

Научная статья
УДК 614.84, 656.11, 519.168
doi:10.34987/vestnik.sibpsa.2025.11.87.012

Обзор современных зарубежных подходов к решению задач дислокации пожарных подразделений

*Сергей Валерьевич Бабенышев*¹

*Алексей Николаевич Бату́ро*²

*Олег Сергеевич Малютин*³

*Евгений Николаевич Матеров*⁴

*Иван Юрьевич Сергеев*⁵

^{1,2,3,4,5} Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, г. Железногорск, Россия

¹<https://orcid.org/0000-0002-4298-2036>

³<https://orcid.org/0000-0001-5543-1324>

⁴<https://orcid.org/0000-0002-3916-0613>

Автор, ответственный за переписку: Сергей Валерьевич Бабенышев,
sergei.babyonyshev@mail.ru

Аннотация. В статье представлен аналитический обзор современных зарубежных подходов к решению задачи оптимального размещения пожарных подразделений и определения районов выезда. Проведён сравнительный анализ исследований из разных стран по ключевым аспектам: используемое программное обеспечение, применяемые математические модели и методы, источники геоданных и критерии эффективности размещения. Особое внимание уделено применениям в зарубежных исследованиях геоинформационных систем (ГИС) в расчётах временных и пространственных параметров движения по дорожной сети, геопространственном анализе и визуализации результатов. Отмечена тенденция к использованию комбинированных, в том числе вероятностно-временных и нечётких, критериев, а также метаэвристических алгоритмов оптимизации. Рассмотрены проблемы применимости зарубежных подходов в российских условиях, связанные с ограничениями доступа к коммерческому ПО и использованием открытых геоданных, а также ограничениям, связанным с требованиями информационной безопасности. Анализ охватывает исследования 2006-2023 годов и демонстрирует эволюцию методов от классических моделей размещения к комплексным, многокритериальным решениям, интегрирующим ГИС, данные о пожарных рисках и социальные факторы.

Ключевые слова: дислокация пожарных подразделений, критерии эффективного размещения, геоинформационные системы

Для цитирования: Бабенышев С.В., Бату́ро А.Н., Малютин О.С., Матеров Е.Н., Сергеев И.Ю. Обзор современных зарубежных подходов к решению задач дислокации пожарных подразделений // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2025. № 3 (38). С. 127-141. <https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2025.11.87.012>.

Original article.

Review of modern foreign approaches to solving the problems of deployment of fire departments

*Sergey V. Babenyshev*¹

*Alexey N. Baturo*²

*Oleg S. Malyutin*³

*Evgeny N. Materov*⁴

*Ivan Yu. Sergeev*⁵

^{1,2,3,4,5}*Siberian Fire and Rescue Academy EMERCOM of Russia, Zheleznogorsk, Russia*

¹<https://orcid.org/0000-0002-4298-2036>

³<https://orcid.org/0000-0001-5543-1324>

⁴<https://orcid.org/0000-0002-3916-0613>

Corresponding author: *Sergey V. Babenyshev, sergei.babyonyshev@mail.ru*

Abstract. The article presents an analytical review of modern foreign approaches to solving the problem of optimal placement of fire brigades and determining departure areas. A comparative analysis of studies from different countries is carried out on key aspects: the software used, the mathematical models and methods applied, the sources of digital geographical data and the criteria for the effectiveness of placement. Particular attention is paid to the use of geographic information systems (GIS) in foreign studies in calculating the temporal and spatial parameters of traffic on the road network, geospatial analysis and visualization of results. A tendency towards the use of combined criteria, including probabilistic-temporal and fuzzy ones, as well as metaheuristic optimization algorithms is noted. The problems of applicability of foreign approaches in Russian conditions associated with restrictions on access to commercial software and the use of open geographic data, as well as restrictions related to information security requirements are considered. The analysis covers studies from 2006 to 2023 and demonstrates the evolution of methods from classical placement models to complex, multi-criteria solutions integrating GIS, fire risk data and social factors.

Keywords: location-allocation of fire brigades, fire safety requirements, geographic information systems

For citation: Babenyshev S.V., Baturo A.N., Malyutin O.S., Materov E.N., Sergeev I.Yu. Review of modern foreign approaches to solving the problems of deployment of fire departments // Siberian Fire and Rescue Bulletin. 2025. № 3 (38). С. 127-141. (In Russ.) <https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2025.11.87.012>.

Введение

С ростом доступных вычислительных мощностей, поступательным развитием геоинформационных технологий и появлением новых источников геопространственных данных стало возможным проводить более точное и количественно обоснованное моделирование аспектов пожарной безопасности в городах и на сельских территориях, в частности, планирование дислокации пожарных подразделений и определения оптимальных районов выезда.

В мировой практике в городском противопожарном планировании наблюдается значительно разнообразие подходов к определению расположения пожарных подразделений [1]. Цель данной статьи состоит в систематизация и анализе современных зарубежных подходов и ГИС-технологий, для определения возможности применения к задаче размещения пожарных подразделений в России. Для достижения этой цели в статье:

- проводится сравнительный анализ зарубежных исследований по списку из отобранных критериев;
- критически рассматриваются различные аспекты этих исследований для определения применимости их в российских условиях.

Статья структурирована следующим образом: после введения, в разделе «Материалы и методы», обосновывается выбор материалов и критериев для сравнительного обзора. В разделе «Результаты» проводится сравнительный анализ по выбранным критериям, далее следует обобщающая дискуссия и выводы относительно возможности применения в российских условиях.

Материалы и методы

В качестве основного метода для выявления тенденций в подходах к размещению пожарных подразделений в зарубежной литературе используется метод сравнительного выборочного анализа по хронологической глубине, охватывающей недавний период быстрого развития геоинформационных технологий.

Для подробного сравнительного анализа зарубежных исследований отобраны 16 общедоступных статей [2-17], содержащих конкретные примеры расчетов на территориях. Тем самым оказались представлены регионы Европы (Великобритания [4], Бельгия [5]), Среднего Востока (ОАЭ [2], Ирак [8, 12], Иран [9], Турция [6, 13]), Китая [10, 11, 14, 15, 17] и США [16]. Рассмотренные в отобранных исследованиях территории характеризуются широким спектром географических и социальных условий. За исключением статьи [2] 1998 года, все остальные отобранные статьи дают хронологический срез с 2006 по 2023 год, для выявления именно новых тенденций в подходах к размещению пожарных подразделений.

