

Обзорная статья

УДК 519.8:614.8; DOI: 10.61260/2218-13X-2025-3-156-174

ЗАДАЧА ОПТИМАЛЬНОГО/РАЦИОНАЛЬНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ АВАРИЙНО-СПАСАТЕЛЬНЫХ ФОРМИРОВАНИЙ: КРАТКИЙ ОБЗОР И КРИТЕРИАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ TOP-20 РЕЛЕВАНТНЫХ РАБОТ

✉Ахунова Дарья Геннадьевна.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

✉shurakova.darya@bk.ru

Аннотация. Представлен краткий обзор и критериальный анализ исследований, посвященных задаче оптимального/рационального размещения аварийно-спасательных формирований. Рассмотрены ключевые подходы для решения поставленной задачи, включая математические методы оптимизации, геоинформационные технологии и имитационное моделирование. Проведен анализ релевантных работ по 14 сгруппированным критериям, в качестве которых выступали следующие характеристики: цель, решаемая задача, предметная область, методы решения задачи, используемая модель, применяемый инструментарий, исходные данные, целевая функция, критерии оптимальности, вычисляемые показатели, ограничения и допущения, степень реализации, перспективы развития. Данные критерии позволяют сделать более точные и конкретные выводы для модернизации поставленной задачи оптимального/рационального размещения аварийно-спасательных формирований.

Ключевые слова: оптимальное размещение, аварийно-спасательные формирования, критериальный анализ, математическое и имитационное моделирование, геоинформационные системы, методы многокритериального анализа, методы искусственного интеллекта

Для цитирования: Ахунова Д.Г. Задача оптимального/рационального размещения аварийно-спасательных формирований: краткий обзор и критериальный анализ top-20 релевантных работ // Науч.-аналит. журн. «Вестник С.-Петерб. ун-та ГПС МЧС России». 2025. № 3. С. 156–174. DOI: 10.61260/2218-13X-2025-3-156-174.

Review article

OPTIMAL/RATIONAL PLACEMENT OF EMERGENCY RESCUE UNITS: A BRIEF REVIEW AND CRITERIA-BASED ANALYSIS OF TOP-20 RELEVANT STUDIES

✉Akhunova Daria G.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia

✉shurakova.darya@bk.ru

Abstract. The article provides a brief review and criteria-based analysis of studies dedicated to the problem of optimal/rational placement of emergency rescue units. Key approaches to solving this problem are considered, including mathematical optimization methods, geoinformation technologies, and simulation modeling. An analysis of relevant works was conducted based on fourteen criteria, which were the following characteristics: objective, subject area, problem being solved, solution methods, model used, input data, output data, tools applied, implementation degree, calculated metrics, optimality criteria, objective function, development prospects, limitations, and assumptions. These criteria will help to draw more precise and specific conclusions for the modernization of the stated problem of optimal/rational emergency rescue units placement.

Keywords: optimal placement, emergency rescue units, criteria-based analysis, mathematical and simulation modeling, geographic information systems, multi-criteria analysis methods, artificial intelligence methods

For citation: Akhunova D.G. Optimal/rational placement of emergency rescue units: a brief review and criteria-based analysis of top-20 relevant studies // Scientific and analytical journal «Vestnik Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia». 2025. № 3. P. 156–174. DOI: 10.61260/2218-13X-2025-3-156-174.

Введение

Территории современных городов, особенно мегаполисов, интенсивно застраиваются жилыми комплексами, коммерческими и социальными объектами различного класса функциональной опасности, что приводит к увеличению плотности населения и, как следствие, к повышению рисков возникновения пожаров и иных чрезвычайных ситуаций (ЧС).

В случае пожара или иной ЧС реагирование обеспечивается подразделениями, находящимися в соседних районах, что может привести к нарушению нормативных сроков прибытия.

Согласно требованиям Федерального закона Российской Федерации от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности», время прибытия пожарных подразделений не должно превышать 10 мин в черте города и 20 мин в сельской местности. Зачастую на практике этот норматив нарушается из-за нерационального расположения пожарных частей, их недостаточной плотности или неравномерного распределения по территории.

То, что при планировании застройки новых районов вопросы размещения пожарных частей либо не учитываются вовсе, либо их возведение откладывается на неопределенный срок ввиду нехватки финансирования, только усугубляет ситуацию.

Поэтому в условиях стремительного развития городской инфраструктуры и активного освоения новых территорий возникает задача если не оптимального, то, как минимум, рационального размещения пожарных депо.

Эта задача традиционно, в значительной степени, решается экспертным путем с фрагментарным применением математики и новых информационных технологий, что является явно ограниченным и недостаточным при наличии современных методов оптимизации, включая имитационное моделирование, геоинформационные системы (ГИС) и методы многокритериального анализа, а также бурно развивающиеся методы и программные средства искусственного интеллекта (ИИ).

Для нахождения инновационных форм и средств решения этой задачи автор обращается к наработкам и заделу российских и зарубежных исследователей в данной и смежных предметных областях, для чего производит краткий обзор с последующим критериальным анализом релевантных научных работ, посвященных задаче оптимального/рационального размещения пожарно-спасательных, поисково-спасательных и иных аварийных подразделений оперативного реагирования.

Для обзора использовалась база Российского индекса научного цитирования (сайт <http://elibrary.ru>), а также международная база научных публикаций Google Scholar. Общее число просмотренных работ составило около 300 по запросам, близким к понятию «размещения аварийно-спасательных формирований». Далее приведен аналитический обзор полнотекстовых top-20 (по мнению автора настоящей статьи) из них.

Обзор релевантных работ

Работа Е.М. Алехина и соавторов [1] посвящена разработке проблемно-ориентированных имитационных систем для автоматизированного проектирования и стратегического управления экстренными и аварийно-спасательными службами (ЭАСС) городов. В статье авторы решают задачу обоснования рациональных размеров, структуры и оснащенности ЭАСС, что важно для устойчивого развития и безопасности городов. В заключении статьи представлено комплексное решение проблемы проектирования и управления ЭАСС, сочетающее теоретические модели и практические инструменты.

Согласно авторским заявлениям, решением этой проблемы они занимались 40 лет, что придает работе высокую научную и прикладную ценность в контексте проблематики обеспечения безопасности современных городов.

Апарин А.А. в своем исследовании [2] представил метод определения оптимальных территорий для размещения систем видеомониторинга (СВН) в пожарно-спасательных гарнизонах, имеющий целью повышение информационной поддержки подразделений при оперативном реагировании. Метод базируется на абстрактном геометрическом моделировании районов выезда (РВ) с последующим приложением линейной алгебры для нахождения метрики, характеризующих удаленность отдельных фрагментов частных случаев границ РВ от их стандартных значений. Реализующая его программа позволяет определять участки местного гарнизона, наиболее предпочтительные для установки СВН, с точки зрения состояния дорожной сети в различное время суток и распределения вызовов по РВ пожарно-спасательного подразделения. По мнению автора, метод и программа являются перспективными инструментами для планирования СВН, но требуют дальнейшего совершенствования, включая интеграцию с ГИС.

В работе [3] изложена формальная постановка задачи оптимального размещения и комплектации аварийно-спасательных формирований (АСФ) для эффективного реагирования на ЧС природного и техногенного характера. Авторы предлагают математическую модель в терминах булевой алгебры, которая учитывает характеристики территорий, вероятности возникновения ЧС, численность населения и профессиональный состав спасателей. Задача формулируется как минимизация стоимости размещения и оснащения АСФ при условии оказания гарантированной помощи населению. Для учета нелинейной и линейной составляющих в функции затрат, а также использования булевых и целочисленных переменных, авторами разработан алгоритм ее приближенного решения, основанный на модификации «метода посредника».

Гусев С.А. в статье [4] исследует и решает проблему оптимального расположения спасательных служб на транспортных магистралях с целью минимизации среднего времени прибытия к месту аварии. Разработана экономико-математическая модель оптимального расположения нескольких (от одной до пяти) спасательных служб при обслуживании одного транспортного узла, как объекта, подчиняющегося нормальному закону распределения с заданной интенсивностью следования вагонов. Для решения задачи применяется аппарат дифференциального и интегрального исчисления. По мнению автора, метод решения масштабируется для любого количества служб и может быть применен на практике для улучшения безопасности транспортных узлов.

