

Управление в организационных системах (2.3.4. технические науки)

Научная статья
УДК 614.849
doi: 10.34987/vestnik.sibpsa.2023.83.62.001

Оптимизация границ районов выезда с использованием языка программирования Python и библиотеки OSMNX

*Олег Сергеевич Малютин
Сергей Валерьевич Бабенышев
Евгений Николаевич Матеров*

*Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, Железногорск, Россия
Автор ответственный за переписку: Сергей Валерьевич Бабенышев, babenyshev@sibpsa.ru*

Аннотация. В статье показывается способ решения задачи оптимизации границ районов выезда и качественной оценки влияния изменения границ районов выезда с использованием языка программирования Python и специальных программных решений для анализа геопространственных данных. Описывается ход работы и использованные технические решения. Перечисляются возникшие сложности и «узкие места» как реализации, так и метода в целом. Приводятся результаты расчета на примере условного пожарно-спасательного гарнизона. Даются рекомендации по применению и дальнейшему совершенствованию показанного метода.

Ключевые слова: пожарные подразделения, границы районов выезда, оптимизация, геопространственные данные

Для цитирования: Малютин О.С., Бабенышев С.В., Матеров Е.Н. Оптимизация границ районов выезда с использованием языка программирования Python и библиотеки OSMNX // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2023. № 1 (28). С. 38-55. [http: 10.34987/vestnik.sibpsa. 2023.83.62.001](http://10.34987/vestnik.sibpsa.2023.83.62.001).

Optimization of the borders of exit areas using the Python programming language and the OSMNX library

*Oleg S. Malyutin
Sergei V. Babenyshev
Evgeny N. Materov*

*Siberian Fire and Rescue Academy EMERCOMV of Russia, Zheleznogorsk, Russia
Corresponding author: Sergey V. Babenyshev, babenyshev@sibpsa.ru*

Annotation. The article considers a method for solving the problem of optimizing the boundaries of exit areas and qualitatively assessing the impact of changing the boundaries of exit areas using the Python programming language and special software solutions for analyzing geospatial data. We describe the course of work and the technical solutions used. The difficulties and “bottlenecks” of both the implementation and the used method as a whole are discussed. We supply the results

of the calculation on the example of a conditional fire and rescue garrison. Recommendations are given for the application and further improvement of the shown method.

Keywords: fire departments, borders of exit areas, optimization, geospatial data

For citation: Malyutin O.S., Babenyshev S.V., Materov E.N. Optimization of the borders of exit areas using the Python programming language and the OSMNX library // Siberian Fire and Rescue Bulletin 2023. № 1 (28). pp. 38-55. (In Russ.) [http: 10.34987/vestnik.sibpsa.2023.83.62.001](http://10.34987/vestnik.sibpsa.2023.83.62.001).

Введение

Проблема уменьшения времени прибытия первого пожарно-спасательного подразделения к месту вызова всегда представляла большой интерес. Это подтверждается большим количеством посвященных ей публикаций, как в отечественных изданиях [1-13], так и за рубежом [14-16].

Попытки решения этой проблемы находят свое отражение и в законодательстве. Так, согласно действующим в Российской Федерации нормам технического регулирования [17], места дислокации подразделений пожарной охраны на территориях поселений и городских округов определяются исходя из условия, что время прибытия первого подразделения к месту вызова не должно превышать 10 минут.

Основные направления решения данной проблемы включают: совершенствование пожарно-спасательной техники, повышение уровня профессиональной подготовки личного состава пожарно-спасательных подразделений, развитие дорожной сети в крупных городах, совершенствование системы управления и диспетчеризации пожарно-спасательных подразделений. В рамках последнего направления особый интерес представляют две задачи:

оптимизация распределения границ районов выезда подразделений пожарно-спасательных гарнизонов;

поиск наиболее оптимальных мест строительства новых пожарных депо.

Если решение второй задачи нашло свое отражение в Методических рекомендациях МЧС России, утвержденных Главным Государственным инспектором Российской Федерации по пожарному надзору Г. Н. Кирилловым от 30 декабря 2009 г. № 2-60-14-18 [18] и в Своде правил СП 11.13130.2009 «Места дислокации подразделений пожарной охраны. Порядок и методика определения» [19], то задача оптимизации распределения границ районов выезда на данный момент в Российской нормативной базе проработана мало, несмотря на то, что необходимость ее решения обозначена в положении о пожарно-спасательных гарнизонах утвержденном приказом МЧС России от 25 октября 2017 г. № 467 [20]. В данном руководящем документе указывается, что одним из важнейших принципов формирования системы реагирования в местных пожарно-спасательных гарнизонах МЧС России является разделение территорий муниципальных образований на районы выезда подразделений, с учетом оптимальной дислокации подразделений, прибытия первого подразделения в наиболее удаленную точку района выезда в максимально короткое время.

Для каждого подразделения гарнизона расписанием выезда определяется территория, в границах которой предусмотрено первоочередное направление сил и средств этого подразделения, по первому сообщению, о пожаре (ЧС) (далее – район выезда). На территории района выезда подразделения гарнизона предусматриваются подрайоны выезда для ближайших подразделений (далее – подрайон выезда). Подрайоном выезда подразделения гарнизона может являться как часть территории, так и вся территория района выезда другого подразделения гарнизона [20].

