	– Задача размещения (Location Set Covering Problem)
MCLP	– Задача максимального покрытия (Maximal Covering Location Problem)
MSA	– Алгоритм обезьяньего поиска (Monkey Search Algorithm)
OSM	– Открытый картографический сервис Open street map
SAA	– Алгоритм имитации отжига (Simulated Annealing Algorithm)
SHC	– Алгоритм пулеметного подъема (Shotgun Hill Climbing)
АСОП ПО	– Автоматизированная Система Организационного Проектирования Пожарной охраны
ГДС	– Граф улично-дорожной сети
ГИС	– Геоинформационная система
ДПК	– Добровольная пожарная команда
ДПО	– Добровольная пожарная охрана
ИП	– Индекс прикрытия
ИП-10	– Индекс прикрытия 10-ти минутной зоны
ИП-20	– Индекс прикрытия 20-ти минутной зоны
ИПФ-10	– Индекс прикрытия 10-ти минутной зоны, полученный исходя из исходных данных

ИПФ-20	– Индекс прикрытия 20-ти минутной зоны, полученный исходя из исходных данных
КИС	– Компьютерная имитационная система
КФПО	– Класс функциональной пожарной опасности
МПО	– Муниципальная пожарная охрана
НЦУКС	– Национальный центр управления в кризисных ситуациях
ПА	– Пожарный автомобиль
ПО	– Пожарная охрана
ППС	– Пожарная служба субъекта РФ
ПСЧ	– пожарно-спасательная часть
ФПС	– Федеральная противопожарная служба

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдурагимов, Г.И. Разработка методики оптимизации границ районов выезда пожарных частей гарнизона: автореф. дис. канд. тех. наук: 05.26.01 / Абдурагимов Георгий Иосифович. – Текст: непосредственный // – Москва, 1995. – 25 с.
2. Алехин, Е.М. О распределении Эрланга и некоторых его приложениях / Е.М. Алехин, Н.Н. Брушлинский, С.В. Соколов – Текст: непосредственный // Пожаровзрывобезопасность. – 2014. – Т. 23, № 6. – С. 11-17.
3. Алехин, Е.М. Проблемно-ориентированные имитационные системы для автоматизированного проектирования и стратегического управления экстренными и аварийно-спасательными службами городов / Е.М. Алехин, Н.Н. Брушлинский, П. Вагнер [и др.] – Текст: непосредственный // Вестник РАЕН. – 2012. – Т. 12, № 3. – С. 27-34.
4. Алехин, Е.М. Решение проблемы оргпроектирования экстренных и аварийно-спасательных служб в городах / Е.М. Алехин, Н.Н. Брушлинский, П. Вагнер [и др.] – Текст: непосредственный // Технологии техносферной безопасности. – 2016. – № 3(67). – С. 192-199.
5. Бабенышев, С.В. Некоторые вопросы статистики пожаров в Российской Федерации / С.В. Бабенышев, Е.Н. Матеров, О.С. Малютин – Текст: непосредственный // Актуальные проблемы обеспечения пожарной безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций: Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции, Красноярск, 21 апреля 2023 года. – Железногорск: СибПСА ГПС МЧС России, 2023. – С. 29-32.
6. Барышев, П.Ф. Методический подход к определению рациональных вариантов дислокации спасательных воинских формирований МЧС России / П.Ф. Барышев – Текст: непосредственный // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. – 2015. – № 2(25). – С. 3-7.

7. Барышев, П.Ф. Постановка общей научной задачи определения рационального варианта дислокации спасательного воинского формирования МЧС России / П.Ф. Барышев – Текст: непосредственный // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. – 2015. – № 3(26). – С. 3-7.

8. Брушлинский Н.Н. Основы теории организации, функционирования и управления экстренными и аварийно-спасательными службами / Н.Н. Брушлинский, С.В. Соколов. – Текст: непосредственный // – М: Академия ГПС МЧС России, 2018. – 92 с.

9. Брушлинский, Н.Н. Безопасность городов. Имитационное моделирование городских процессов и систем / Н.Н. Брушлинский, С.В. Соколов, Е.М. Алехин, П. Вагнер, Ю.И. Коломиец. – Текст: непосредственный // М., 2004. – 172 с.

10. Брушлинский, Н.Н. Математические методы и модели управления в противопожарной службе: учеб. / Н.Н. Брушлинский, С.В. Соколов. – 2-е изд., испр. и доп. – Текст: непосредственный // М.: Академия ГПС МЧС России, 2020. – 200 с.

11. Брушлинский, Н.Н. О некоторых закономерностях и особенностях российской пожарной статистики / Н.Н. Брушлинский, С.В. Соколов, М.П. Григорьева – Текст: непосредственный // Пожаровзрывобезопасность. – 2016. – Т. 25, № 6. – С. 33-38.

12. Брушлинский, Н.Н. О нормировании времени прибытия пожарных подразделений к месту пожара / Н.Н. Брушлинский, С.В. Соколов – Текст: непосредственный // Пожаровзрывобезопасность. – 2011. – Т. 20, № 9. – С. 42-48.

13. Брушлинский, Н.Н. Опыт применения компьютерных имитационных систем моделирования деятельности экстренных служб / Н.Н. Брушлинский, С.В. Соколов, Е.М. Алехин [и др.] – Текст: непосредственный // Пожаровзрывобезопасность. – 2016. – Т. 25, № 8. – С. 6-16.

14. Брушлинский, Н.Н. Организация пожарно-спасательных служб в городах мира / Н.Н. Брушлинский, С.В. Соколов, М.П. Григорьева – Текст: непосредственный // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2017. – № 1. – С. 49-55.

15. Брушлинский, Н.Н. Организация территориальных подразделений добровольной пожарной охраны / Н.Н. Брушлинский, С.В. Соколов, Д.А. Портнов – Текст: непосредственный // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2018. – № 2. – С. 39-44.

16. Брушлинский, Н.Н. Оргпроектирование противопожарной службы России / Н.Н. Брушлинский, С.В. Соколов – Текст: непосредственный // Проблемы управления безопасностью сложных систем: Труды XXI Международной конференции, Москва, 18 декабря 2013 года / Под редакцией Н.И. Архиповой, В.В. Кульбы. – Москва: Российский государственный гуманитарный университет, 2013. – С. 34-36.

17. Брушлинский, Н.Н. Проблема государственной важности (как обосновать численность противопожарной службы России?) / Н.Н. Брушлинский, С.В. Соколов, В.И. Морозов – Текст: непосредственный // Пожаровзрывобезопасность. – 2009. – Т. 18, № 6. – С. 7-12.

18. Буйначев, С.К. Основы программирования на языке Python: учебное пособие / С. К. Буйначев, Н. Ю. Боклаг. – Текст: непосредственный // Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 91 с.

19. Буйневич, М.В. Адаптация алгоритма RESQ под задачи оптимального управления ресурсами организационных систем экстренных служб / М.В. Буйневич, А.В. Вострых – Текст: непосредственный // Вестник Воронежского института МВД России. – 2022. – № 3. – С. 17-26.