Статья сотрудников научно-исследовательского института противопожарной обороны МЧС России в сборнике научных трудов конференции [5] посвящена разработке математической модели для определения оптимальных мест дислокации специализированных пожарно-спасательных частей (СПСЧ) с учетом рисков возникновения ЧС природного и техногенного характера. Основная цель – минимизировать время прибытия подразделений СПСЧ к месту потенциальной ЧС, что особенно важно в рамках «золотого часа» для эффективного оказания помощи. Решение задачи определения оптимального места расположения СПСЧ осуществляется методом градиентного спуска. В качестве примера рассмотрено определение оптимального размещения пожарной части, обслуживающей девять потенциально опасных объектов. По мнению авторов, модель может быть использована при разработке предложений по перспективному развитию сети СПСЧ.

Статья П.А. Матюшева и С.Н. Зариповой в сборнике трудов еще одной конференции [6] посвящена исследованию оптимального размещения АСФ на территории субъекта Российской Федерации. Анализируя статистические данные о реагировании АСФ на происшествия и ЧС в Республике Татарстан за 2015–2019 гг., выявляя неравномерность нагрузки на спасателей и различия в эффективности работы формирований, авторами получены многофакторные модели прогнозирования исследуемых показателей. В качестве способа решения задачи оптимального размещения АСФ используется представление ее в виде графа.

В работе [7] рассмотрены методические подходы к определению рациональных мест размещения АСФ на заданной территории с использованием метода «взвешенных координат», когда ожидаемым местам и объемам выполняемых работ в зависимости от их важности и масштаба присваиваются соответствующие веса. В качестве веса используются различные показатели: количество «обслуживаемого» населения, площадь зоны ЧС, вероятность ее наступления и т.п. По мнению авторов, использование этих риск-ориентированных подходов способствует снижению безвозвратных потерь населения, а также материальных затрат и потерь времени на прибытие АСФ к месту спасения. Приведен условный пример расчета координат мест размещения АСФ с учетом количества пострадавших и применяемых сил в ЧС. Авторы планируют представить дальнейшие исследования с реальными данными.

В работе [8] приводятся результаты анализа расположения баз скорой помощи в г. Рио-де-Жанейро (Бразилия) в контексте сокращения времени реагирования на экстренные вызовы. Предложена математическая модель, направленная на максимизацию количества обслуживаемых людей, а также на минимизацию диспетчерских центров и расстояния между ними и точками вызова. Модель была протестирована на реальных данных за 2014 г. (105 тыс. вызовов), в результате чего установлены зоны с потенциалом для улучшения обслуживания. Авторы предполагают, что в будущих исследованиях необходимо учитывать стохастический характер спроса и использовать многокритериальные подходы.

Работа [9] посвящена оптимизации размещения ресурсов морской поисково-спасательной службы (ПСС) в Атлантическом регионе Канады. Авторы модифицируют две классические модели размещения: задачу максимального покрытия и р-медианную задачу, чтобы учесть особенности ПСС, такие как различные типы судов с разными характеристиками (скорость, дальность действия). Для прогноза используются ретроспективные данные об инцидентах на море. Оптимальные решения этих двух задач сравниваются с точки зрения пяти критериев принятия решения: среднее время доступа, основное/резервное покрытие, индекс Джини и максимальное время доступа. Результаты, по мнению авторов, указывают на значительное повышение эффективности использования ресурсов и доступности сервиса спасения по сравнению с текущей ситуацией.

В исследовании [10] акцент сделан на географическую доступность спасательных служб – предлагается метод поддержки процесса планирования, сопоставляя риск возникновения инцидента с возможностями и доступностью, в том числе, нестационарных спасательных подразделений. Для реализации использовалось приложение «Планировщик спасательных подразделений», разработанное на C# для среды Windows и использующее для своей работы имитационную и регрессионную модели. Результат анализа географической доступности нестационарных единиц для двух районов Швеции представлен на тематических картах и графиках в виде уровня покрытия, среднего времени отклика (прибытия) и концентрации спасателей в «точке» происшествия. Делается вывод об удобстве работы с приложением и доверии к результатам его работы.

В статье [11] ученые из Мэрилендского университета (США) решают проблему оптимального развертывания городских поисково-спасательных групп (USAR) к местам стихийных бедствий. Основная цель – максимизировать ожидаемое количество спасенных жизней, учитывая динамически изменяющиеся условия, такие как появление новых зон бедствия, стохастичность времени перемещения и обслуживания, а также снижение вероятности выживания с течением времени. В статье предлагается инновационный метод оптимизации работы USAR-команд, сочетающий стохастическое моделирование на графе и динамическое обновление решений, что особенно актуально в условиях ограниченных ресурсов и высокой неопределенности.

В работе [12] представлена разработка многоцелевой модели принятия решений для оптимального размещения пунктов дорожной спасательной службы. Авторы отмечают, что традиционные одноцелевые модели (например, р-медиана, р-центр, модель максимального и резервного покрытия) не в полной мере учитывают сложные требования реальных условий и должны интегрироваться. Это позволяет учитывать несколько целей: минимизацию максимального времени спасения, максимизацию, в том числе резервного, покрытия,

минимизацию общего взвешенного времени. Делается вывод, что в сочетании с параметрическим программированием интегрированная модель может явиться теоретико-методологической основой в практике планирования дорожных спасательных служб, а в дальнейшем должна быть усилена использованием случайных моделей и интеллектуальных алгоритмов.

В работе ученых из Национального университета Ченг Кунг (Тайвань) [13] рассматривается проблема локализации служб экстренного спасения при авариях на железной дороге. Предлагаемая авторами модель учитывает стохастическую природу ЧС и пространственную специфику спасательных операций, для чего используется закон Пуассона и нечеткое многоцелевое программирование. Задача местоположения станций экстренной медицинской помощи решается на базе генетического алгоритма сортировки без доминирования применительно к реальной железнодорожной системе. Результаты решения, по мнению авторов, демонстрируют повышение эффективности спасательных работ за счет корректировки расположения ограниченных ресурсов.

Работа А. Кларка и Дж.С. Майлза из Кардиффского университета (Великобритания) [14] посвящена повышению эффективности и результативности работы ПСС за счёт более рационального размещения станций, техники и персонала. Задача размещения решается с использованием ГИС Wings32, которая позволяет специально разработанному программному обеспечению моделировать географические связи в зоне действия ПСС, включая время в пути, плотность населения, расположение объектов и субъектов ЧС. Статья представляет собой пример применения эволюционных алгоритмов (в частности, генетических алгоритмов) в сочетании с моделями покрытия для идентификации областей с потенциально хорошими (рациональными) решениями.

Чтобы увеличить общее количество запросов в системе служб неотложной медицинской помощи, обслуживаемых первичным покрытием, в два раза, авторы работы [15] задались вопросами: где разместить пункты скорой помощи и сколько автомобилей должно быть выделено для станций? Многокритериальная задача решается ими с помощью метода целочисленного линейного программирования с использованием программного обеспечения CPLEX. В качестве примера взят район Сунцзян (провинция Шанхай, Китай) площадью около 605 км² и населением примерно 1,75 млн чел. (на 2015 г.), разбитый на 187 узлов спроса. Результаты показывают, что уровень покрытия спроса и время отклика могут быть значительно улучшены за счет перемещения существующих объектов без использования дополнительных транспортных средств.

В работе других китайских ученых-исследователей [16] описывается решение задачи оптимального размещения таких объектов аварийно-спасательной инфраструктуры в городах, как пожарные станции, убежища, медицинские учреждения и склады с запасами. Сформулированы основные принципы (оперативность, системность, минимизация затрат и социальная эффективность) и цели (минимизация максимального расстояния до места ЧС, максимизация зоны покрытия, минимизация общего взвешенного расстояния между точками спроса, минимизация затрат) их размещения. Синтезирована многоцелевая модель принятия решения о местоположении аварийно-спасательных объектов, основанная на интеграции традиционных моделей; для ее решения использован закон линейной взвешенной суммы с корректировкой весов целей для достижения удовлетворительного плана. Работоспособность модели показана на примере масштабной новостройки – развивающегося района Чжэнцзун Дон (провинция Хэнань, Китай) с большой площадью и сосредоточенным населением.

Работа Т. Андерссона и С. Сярдквиста из университета Линчёпинга (Швеция) [17] представляет собой исследование, направленное на оптимизацию размещения ресурсов пожарно-спасательных служб (машины, лестницы и т.п.) для эффективного реагирования на события (пожары, дорожные аварии). Используются три математические модели: р-медианная (РММ), р-центровая (РСМ) и максимального покрытия (MCLM). Модель была протестирована на территории пяти муниципалитетов в Швеции, где расположены 11 пожарных станций с 23 единицами техники. Исследование показало, что использование различных математических моделей позволяет получить разные «оптимальные» решения для

размещения ресурсов: РММ обеспечивает лучшее среднее время реагирования, РСМ – лучшее максимальное время, а МСЛМ – лучшее покрытие событий в пределах 10 мин. Решения были получены для различных сценариев, таких как дневное и ночное время, когда доступность ресурсов и частота событий могут значительно различаться, что оказалось близким к текущей практике пожарных служб и указывает на их практическую применимость.