В качестве критериев для сравнения, представляют практический интерес следующие четыре аспекта:

- использованное программное обеспечение, и решаемые с его помощью конкретные задачи исследования;
- использованные математические методы, в частности, соотношение между классическими методами теории размещения объектов обслуживания и более современными методами: включая эвристические, биоэвристические, генетические алгоритмы и т.д.;
- источники геоданных, в частности соотношение закрытых, коммерческих и открытых (в том числе, так называемых, краудсорсинговых – crowd-sourced) источников данных;
- применяемые критерии эффективности размещения пожарных подразделений: одно- или многокритериальные, чисто временные, вероятностно-временные, пространственные, нечеткие или комбинации вышеперечисленного.

Охватываемый в обзоре хронологический период характеризуется «демократизацией» использования геопространственных инструментов. До начала этого периода, использование таких инструментов и источников геоданных было прерогативой специалистов в ГИС-технологиях, однако развитие этих технологий открыло возможность их применения для широкого круга неспециалистов, привносящих свой опыт и знание нюансов своих предметных областей.

Заметим также, что характеристика «более современные» в пункте 2, не означает, по умолчанию, «более эффективные», а означает только что эти методы получили развитие относительно недавно, при этом получаемые ими решения обычно субоптимальны, в отличии от классических методов, которые дают наилучшие решения.

Основные результаты

Задача оптимального размещения пожарных подразделений является частным случаем более общей задачи размещения (location-allocation problem). В общей постановке эта задача рассматривает оптимальные варианты размещения на территории *станций* обслуживания (facilities) для обслуживания *объектов* обслуживания (demand points). Объекты обслуживания приписываются (allocated) к размещаемым станциям обслуживания так, чтобы выполнялись определенные условия – *стандарты* обслуживания (например, время выезда до объекта должно

быть не более 10 мин). Оптимальность рассматривается в виде минимальности или максимальности значений некоторой *целевой* функции (objective function), например, минимальности количества станций обслуживания, необходимых для соблюдения стандарта обслуживания для всех защищаемых объектов. В контексте размещения пожарных подразделений, наравне с термином «стандарт обслуживания» в этой статье будет использоваться термин «критерий эффективности размещения» или просто «критерий размещения».

Более ранние модели, рассматриваемые в теории размещения, касались вопросов производственной и коммерческой логистики, как, например, задача о *P*-медиане (*P*-median model) [18], в том числе и в конкурентной среде: задача о *P*-центре (*P*-center model) [19]. Для описания задач размещения объектов экстренных служб более подходящими оказались различные варианты других задач: LSCP [20] и MCLP [21].

LSCP (Location Set Covering Problem) – задача нахождения минимального количества станций обслуживания (пожарных подразделений, в нашем случае) и мест их размещения при безусловном выполнении заданного критерия обслуживания. Геометрически эту задачу можно проиллюстрировать следующим простым примером (Рис.1а):

- каждое возможное место дислокации станции обслуживания будем задавать условным кругом (не связанным с географическими координатами или расстояниями);
- в этот круг поместим точки – защищаемые объекты, которые могли бы обслуживаться из этого месторасположения, с выполнением условий критерия обслуживания (например, расчетное время выезда не более 10 минут или расстояние до объекта не более 1,5 км, или более сложные условия);
- взаимное расположение точек на диаграмме не связано с реальным географическим расположением объектов на территории, важно лишь попадает ли точка-объект в допустимую область обслуживания при соответствующей дислокации станции обслуживания.

Задача состоит в том, чтобы выбрать наименьшее количество кругов-местоположений, которые накрывали бы все точки – защищаемые объекты (Рис.1б).

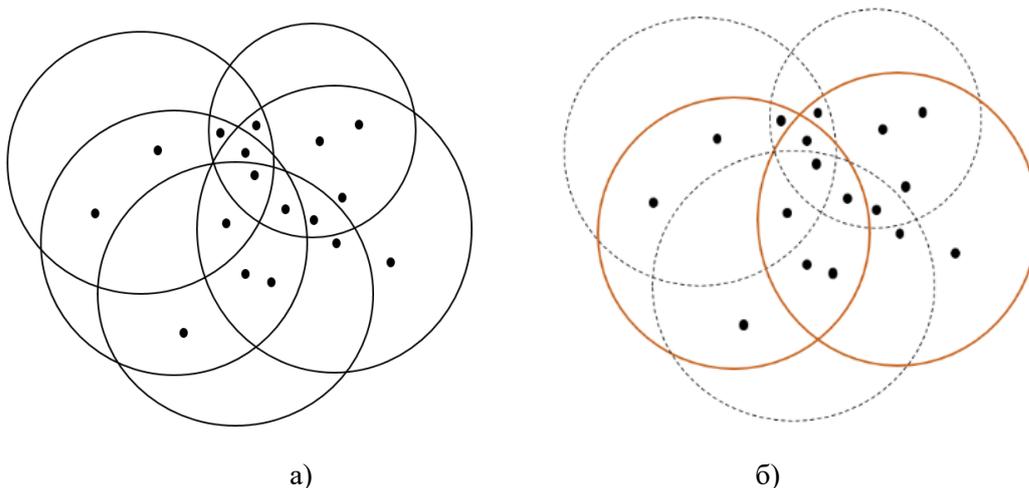


Рис.1. Иллюстрация к решению задачи LSCP:

а) каждый круг условно соответствует возможному расположению станции обслуживания, точки внутри круга – защищаемые объекты, расположение которых удовлетворяют критерию обслуживания;

б) если выбрать два расположения, соответствующие оранжевым кругам, то все объекты защищены, в соответствии с критерием обслуживания

MCLP (Maximum Coverage Location Problem) – размещение заданного количества станций для максимального охвата объектов согласно стандарту обслуживания. В отличие от формулировки LSCP, здесь количество станций обслуживания фиксировано заранее – задача

состоит в том, как с помощью этого количества защитить наибольшее количество объектов обслуживания, в частности, допускаются решения, в которых не для всех защищаемых объектов выполняется стандарт обслуживания. На Рис.2, приведена иллюстрация решения задачи MCLP, когда количество размещаемых станций обслуживания равно двум.