20. Буйневич, М.В. Моделирование развития сети пожарных депо на территории мегаполиса / М.В. Буйневич, М.Т. Пелех – Текст: непосредственный // Передовые инновационные разработки. Перспективы и опыт использования, проблемы внедрения в производство: сборник научных статей по итогам второй международной научной конференции, Казань, 30 марта 2019 года. – Казань: ООО «Конверт», 2019. – С. 62-64.

21. Буйневич, М.В. Принципы информационной поддержки системного проектирования развития сети пожарных депо на территории мегаполиса / М.В.

Буйневич, А.В. Максимов, М.Т. Пелех – Текст: непосредственный // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». – 2017. – № 3. – С. 129-135.

22. Буйневич, М.В. Проектирование пожарных депо с применением поисково-информационных картографических сервисов / М.В. Буйневич, М.Т. Пелех – Текст: непосредственный // Передовые инновационные разработки. Перспективы и опыт использования, проблемы внедрения в производство: Сборник научных статей по итогам шестой международной научной конференции, Казань, 31 июля 2019 года. Том Часть 1. – Казань: Общество с ограниченной ответственностью «КОНВЕРТ», 2019. – С. 139-141.

23. Буйневич, М.В. Развитие пожарной охраны мегаполиса с использованием технологии имитационного моделирования / М.В. Буйневич, М.Т. Пелех, Д.Г. Ахунова – Текст: непосредственный // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». – 2019. – № 3. – С. 150-156.

24. Буйневич, М.В. Совершенствование маршрутов следования пожарно-спасательных подразделений к месту вызова / М.В. Буйневич, М.Т. Пелех – Текст: непосредственный // Передовые инновационные разработки. Перспективы и опыт использования, проблемы внедрения в производство: Сборник научных статей по итогам седьмой международной научной конференции, Казань, 31 августа 2019 года. – Казань: Общество с ограниченной ответственностью «КОНВЕРТ», 2019. – С. 86-88.

25. Васильев, А.Н. JavaScript в примерах и задачах / А.Н. Васильев. – Текст: непосредственный // Москва Издательство «Э», 2017. – 720 с.

26. Вилисов, В. Я. Модели, методы и алгоритмы информационно-аналитической поддержки принятия решений по распределению сил и средств при ликвидации пожаров и чрезвычайных ситуаций : специальность 23.40.00 :

диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Вилисов Валерий Яковлевич Текст: непосредственный //, 2022. – 433 с. – EDN GVTUGP.

27. Вирсански. Генетические алгоритмы на Python / пер. с англ. А.А. Слинкина. – Текст: непосредственный // М: ДМК Пресс, 2020. – 286 с.

28. Власов, В.К. Недостатки существующих методов оценки показателей оперативной деятельности пожарно-спасательных подразделений / В.К. Власов, А.Н. Денисов – Текст: непосредственный // Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2016. – С. 86-88.

29. Власов, К.С. Оценка распределения выездов пожарно-спасательных подразделений на пожары различных объектов / К.С. Власов, А.А. Порошин – Текст: непосредственный // Актуальные проблемы обеспечения пожарной безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций: Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции, Железногорск, 23 апреля 2021 года. – Железногорск: СибПСА ГПС МЧС России, 2021. – С. 574-581.

30. Гимпилевич, Ю.Б. Эвристическая оптимизация размещения антенн RFID-системы при реализации комбинированного метода пространственной двумерной локализации / Ю.Б. Гимпилевич, Д.А. Савочкин – Текст: непосредственный // Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. – 2015. – № 4(90). – С. 61-67.

31. Гладков, Л.А. Интеллектуальные системы: модели и методы метаэвристической оптимизации: Монография / Л.А. Гладков, Ю.А. Кравченко, В.В. Курейчик, С.И. Родзин. – Текст: непосредственный // Чебоксары: ООО Издательский дом «Среда», 2024. – 228 с.

32. Данильченко, В.И. Метаэвристика на основе поведения колонии белых кротов / В. И. Данильченко, Е. В. Данильченко, В. М. Курейчик – Текст: непосредственный // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2021. – № 6(223). – С. 132-140.

33. Данильченко, В.И. Метаэвристический метод оптимизации на основе модели поведения стволовых клеток / В. И. Данильченко, Е. В. Данильченко, В. М.

Курейчик – Текст: непосредственный // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2022. – № 2(226). – С. 14-20.

34. Денисов, А.Н. Моделирование сосредоточения и введения сил и средств для планирования боевых действий пожарных подразделений при пожарах в резервуарных парках: дис. ... канд. тех. наук: 05.13.10 / Денисов Алексей Николаевич. – Текст: непосредственный // Москва, 2001. – 193 с.

35. Зайченко, Ю. С. Модель и алгоритмы поддержки управления распределением пожарных автомобилей в территориальные пожарно-спасательные гарнизоны : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Зайченко Юлия - Текст: непосредственный // Сергеевна, 2022. – 150 с. – EDN OEFVEL.

36. Захаров, Д.В. Обоснование необходимого количества пожарно-спасательных подразделений и мест их дислокации / Д.В. Захаров, С.А. Нека, Е.И. Добрякова – Текст: непосредственный // Научный вестник НИИГД Респиратор. – 2022. – № 1(59). – С. 44-52.

37. Иванов, С.А. Концепция построения цифрового двойника города / С.А. Иванов, К.Ю. Никольская, Г.И. Радченко, Л.Б. Соколинский, М.Л. Цымблер – Текст: непосредственный // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика. – 2020. – Т. 9, № 4. – С. 5–23.

38. Илявин, М.В. К проблеме определения оптимальных значений количества сил и средств пожарно-спасательного гарнизона / М.В. Илявин, А.Н. Денисов – Текст: непосредственный // Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации: Материалы VII Международной научно-практической конференции. В 2-х частях, Москва, 24 ноября 2020 года. Том Часть 2. – Москва: Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, 2020. – С. 36-40.

39. Карпенко, А.П. Типовые структуры популяционных алгоритмов глобальной оптимизации / А.П. Карпенко – Текст: непосредственный //

Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2022. – № 1(25). – С. 48-57.

40. Козлова, А.П. Проверка смежности вершин многогранника задачи коммивояжёра / А.П. Козлова, А.В. Николаев – Текст: непосредственный // Заметки по информатике и математике: Сборник научных статей. Том Выпуск 10. – Ярославль: Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова, 2018. – С. 51-58.

41. Костямин, Д.И. Базовые показатели для определения мест дислокации пожарно-спасательных частей / Д.И. Костямин, Е.И. Добрякова – Текст: непосредственный // Научный вестник НИИГД Респиратор. – 2019. – № 1(56). – С. 17-24.

42. Курейчик, В.В. Вычислительные модели биоэвристик, основанных на физических и когнитивных процессах (обзор) / В.В. Курейчик, С.И. Родзин – Текст: непосредственный // Информационные технологии. – 2021. – Т. 27, № 11. – С. 563-574.

43. Курейчик, В.В. Вычислительные модели эволюционных и роевых биоэвристик (обзор) / В.В. Курейчик, С.И. Родзин – Текст: непосредственный // Информационные технологии. – 2021. – Т. 27, № 10. – С. 507-520.