В работе [18] описывается и решается проблема размещения спасательных судов на основе данных о морских инцидентах в Атлантической зоне Канады за период с 2000 по 2003 г. Данные включают информацию о типах инцидентов, их тяжести и местоположении. Рассматриваются различные типы спасательных судов, их скорость и дальность действия. В исследовании используется алгоритм расчета расстояний с учетом обхода суши, что важно для морских операций. Для решения поставленной задачи применяется модель максимально возможного покрытия при заданном количестве баз (MCLP), ее детерминированная (SMCLP) и вероятностная (MEXCLP) разновидности, которые адаптируются для учета вышеуказанной специфики. Исследование демонстрирует, что модели, учитывающие несколько критериев и дополнительные ограничения, такие как загрузка и доступность ресурсов, работают лучше для условий морских спасательных операций.

В работе [19] предлагается комплексная методология выбора местоположения пожарных депо, которая учитывает прогнозируемый спрос, а также время в пути. Авторы разработали модель машинного обучения на основе алгоритма «Случайный лес» (Random Forest) для прогнозирования вероятности возникновения пожаров в различных зонах города, учитывая такие факторы, как тип недвижимости, возраст объектов, плотность населения, стоимость земли и другие демографические и пространственные данные из множества различных источников. На основе полученных данных ими разработана оптимизационная модель, направленная на максимизацию покрытия зон с высоким риском и низким качеством обслуживания, при этом минимизируя перекрытие зон обслуживания между новыми и уже существующими пожарными станциями. Предложенная методология применена при выборе места для нового пожарного депо в г. Виктория (штат Миннесота, США).

Размещению противопожарных служб с учетом кооперации между различными типами пожарной техники, а также частичного покрытия зон обслуживания по расстоянию и количеству доступных транспортных средств посвящена статья [20]. Для решения задачи авторами разработана модель смешанного целочисленного нелинейного программирования. Для автоматизации численных экспериментов с моделью использовалась вычислительная система невыпуклой оптимизации BARON. Модель была протестирована на гипотетической дорожной сети ($4 \times 3 = 12$ точек спроса, которые рассматриваются как набор возможных мест расположения пожарной части) и применена к реальным данным г. Харбин (Китай). Авторы считают, что модель эффективно решает задачу размещения пожарных станций с учетом национальных особенностей Китая.

Критериальный анализ

Чтобы объективизировать авторские мнения и структурировать предлагаемые ими новации, а также по возможности учесть все значимые факторы решения задачи и их относительную важность, произведем критериальный анализ указанных релевантных работ.

Анализ проведем по 13 критериям, в качестве которых выступают следующие обоснованно сгруппированные характеристики:

- 1) цель и решаемая (авторами публикации) задача, предметная область;
- 2) методы решения задачи, включая используемые модели и применяемый для решения инструментарий;
- 3) исходные данные, целевая функция и критерии оптимальности, результаты решения;
- 4) ограничения/допущения, степень реализации и перспективы развития.

Основанием группирования является: для первой – вопросы актуальности и значимости публикации, а также ее целевая аудитория, для второй – собственно

методологическая и технологическая база решения, для третьей – вход, «движок» и выход задачного блока, а для четвертой – «мостик» между настоящим состоянием исследуемого вопроса и будущими ответами. Предположительно, данные сгруппированные критерии позволят сделать емкие, более точные и конкретные выводы для модернизации поставленной задачи оптимального/рационального размещения АСФ.

Цель и решаемая задача, предметная область

Анализ top-20 работ по критериям декларируемой авторами цели публикации и решаемой исследователями задачи позволил сделать следующие обоснованные умозаключения.

Во-первых, доминирующей научно-исследовательской проблемой является оптимизация пространственного размещения сил и средств. Подавляющее большинство целей [2–9, 12, 14–16, 18–20] прямо направлены на решение задач оптимального размещения (локации) аварийно-спасательных ресурсов. Цели различаются по объектам размещения и методам, но объединены общей парадигмой: минимизация времени/максимизация покрытия при ограниченных ресурсах.

Во-вторых, наблюдается универсальность применяемого математического аппарата для разнородных объектов. Один и тот же класс задач оптимизации (задачи размещения, задача о покрытии) успешно применяется к крайне разнородным объектам: наземные службы (пожарные [5, 14, 17, 19, 20] и аварийно-спасательные части [1, 3, 6, 7, 10, 11, 16], станции скорой помощи [8, 15], пункты экстренной помощи на дорогах [4, 12, 13]), морские силы (поисково-спасательные суда) [9, 18], технические системы (стационарные камеры видеонаблюдения) [2], а также мобильные команды. Это доказывает мощь и универсальность методов исследования операций и математического моделирования для решения прикладных задач в различных прикладных областях, объединенных общей целью.

В-третьих, четко выделяются два взаимодополняющих подхода: стратегическое планирование и оперативное управление. Большинство авторов (например, [3, 5, 7, 16, 19]) нацелены на долгосрочное планирование инфраструктуры: где построить новую часть, где разместить постоянный пункт дислокации – стратегический уровень. Некоторые цели (например, [11, 15, 17]) касаются гибкого распределения и перераспределения уже имеющихся мобильных ресурсов (машин, команд) в реальном времени или для ликвидации последствий конкретной крупной аварии – оперативный (тактический) уровень.

В-четвертых, наблюдается четкий тренд от статических к динамическим и сложным моделям, учитывающим неопределенность и риски. Эволюция сложности прослеживается при уровненом сравнении поставленных целей: базовый уровень – классические модели размещения (например, [4, 8]); повышенный уровень сложности – учет вероятностных факторов и рисков [3, 5–7, 14], то есть признание того, что ЧС это не статичные точки, а события, вероятность которых распределена в пространстве и времени неравномерно; высший уровень сложности – моделирование динамических и многоэтапных процессов [11, 15]. Цель, заявленная в [11], в частности, является одной из наиболее комплексных, учитывающей динамическое появление новых очагов, неопределенность и временную зависимость вероятности спасения.

И в-пятых, наличие цели в [1] как обоснование и проектирование проблемно-ориентированных имитационных систем для автоматизированного проектирования и стратегического управления экстренными и аварийно-спасательными службами городов указывает на осознание необходимости системной интеграции всех перечисленных решений в единый программно-аналитический комплекс. Эта мета-цель предполагает, что все разрабатываемые модели и алгоритмы (из целей [2–20]) не являются изолированными инструментами, а должны стать модулями единой системы. Такая система должна проводить комплексное моделирование сценариев ЧС, тестировать различные стратегии размещения и управления и в итоге служить основой для систем поддержки принятия решений для руководителей МЧС России и других служб.

Общий вывод по критерию «Цель – решаемая задача – предметная область»:

1) Исследовательский фокус сконцентрирован как на фундаментальной, так и на прикладной задаче территориально-временной оптимизации, что является основой для повышения эффективности всех экстренных служб;

2) Современные исследования в предметной области требуют ухода от упрощенных статических моделей в сторону сложных, вероятностных и адаптивных систем, адекватно отражающих хаотичную природу ЧС;

3) Очевидно, что полноценная система управления должна включать как оптимизированную стационарную сеть (стратегия), так и инструменты для гибкого маневрирования силами (тактика) – представленные цели охватывают оба этих аспекта;

4) Мета-цель заключается не просто в создании разрозненных математических моделей, а в построении целостного инструментария для автоматизированного проектирования и стратегического оперативно-тактического управления всей системой экстренного реагирования города или региона.

Метод, модель, инструментарий

В результате проведенного исследования релевантных источников были установлены следующие ключевые положения относительно методологических подходов (характеристики используемых моделей и методов) к решению задачи, а также о технологическом оснащении исследований (характеристики применяемого для решения программного инструментария) по оптимальному размещению АСФ.

Во-первых, подавляющее большинство работ [3–5, 8–10, 12, 16–18, 20] опираются на хорошо зарекомендовавший себя аппарат целочисленного (в том числе смешанного) и линейного программирования, а также на методы комбинаторной оптимизации. Это прямое следствие того, что задача размещения конечного числа объектов (пожарных частей и др.) по своей природе является дискретной. Широкое использование таких методов (вплоть до модификаций под специфические нужды, как в работе [15]) свидетельствует, что данная прикладная область имеет прочный фундамент в классическом исследовании операций, что обеспечивает нахождение точного или близкого к оптимальному решению для сложных задач с множеством ограничений.