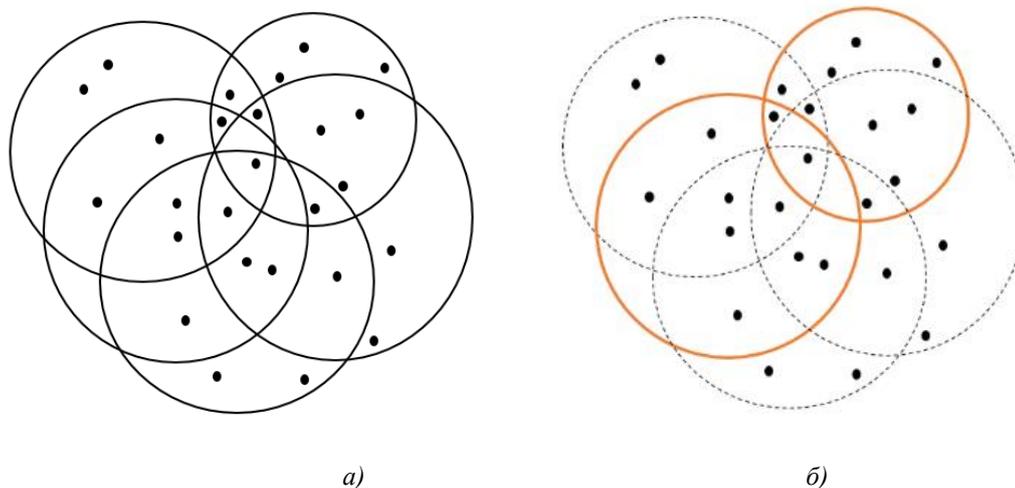


Рис.2. Иллюстрация к решению задачи MCLP. Как и раньше:

- а) каждый круг условно соответствует возможному расположению станции обслуживания, точки внутри круга – защищаемые объекты, удовлетворяющие стандарту обслуживания;
 б) если разрешено выбрать только два расположения, то оранжевым круги, соответствуют оптимальному решению

В такой формулировке видно, что решения обеих задач LSCP и MCLP носят переборный характер и, соответственно, сложность расчета очень быстро растёт с ростом количества возможных месторасположений станций и объектов обслуживания. Если ставить задачу защиты всей городской территории, в качестве объектов обслуживания можно выбрать узлы дорожной сети – перекрестки, съезды, разветвления, конечные точки и т.п., тогда таких объектов становится очень много, и практическая разрешимость задачи зависит от количества возможных месторасположений станций обслуживания.

Для задач LSCP и MCLP можно выделить свои предпочтительные условия применимости (Табл.1).

Табл.1. Сравнение подходов LSCP и MCLP

Критерий	Задача полного покрытия (LSCP)	Задача максимального покрытия (MCLP)
Цель	100% покрытие	Максимальное покрытие при ограничениях
Затраты	Высокие затраты	Оптимизация под ограниченный бюджет
Использование ГИС	Анализ всех возможных локаций	Приоритизация обслуживания районов с высоким спросом
Адаптируемость под дополнительные требования	Менее гибкий	Более адаптивный

Таким образом, MCLP более подходит для территорий с ограниченными ресурсами, тогда как LSCP подходит для ситуаций, где безопасность является абсолютным приоритетом.

Математические методы. Относительно разработки математических методов решения задач LSCP и MCLP, можно выделить два, частично перекрывающихся, временных периода:

Классические математические методы, которые обычно сводятся к решению оптимизационной задачи целочисленного линейного программирования – активно

исследовались в начальный период развития теории размещения объектов обслуживания. В настоящее время их развитие, в основном, ограничивается совершенствованием соответствующих решающих программ – солверов.

Позднее были предложен ряд других подходов, таких как различные эвристические и биоэвристические методы (метод отжига, алгоритм муравьиной кучи – ANT и др.), генетические алгоритмы (GA) и ряд других. Эвристические и биоэвристические методы вместе иногда называют метаэвристическими.

Необходимость поиска новых методов частично обосновывалась тем, что задача размещения в классической постановке является NP-полной, поэтому существующие точные методы решения, как уже отмечалось, носят переборный характер и, соответственно, имеют экспоненциальную сложность, то есть теоретически неприменимы в сложных сценариях использования, в частности в сочетании с стандартами обслуживания, которые включают несколько критериев. В то же время метаэвристические методы, не являясь точными, могут предлагать не самое оптимальное размещение, но делают это за практически приемлемое время.

По соотношению между используемыми критериями размещения (стандартами обслуживания) и применяемыми методами оптимизации (Табл.2) видно, что генетические и метаэвристические алгоритмы в основном применялись в сочетании с многокритериальными критериями эффективности размещения [3, 4, 6, 8, 9].

Табл.2. Виды алгоритмов и многокритериальная оптимизация

Источник страна, территория	Алгоритм	Многокритериальный стандарт обслуживания
[2] ОАЭ, Дубаи	Целочисленное линейное программирование	Да
[3] Singapore	ANT-алгоритм	Да
[4] Великобритания, графство Дербишир	GA	Да
[5] Бельгия	нейросеть	Нет
[8] Турция, муниципальный округ Самсун	GA	Да
[9] Иран, Тегеран, округ 11	GA	Да
[11] Китай, район Шанхайской экономической зоны	FAHP (процесс нечеткой оценки по аналитической иерархии)	Да
[13] Турция, Стамбул	нечеткие оценки	Да
[14] Китай, Нанкин	GA	Нет
[15] Китай, Ухань	AHP + WLC: (оценка важности факторов по аналитической иерархии и визуализация взвешенной суммы факторов)	Да

Используемые ГИС инструменты

Программные продукты ГИС использовались в исследованиях в трёх основных целях: сетевой и геопространственный анализ (анализ доступности, упрощение топологии графа дорожной сети, моделирование зон обслуживания) [6, 10, 11, 14], для расчёта кратчайших

расстояний или скорейших путей по дорожной сети [6, 10, 14] и для визуализации результатов [5, 6, 9-11, 14, 15].

Коммерческая ArcGIS ESRI [6, 7, 9-11, 13-15] остаётся безусловным лидером среди используемых ГИС-платформ, ранее также использовалась другая коммерческая GIS – Mapinfo [5].