44. Курейчик, В.М. Модифицированные генетические операторы / В.М. Курейчик – Текст: непосредственный // Перспективные информационные технологии и интеллектуальные системы. – 2006. – № 1. – С. 4-13.

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

46. Малютин, О.С. Анализ суточного изменения скоростей движения пожарных автомобилей для определения мест оптимального размещения подразделений ГПС / О.С. Малютин, Р.Ш. Хабибулин – Текст: непосредственный

// 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. – С. 52-60.

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

48. 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 – Текст: непосредственный // Пожаровзрывобезопасность. – 2023 – 32(5) – С. 60-77. – Режим доступа: <https://doi.org/10.22227/0869-7493.2023.32.05.60-77>.

49. Мартинович, Н.В. Методика определения потребности пожарно-спасательных подразделений в пожарной технике, оборудовании и пожарно-техническом вооружении / Н.В. Мартинович, И.Н. Татаркин, А.В. Антонов, А.А. Мельник – Текст: непосредственный // Интернет-журнал Науковедение. – 2015. – Т. 7, № 6(31). – С. 120.

50. Мастицкий С.Э., Шитиков В.К. (2014) Статистический анализ и визуализация данных с помощью R. / С.Э. Мастицкий, В.К. Шитиков – Текст: электронный // Режим доступа: <http://r-analytics.blogspot.com>.

51. Матушкин, А.С. Картографирование и анализ пространственных данных с использованием геоинформационной системы QGIS : учебное пособие / А.С. Матушкин. – Текст: непосредственный // Киров: ВятГУ, 2018. – 100 с.

52. Матюшев, П.А. Исследование влияния факторов на количество чрезвычайных ситуаций и происшествий на территории Республики Татарстан / П.А. Матюшев, М.А. Кузнецова – Текст: непосредственный // XXV Туполевские чтения (школа молодых ученых): Международная молодежная научная

конференция, посвященная 60-летию со дня осуществления Первого полета человека в космическое пространство и 90-летию Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева-КАИ, Казань, 10–11 ноября 2021 года. Том IV. – Казань: Изд-во ИП Сагиева А.Р., 2021. – С. 8-16.

53. Матюшев, П.А. Исследование вопроса оптимального размещения аварийно-спасательных формирований на территории субъекта Российской Федерации с учетом его географических, природных, социально-экономических характеристик / П. А. Матюшев, В. М. Афанасьев – Текст: непосредственный // Вестник НЦБЖД. – 2018. – №4(38). – С. 98-102.

54. Матюшев, П.А. Обоснование рационального количества аварийно-спасательных формирований и мест их дислокации на территории субъекта Российской Федерации: дис. канд. тех. наук.: специальность 2.3.6: Безопасность в чрезвычайных ситуациях/ П.А. Матюшев – Текст: непосредственный // – Казань, 2024. – 267 с.

55. Матюшев, П.А. Общая постановка задачи определения мест дислокации аварийно-спасательных формирований / П.А. Матюшев, М.А. Кузнецова, С.Н. Зарипова – Текст: непосредственный // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. – 2021. – № 3(50). – С. 68-76.

56. Матюшин А.В., Модель обоснования мест дислокации оперативных подразделений пожарной охраны на территории населенного пункта / А.В. Матюшин – Текст: непосредственный // Материалы XX международной науч.-практ. конф. Секция 3. – М: ВНИИПО, 2007. – С. 66–71.

57. Матюшин, А.В. Анализ оперативно-тактических возможностей гарнизона пожарной охраны Г. Ханоя (Республика Вьетнам) / А.В. Матюшин, Ю.А. Матюшин, К.Т. Нго – Текст: непосредственный // Пожарная безопасность. – 2016. – № 1. – С. 89-96.

58. Матюшин, А.В. Зарубежный опыт обоснования мест дислокации оперативных подразделений пожарной охраны / А.В. Матюшин, А.А. Порошин,

Ю.А. Матюшин – Текст: непосредственный // Пожарная безопасность. – 2005. – № 2. – С. 74-82.

59. Матюшин, А.В. Методологические основы определения необходимого числа оперативных подразделений пожарной охраны для защиты городских и сельских поселений от пожаров (новый взгляд на старую проблему) / А.В. Матюшин, А.А. Порошин, Ю.А. Матюшин – Текст: непосредственный // Пожарная безопасность. – 2005. – №3. – С. 45-52.

60. Матюшин, А.В. Определение максимально допустимого расстояния между пожарным депо и объектом предполагаемого пожара при стохастической постановке задачи / А.В. Матюшин, А.А. Порошин, А.А. Кондашов, Ю.А. Матюшин – Текст: непосредственный // Пожарная безопасность. – 2007. – № 2. – С. 103-121.

61. Матюшин, А.В. Определение областей нормативного обслуживания территории населенного пункта (района) оперативными подразделениями пожарной охраны / А.В. Матюшин, А.А. Порошин, Е.В. Бобринев [и др.] – Текст: непосредственный // Пожарная безопасность. – 2010. – № 4. – С. 104-110.

62. Матюшин, А.В. Определение скорости следования дежурного караула пожарной охраны на место пожара в г. Ханое Республики Вьетнам / А.В. Матюшин, К. Т. Нго – Текст: непосредственный // Пожарная безопасность. – 2015. – № 2. – С. 44-48.

63. Матюшин, А.В. Отечественный опыт нормирования ресурсов оперативных подразделений пожарной охраны и мест их дислокации в населенных пунктах / А.В. Матюшин, А.А. Порошин, Ю.А. Матюшин – Текст: непосредственный // Пожарная безопасность. – 2005. – № 3. – С. 75-80.

64. Матюшин, А.В. Проектирование размещения подразделений пожарной охраны в населенных пунктах с использованием геоинформационных технологий / А.В. Матюшин, А.А. Порошин, Ю.А. Матюшин [и др.] – Текст: непосредственный // Bezpieczenstwo i Technika Pozarnicza. – 2013. – Т. 31, № 3. – С. 81-86.

65. Матюшин, А.В. Проектирование размещения подразделений пожарной охраны в населенных пунктах с использованием геоинформационных технологий / А.В. Матюшин, А.А. Порошин, Ю.А. Матюшин [и др.] – Текст: непосредственный // *Bezpieczenstwo i Technika Pozarnicza*. – 2013. – Т. 31, № 3. – С. 81-86.

66. Матюшин, А.В. Современные геоинформационные технологии в проектировании гарнизонов пожарной охраны / А.В. Матюшин, А.А. Порошин, Е.В. Бобринев [и др.] – Текст: непосредственный // *Пожарная безопасность*. – 2012. – № 3. – С. 107-119.

67. Матюшин, Ю. А. Методические основы проектирования гарнизонов пожарной охраны городских и сельских поселений, автореф. дисс. ... канд. тех. наук / Юрий Александрович Матюшин. – Текст: непосредственный – М., 2009. – 24 с.