Во-вторых, во многих методах [1, 4, 6, 7, 11, 13, 15] явно присутствует компонента, направленная на работу с неопределенностью, что критически важно для моделирования ЧС, это статистические и вероятностные методы (нормальное распределение, функции Лапласа, регрессионное моделирование, корреляционный анализ), которые используются для прогнозирования спроса на услуги экстренных служб и вероятности возникновения инцидентов, стохастическое программирование [11] и сценарное моделирование [7] применяются для учета случайного характера возникновения и развития ЧС; метод нечеткого многокритериального программирования используется в работе [13] для работы с качественными, «размытыми» данными и экспертными оценками. Эта характеристика отражает переход от детерминированных моделей к более реалистичным, учитывающим вероятностную природу реального мира.

В-третьих, для адекватного описания реальности применяются модели, явно учитывающие аспекты пространственно-временной природы решаемой задачи. Для пространственного аспекта это геометрически-математические модели [2, 5], территориальные регрессионные модели [6], пространственно-временные модели [1], которые работают с картографическими данными, транспортными сетями и географическим распределением рисков. А для временного – вероятностно-временные модели [5], модели загрузки подразделений [1], модели затрат на реагирование [4], они фокусируются на временных параметрах – от времени прибытия до времени восстановления работоспособности подразделения. Кроме того, современные модели учитывают ресурсные (например, баланс нагрузки [10], достаточность персонала [3]) и инфраструктурные (транспортная доступность [1, 5], состояние дорожной сети [2]) аспекты. Такой комплексный подход обеспечивает более

адекватное моделирование реальных условий, но напрямую влияет на постановку оптимизационной задачи и выбор критериев (см. ниже).

В-четвертых, для решения сложных задач, где классические методы оптимизации требуют неприемлемо больших вычислительных ресурсов (так называемые, NP-трудные задачи), авторами активно применяются эволюционные, в частности генетические [13, 14], алгоритмы, а также модифицированные декомпозиционные алгоритмы [3] и метод генерации столбцов [11]. Эти методы позволяют находить «достаточно хорошие» решения за приемлемое время для задач большой размерности, что крайне важно при оптимизации размещения сил реагирования в масштабах крупного города (мегаполиса) или региона.

В-пятых, анализ методов показывает, что редко для решения задачи размещения используется только один из них. Как правило, применяется последовательность методов, образующих целостный исследовательский цикл, а именно: для анализа ретроспективных данных – статистические методы, ABC-анализ, корреляционный и регрессионный анализ [1, 6, 7, 15]; для прогнозирования – метод регрессионного моделирования [6], «Случайный лес» [19]; для оптимизации – методы математического программирования и генетические алгоритмы [3, 9, 13, 14]; для оценки и принятия решения – многокритериальная оптимизация, методы взвешенных сумм [16], оценка рисков [13]. Такой комплексный подход, наиболее выпукло представленный в работах [6, 7, 19], превращает разрозненные данные в обоснованные управленческие решения.

И в-шестых, можно утверждать, что сформировался де-факто отраслевой стандарт инструментария, состоящий из трёх ключевых компонентов [1, 2, 5, 7–9, 15, 18–20]:

- ГИС-платформы (QGIS, ArcGIS, MapXtreme) – для пространственного анализа, визуализации, работы с картографическими данными и расчёта зон покрытия по реальной дорожной сети;

- мощные оптимизационные программные пакеты (CPLEX, GUROBI, BARON) – для решения сложных задач линейного, целочисленного и нелинейного программирования, возникающих в моделях размещения;

- языки программирования общего назначения (Python¹, C++, Java) – для интеграции компонентов, предобработки данных, реализации алгоритмов и автоматизации расчётов.

Этот стек отражает потребность в комплексном подходе, сочетающем математическую оптимизацию с геопространственным анализом. При этом исследователи используют как мощные коммерческие продукты (IBM ILOG CPLEX, GUROBI, TransCAD, ArcGIS), так и активно развивающийся open-source стек (Python, QGIS, OSRM, OpenStreetMap).

Общий вывод по критерию «Метод – модель – инструментарий»:

1) Современные методологические подходы к размещению АСФ характеризуются глубоким синтезом классической оптимизации, современных методов анализа данных (Data Science) и специализированных инструментов пространственного анализа (ГИС). Исследователи эффективно комбинируют строгие математические методы для поиска оптимальных решений с гибкими эвристическими и вероятностными подходами для учета сложности и неопределенности реального мира, но нацеливаясь на создание практических инструментов для повышения эффективности аварийно-спасательных служб. Конечная цель – создание не просто математической модели, а инструмента для обоснования жизненно важных управленческих решений.

2) Инструментальная база исследований эволюционировала от изолированного использования математического и программного обеспечения к созданию интегрированных, гибридных вычислительных платформ. Эти платформы сочетают мощь коммерческих решателей, гибкость open-source инструментов, возможности ГИС-технологий и методы Data Science для сквозного решения задачи – от прогноза рисков и расчёта времени доезда

¹ Python упоминается явно и неоднократно [2, 5, 7, 9, 19] как инструмент для расчётов, ГИС-анализа и визуализации.

по реальным дорогам до визуализации оптимального размещения сил на карте, что свидетельствует о высокой степени зрелости и технологизации данной научно-прикладной области.

Исходные данные, целевая функция и критерии оптимальности, результаты решения

Анализ представленных выше работ позволил сделать некоторые предварительные выводы и выявить закономерности касательно основных структурных компонентов формализованной оптимизационной задачи.

Во-первых, установлена закономерность между типом исходных данных и используемым аппаратом решения оптимизационной задачи. Например, многие публикации [1, 2, 6, 7, 13, 18, 20] включают исторические данные о вызовах и ЧС, их типах, географическом распределении и временных закономерностях, что указывает на применение прогнозно-аналитических моделей (например, с помощью машинного обучения). Или почти в каждой присутствуют географические привязки: координаты, дорожная сеть, зоны покрытия, матрицы расстояний [3, 7, 10, 11, 16, 19, 21], что свидетельствует о том, что современные модели размещения АСФ строятся на основе ГИС-технологий. Также можно наблюдать, что для построения адекватной модели недостаточно одного типа данных: моделирование требует интеграции демографических (плотность населения), географических (дороги, рельеф), статистических (история вызовов), инфраструктурных (расположение опасных объектов, больниц) и операционных (скорость техники, время готовности) данных. Например, работы [1, 6, 14, 20] явно демонстрируют, что без совмещения всех этих факторов модель будет нежизнеспособной и далекой от реальности.

Во-вторых, в подавляющем большинстве анализируемых публикаций доминируют две фундаментальные парадигмы задачи оптимизации размещения: минимизация времени/расстояния и максимизация покрытия. И, соответственно, практически все целевые функции можно отнести к одному из двух основных классов: минимизация временных/затратных показателей (например, времени реагирования [1, 5, 10, 17] или затрат [1, 3] или взвешенного расстояния [7]) и максимизация охвата/доступности (например, покрытия инцидентов [9, 19, 20] или покрытия населения [13] или количества спасенных жизней [11]). Эти два подхода часто конфликтуют: для максимального покрытия нужно больше станций (рост затрат), а минимизация числа станций для снижения затрат ухудшает покрытие, что приводит к необходимости многокритериальной оптимизации. Прямое указание на наличие нескольких критериев [1, 6, 8, 12, 13, 16, 17] отражает комплексный характер задачи размещения. Однако простая минимизация/максимизация не отражает реальной важности разных событий и районов, поэтому почти повсеместно применяется взвешивание: например, по вероятности возникновения ЧС [4], по тяжести последствий (например, число пострадавших, материальный ущерб) [7, 11], по численности населения или частоте вызовов [9, 16, 19], – что позволяет направлять ресурсы в зоны с наибольшим риском и потенциальным ущербом, а не просто в географический центр.

В-третьих, целевые функции эволюционируют от простых к сложным, учитывающим надежность системы и резервирование. Помимо базовых показателей, современные целевые функции включают критерии, обеспечивающие устойчивость и отказоустойчивость системы, например: максимизация резервного (вторичного) покрытия [12] – критерий критически важен для работы в условиях множественных одновременных инцидентов; минимизация максимального («наихудшего») времени реагирования [12, 17] – направлен не на улучшение средних показателей, а на ликвидацию «слабых» мест и зон с катастрофически плохим обслуживанием; учет ограниченной вместимости ресурсов [18] – предотвращает перегрузку ближайшей станции в ущерб другим зонам.