Сетевой анализ и расчет расстояний по дорожной сети может быть разбит на следующие этапы:

- Построение ориентированного графа дорожной сети. Для моделирования задачи используется математический объект – граф дорожной сети, который состоит из узлов, обычно это перекрестки, съезды, повороты дороги, в том числе незначительные изгибы, необходимые для достоверного представления дорожной сети на карте. Участки дорог между узлами представлены стрелками – ребрами, чтобы учитывать возможность одностороннего движения.

- Построение взвешенного графа дорожной сети. Для этого проводится расчет весов для каждого ребра графа. Значениями весов могут быть расстояния по прямой или по дорожной сети, или ожидаемое время движения с учетом средних скоростей для различных участков (Рис.1б) и др.

- Топологическое упрощение графа дорожной сети (Рис.1а). Поскольку незначительные изгибы дороги не влияют на среднюю скорость движения, несколько последовательных ребер могут быть заменены на одно ребро с суммарным весом, что может значительно сократить временные затраты на расчёт. Упрощение дорожной сети можно делать как с помощью встроенных функций или плагинов ГИС-системы, так и с помощью внешних программ, например, Python-библиотеки osmnx [22].



а)

Road at all levels	Setting speed of fire engine	designed speed at on the road
National Rd or Fast lane	60	80
Main road	50	50~60
secondary main road	40	40
Access road	30	30

б)

Рис.1. Пример сетевого анализа [10]:

а) топологически упрощенный граф дорожной сети;

б) таблица скоростей движения пожарного автомобиля для разных категорий дорог, используемая для расчета времени выезда

ГИС-программы также получили применение в целях визуализации результатов, что делает возможным их применение в системах поддержки принятия решений (Рис.2).

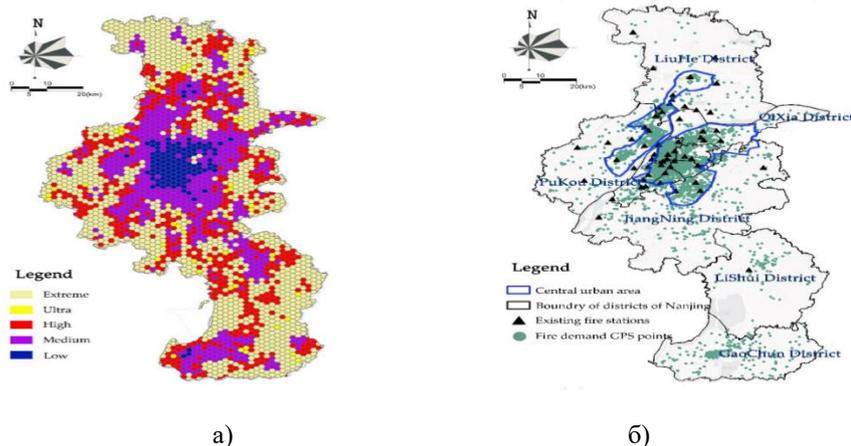


Рис.2. Пример визуализация результатов [14]:

а) расчёт пожарного риска по районам;

б) визуализация размещения пожарных подразделений

Как видно из рассмотренных примеров, ГИС-инструменты становятся неотъемлемым инструментом анализа, моделирования и визуализации в задачах размещения, особенно в сложных неоднородных условиях городских поселений.

Источники геоданных

В части более ранних исследований использовались данные из локальных источников [6, 12], в части – данные из ArcGIS [7]. Китайские исследователи стали активно использовать и комбинировать геоданные из открытых источников, таких как: Baidu Open Map (<https://lbsyun.baidu.com>) [15, 17], Gaode Map (<https://www.amap.com>) [17], OpenStreetMap (<https://www.openstreetmap.org>) [15, 17].

Необходимо отметить, что работа с геоданными в Китае имеет свои особенности, связанные с тем, что официальная система географических координат в Китае: GCJ-02 (GCJ – «Государственное управление геодезии и картографии») основана на мировой системе WGS-84, но географические координаты намеренно изменены с помощью нелинейного алгоритм искажения, с неизвестными параметрами, для обфускации топографических данных [23]. Имеется ряд неофициальных приближенных реализаций алгоритма обфускации, дающие точность до 0.5 м, например, [24].

Доминирующим источником открытых геоданных в мире является ресурс OpenStreetMap (OSM) [25]. Этот ресурс содержит, в частности, информацию по типам и назначению дорог, координаты и полигоны отдельных зданий и может служить основой для весьма точных усредненных оценок времени выезда, вплоть до отдельного подъезда. Отметим, что OSM находится в иностранной юрисдикции.

Ориентация на открытые источники данных имеет свои особенности. Так частым и важным предварительным этапом их использования является актуализация геоданных, в частности информации по дорожной сети, в случаях введения в строй новых дорог или развязок, изменения схем движения, добавления или закрытия проездов и т.п. Задержка обновления в основном репозитории OSM по отдельным территориям может составлять до нескольких лет, ввиду того, что работа по обновлению ведётся волонтерами. Другим, не менее важным с юридической точки зрения этапом, является верификация данных, ввиду того, что предоставляемые данные могут не соответствовать российскому законодательству или внутриведомственной нормативной базе, например, могут быть не указаны границы новых регионов России, или данные могут быть намеренно скомпрометированы, например, из-за актов хактивизма (хакерский активизм – взлом информационных систем не для коммерческой выгоды, а для выражения политической позиции), например, подменяющих

подписи на картах. Собственный опыт работы авторов с OSM показывает, что краудсорсинговая основа этой платформы, приводит к тому, что данные могут быть устаревшими (например, не указан новый съезд с магистрали, существенно сокращающий проезд до микрорайона), неправильный указан тип дороги или используются нестандартные обозначения, которые не позволяют полностью автоматизировать расчёты.

Альтернативой открытым источником геоданных выступают коммерческие: ArcGIS, NextGIS (обработанные данные из OSM), облачные провайдеры, данные из которых обычно отличаются в лучшую сторону точностью, единообразием и актуальностью. Самыми актуальными данными по дорожной сети обладают компании-агрегаторы: 2GIS, Яндекс Карты, Google Maps, за счёт того, что они могут отслеживать транспортные потоки и, соответственно, актуальную конфигурацию дорожной сети по геометкам в реальном времени. Однако доступ к облачным данным предоставляется через специальные сетевые программные интерфейсы (API), которые имеют ограничения по использованию, например, по количеству бесплатных запросов (для расчета матрицы расстояний «от точки к точке» требуется значительно больше запросов, чем позволяют бесплатные лимиты). Второе существенное ограничение может быть связано с условиями лицензии, например, что результаты расчетов можно размещать только на площадке этого же провайдера. Это условие может оказаться блокирующим, поскольку, например, геокоординаты пожарных частей являются служебной информацией и не могут быть размещены в открытом доступе.