68. Маштаков, В.А. Сравнение показателей оперативного реагирования подразделений пожарной охраны территорий, находящихся в различных климатических условиях / В.А. Маштаков, Е.В. Бобринев, Е.Ю. Удавцова, А.А. Кондашов – Текст: непосредственный // *Актуальные вопросы пожарной безопасности*. – 2021. – № 4(10). – С. 6-10.

69. Маштаков, В.А. Сравнительный анализ показателей оперативного реагирования подразделений пожарной охраны в разных климатических условиях // В.А. Маштаков, Е.В. Бобринев, Е.Ю. Удавцова и др. – Текст: непосредственный // *Актуальные проблемы безопасности в техносфере*. – 2023. № 1 (9). – С. 30-35.

70. Мельник, А.А. Расчётное определение области нормативного обслуживания пожарных частей на территории города Красноярска / А.А. Мельник, А.В. Антонов, Н.В. Мартинович, О.С. Малютин – Текст: непосредственный // *Сибирский пожарно-спасательный вестник*. – 2019. – № 3(14). – С. 61-66.

71. Меркулов, А. П. Определение частоты возникновения пожара в зданиях различных классов функциональной пожарной опасности в зависимости от площади здания / А. П. Меркулов, Д. Ф. Кожевин Текст: непосредственный //

Научно-аналитический журнал "Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России". – 2022. – № 3. – С. 34-41. – EDN COUIQH.

72. Мироненко, Р.В. Использование машинного обучения в вопросе прогнозирования времени прибытия пожарно-спасательных подразделений / Р.В. Мироненко, М.В. Сибиряков, А.И. Соковнин – Текст: непосредственный // Современные проблемы гражданской защиты. – 2023. – № 4(49). – С. 76-83.

73. Митягин, С.А. Цифровая модель города: принципы и подходы к реализации / С.А. Митягин, С.Л. Соболевский, А.И. Дрожжин [и др.] – Текст: непосредственный // International Journal of Open Information Technologies. – 2019. – Т. 7, № 12. – С. 94-103.

74. Населенные пункты России: численность населения и географические координаты. – Текст: электронный // URL: <http://data.rcsi.science/data-catalog/datasets/160/>.

75. Нго, К. Т. Модель и алгоритмы системы поддержки управления ресурсами оперативных подразделений пожарной охраны крупных городов Вьетнама : специальность 05.13.10 "Управление в социальных и экономических системах" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Нго Куанг Тоан. – Текст: непосредственный – Москва, 2016. – 22 с.

76. Перегутова, Т.А. Основные компоненты цифровой модели городской территории / Т.А. Перегутова – Текст: непосредственный // Труды Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин). – 2023. – Т. 26, № 3(89). – С. 78-88.

77. Пожары и пожарная безопасность в 2021 году: статист. сб. / – Текст: непосредственный // Балашиха: ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2022. – 114 с.

78. Поляков, И.В. Алгоритмы поиска путей на графах большого размера / И.В. Поляков, А.А. Чеповский, А.М. Чеповский // Фундаментальная и прикладная математика. – 2014. – Т. 19, № 1. – С. 165-172.

"79. Порошин А. А., Власов К. С. ""Цифровизация"" оперативно-тактической деятельности / А.А. Порошин, К.С. Власов - Текст: непосредственный

// Актуальные проблемы пожарной безопасности: материалы XXXI Международной научнопрактической конференции. М.: ВНИИПО МЧС России, 2019. С. 638-641."

80. Порошин, А. А. Учет скорости следования дежурного караула к месту вызова при обосновании числа и мест размещения пожарных депо в городской и сельской местности / А. А. Порошин, Е. Ю. Удавцова - Текст: непосредственный

// Актуальные проблемы пожарной безопасности : материалы XXXV Международной научно-практической конференции, Москва, 31 мая 2023 года. – Москва: Всероссийский ордена "Знак Почета" научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, 2023. – С. 83-90. – EDN IQLJPC.

81. Порошин, А.А Вопросы нормирования ресурсной потребности пожарной охраны / А.А. Порошин, В.В. Харин, Е.В. Бобринев [и др.] – Текст: непосредственный // Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования. – 2020. – №1(5). – С. 507-512.

82. Порошин, А.А. Вопросы расчета ресурсной потребности пожарной охраны поселений и городских округов / А.А. Порошин, В.В. Харин, Е.В. Бобринев [и др.] – Текст: непосредственный // Пожарная безопасность. – 2018. – № 4. – С. 93-96.

83. Порошин, А.А. Метод определения количества территориальных подразделений пожарной охраны на основе базового радиуса обслуживания пожарной части / А. А. Порошин, Е. В. Бобринев, Е. Ю. Удавцова, А. А. Кондашов - Текст: непосредственный // Актуальные проблемы пожарной безопасности : Материалы XXXVI Международной научно-практической конференции, посвященной 375-й годовщине образования пожарной охраны России, Москва, 31

мая 2024 года. – Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС РФ, 2024. – С. 15-21. – EDN PZHJBA.

84. Порошин, А.А. Методология проектирования гарнизонов пожарной охраны: автореф. дисс. ... докт. тех. наук / Александр Алексеевич Порошин. – Текст: непосредственный – М., 2009. – 26 с.

85. Порошин, А.А. Определение мест дислокации подразделений пожарной охраны для защиты от пожаров социально значимых объектов / А.А. Порошин – Текст: непосредственный // Технологии техносферной безопасности. – 2022. – № 4(98). – С. 68-78.

86. Порошин, А.А. Определение мест дислокации пожарных частей для защиты от пожаров зданий классов функциональной пожарной опасности Ф1.1, Ф1.2, Ф4.1, Ф4.2 / А.А. Порошин – Текст: непосредственный // Актуальные проблемы пожарной безопасности: материалы Международной XXXIV научно-практической конференции, посвященной 85-летию образования ФГБУ ВНИИПО МЧС России, Балашиха, 23–24 августа 2022 года. – Москва: ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2022. – С. 20-25.

87. Порошин, А.А. Разработка методики обоснования ресурсов пожарной охраны в сельских поселениях Российской Федерации в зависимости от уровня пожарной опасности / А.А. Порошин, В.В. Харин, А.А. Кондашов [и др.] – Текст: непосредственный // Пожарная безопасность. – 2018. – № 4. – С. 32-38.

88. Порошин, А.А. Разработка методики оценки ресурсной потребности пожарно-спасательных подразделений моногородов Российской Федерации / А.А. Порошин, В.В. Харин, Е.В. Бобринев [и др.] – Текст: непосредственный // Актуальные проблемы пожарной безопасности: материалы XXVIII международной научно-практической конференции: в 2 частях, Ногинск, 19–20 мая 2016 года. Том Часть 1. – Ногинск: ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2016. – С. 44-57.

89. Порошин, А.А., Определение дислокации территориальных подразделений пожарной охраны на основе нормативных значений времени

прибытия / А. А. Порошин, Е. В. Бобринев, Е. Ю. Удавцова [и др.] – Текст: непосредственный // Ройтмановские чтения : Сборник материалов XII научно-практической конференции, Москва, 03 апреля 2024 года. – Москва: Академия государственной противопожарной службы, 2024. – С. 104-108.