В-четвертых, используемые авторами критерии образуют сложную систему, отражающую тройственную природу задачи – эффективность–экономичность–«справедливость». Практически все наборы критериев демонстрируют необходимость баланса между тремя конфликтующими целями: операционная эффективность (например, минимизация времени прибытия [1, 2, 5, 7], максимизация зоны покрытия [1, 3, 8]),

экономическая целесообразность (например, минимизация бюджетных затрат [1, 3, 6], минимизация суммарных затрат [3, 16]) и «справедливость» (например, равномерность покрытия территории [1, 13], минимизация максимального времени реагирования [12, 17]). Этот баланс свидетельствует о том, что оптимальное решение всегда представляет собой компромисс между желанием максимально улучшить обслуживание и ограниченностью ресурсов.

В-пятых, анализ публикаций показывает наличие критериев разного назначения – выделяются два уровня критериев: содержательные (например, время реагирования [6, 7, 10, 12, 14, 17], охват населения [8, 13, 16], экономические затраты [1, 3, 18]) – понятные для принятия решений, и формальные (например, условия экстремума [4], критерии сходимости [5]) – обеспечивают математическую корректность алгоритмов, – что подчеркивает потребность сочетания предметной экспертизы и математической строгости для успешности решения.

В-шестых, наблюдается явная связь с классическими типами задач размещения в исследованиях операций. Многие формулировки целевых функций и критерии прямо отсылают к известным математическим моделям, а именно: задаче максимального покрытия (упоминается напрямую в [18–20]), задаче минимизации среднего расстояния или Р-медианы (работы [5, 7, 10] являются ее прямой формулировкой), задаче центра или Р-центра (минимизация максимального времени в исследовании [17] однозначно соответствует этой модели), – что свидетельствует о том, что практические задачи размещения АСФ успешно формализуются в рамках хорошо изученного теоретического аппарата.

В-седьмых, результаты решения оптимизационной задачи носят комплексный характер, включая как конкретные координаты размещения [3–5, 7, 8, 13, 14, 16–18, 21], так и ключевые показатели эффективности – среднее и максимальное время реагирования [18], процент покрытия территории [10], ожидаемое количество спасенных жизней [12], охват населения [8, 14], – что доказывает, что цель оптимизации не просто найти «удобное» место, а достичь измеримого улучшения в работе экстренных служб. Модели также определяют, какие именно ресурсы, и в каком количестве должны там находиться. В анализируемых публикациях это отражено в таких выходных данных, как: распределение техники и машин [1, 8, 16, 21], численность и состав персонала [3], типы размещаемых ресурсов [7]. Кроме того, во многих работах выходные данные включают географические схемы, тематические карты и иную графическую визуализацию [2, 4, 7, 10, 15], что облегчает принятие решения.

И в-восьмых, в анализируемых публикациях авторами рассчитываются не только абсолютные значения, но и показатели, демонстрирующие эффективность предлагаемых решений относительно других альтернатив или состояний, например:

- процент улучшения и процент ошибки между моделями в работе [14] прямо сравнивают эффективность разных конфигураций или алгоритмов;
- индекс качества обслуживания [19] и индекс Джини [9] позволяют нормировать и сравнивать справедливость распределения ресурсов между разными районами;
- сравнение с пороговыми значениями [3] или нормативами («процент зон с покрытием до 10 мин») [17] показывает, соответствует ли решение внешним требованиям и др.

Это доказывает, что цель оптимизации размещения АСФ – не только найти математический экстремум, но и обеспечить ощутимое (и желательно измеримое) улучшение по сравнению с текущей ситуацией, альтернативным вариантом или нормативом.

Общий вывод по критерию «Исходные данные – целевая функция – критерии оптимальности – результаты решения»:

1) Проанализированные публикации демонстрируют, что задача оптимального размещения АСФ решается на стыке анализа больших данных, теории оптимизации и геоинформатики, и ее успешное решение требует не просто механического расчета расстояний, а комплексного учета в качестве исходных параметров моделей показателей социальных, географических, экономических, операционных и прочих факторов конкретной территории.

2) Анализ целевых функций показывает, что оптимальное размещение АСФ – это не поиск единственного лучшего решения, а сложный процесс нахождения компромисса между различными критериями, которые эволюционируют от простых пространственных показателей к сложной системе сбалансированных метрик, учитывающих операционную эффективность, экономическую целесообразность и социальную справедливость. Современные подходы учитывают приоритеты и риски через взвешивание, стремятся к созданию отказоустойчивых систем с резервным покрытием и опираются на солидный фундамент классических моделей исследования операций.

3) Исследование проанализированных оптимизационных моделей размещения АСФ подтверждает, что авторы оперируют сложными многоуровневыми системами сбалансированных показателей. Получаемые в результате решения выходные данные зачастую включают точное расположение объектов, детальное распределение ресурсов и количественную оценку ожидаемого улучшения ключевых операционных показателей, что делает их практичным инструментом для управления службами экстренного реагирования.

Ограничения/допущения, степень реализации и перспективы развития

Анализ релевантных публикаций по критерию «ограничения/допущения – степень реализации – перспективы развития» указывает на следующие характеристики научных работ и устойчивые тенденции исследований в предметной области.

Во-первых, почти в половине проанализированных моделей [1, 2, 4–7, 9, 12, 13, 16, 17, 19, 20] игнорируется временная, сезонная и ситуационная динамика, например «час пик», погода, дорожные работы и т.п. Это приводит к тому, что расчетное оптимальное размещение актуально только для гипотетических «средних» условий и быстро устаревает при их изменении, что характерно для реальных ЧС. Ключевым ограничением также является сильная зависимость от качества, полноты и репрезентативности ретроспективных данных – в публикациях [1, 6, 7, 9, 13, 14, 16, 19] авторы прямо указывают на эту проблему – в результате решение оптимально для «вчерашнего дня».

Во-вторых, многочисленные упрощения и допущения в проанализированных моделях [2, 4, 5, 9, 12, 16, 17, 20] сводят сложную логику к примитивным схемам: линейная зависимость времени от расстояния (например, игнорируются пробки, светофоры, рельеф), идеализированная геометрия (расстояния «по прямой» или без учета препятствий), однородность техники и персонала (все машины едут с одинаковой скоростью, все экипажи работают с одинаковой эффективностью, не учитывается время на подготовку к выезду), – в итоге рассчитанное моделью «оптимальное» расположение на практике может показывать худшие результаты из-за неучтенных задержек. Игнорирование человеческого фактора, организационных аспектов и взаимодействия между подразделениями, что присутствует, например, в работах [1, 6, 7, 16], синтезирует оптимальное с математической точки зрения, но «идеализированное» решение, которое может быть нереализуемо или неэффективно на практике.

В-третьих, большинство проанализированных моделей стремятся к универсальности через агрегацию разнородных критериев в одну целевую функцию, что маскирует важные компромиссы и снижает гибкость решений в конкретных сценариях – публикации [8, 14, 16, 20] явно демонстрируют эту методологическую проблему. Объединение таких разнородных целей, как минимизация времени прибытия, минимизация стоимости, максимальное покрытие населения, в одну формулу требует субъективного назначения весов, что «обесценивает» научную обоснованность получаемых решений.

В-четвертых, значительный разрыв между теоретическими разработками и их практической реализацией. Так авторы публикаций [2, 3, 5–8, 12, 16, 20] акцентируют внимание на создании математических моделей (многокритериальных, стохастических, целочисленного программирования), алгоритмов и методологий, но при этом следует отметить отсутствие полномасштабной апробации, валидации на реальных данных или внедрения в практику. Это указывает на то, что академическое сообщество активно

порождает новые сложные модели, однако процесс их трансфера в реальные службы затруднен. Ярким исключением из общего ряда является работа [1], где степень реализации может быть оценена как максимальная. Успех достигнут не благодаря одной конкретной модели, а за счет разработки комплексной методологии, которая включает нормативное закрепление, поддержку ИТ-системами и дает измеримый эффект.

В-пятых, наиболее практико-ориентированные разработки носят адаптивный характер – их авторы не изобретают подход с нуля, а адаптируют (модифицируют) проверенные временем модели (такие как MCLP, Р-медиана) к специфике предметной области, как в работах [9, 10, 15, 17, 20]. Например, учет кооперативного взаимодействия машин [20], двухэтапного спасения [15] или нестационарных единиц [10] делает модели более реалистичными и пригодными для использования.