В России в ходе реализации госпрограммы «Национальная система пространственных данных» [26] к 2030 году планируется завершить разработку федеральной государственной географической информационной системы «Единая цифровая платформа «Национальная система пространственных данных» (<https://nspd.gov.ru>), точный состав и планируемый порядок работы которой пока не известен, но известно, что она будут включать в себя сведения об объектах недвижимости, зарегистрированных правах на недвижимое имущество и государственной кадастровой оценке, то есть, в частности, будет расширять функционал уже существующей НСПД Росреестр. Планируемая Единая цифровая платформа должна будет стать единым источником геопропространственных данных, в том числе, вероятно, и для расчетов по размещению пожарных подразделений в официальных целях. На данный момент важные для возможных приложений технические характеристики системы не определены (доступные форматы данных, состав API, наличие и степень детализации дорожной сети и т.п.).

Критерии эффективности размещения

Критерии эффективности размещения (в более общей терминологии задач размещения – стандарты обслуживания) можно разделить на следующие виды:

- пространственные – например, должны быть не менее одной пожарной части на 15 км² территории или все объекты обслуживания должны быть не далее, чем в 1.5 км;
- временные – например, время выезда не более 10 мин;
- вероятностно-временные – например, в 90% процентов случаев время выезда не превышает 10 мин;
- нечеткие временные – например, время выезда должно составлять от 5 до 7 мин;
- комбинированные – обычно используют комбинации вышеперечисленных критериев и/или может быть дополнительных условий.

Современные зарубежные исследования всё чаще используют комбинации критериев (Табл.3), что отражает сложность реальных условий на территориях и необходимость учёта баланса между различными факторами на территориях.

Табл.3. Используемые критерии эффективности размещения

Статья, год	Страна/территория	Вид критериев размещения
[4], 2006	Великобритания /Дербишир	нечеткие временные, бюджетные

[6], 2013	Турция/Стамбул	вероятностно-временной и временной
[7], 2013	США/Элк Гроув	временные и пространственные
[9], 2018	Иран/Тегеран	временные, пространственные, плотность населения
[12], 2020	Ирак/Багдад	социальные, пространственные, временные
[14], 2021	Китай/Нанкин	вероятностно-временной
[15], 2021	Китай/Ухань	пространственный, временной, риски пожаров
[16], 2023	США	социально-политический

В законодательстве зарубежных стран используются чаще всего комбинированные критерии, иногда в виде рекомендаций, например,

- Китай (MOHURD Standard 152-2017 – Стандарт строительства городских пожарных частей): «пожарный караул в случае вызова должен добраться до границ зоны обслуживания не более чем за 5 мин после вызова; зона обслуживания обычной городской пожарной части не должна превышать 7 км², в пригородах – 15 км²» [15]. Таким образом, критерий является комбинированным, включающим временные и пространственные требования.

- США, NFPA (National Fire Protection Association) Standard 1710 2020: «четыре минуты в пути, исключая приём вызова и время подготовки» («240 seconds or less travel time for the arrival of the first engine company at a fire suppression incident» [27]) – вероятностно-временной критерий.

- Великобритания (Целевые показатели для локальных актов «Интегрированные планы управления рисками» [28]): «прибытие первого подразделения в течение 10 минут в 80% случаев и за 20 минут в 99% случаев» («Achieve attendance with the first operational resource for all emergency incidents within 10 minutes on 80 per cent of occasions, and 99 per cent of all emergency incidents within 20 minute.») – комбинированный вероятностно-временной критерий.

Стандарт NFPA может использоваться как ориентир в исследованиях из других стран, как, например, в [6].

Обсуждение

Доступность геоданных и развитие информационных технологий, и ГИС-технологий в частности, позволяют по-новому взглянуть на проблему размещения пожарных подразделений. В качестве важных тенденций и изменений в зарубежных подходах можно выделить:

1. Использование геоинформационных систем для сетевого и геопространственного анализа, расчётов расстояний по дорожной сети и визуализации. Чаще всего используется коммерческая ArcGIS [6, 7, 9-11, 13-15].

2. Комбинирование ГИС-технологий, математического моделирования и методов оптимизации для анализа, моделирования и визуализации результатов позволяет оказывать поддержку в принятии обоснованных решений для повышения безопасности городских территорий с учетом множества факторов.

3. Использование специализированных солверов (решателей) для задач математической оптимизации: GUROBI [7, 8], CPLEX [6], иногда используемых через интерфейс пакета GAMS (<https://www.gams.com/>) [8, 6] (другие возможные солверы – GLPK, SCIP, CBC). Для расчетов используется также программный пакет Matlab разных версий [9, 14], и язык Python для предобработки данных [7, 14].

4. Учёт особенностей дорожной сети (близость к магистралям, узость улиц в исторической застройке, наклон рельефа и т.д.).

5. Учет местных факторов: топографии территории [6], перепадов высот и особенности ландшафта [15, 17], географических (сейсмическая опасность [6]), культурных [17], климатических (опасность наводнений), политико-социальных [16].

6. Отдельное внимание, уделяемое защите культурно-исторических [6, 17] и социально-значимых объектов [17], государственных учреждений [17].

В то время как наличие ряда факторов, например, санкционного режима, ограничивает возможность применения некоторых зарубежных программных инструментов и источников геоданных в российских условиях, тем не менее, можно выделить следующие подходы, которые могут быть использованы с учетом российской специфики:

1. Учёт важности защищаемых объектов при расчете времени выезда. В качестве важных объектов может рассматриваться как высотная жилая застройка, так и объекты культурно-исторической ценности. Учёт при расчетах в качестве социально значимых объектов административного управления не может применяться ввиду того, что данные о их дислокации относятся к государственной тайне [29, п. 45], хотя OpenStreetMap, находясь под иностранной юрисдикцией, эти данные содержит.

2. Учёт географических особенностей защищаемой территории (разделение рекой или проливом, прохождение железнодорожных путей, перепады высот, гористый характер местности, учёт сейсмической опасности или возможности наводнений) [6, 15].