90. Прайс, М. Дж. C# 7 и NET Core: кросс-платформенная разработка для профессионалов / Марк Дж. Прайс; [пер. с англ. М. Сагалович, С. Черников]. – СПб, 2018. – 636 с.

91. Пранов, Б.М. Математическое моделирование оптимального размещения ресурсов в системах безопасности / Б.М. Пранов – Текст: непосредственный // Технологии техносферной безопасности. – 2010. – № 3(31). – С. 17.

92. Простакова, А.А. Сравнительный анализ использования Plant UML и графических редакторов для создания диаграмм UML при проектировании программных продуктов / А.А. Простакова, Д.С. Трифанов – Текст: непосредственный // XXXVI Международные Плехановские чтения: Сборник статей участников конференции. Москва, 25–27 апреля 2023 года. – М.: Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, 2023. – С. 226-231.

93. Свидетельство Роспатента о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016610485 от 18.11.2015 Автоматизированная система организационного проектирования деятельности и ресурсной оснащенности оперативных подразделений пожарной охраны / Ю.А. Матюшин, А.В. Матюшин, А.А. Порошин, А.А. Кондашов. – Текст: непосредственный // № 2015661164: заявл. 18.11.2015: опубл. 13.01.2016.

94. Сибиряков, М. В. Информационно-аналитическая поддержка управления оперативными пожарно-спасательными подразделениями : специальность 05.13.10 "Управление в социальных и экономических системах" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Сибиряков Максим Владимирович, – Текст: непосредственный - 2018. – 141 с.

95. Сибиряков, М.В. Анализ геоинформационных данных о следовании пожарно-спасательных подразделений к местам экстренных вызовов / М.В.

Сибиряков – Текст: непосредственный // Технологии техносферной безопасности. – 2016. – № 6(70). – С. 214-221.

96. Соколов, С.В. Анализ и оценка времени прибытия пожарных подразделений к местам вызовов в Санкт-Петербурге в 2006-2015 гг. / С.В. Соколов, Е.А. Судаков – Текст: непосредственный // Технологии техносферной безопасности. – 2016. – №2(66). – С. 86-93.

97. Соколов, С.В. Имитационная модель процесса функционирования территориальных добровольных пожарных команд для оценки параметров оперативного реагирования / С.В. Соколов, Д.А. Портнов, С.Ю. Попков – Текст: непосредственный // Технологии техносферной безопасности. – 2018. – № 6(82). – С. 22-31.

98. Соколов, С.В. Определение преимущества движения пожарно-спасательных подразделений в транспортном потоке / С.В. Соколов, М.В. Сибиряков – Текст: непосредственный // Технологии техносферной безопасности. – 2017. – № 1(71). – С. 244-254.

99. Соколов, С.В. Разработка и адаптация имитационной системы оперативной деятельности пожарных подразделений к условиям Вьетнама / С.В. Соколов, Н.Н. Брушлинский, К.Х. Фам – Текст: непосредственный // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2021. – № 2. – С. 5-14.

100. Сурина, Г.П. Архитектура прикладного программного обеспечения в области пожарной безопасности / Г. П. Сурина, Е. А. Мешалкин, А. А. Порошин, Л. В. Васильева // Технологии техносферной безопасности. – 2024. – № 4(106). – С. 127-140. – DOI 10.25257/TTS.2024.4.106.127-140. – EDN AXKQSZ.

101. Таранцев, А.А. О проблеме размещения вновь создаваемых пожарных частей на территориях регионов / А.А. Таранцев – Текст: непосредственный // Пожаровзрывобезопасность. – 2013. – Т. 22, № 5. – С. 52-57.

102. Туан, Д.А. Модели управления ресурсами противопожарной службы Вьетнама на основе типологизации территорий по пожарным рискам: автореф. дис.

канд. тех. наук: 05.13.10 / Дао Ань Туан. – Текст: непосредственный // – Москва, 2018. – 23 с.

103. Харин, В.В. Оперативное реагирование подразделений пожарной охраны в различное время суток / В.В. Харин, А.А. Кондашов, Т.А. Шавырина – Текст: непосредственный // Пожарная и аварийная безопасность: сборник материалов XVI Международной научно-практической конференции, посвященной проведению в Российской Федерации Года науки и технологий в 2021 году и 55-летию учебного заведения, Иваново, 10–11 ноября 2021 года. – Иваново: ИПСА ГПС МЧС России, 2021. – С. 412-418.

104. Харин, В.В. Показатели оперативного реагирования подразделений пожарной охраны в Московской области / В.В. Харин, Е.В. Бобринев, А.А. Кондашов, Е.Ю. Удавцова – Текст: непосредственный // Современные проблемы гражданской защиты. – 2021. – № 4(41). – С. 40-47.

105. Харин, В.В. Технологии математического моделирования для определения оптимальных мест дислокации специализированных пожарно-спасательных частей / В.В. Харин, А.А. Кондашов, Е.В. Бобринев [и др.] – Текст: непосредственный // Мониторинг, моделирование и прогнозирование опасных природных явлений и чрезвычайных ситуаций: Сборник материалов Международной научно-практической конференции, Красноярск, 21 октября 2022 года. – Красноярск: СибПСА ГПС МЧС России, 2022. – С. 12-18.

106. Харин, В.Н. Анализ скорости следования пожарных автомобилей к месту вызова в Московской области / В.В. Харин, Т.А. Шавырина, Е.В. Бобринев [и др.] – Текст: непосредственный // Сибирский пожарно-спасательный вестник. – 2021. – № 3(22). – С. 121-127.

107. Хынг, Ф.К., Информационно-аналитическая поддержка управления пожарными подразделениями Вьетнама на основе технологий имитационного моделирования: автореф. дис. канд. тех. наук.: специальность 2.3.4 Управление в организационных системах / Фам Куок Хынг – Текст: непосредственный // – Москва, 2022. – 24 с.

108. Шитиков В.К., Мастицкий С.Э. (2017) Классификация, регрессия и другие алгоритмы Data Mining с использованием R. / – Текст: электронный / 351 с. – URL: <https://github.com/ranalytics/data-mining>.
109. Aktaş E. et al. Optimizing Fire Station Locations for the Istanbul Metropolitan Municipality // *Interfaces*. – 2013. – Vol. 43, № 3. – P. 240–255.
110. Alexandris G., Giannikos I. A new model for maximal coverage exploiting GIS capabilities // *European Journal of Operational Research*. – 2010. – Vol. 202, № 2. – P. 328–338.
111. Anaconda | The World’s Most Popular Data Science Platform [электронный ресурс] URL - <https://www.anaconda.com/>(дата обращения 22.03.2022).
112. Aric A. Hagberg, Daniel A. Schult and Pieter J. Swart, “Exploring network structure, dynamics, and function using NetworkX”, in *Proceedings of the 7th Python in Science Conference (SciPy2008)*, Gäel Varoquaux, Travis Vaught, and Jarrod Millman (Eds), (Pasadena, CA USA), pp. 11–15, Aug 2008.
113. Atsuyuki Okabe, Kokichi, Sugihara. *Spatial analysis along networks: statistical and computational methods*. Tokyo, 2012. – 300 p.
114. Badri M.A., Mortagy A.K., Alsayed C.A. A multi-objective model for locating fire stations // *European Journal of Operational Research*. – 1998. – Vol. 110, № 2. – P. 243–260.
115. Benza M. et al. Fertility and urban context: A case study from Ghana, West Africa, using remotely sensed imagery and GIS // *Population Space and Place*. – 2017. – Vol. 23, № 8. – P. 2062.
116. Blum, Christian & Roli, Andrea. // *Metaheuristics in Combinatorial Optimization: Overview and Conceptual Comparison*. ACM Comput. Surv.. 35. - 2001. - pp. 268-308 - doi: 10.1145/937503.937505.
117. Boeing G. OSMnx: New methods for acquiring, constructing, analyzing, and visualizing complex street networks // *Computers, Environment and Urban Systems*. – 2017. – Vol. 65. – P. 126–139.