В-шестых, будущее развитие систем размещения АСФ авторы публикаций видят в создании комплексных, динамических и самообучающихся цифровых экосистем, а не просто в совершенствовании отдельных математических моделей. Так в подавляющем большинстве публикаций [1–6, 9, 10, 12, 13, 18, 19] указывается на конвергенцию нескольких ключевых технологий:

- цифровые двойники и ГИС (например, создание точных виртуальных копий городов [1–3, 5, 7] для учета инфраструктуры, рельефа и сетей);

- данные в реальном времени за счет интеграции с городскими системами [2], GPS [8], датчиками пробок и погоды [2, 12, 20] для перехода от статического планирования к динамическому управлению;

- ИИ и машинное обучение (использование ИИ не только для оптимизации [3–6, 9], но и для прогнозирования рисков и ЧС [2, 13] на основе анализа больших данных [1, 6].

Все это формирует общую картину предметной области как экосистемы, где модель постоянно получает актуальные данные, обучается на них и адаптирует дислокацию и маршруты в режиме, близком к реальному времени.

Также лейтмотивом практически всего списка проанализированных публикаций являются понятия «динамическая оптимизация» [4, 15], «реальное время» [9, 18], «учет динамических факторов/рисков» [3, 12] и конкретные примеры (в [20] – оптимизация маршрутов с учетом трафика, перераспределение машин при пиковых нагрузках) как прямое следствие осознания авторами ограничений статических моделей.

И в-седьмых, важнейшим условием успешной реализации перспективных разработок видится их практическая внедряемость, которая требует масштабируемости, адаптации и преодоления межведомственных барьеров. Во многих публикациях [5, 6, 8, 10, 13, 14, 16, 19] звучит тема «масштабирования на другие регионы/страны», «адаптации» и «практического внедрения». Также подчеркивается необходимость межведомственного взаимодействия [2] и создания «единых платформ» [1, 8]. Все это указывает на то, что авторы-разработчики осознают необходимость создания гибких решений, которые можно настроить под специфику разных городов и стран, обеспечения взаимодействия между МЧС России, скорой помощью, полицией и другими службами экстренного реагирования, а также разработки удобного программного обеспечения [18] и проведения пилотных проектов [5] для демонстрации эффективности и преодоления «сопротивления изменениям» на местах.

Общий вывод по критерию «ограничения/допущения – степень реализации – перспективы развития»:

- 1) Проанализированные модели являются ценным инструментом для стратегического планирования в спокойных, предсказуемых условиях на основе ретроспективных данных. Однако фундаментальные ограничения и принятые при формализации допущения делают их малоприспособленными для оперативного управления в реальном времени и планирования действий в условиях нестабильности, быстро меняющейся обстановки, что характерно для реагирования на ЧС.

- 2) На основе списка можно наблюдать широкий спектр научной деятельности – от чисто теоретических изысканий до практически внедренных и нормативно закрепленных

систем. Преобладающее большинство публикаций [2, 3, 5–9, 11–13, 16, 19, 20] описывают разработки, находящиеся на теоретическом или раннем экспериментальном этапе. Значительно меньшая часть [1, 10, 14, 15, 17, 18] демонстрирует элементы практической реализации, и лишь единицы [1, 18] указывают на полноценное внедрение в деятельность реальных служб. Однако все же истинная практическая ценность отдельных проанализированных публикаций заключается в их системном подходе, а не в идеальном алгоритме.

3) Эволюция задач размещения АСФ движется от изолированных, статических, детерминированных и чисто математических моделей к комплексным, динамическим, интеллектуальным и социально-ориентированным системам поддержки принятия решений, глубоко интегрированным в городскую и цифровую инфраструктуру.

Заключение

Проведенный выше критериальный анализ убедительно показал, что представленный список Тор-20 является не случайным набором публикаций, а достаточно целостной картиной исследовательских усилий, направленных на создание научного фундамента для кардинального повышения эффективности работы спасательных и экстренных служб. Все они посвящены разрешению главного противоречия – между потребностью в рациональном размещении последних с учетом различных факторов в отсутствие надлежащего научно-методического и практико-ориентированного инструментария решения такого класса задач, что позволяет говорить об их релевантности.

Несмотря на разнообразие служб, доминирующим объектом оптимизации все же являются пожарно-спасательные подразделения, что указывает на их центральную роль в системе экстренного реагирования и, возможно, на более высокую зрелость методов моделирования именно для этой области. Так, только прямое упоминание пожарно-спасательных служб, гарнизонов и станций встречается чаще всего – семь раз [2, 5, 14, 17, 19, 20]. Это свидетельствует о том, что именно для этих служб задача рационального размещения исторически была наиболее актуальной из-за жесткой зависимости последствий пожара от времени прибытия. Также, вероятно, для пожарных служб накоплен наибольший объем релевантных фактологических данных (история вызовов, время прибытия), необходимых для построения точных моделей. Таким образом, данная конкретная предметная область является своеобразным «полигоном» для отработки оптимизационных моделей, которые в дальнейшем могут быть адаптированы для других служб.

Результаты исследований демонстрируют, что современные методы оптимизации позволяют существенно улучшить эффективность работы АСФ путем минимизации времени реагирования, максимизации зон покрытия за счет рационального распределения ресурсов. Наибольшую эффективность показывают комбинированные подходы, такие как интеграция ГИС с алгоритмами машинного обучения и стохастическим моделированием. Однако внедрение этих методов в практику пожарной безопасности сталкивается с целым рядом проблемных вопросов, связанных с эффективностью решения задачи оптимального/рационального размещения АСФ.

Во-первых, чем измерять эффективность решения? Вопрос далеко не праздный: действительно, модификации целевых функций измеряются десятками, а количество показателей и критериев оптимальности только в проанализированных работах приближается к сотне. Сюда же можно отнести проблему количества и качества учитываемых в моделях факторов географического, социально-экономического, инфраструктурного и иного толка. То есть, актуальным является доказательство их необходимого и достаточного состава, для чего потребуются глубокое изучение специфики решения задачи оптимального/рационального размещения для конкретной экстренной службы (в нашем случае – пожарной) [21–23].

Во-вторых, касательно эффективности комбинирования методов. Если интеграция ГИС со стохастическим (имитационным) моделированием хорошо зарекомендовала себя для решения задачи оптимального/рационального размещения АСФ [24–26], то установление границ применимости методов машинного обучения в контексте предметной области пока находится в стадии исследования. А вопрос о выборе и обосновании конкретного алгоритма, а тем более определение условий их совместной с ИС+ГИС эффективной работы еще даже не поднимался. Гипотетически высокую эффективность для решения задачи оптимального/рационального размещения АСФ показывают генетические алгоритмы [13, 14], существуют значительные наработки по их применению и принципиально в иных областях знания, например в сфере информационной безопасности [27].

В-третьих, хотя представленный в релевантных работах инструментарий демонстрирует симбиоз математических моделей, алгоритмов оптимизации и современных программных средств, однако степень его реализации для потребителя этой наукоемкой продукции – лица, принимающего решения (об оптимальном/рациональном размещении), – оставляет желать лучшего [28]. Причин здесь несколько: низкая адаптируемость и масштабируемость, неудачный интерфейс [29] как оператора, так и лица, принимающего решения, высокая степень их субъективности и др. Их устранение видится на путях создания некой автоматизированной методики, базирующейся на специализированном программном комплексе с интеллектуальной компонентой и целеориентированным интерфейсом [30–32].

Вышеизложенное подчеркивает необходимость дальнейшего совершенствования методологической и технологической базы, также практического переориентирования современных оптимизационных подходов, что потребует научных изысканий, в частности, для поиска удовлетворительных ответов на поднятые проблемные вопросы.