3. Учёт плотности населения и пожаров, например, с помощью тепловых карт, обычно построенных по имеющимся статистическим данным распределения плотности населения или пожаров [14, 15].

Несмотря на то, что традиционные подходы решения задач MCLP и LSCP носят переборный характер, и соответствующие алгоритмы решения имеют экспоненциальную сложность, эти алгоритмы остаются вполне применимыми в условиях, когда возможное количество мест размещения относительно невелико ($\leq 30-40$), что является вполне адекватной оценкой, если планирование производится с учетом генеральных планов городского развития.

Также следует отметить, что ряд вопросов, затронутых в рассмотренных в данном обзоре зарубежных исследованиях, носит чисто академический характер. Например, состояние дорожной обстановки в различное время суток вряд ли должно учитываться при планировании размещения пожарных подразделений, при ожидаемом функционировании последних 40-60 и более лет. За такой период, как показывает практика, могут произойти весьма радикальные изменения как в дорожной сети, так и в характере и составе транспортных потоков. Также в рассмотренных исследованиях относительно мало внимания уделено ресурсному фактору, хотя на практике он является определяющим при реальном планировании размещений порядка и темпа строительства или передислокации пожарных подразделений.

Выводы

В то время как в зарубежных исследованиях преобладает использование коммерческих ГИС (особенно ArcGIS) и связанных с ними источников геоданных, в последние годы наблюдается интерес к открытым источникам геоданных, однако без использования ГИС с открытым кодом, вроде QGIS (<https://qgis.org>). Такой подход, в силу санкционных ограничений, не подходит для задач, решаемых в интересах ГПС МЧС России, где для исследовательских и расчетных задач более приемлемы открытые решения, в основном QGIS (как вариант, базирующаяся на QGIS программа NextGIS (<https://nextgis.ru/nextgis-qgis>), входящая в реестр отечественного программного обеспечения, или открытые программные решения, основанные на экосистемах языков программирования Python или R.

Коммерческая NextGIS также предлагает платный сервис скачивания актуализированных геоданных в самых распространенных форматах: ArcGIS, QGIS, MapInfo, PostGIS, Excel, GeoPackage, Shape, GeoJSON, CSV, SQL. Однако опора на коммерческие продукты желательна только в рамках долгосрочных соглашений с крупными провайдерами геоданных ввиду требований тендерной системы, рисков зависимости от одного поставщика (vendor lock-in) или риска утраты поставщика в результате банкротства или закрытия, с угрозой потери всех наработанных решений и компетенций.

Также следует отметить тенденцию в зарубежных исследованиях к увеличению использования многокритериальных критериев эффективности размещения, в связи с необходимостью учитывать множество социальных и экономических факторов. Причем более популярно использование таких критерии в Китае и развивающихся странах, что может быть связано как с большей неравномерностью социальных условий, так и с большей зрелостью и/или консервативностью уже устоявшейся нормативной базы в развитых странах.

Часто в зарубежной литературе рассматриваются также комбинированные, вероятностно-временные критерии размещения, например, следующего вида:

- в 90% процентах случаев время выезда должно быть не более 10 минут,
- до значимых объектов, расчётно-гарантировано, в течении 5 минут.

Интерес к такому виду критериев может объясняться тем, что в условиях ресурсных ограничений на размещение пожарных подразделений, критерии такого вида позволяют уменьшить влияние на рекомендуемое время выезда как случайных факторов дорожной обстановки (ремонт, аварий, заторов, временных перекрытий движения), так и наличия на городских территориях малозначимых защищаемых объектов, вроде заброшенных строений, пустырей и т.п., в то же время, акцентируя наиболее значимый фактор снижения тяжести последствий от пожаров, – время выезда первого пожарного подразделения.

В качестве значимых объектов могут выступать, помимо высотных жилых зданий, больниц, школ и детских садов, мест массового скопления людей и промышленных предприятий, также государственные учреждения, объекты культурного наследия и т.п. В этом случае, проблема эффективного размещения пожарных частей и определения районов выезда сводится к задаче многокритериальной негладкой оптимизации, для решения которой могут быть, в частности, применены генетические или метаэвристические алгоритмы.

Список источников

1. Aleisa E. The fire station location problem: a literature survey // *International Journal of Emergency Management*. 2018. Vol. 14, № 3, pp. 291-302. DOI 10.1504/IJEM.2018.094239. (in English).
2. Masood A. Badri, Amr K. Mortagy, Colonel Ali Alsayed. A multi-objective model for locating fire stations // *European Journal of Operational Research*. 1998. Vol. 110, № 2, pp. 243-260. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(97\)00247-6](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00247-6). (in English).
3. Liu Nan, Bo Huang, Magesh Chandramouli. Optimal siting of fire stations using GIS and ANT algorithm // *Journal of Computing in Civil Engineering*. 2006. Vol. 20, № 5, pp. 361-369. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3801\(2006\)20:5\(361\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3801(2006)20:5(361)). (in English).
4. Yang Lili, Bryan F. Jones, Shuang-Hua Yang. A fuzzy multi-objective programming for optimization of fire station locations through genetic algorithms // *European Journal of Operational Research*. 2007. Vol. 181, № 2, pp. 903-915. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.07.003>. (in English).
5. Chevalier Philippe, Isabelle Thomas, David Geraets, Els Goetghebeur, Olivier Janssens, Dominique Peeters, Frank Plastria. Locating fire stations: an integrated approach for Belgium // *Socio-Economic Planning Sciences*. 2012. Vol. 46, № 2, pp. 173-182. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2012.02.003>. (in English).
6. Aktaş Emel, Özay Özaydın, Burçin Bozkaya, Füsün Ülengin, Şule Önsel. Optimizing fire station locations for the Istanbul Metropolitan Municipality // *Interfaces*. 2013. Vol. 43, № 3, pp. 240-55. <https://doi.org/10.1287/inte.1120.0671>. (in English).
7. Murray Alan T. Optimising the spatial location of urban fire stations // *Fire Safety Journal*. 2013. Vol. 62 (November 2013), pp. 64-71. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2013.03.002>. (in English).
8. Macit Irfan. Solving fire department station location problem using modified binary genetic algorithm. A case study of Samsun in Turkey // *European Scientific Journal, ESJ*. 2015. Vol. 11, № 30, pp. 10-25. ISSN: 1857-7881. (in English).
9. Bolouri Samira, Alireza Vafaeinejad, Ali Alesheikh, Hossein Aghamohammadi. The ordered capacitated multi-objective location-allocation problem for fire stations using spatial optimization // *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2018. Vol. 7, № 2, pp. 44. <https://doi.org/10.3390/ijgi7020044>. (in English).