118. Boeing G., Ha J. Resilient by design: Simulating street network disruptions across every urban area in the world // *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. – 2024. – Vol. 182. – P. 104–116.
119. Bolouri S. et al. The Ordered Capacitated Multi-Objective Location-Allocation Problem for Fire Stations Using Spatial Optimization // *IJGI*. – 2018. – Vol. 7, № 2. – P. 44.
120. Chen C.-Y., Yang Q.-H. Hotspot Analysis of the Spatial and Temporal Distribution of Fires: // *Proceedings of the 4th International Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management*. Funchal, Madeira, Portugal: SCITEPRESS – Science and Technology Publications, 2018. – P. 15–21.
121. Chevalier P. et al. Locating fire stations: An integrated approach for Belgium // *Socio-Economic Planning Sciences*. – 2012. – Vol. 46, № 2. – P. 173–182.
122. Chris Garrard. *Geoprocessing with Python* / Shelter Island, NY: Manning Publication Co., 2016.
123. Church R, Revelle C. The maximal covering location problem // *Papers in Regional Science*. – 1974. – Vol. 32, № 1.– P. 101.
124. Daskin, Mark. S. *Network and Discrete Location: Models, Algorithms, and Applications* / Mark S. Daskin. // Wiley. - 1995 - pp 498
125. DeVore R.A., Temlyakov V.N. Some remarks on greedy algorithms // *Adv Comput Math*. – 1996. – Vol. 5, № 1. – P. 173–187.
126. Dietterich T. G. *Ensemble Methods in Machine Learning* Springer, Berlin, Heidelberg, 2000. pp. 1–15.
127. Dong X. et al. Study on Urban Fire Station Planning based on Fire Risk Assessment and GIS Technology // *Procedia Engineering*. – 2018. – Vol. 211. – P. 124–130.
128. Erden T., Coşkun M.Z. Multi-criteria site selection for fire services: the interaction with analytic hierarchy process and geographic information systems // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*. – 2010. – Vol. 10, № 10. – P. 2127–2134.

129. Fan T. et al. Density peaks clustering algorithm based on kernel density estimation and minimum spanning tree // *IJICA*. 2022. Vol. 13, № 5/6. P. 336.
130. Galvão R.D., Morabito R. Emergency service systems: The use of the hypercube queueing model in the solution of probabilistic location problems // *International Transactions in Operational Research*. – 2008. – Vol. 15, № 5. – P. 525–549.
131. GeoPandas 0.12.1 - documentation [электронный ресурс] URL – <https://geopandas.org/en/stable/> (дата обращения 13.05.2024).
132. GIS for Fire Station Locations and Response Protocol. An ESRI®, – 2007.
133. Han B. et al. Site Selection of Fire Stations in Large Cities Based on Actual Spatiotemporal Demands: A Case Study of Nanjing City // *IJGI*. – 2021. – Vol. 10, № 8. – P. 542.
134. Hulida, E.M., Pasnak, I.V., Vasilyeva, E.E. Methodology for Reducing the Duration of the Free Development of Fire // *Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza*. – 2017. – № 48. – P. 80–87.
135. Jiang Y. et al. A GIS-Based Multi-Criterion Decision-Making Method to Select City Fire Brigade: A Case Study of Wuhan, China // *IJGI*. 2021. – Vol. 10, № 11. – P. 777.
136. Karaboga D., Basturk B. On the performance of artificial bee colony (ABC) algorithm // *Applied Soft Computing*. – 2008. – Vol. 8, № 1. – P. 687–697.
137. Кс К., Corcoran J. Modelling residential fire incident response times: A spatial analytic approach // *Applied Geography*. – 2017. – Vol. 84. – P. 64–74.
138. Kulpanovski D. Fire Station Site Selection. New York, NY: ESRI, – 2019.
139. Liu N., Huang B., Chandramouli M. Optimal Siting of Fire Stations Using GIS and ANT Algorithm // *J. Comput. Civ. Eng.* – 2006. – Vol. 20, № 5. – P. 361–369.
140. Macit I. Solving fire department station location problem using modified binary genetic algorithm // *European Scientific Journal*. – 2015. – Vol. 11.
141. Matplotlib: Visualization with Python [электронный ресурс] URL – <https://matplotlib.org/> (дата обращения 12.02.2024).

142. Murray A.T. Optimising the spatial location of urban fire stations // *Fire Safety Journal*. – 2013. – Vol. 62. – P. 64–71.
143. Newton R. et al. A Decision Support System for Including Equity in the Siting of Emergency Services: preprint. In Review, –2023.
144. Nyimbili P., Erden T. A combined model of GIS and fuzzy logic evaluation for locating emergency facilities: a case study of Istanbul. – 2020.
145. Nyimbili P.H., Erden T. Comparative evaluation of GIS-based best–worst method (BWM) for emergency facility planning: perspectives from two decision-maker groups // *Nat Hazards*. – 2021. – Vol. 105, № 1. – P. 1031–1067.
146. Pandas – Python Data Visualization Library [электронный ресурс] URL - <https://pandas.pydata.org/> (дата обращения 16.04.2024).
147. Pasnak I., Renkas A. Optimization of the duration of emergency vehicle movement to the place of fire // *Transport Problems*. – 2020. – Vol. 15, № 4, – Part 1. P. 117–124.
148. Popelínský J., Vachuda J., Veselý O. Geographical modelling based on spatial differentiation of fire brigade actions: A case study of Brno, Czech Republic // *Bulletin of Geography. Socio-economic Series*. – 2017. – Vol. 35, № 35. – P. 81–92.
149. Project Jupiter | Home [электронный ресурс] URL – <https://jupyter.org/>(дата обращения 22.03.2022).
150. Quarto [электронный ресурс] URL – <https://quarto.org/> (дата обращения 18.09.2023).
151. Renkas A., Popovych V., Rudenko D. Optimization of Fire Station Locations to Increase the Efficiency of Firefighting in Natural Ecosystems // *EREM*. – 2022. – Vol. 78, № 1. – P. 97–104.
152. S. Kirkpatrick, C.D. Gelatt, M.P. Vecclii. Optimization by Simulated Annealing // *Science, New Series*. – 1983. – Vol. 220, № 4598. – P. 671–680.
153. Schilling D.A. et al. Some models for fire protection locational decisions // *European Journal of Operational Research*. – 1980. – Vol. 5, № 1. – P. 1–7.