Список источников

1. Проблемно-ориентированные имитационные системы для автоматизированного проектирования и стратегического управления экстренными и аварийно-спасательными службами городов / Е.М. Алехин [и др.] // Вестник РАЕН. 2012. Т. 12. № 3. С. 27–34. EDN: TXIKGX.
2. Апарин А.А. Определение предпочтительных территорий пожарно-спасательного гарнизона при планировании размещения систем видеомониторинга // «Безопасность и охрана труда» (БИОТ-2022): сб. трудов конкурса НИР. Москва, 2022. С. 6–9. EDN: TUSTDM.
3. Бирюков Д.С., Заславская О.В. Оптимальное размещение и комплектация аварийно-спасательных служб для реагирования на чрезвычайные ситуации // Вестник Национального технического университета Харьковский политехнический институт. 2013. № 39 (1012). С. 3–8. EDN RCNMPZ.
4. Гусев С.А. Оптимальное расположение спасательных служб // Транспортное дело России. 2017. № 6. С. 72–79. EDN: YMTHWJ.
5. Технологии математического моделирования для определения оптимальных мест дислокации специализированных пожарно-спасательных частей / В.В. Харин [и др.] // Мониторинг, моделирование и прогнозирование опасных природных явлений и чрезвычайных ситуаций: сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф. Красноярск, 2022. С. 12–18. EDN: FXHTPE.
6. Матюшев П.А., Зарипова С.Н. О моделировании оптимального размещения аварийно-спасательных формирований на территории субъекта Российской Федерации // Моделирование сложных процессов и систем: сб. трудов секции № 12 XXXI Междунар. науч.-практ. конф. Химки, 2021. С. 5–16. EDN: MBZYVE.
7. Обоснование рациональных мест размещения аварийно-спасательных сил на основе риск-ориентированных подходов / Р.А. Дурнев [и др.] // Проблемы анализа риска. 2025. Т. 22. № 2. С. 58–65. EDN CCFUXS.
8. Analysis of the location of rescue ambulance dispatch bases: a case study in Rio de Janeiro, Brazil / T. Ferrari [et al.] // Geographical Analysis. 2018. Vol. 50. № 4. P. 397–421.

9. Akbari A., Eiselt H.A., Pelot R.A. Maritime search and rescue location analysis considering multiple criteria, with simulated demand // *INFOR: Information Systems and Operational Research*. 2018. Vol. 56. №. 1. P. 92–114.
10. Dahlgren A., Harrie L., Axelsson A. Planning rescue services with non-stationary rescue units // *Fire technology*. 2009. Vol. 45. P. 239–255.
11. Chen L., Miller-Hooks E. Optimal team deployment in urban search and rescue // *Transportation Research Part B: Methodological*. 2012. Vol. 46. № 8. P. 984–999.
12. A Multi-Objective Decision Model of Traffic Rescue Service Site Location on Road / G. Chai [et al.] // *ICCTP 2009: Critical Issues in Transportation Systems Planning, Development, and Management*. 2009. P. 1–7.
13. Cheng Yu.H., Liang Z.X. A strategic planning model for the railway system accident rescue problem // *Transportation research part E: logistics and transportation review*. 2014. Vol. 69. P. 75–96.
14. Clarke A., Miles J.C. Strategic Fire and Rescue Service decision making using evolutionary algorithms // *Advances in Engineering Software*. 2012. Vol. 50. P. 29–36.
15. Liu M., Yang D., Hao F. Optimization for the Locations of Ambulances under Two-Stage Life Rescue in the Emergency Medical Service: A Case Study in Shanghai, China // *Mathematical Problems in Engineering*. 2017. № 1. P. 1830480.
16. Research on the location model of emergency rescue facilities in the city disaster prevention / Q.Z. Sun [et al.] // *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vol. 744. P. 1745–1748.
17. Andersson T., Särndqvist S. Planning for effective use of fire and rescue service resources // *Interflam 2007: 11th International Fire Science & Engineering Conference, London, 2007*. P. 1561–1566.
18. Pelot R., Akbari A., Li L. Vessel location modeling for maritime search and rescue // *Applications of location analysis*. 2015. P. 369–402.
19. Dey A., Heger A., England D. Urban fire station location planning using predicted demand and service quality index // *International Journal of Data Science and Analytics*. 2023. Vol. 15. № 1. P. 33–48.
20. A new partial coverage locating model for cooperative fire services / J. Wang [et al.] // *Information Sciences*. 2016. Vol. 373. P. 527–538.
21. Ахунова Д.Г., Буйневич М.В., Власов С.С. Обеспечение пожарной безопасности производственных объектов на основе информатизации риск-менеджментного подхода // *Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты)*. 2020. № 1 (33). С. 4–11.
22. Буйневич М.В., Ахунова Д.Г., Ярошенко А.Ю. Комплексный метод решения типовой задачи риск-менеджмента в инфологической среде (на примере ранжирования требований пожарной безопасности). Часть 1 // *Науч.-аналит. журн. «Вестник С.-Петерб. ун-та ГПС МЧС России»*. 2020. № 3. С. 88–99.
23. Буйневич М.В., Ахунова Д.Г., Ярошенко А.Ю. Комплексный метод решения типовой задачи риск-менеджмента в инфологической среде (на примере ранжирования требований пожарной безопасности). Часть 2 // *Науч.-аналит. журн. «Вестник С.-Петерб. ун-та ГПС МЧС России»*. 2020. № 4. С. 78–89.
24. Ахунова Д.Г. Имитационная модель поддержки принятия решений по размещению пожарно-спасательных подразделений на территории Санкт-Петербурга // *Науч.-аналит. журн. «Вестник С.-Петерб. ун-та ГПС МЧС России»*. 2023. № 3. С. 152–163.
25. Буйневич М.В., Пелех М.Т., Ахунова Д.Г. Развитие пожарной охраны мегаполиса с использованием технологии имитационного моделирования // *Науч.-аналит. журн. «Вестник С.-Петерб. ун-та ГПС МЧС России»*. 2019. № 3. С. 150–156.
26. Буйневич М.В., Шуракова Д.Г., Вострых А.В. Двухуровневая кластеризация субоптимальных зон прикрытия г. Костромы подразделениями МЧС России при возникновении происшествий // *Науч.-аналит. журн. «Вестник С.-Петерб. ун-та ГПС МЧС России»*. 2018. № 2. С. 121–127.

27. Израилов К.Е. Применение генетических алгоритмов для декомпиляции машинного кода // Защита информации. Инсайд. 2020. № 3 (93). С. 24–30.
28. Ахунова Д.Г., Матвеев А.В. О научно-методическом обеспечении локации аварийно-спасательных служб в Арктической зоне российской федерации // Техносферная безопасность в Арктике: сб. материалов VIII Междунар. науч.-практ. конф. Санкт-Петербург, 2025. С. 11–15.
29. Ахунова Д.Г., Вострых А.В., Курта П.А. Оценка пользовательского интерфейса информационных систем посредством моделей качества программного обеспечения // Информатизация и связь. 2020. № 2. С. 127–135.
30. Ахунова Д.Г. Программный модуль определения оптимальных маршрутов доставки сил и средств в зону происшествий на территории Санкт-Петербурга // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). 2023. № 3 (47). С. 36–43.
31. Ахунова Д.Г., Вострых А.В. Преимущества перехода на целеориентированное проектирование интерфейсов для мобильных пользователей информационных систем // Модернизация информационной инфраструктуры для сетей 5G/IMT 2020 и для других перспективных технологий в интересах трансформации регионов РОСИНФОКОМ-2019: сб. науч. статей. Санкт-Петербург, 2019. С. 5–9.
32. Вострых А.В., Шуракова Д.Г. Компоненты специальной информационной технологии построения оптимальных маршрутов // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании: сб. трудов VII Междунар. науч.-техн. и науч.-метод. конф. Санкт-Петербург, 2018. С. 213–218.