10. Dong Xin-ming, Li Ye, Pan Yue-lei, Huang Ya-jun, Cheng Xu-dong. Study on urban fire station planning based on fire risk assessment and GIS technology // *Procedia Engineering*. 2018. Vol. 211, pp. 124-130. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.12.129>. (in English).
11. Wang Wenxuan. Site selection of fire stations in cities based on geographic information system (GIS) and fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) // *Ingénierie des systèmes d'information*. 2019. Vol. 24, № 6, pp. 619-626. <https://doi.org/10.18280/isi.240609>. (in English).
12. Shok Mufeed Ehsan. Optimal spatial distribution of fire stations using geographic information systems Baghdad case study // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 737. 2020. 012225. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/737/1/012225>. (in English).
13. Nyimbili Penjani, Turan Erden. A combined model of GIS and fuzzy logic evaluation for locating emergency facilities: a case study of Istanbul // *Proceedings Vol. 1, 8th International Conference on Cartography and GIS, 2020, Nessebar, Bulgaria*. Eds: Bandrova T., Konečný M., Marinova S, 2020, pp. 191-203. ISSN: 1314-0604. (in English).
14. Han Bing, Mingxing Hu, Jiemin Zheng, Tan Tang. Site selection of fire stations in large cities based on actual spatiotemporal demands: a case study of Nanjing city // *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2021, 10: 542. <https://doi.org/10.3390/ijgi10080542>. (in English).
15. Jiang Yuncheng, Aifeng Lv, Zhigang Yan, Zhen Yang. A GIS-based multi-criterion decision-making method to select city fire brigade: a case study of Wuhan, China // *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2021. Vol. 10, № 11: 777. <https://doi.org/10.3390/ijgi10110777>. (in English).
16. Newton Robert, Soundar Kumara, José A. Ventura, Paul M. Griffin. A Decision Support System for Including Equity in the Siting of Emergency Services // *Preprint*. 2022. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2097472/v1>. (in English).
17. Yu Zhijin, Lan Xu, Shuangshuang Chen, Ce Jin. Research on urban fire station layout planning based on a combined model method // *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2023. Vol. 12, № 3: 135. <https://doi.org/10.3390/ijgi12030135>. (in English).
18. Hakimi S.L. Optimum locations of switching centers and the absolute centers and medians of a graph // *Operations Research*. 1964. Vol. 12, № 3, pp. 450-459. (in English).
19. Hakimi S.L. Optimum distribution of switching centers in a communication network and some related graph theoretic problems // *Operations Research*. 1965. Vol. 13, № 3, pp. 462-475. (in English).
20. Toregas C., Swain R., ReVelle C.S., Bergman L. The location of emergency service facilities // *Operations Research*. 1971. Vol. 19, № 6, pp. 1363-1373. (in English).
21. Church R., ReVelle C.S. The maximal covering location problem. *Papers in Regional Science*. 1974. Vol. 32, № 1, pp. 101-118. (in English).
22. Boeing G. OSMnx: New methods for acquiring, constructing, analyzing, and visualizing complex street networks // *Computers, Environment and Urban Systems*. 2017. Vol. 65, pp. 126-139, ISSN 0198-9715, <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2017.05.004>. (in English).
23. Restrictions on geographic data in China. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/Restrictions_on_geographic_data_in_China/ (Дата последнего обращения: 11.06.25).
24. Transform coordinate between earth(WGS-84) and mars in china(GCJ-02). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://github.com/googollee/eviltransform/> (Дата последнего обращения: 11.06.25).
25. OpenStreetMap. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.openstreetmap.org/> (Дата последнего обращения: 11.06.25).
26. Постановление Правительства РФ от 1 декабря 2021 г. № 2148 «Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Национальная система пространственных данных».
27. National Fire Protection Association (NFPA) NFPA 1710: Standard for the Organization and Deployment of Fire Suppression Operations, Emergency Medical Operations, and Special Operations to the Public by Career Fire Departments, 2010. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.nfpa.org/> (Дата последнего обращения: 24.07.25).
28. Buckinghamshire Council. [Электронный ресурс]. – Access mode: <https://buckinghamshire.moderngov.co.uk/Data/BCC%20BMKFA%20Overview%20&%20Audit%20>

Committee/201807181000/Agenda/ITEM%2016b_Appendix%20%20Background%20History%20-20Standards%20of%20Fire%20Cover.pdf (Дата последнего обращения: 25.07.2025).

29. Указ Президента РФ от 30.11.1995 № 1203 (ред. от 24.06.2025) «Об утверждении Перечня сведений, отнесенных к государственной тайне».