154. Shok M.E. Optimal spatial distribution of fire stations using geographic information systems Baghdad case study // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2020. – Vol. 737, № 1. – P. 012225.
155. Siddartha Amatya, Nagendra Raj Sitaula, Akhilesh Kumar Karna. Optimization of Firefighting capacity using Network Analysis: Case Study of Kathmandu Valley. – Nepal, 2022. – P. 141–147.
156. Stuart J. Russell, Peter Norvig. Iterative improvement algorithms // Artificial Intelligence: A Modern Approach. NJ: PrenticeHall, 1995. – P. 111–114.
157. The Ohio Fire Chiefs' Association. Fire Station Needs Assessment and Location Analysis for the BST&G Joint Fire District: Consulting Services. – 2022. – P. 79.
158. Uniwersytet Łódzki, Wiśniewski S. The use of network analyst tool and 2SFCA method to assess fire service effectiveness in a city, as exemplified by Łódź // GLL. – 2017. – Vol. 1. P. – 147–158.
159. Wang W. Site Selection of Fire Stations in Cities Based on Geographic Information System (GIS) and Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP) // ISI. 2019. – Vol. 24, № 6. – P. 619–626.
160. Wiśniewski, Szymon. Dostępność przestrzenna straży pożarnej do miejsc potencjalnych interwencji na terenie województwa łódzkiego // Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza. – 2016. – № 43. – P. 21–36.
161. Yang L., Jones B.F., Yang S.-H. A fuzzy multi-objective programming for optimization of fire station locations through genetic algorithms // European Journal of Operational Research. – 2007. – Vol. 181, № 2. – P. 903–915.
162. Yu Z. et al. Research on Urban Fire Station Layout Planning Based on a Combined Model Method // IJGI. – 2023. – Vol. 12, № 3. – P. 135.
163. Zhao R., Tang W. Monkey Algorithm for Global Numerical Optimization // J. of Uncertain Systems. – 2008. – Vol. 2, № 3. – P. 165–176.

ПРИЛОЖЕНИЕ А.
СВИДЕТЕЛЬСТВА О ГОСУДАРСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ БАЗ
ДАНЫХ И ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024689027

**Библиотека для решения задач пространственной
оптимизации с использованием гибридных
эвристических алгоритмов**

Правообладатель: *государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирская пожарно-спасательная академия" Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны чрезвычайным ситуациям ликвидации последствий стихийных бедствий" (RU)*

Авторы: *Олег Сергеевич Малютин (RU), Хабибуллин Ренат Шамильевич (RU)*

Заявка № 2024688884

Дата поступления 04 декабря 2024 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 04 декабря 2024 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 0692e782ab3008f54f2401670bcca2026
Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 10.01.2024 по 03.10.2025

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024689028

**Библиотека для решения задач поиска оптимального
пространственного размещения пожарных
подразделений**

Правообладатель: *государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирская пожарно-спасательная академия" Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям ликвидации последствий стихийных бедствий" (RU)*

Авторы: *Олег Сергеевич Малютин (RU), Матеров Евгений Николаевич (RU), Бабенышев Сергей Валерьевич (RU), Сергеев Иван Юрьевич (RU), Батуро Алексей Николаевич (RU)*

Заявка № 2024688885

Дата поступления 04 декабря 2024 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 04 декабря 2024 г.



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 0492e7b7c63006f542e40670bca2024
Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 10.07.2024 по 03.10.2025

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ Б.
ФРАГМЕНТ ЛИСТИНГ ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ
GENESIS.BEST_POINTS.PY

```

'''
Алгоритмы поиска оптимальных узлов графа.
'''

import random

import networkx as nx

import osmnx as ox

import numpy as np

import pandas as pd

from .core import BestPointsBase, MetricBase, StateBase
from .metrics import ArrivalTime
from .tools import get_all_neighbor_nodes

class NodeMetric(BestPointsBase):
    '''
    Расчет метрики для конкретного узла графа.
    ## Важно
    Применяется строго к графам!
    '''

    def __init__(self, state_function: StateBase,
                 metric_function: MetricBase,
                 appr_val = 0.95,
                 err_val=None,
                 **kwargs) -> None:
        '''
        `state_function`: StateBase
            функция расчета состояния окружения
        `metric_function`: MetricBase
            Функция расчета метрики

```

```
`appr_val`: = 0.95
```

Доля узлов графа, покрытие которой считается приемлемой для принятия расчетной метрики.

Если при расчете метрик, из стартового узла (узлов) достижимо меньшее количество узлов,

то такой узел не рассматривается.

```
`err_val`: any = None
```

Значение которое будет возвращено в случае если из точки `node` невозможно будет достичь требуемой доли узлов графа.

```
'''
```

```
self.appr_val = appr_val
```

```
self.err_val = err_val
```

```
super().__init__(state_function, metric_function, **kwargs)
```

```
def __call__(self, env:nx.MultiDiGraph, node:int, area=None, **kwargs):
```

```
'''
```

```
## Параметры
```

```
`env`: MultiDiGraph (G)
```

Граф дорожной сети

```
`node`: int
```

Идентификатор узла графа для которого происходит расчет

```
`area`: pd.Series = None
```

Маска узлов графа. Значениями True отмечены узлы графа - цели расчета леса Вороного.

Если не указана, расчет производится для всех узлов графа.

```
'''
```

```
# Если маска приемлемых узлов графа не передана,
```

```
# то приемлемое количество узлов считается от количества узлов в графе
```

```
# Иначе - от количества True в маске
```

```

if area is None:
    appr_nodes_count = int(env.number_of_nodes() * self.appr_val)
else:
    appr_nodes_count = int(sum(area) * self.appr_val)
# # Приемлемое количество узлов считается от количества узлов в графе
# appr_nodes_count = int(env.number_of_nodes() * self.appr_val)
# Собственно расчет
times, _ = self.state_function(env=env, points=[node], area=area, **kwargs)
if len(times)>=appr_nodes_count:
    cur_val = self.metric_function(times, **kwargs)
else:
    # print(node, len(times))
    cur_val = self.err_val
return cur_val

class BestNodesFull(BestPointsBase):
    def __init__(self,
                 state_function: StateBase,
                 metric_function: MetricBase,
                 appr_val: float = 0.95,
                 return_list: bool = False,
                 node_calc_end_function: callable = None,
                 **kwargs) -> None:
        self.appr_val = appr_val
        self.node_calc_end_function = node_calc_end_function
        self.return_list = return_list
        super().__init__(state_function, metric_function, **kwargs)
    def __call__(self, env: nx.MultiDiGraph,