References

1. Problemno-orientirovannye imitacionnye sistemy dlya avtomatizirovannogo proektirovaniya i strategicheskogo upravleniya ekstrennymi i avarijno-spasatel'nymi sluzhbam gorodov / E.M. Alekhin [i dr.] // Vestnik RAEN. 2012. T. 12. № 3. S. 27–34. EDN: TXIKGX.
2. Aparin A.A. Opredelenie predpochtitel'nyh territorij pozharo-spasatel'nogo garnizona pri planirovanii razmeshcheniya sistem videomonitoringa // «Bezopasnost' i ohrana truda» (BIOT-2022): sb. trudov konkursa NIR. Moskva, 2022. S. 6–9. EDN: TUSTDM.
3. Biryukov D.S., Zaslavskaya O.V. Optimal'noe razmeshchenie i komplektaciya avarijno-spasatel'nyh sluzhb dlya reagirovaniya na chrezvychajnye situacii // Vestnik Nacional'nogo tekhnicheskogo universiteta Har'kovskij politekhnicheskij institut. 2013. № 39 (1012). S. 3–8. EDN RCNMPZ.
4. Gusev S.A. Optimal'noe raspolozhenie spasatel'nyh sluzhb // Transportnoe delo Rossii. 2017. № 6. S. 72–79. EDN: YMTHWJ.
5. Tekhnologii matematicheskogo modelirovaniya dlya opredeleniya optimal'nyh mest dislokacii specializirovannyh pozharo-spasatel'nyh chastej / V.V. Harin [i dr.] // Monitoring, modelirovanie i prognozirovanie opasnyh prirodnyh yavlenij i chrezvychajnyh situacij: sb. materialov Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Krasnoyarsk, 2022. S. 12–18. EDN: FXHTPE.
6. Matyushev P.A., Zaripova S.N. O modelirovanii optimal'nogo razmeshcheniya avarijno-spasatel'nyh formirovanij na territorii sub"ekta Rossijskoj Federacii // Modelirovanie slozhnyh processov i sistem: sb. trudov sekcii № 12 XXXI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Himki, 2021. S. 5–16. EDN: MBZYVE.
7. Obosnovanie racional'nyh mest razmeshcheniya avarijno-spasatel'nyh sil na osnove risk-orientirovannyh podhodov / R.A. Durnev [i dr.] // Problemy analiza riska. 2025. T. 22. № 2. S. 58–65. EDN CCFUXS.
8. Analysis of the location of rescue ambulance dispatch bases: a case study in Rio de Janeiro, Brazil / T. Ferrari [et al.] // Geographical Analysis. 2018. Vol. 50. № 4. P. 397–421.
9. Akbari A., Eiselt H.A., Pelot R.A. Maritime search and rescue location analysis considering multiple criteria, with simulated demand // INFOR: Information Systems and Operational Research. 2018. Vol. 56. №. 1. P. 92–114.

10. Dahlgren A., Harrie L., Axelsson A. Planning rescue services with non-stationary rescue units // *Fire technology*. 2009. Vol. 45. P. 239–255.
11. Chen L., Miller-Hooks E. Optimal team deployment in urban search and rescue // *Transportation Research Part B: Methodological*. 2012. Vol. 46. № 8. P. 984–999.
12. A Multi-Objective Decision Model of Traffic Rescue Service Site Location on Road / G. Chai [et al.] // *ICCTP 2009: Critical Issues in Transportation Systems Planning, Development, and Management*. 2009. P. 1–7.
13. Cheng Yu.H., Liang Z.X. A strategic planning model for the railway system accident rescue problem // *Transportation research part E: logistics and transportation review*. 2014. Vol. 69. P. 75–96.
14. Clarke A., Miles J.C. Strategic Fire and Rescue Service decision making using evolutionary algorithms // *Advances in Engineering Software*. 2012. Vol. 50. P. 29–36.
15. Liu M., Yang D., Hao F. Optimization for the Locations of Ambulances under Two-Stage Life Rescue in the Emergency Medical Service: A Case Study in Shanghai, China // *Mathematical Problems in Engineering*. 2017. № 1. P. 1830480.
16. Research on the location model of emergency rescue facilities in the city disaster prevention / Q.Z. Sun [et al.] // *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vol. 744. P. 1745–1748.
17. Andersson T., Särndqvist S. Planning for effective use of fire and rescue service resources // *Interflam 2007: 11th International Fire Science & Engineering Conference*, London, 2007. P. 1561–1566.
18. Pelot R., Akbari A., Li L. Vessel location modeling for maritime search and rescue // *Applications of location analysis*. 2015. P. 369–402.
19. Dey A., Heger A., England D. Urban fire station location planning using predicted demand and service quality index // *International Journal of Data Science and Analytics*. 2023. Vol. 15. № 1. P. 33–48.
20. A new partial coverage locating model for cooperative fire services / J. Wang [et al.] // *Information Sciences*. 2016. Vol. 373. P. 527–538.
21. Ahunova D.G., Bujnevich M.V., Vlasov S.S. Obespechenie pozharnoj bezopasnosti proizvodstvennyh ob"ektov na osnove informatizacii risk-menedzhmentnogo podhoda // *Prirodnye i tekhnogennye riski (fiziko-matematicheskie i prikladnye aspekty)*. 2020. № 1 (33). S. 4–11.
22. Bujnevich M.V., Ahunova D.G., Yaroshenko A.Yu. Kompleksnyj metod resheniya tipovoj zadachi risk-menedzhmenta v infologicheskoy srede (na primere ranzhirovaniya trebovanij pozharnoj bezopasnosti). Chast' 1 // *Nauch.-analit. zhurn. «Vestnik S.-Peterb. un-ta GPS MCHS Rossii»*. 2020. № 3. S. 88–99.
23. Bujnevich M.V., Ahunova D.G., Yaroshenko A.Yu. Kompleksnyj metod resheniya tipovoj zadachi risk-menedzhmenta v infologicheskoy srede (na primere ranzhirovaniya trebovanij pozharnoj bezopasnosti). Chast' 2 // *Nauch.-analit. zhurn. «Vestnik S.-Peterb. un-ta GPS MCHS Rossii»*. 2020. № 4. S. 78–89.
24. Ahunova D.G. Imitacionnaya model' podderzhki prinyatiya reshenij po razmeshcheniyu pozharno-spasatel'nyh podrazdelenij na territorii Sankt-Peterburga // *Nauch.-analit. zhurn. «Vestnik S.-Peterb. un-ta GPS MCHS Rossii»*. 2023. № 3. S. 152–163.
25. Bujnevich M.V., Pelekh M.T., Ahunova D.G. Razvitie pozharnoj ohrany megapolisa s ispol'zovaniem tekhnologii imitacionnogo modelirovaniya // *Nauch.-analit. zhurn. «Vestnik S.-Peterb. un-ta GPS MCHS Rossii»*. 2019. № 3. S. 150–156.
26. Bujnevich M.V., Shurakova D.G., Vostryh A.V. Dvuhurovnevaya klasterizaciya suboptimal'nyh zon prikrytiya g. Kostromy podrazdeleniyami MCHS Rossii pri vozniknovenii proisshestvij // *Nauch.-analit. zhurn. «Vestnik S.-Peterb. un-ta GPS MCHS Rossii»*. 2018. № 2. S. 121–127.
27. Izrailov K.E. Primenenie geneticheskikh algoritmov dlya dekompilyacii mashinnogo koda // *Zashchita informacii. Insajd*. 2020. № 3 (93). S. 24–30.

28. Ahunova D.G., Matveev A.V. O nauchno-metodicheskom obespechenii lokacii avarijno-spasatel'nyh sluzhb v Arkticheskoj zone rossijskoj federacii // Tekhnosfernaya bezopasnost' v Arktike: sb. materialov VIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Sankt-Peterburg, 2025. S. 11–15.

29. Ahunova D.G., Vostryh A.V., Kurta P.A. Ocenka pol'zovatel'skogo interfejsa informacionnyh sistem posredstvom modelej kachestva programmogo obespecheniya // Informatizaciya i svyaz'. 2020. № 2. S. 127–135.

30. Ahunova D.G. Programmnyj modul' opredeleniya optimal'nyh marshrutov dostavki sil i sredstv v zonu proisshestvij na territorii Sankt-Peterburga // Prirodnye i tekhnogennye riski (fiziko-matematicheskie i prikladnye aspekty). 2023. № 3 (47). S. 36–43.

31. Ahunova D.G., Vostryh A.V. Preimushchestva perekhoda na celeorintirovannoe proektirovanie interfejsov dlya mobil'nyh pol'zovatelej informacionnyh sistem // Modernizaciya informacionnoj infrastruktury dlya setej 5G/IMT 2020 i dlya drugih perspektivnyh tekhnologij v interesah transformacii regionov ROSINFOKOM-2019: sb. nauch. statej. Sankt-Peterburg, 2019. S. 5–9.

32. Vostryh A.V., Shurakova D.G. Komponenty special'noj informacionnoj tekhnologii postroeniya optimal'nyh marshrutov // Aktual'nye problemy infotelekkommunikacij v nauke i obrazovanii: sb. trudov VII Mezhdunar. nauch.-tekhn. i nauch.-metod. konf. Sankt-Peterburg, 2018. S. 213–218.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 05.08.2025; одобрена после рецензирования: 02.09.2025;

принята к публикации: 04.09.2025

Information about the article:

The article was submitted to the editorial office: 05.08.2025; approved after review: 02.09.2025;

accepted for publication: 04.09.2025

Сведения об авторах:

Ахунова Дарья Геннадьевна, адъюнкт Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), e-mail: shurakova.darya@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0009-3361-3464>, SPIN-код: 4802-3758

Information about authors:

Akhunova Daria G., adjunct of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), e-mail: shurakova.darya@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0009-3361-3464>, SPIN: 4802-3758