References

1. Aleisa E. The fire station location problem: a literature survey // *International Journal of Emergency Management*. 2018. Vol. 14, № 3, pp. 291-302. DOI 10.1504/IJEM.2018.094239.
2. Masood A. Badri, Amr K. Mortagy, Colonel Ali Alsayed. A multi-objective model for locating fire stations // *European Journal of Operational Research*. 1998. Vol. 110, № 2, pp. 243-260. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(97\)00247-6](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00247-6).
3. Liu Nan, Bo Huang, Magesh Chandramouli. Optimal siting of fire stations using GIS and ANT algorithm // *Journal of Computing in Civil Engineering*. 2006. Vol. 20, № 5, pp. 361-369. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3801\(2006\)20:5\(361\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3801(2006)20:5(361)).
4. Yang Lili, Bryan F. Jones, Shuang-Hua Yang. A fuzzy multi-objective programming for optimization of fire station locations through genetic algorithms // *European Journal of Operational Research*. 2007. Vol. 181, № 2, pp. 903-915. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.07.003>.
5. Chevalier Philippe, Isabelle Thomas, David Geraets, Els Goetghebeur, Olivier Janssens, Dominique Peeters, Frank Plastria. Locating fire stations: an integrated approach for Belgium // *Socio-Economic Planning Sciences*. 2012. Vol. 46, № 2, pp. 173-182. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2012.02.003>.
6. Aktaş Emel, Özay Özaydın, Burçin Bozkaya, Füsün Ülengin, Şule Önsel. Optimizing fire station locations for the Istanbul Metropolitan Municipality // *Interfaces*. 2013. Vol. 43, № 3, pp. 240-55. <https://doi.org/10.1287/inte.1120.0671>.
7. Murray Alan T. Optimising the spatial location of urban fire stations // *Fire Safety Journal*. 2013. Vol. 62 (November 2013), pp. 64-71. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2013.03.002>. (in English).
8. Macit Irfan. Solving fire department station location problem using modified binary genetic algorithm. A case study of Samsun in Turkey // *European Scientific Journal, ESJ*. 2015. Vol. 11, № 30, pp. 10-25. ISSN: 1857-7881.
9. Bolouri Samira, Alireza Vafaeinejad, Ali Alesheikh, Hossein Aghamohammadi. The ordered capacitated multi-objective location-allocation problem for fire stations using spatial optimization // *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2018. Vol. 7, № 2, 44. <https://doi.org/10.3390/ijgi7020044>.
10. Dong Xin-ming, Li Ye, Pan Yue-lei, Huang Ya-jun, Cheng Xu-dong. Study on urban fire station planning based on fire risk assessment and GIS technology // *Procedia Engineering*. 2018. Vol. 211, pp. 124-130. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.12.129>.
11. Wang Wenxuan. Site selection of fire stations in cities based on geographic information system (GIS) and fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) // *Ingénierie des systèmes d'information*. 2019. Vol. 24, № 6, pp. 619-626. <https://doi.org/10.18280/isi.240609>.
12. Shok Mufeed Ehsan. Optimal spatial distribution of fire stations using geographic information systems Baghdad case study // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 737. 2020. 012225. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/737/1/012225>.
13. Nyimbili Penjani, Turan Erden. A combined model of GIS and fuzzy logic evaluation for locating emergency facilities: a case study of Istanbul // *Proceedings Vol. 1, 8th International Conference on Cartography and GIS, 2020, Nessebar, Bulgaria*. Eds: Bandrova T., Konečný M., Marinova S, 2020, pp. 191-203. ISSN: 1314-0604.
14. Han Bing, Mingxing Hu, Jiemin Zheng, Tan Tang. Site selection of fire stations in large cities based on actual spatiotemporal demands: a case study of Nanjing city // *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2021, 10: 542. <https://doi.org/10.3390/ijgi10080542>.
15. Jiang Yuncheng, Aifeng Lv, Zhigang Yan, Zhen Yang. A GIS-based multi-criterion decision-making method to select city fire brigade: a case study of Wuhan, China // *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2021. Vol. 10, № 11: 777. <https://doi.org/10.3390/ijgi10110777>.
16. Newton Robert, Soundar Kumara, José A. Ventura, Paul M. Griffin. A Decision Support System for Including Equity in the Siting of Emergency Services // *Preprint*. 2022. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2097472/v1>.

17. Yu Zhijin, Lan Xu, Shuangshuang Chen, Ce Jin. Research on urban fire station layout planning based on a combined model method // ISPRS International Journal of Geo-Information. 2023. Vol. 12, № 3: 135. <https://doi.org/10.3390/ijgi12030135>.
18. Hakimi S.L. Optimum locations of switching centers and the absolute centers and medians of a graph // Operations Research. 1964. Vol. 12, № 3, pp. 450-459.
19. Hakimi S.L. Optimum distribution of switching centers in a communication network and some related graph theoretic problems // Operations Research. 1965. Vol. 13, № 3, pp. 462-475.
20. Toregas C., Swain R., ReVelle C.S., Bergman L. The location of emergency service facilities // Operations Research. 1971. Vol. 19, № 6, pp. 1363-1373.
21. Church R., ReVelle C.S. The maximal covering location problem. Papers in Regional Science. 1974. Vol. 32, № 1, pp. 101-118.
22. Boeing G. OSMnx: New methods for acquiring, constructing, analyzing, and visualizing complex street networks // Computers, Environment and Urban Systems. 2017. Vol. 65, pp. 126-139, ISSN 0198-9715, <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2017.05.004>.
23. Restrictions on geographic data in China. [electronic resource]. – Access mode: https://en.wikipedia.org/wiki/Restrictions_on_geographic_data_in_China/ (accessed: 11.06.2025).
24. Transform coordinate between earth(WGS-84) and mars in china(GCJ-02). [electronic resource]. – Access mode: <https://github.com/googollee/eviltransform/> (accessed: 11.06.2025).
25. OpenStreetMap. [electronic resource]. – Access mode: <https://www.openstreetmap.org/> (accessed: 11.06.2025).
26. Decree of the Government of the Russian Federation dated December 1, 2021 No. 2148 "On Approval of the State Program of the Russian Federation "National Spatial Data System".
27. National Fire Protection Association (NFPA) NFPA 1710: Standard for the Organization and Deployment of Fire Suppression Operations, Emergency Medical Operations, and Special Operations to the Public by Career Fire Departments, 2010. [electronic resource]. – Access mode: <http://www.nfpa.org/> (accessed: 07.24.25).
28. Buckinghamshire Council. [electronic resource]. – Access mode: https://buckinghamshire.moderngov.co.uk/Data/BCC%20BMKFA%20Overview%20&%20Audit%20Committee/201807181000/Agenda/ITEM%2016b_Appendix%20%20Background%20History%20-20Standards%20of%20Fire%20Cover.pdf (accessed: 25.07.2025).
29. Decree of the President of the Russian Federation dated 11/30/1995 No. 1203 (as amended on 24.06.2025) "On approval of the List of information classified as a State Secret".

Информация об авторах

С.В. Бабеньшев – кандидат физико-математических наук, доцент
А.Н. Батуро – кандидат технических наук, доцент
Е.Н. Матеров – кандидат физико-математических наук, доцент
И.Ю. Сергеев – кандидат технических наук

Information about the author

S.V. Babenyshev – PhD of Physical and Mathematical Sciences, Docent
A.N. Baturо – Ph.D. of Engineering Science, Docent
E.N. Materov – PhD of Physical and Mathematical Sciences, Docent
I.Yu. Sergeev – Ph.D. of Engineering Science

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 23.06.2025, одобрена после рецензирования 21.08.2025, принята к публикации 01.09.2025.

The article was submitted 23.06.2025, approved after reviewing 21.08.2025, accepted for publication 01.09.2025.