```

```

    area:    pd.Series = None,
    start_point: int = None,
    points_list: set = None,
    **kwargs):
if not isinstance(env, nx.MultiDiGraph):
    raise TypeError('Тип данных аргумента `env` должен быть nx.MultiDiGraph')
if not area is None and not isinstance(area, pd.Series):
    raise TypeError(f'Аргумент `area` должен иметь тип `pd.Series`! Имеет
{type(area)}')
# Если списка узлов изначально не передано, рассматриваются все узлы
графа
nodes_list = points_list
if nodes_list is None:
    nodes_list = env.nodes()
best_metric = None
best_nodes_list = []
for node in nodes_list:
    node_metric_func = NodeMetric(self.state_function,
self.metric_function, self.appr_val, err_val=None)
    node_metric = node_metric_func(env=env, node=node, area=area)
# проверка на корректность охвата графа
if node_metric:
    # если лучшая метрика еще не указана, присваиваем текущее значение
    if best_metric is None:
        best_metric = node_metric
        best_nodes_list = [node]
# проверяем лучше ли метрика среды для текущего узла, чем лучшая до
этого

```

```
else:
    # if best_metric > node_metric:
    if self.metric_function.compare(best_metric, node_metric) == node_metric:
        if best_metric == node_metric:
            best_nodes_list.append(node)
            # best_nodes_list.add(node)
        else:
            best_nodes_list = [node]
            # best_nodes_list = set([node])
            # best_node = node
            best_metric = node_metric
    # выполняем функцию завершения расчета для узла
    if self.node_calc_end_function:
        self.node_calc_end_function()
    if self.return_list:
        return best_nodes_list, best_metric
    return best_nodes_list[0], best_metric
```

ПРИЛОЖЕНИЕ В.
АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель начальника Академии ГПС
МЧС России по учебной работе, к.и.н.,
доцент


« 15 » _____



АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы
Малютин Олега Сергеевича, представленной к защите
по специальности 2.3.4 Управление в организационных системах
(технические науки)

Комиссия в составе председателя – заместителя начальника кафедры информационных технологий УНК АСИТ к.т.н., доцента Мокшанцева Александра Владимировича и членов комиссии – профессора кафедры информационных технологий УНК АСИТ д.т.н., доцента Бутузова Станислава Юрьевича, доцента кафедры информационных технологий УНК АСИТ к.т.н., доцента Минеева Евгения Николаевича подтверждает, что результаты диссертационной работы Малютин О.С. внедрены в учебный процесс кафедры информационных технологий Академии Государственной противопожарной службы МЧС России, а именно: специализированное программное обеспечение для проведения компьютерного моделирования процедуры принятия решений по определению численности и оптимального пространственного размещения пожарно-спасательных подразделений.

Результаты внедрены в учебно-методические материалы по дисциплине «Системы поддержки принятия решений», «Моделирование процессов и систем» на факультете пожарной и техносферной безопасности по направлению подготовки 09.03.02 Информационные системы и технологии (уровень бакалавриата).


Председатель комиссии
Заместитель начальника кафедры ИТ УНК АСИТ
к.т.н., доцент

 А.В. Мокшанцев

Члены комиссии:
Профессор кафедры ИТ УНК АСИТ
д.т.н., доцент

 С.Ю. Бутузов

Доцент кафедры ИТ УНК АСИТ
к.т.н., доцент

 Е.Н. Минеев

УТВЕРЖДАЮ

Начальник 1 ПСО ФПС ГПС Главного
управления МЧС России по Ханты-
Мансийскому автономному округу - ЮгреО.Б. Белоконный
2025 г.


АКТ

внедрения результатов диссертационного исследования
начальника отдела информационных технологий и компьютерного моделирования
ФГБОУ ВО Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России
Малютин Олег Сергеевич

Комиссия в составе: председатель комиссии, полковник внутренней службы Груздев П.С., заместитель начальника 1 ПСО ФПС ГПС Главного управления; члены комиссии, подполковник внутренней службы Виноградов М.В., начальник СПТ 1 ПСО ФПС ГПС Главного управления, подполковник внутренней службы Семенихин С.В., заместитель начальника СПТ – начальник дежурной смены СПТ 1 ПСО ФПС ГПС Главного управления, составили настоящий акт в том, что результаты диссертационных исследований Малютин О.С. использованы при проведении Расчета численности и технической оснащенности подразделений пожарной охраны, создаваемых для тушения пожаров и проведения аварийно-спасательных работ на территории города Сургута в соответствии со служебной запиской Главного управления МЧС России по Ханты-Мансийскому автономному округу – Югре от 10.02.2025 № СЗ-228-987.

Председатель комиссии:


Заместитель начальника 1 ПСО ФПС ГПС Главного управления
полковник внутренней службы


 П.С. Груздев
Члены комиссии:

Начальник СПТ 1 ПСО ФПС ГПС Главного управления
подполковник внутренней службы


 М.В. Виноградов

Заместитель начальника СПТ – начальник дежурной
смены СПТ 1 ПСО ФПС ГПС Главного управления
подполковник внутренней службы


 С.В. Семенихин

УТВЕРЖДАЮ

Исполняющий обязанности начальника
 Главного управления МЧС России по
 Красноярскому краю
 полковник внутренней службы И.В. Гальянский

« 24 » ФЕВРАЛЯ 2025 г.



АКТ

внедрения результатов диссертационного исследования
 начальника отдела информационных технологий и компьютерного моделирования
 ФГБОУ ВО Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России
 Малютина Олега Сергеевича

Комиссия в составе: председатель комиссии, начальник управления организации пожаротушения и проведения аварийно-спасательных работ Главного управления МЧС России по Красноярскому краю, полковник внутренней службы Д.А. Лаптев; члены комиссии, заместитель начальника управления – начальник отдела организации службы пожарно-спасательных подразделений управления организации пожаротушения и проведения аварийно-спасательных работ Главного управления МЧС России по Красноярскому краю, полковник внутренней службы А.В. Метелица, начальник отдела координации деятельности аварийно-спасательных формирований управления организации пожаротушения и проведения аварийно-спасательных работ Главного управления МЧС России по Красноярскому краю, майор внутренней службы Г.В. Малеев, составили настоящий акт в том, что результаты диссертационных исследований Малютина О.С. позволили определить наиболее эффективные места размещения и количество подразделений ГПС на территории города Красноярска, способных осуществить прибытие сил и средств к месту пожара во временных рамках, установленных Федеральным законом от 22.07.2008 № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности», что позволит обеспечить полное прикрытие территории города Красноярска в области пожарной безопасности.

Председатель комиссии:

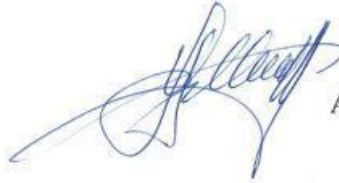
Начальник УОПиПАСР
 Главного управления МЧС России
 по Красноярскому краю
 полковник внутренней службы



Д.А. Лаптев

Члены комиссии:

Заместитель начальника управления – начальник отдела
организации службы пожарно-спасательных
подразделений УОПиПАСР
Главного управления МЧС России
по Красноярскому краю
полковник внутренней службы



А.В. Метелица

Начальник отдела координации деятельности
аварийно-спасательных формирований УОПиПАСР
Главного управления МЧС России
по Красноярскому краю
майор внутренней службы



Г.В. Малеев