Задачи оптимизации границ районов выезда и поиска наиболее оптимальных зон строительства новых пожарных депо в настоящее время не получили реализации в виде конечного инструмента, что можно объяснить отсутствием или недостаточным развитием до недавнего времени необходимых технологий.

Как правило, руководство пожарно-спасательных гарнизонов достаточно хорошо знает особенности обслуживаемой территории для того, чтобы определять границы подрайонов

выезда основываясь на собственном опыте, однако такой субъективный подход может потенциально приводить к ошибкам в распределении границ районов выезда. Кроме того, отсутствие четко определенной методики определения границ подрайонов выезда может негативно сказаться на позиции должностных лиц гарнизона в случае судебных разбирательств.

В последние годы, с развитием информационных технологий (далее – ИТ) появились новые возможности по работе с геопространственными данными, в частности касающимися дорожной сети. Возможности их применения были показаны в работе, проводившейся в 2019 году в ФГБОУ ВО Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России в интересах ГУ МЧС России по Красноярскому краю [20]. Дальнейшее применение таких технологий может позволить создать инструменты решения описанных выше задач. В данной работе предложен способ решения задачи оптимизации границ районов выезда и качественной оценки влияния изменения границ районов выезда с использованием языка программирования Python и специальных программных решений для анализа геопространственных данных.

Материалы и методы

Большая часть подходов к определению параметров прибытия пожарных подразделений к месту вызова, как правило сводится к двум основным направлениям:

1. Определение параметров прибытия на основе статистических данных [1, 2, 4, 8, 15].
2. Определение параметров прибытия, используя в качестве математической основы теорию графов [7, 10, 11, 14, 18, 21, 22].

В данной работе использовался второй подход, как способ, позволяющий получать более точные оценки.

Основная идея реализации этого подхода заключается в том, чтобы используя математические методы, положенные в основу теории графов и современное программное обеспечение для выполнения научных расчетов, получить инструмент который позволит рассчитывать время прибытия (а при необходимости и маршрут следования) пожарных подразделений в любую точку населенного пункта и, исходя из полученных результатов расчета, получить обоснованный вывод о целесообразности изменения границ районов и подрайонов выезда пожарно-спасательных подразделений.

Описание подхода к проведению расчетов

Для формализации поставленной задачи введем некоторые определения:

Граф дорожной сети (далее – ГДС) – математическая модель в виде взвешенного ориентированного графа, отражающая структуру и характер сети проезжих дорог некоторой географической территории. В таком графе ребрами будут являться непосредственно проезжие части дорог. Узлами – пересечения дорог, перекрестки, зоны изменения типа покрытия и т.д. Направление движения в графе соответствует направлению движения по проезжей части, при этом, для некоторых типов дорог, таких как проезжие зоны дворовых территорий, ребра графа являются двунаправленными, т.к. пожарная техника по таким проезжим частям может перемещаться в обоих направлениях. Веса же ребер графа представляют собой время следования, требуемое на их преодоление.

Индекс прикрытия – отношение количества узлов ГДС время прибытия, в которые меньше или равно некоторому граничному условию к общему количеству рассматриваемых узлов ГДС. В контексте оценки прикрытия населенных пунктов пожарными подразделениями в качестве таких условий рассматриваются 10 минут для городских населенных пунктов (**ИП-10**) и 20 минут для сельских (**ИП-20**).

Профиль дислокации (далее – ПД) – формализованное описание пространственного положения пожарно-спасательных подразделений и техники, стоящей в боевом расчете (координаты частей, количество и состав техники, учитываемой в расчетах).

Профиль выезда (далее – ПВ) – формализованное описание правил очередности направления пожарно-спасательных частей (далее – ПСЧ) в те или иные узлы ГДС.

Профиль прибытия (далее – ПП) – расчет времени прибытия всех подразделений во все точки ГДС исходя из профиля выезда и профиля дислокации.

Профиль скоростей (далее – ПС) – формализованное описание скоростей следования подразделений по различным типам дорог.

Матрица прибытия (далее – МП) – расчет времени прибытия всех подразделений во все точки ГДС. Матрица прибытия не учитывает правила очередности прибытия пожарных подразделений, она только содержит расчетные времена прибытия.

Наиболее удобным способом хранения данных в ПД, ПВ, ПП, ПС и МП является табличная форма.

Исходя из приведенных определений, задача определения оптимальных границ районов выезда сводится к определению такого профиля выезда, при котором профиль прибытия будет обеспечивать наилучшие показатели сосредоточения пожарно-спасательных подразделений. Данная задача подразумевает что профиль дислокации остается неизменным, т.е. расчеты производятся для постоянного количества и пространственного положения пожарных подразделений.

Располагая ГДС и ПД становится возможным рассчитать времена прибытия всех ПСЧ во все узлы ГДС, т.е. определить сколько времени потребуется любому пожарному подразделению на то, чтобы попасть в любую точку рассматриваемой территории. Результатом этого расчета является *матрица прибытия*. Далее, в зависимости от цели расчета, можно определить профиль прибытия подразделений в пределах заранее заданных границ районов выездов (или любых произвольно заданных областей), для чего потребуется наложить на МП профиль выезда, составленный на основе имеющегося расписания выездов; или же определить оптимальные границы районов выезда, выбрав из МП подразделения с наименьшим временем прибытия в любую точку ГДС.

Таким образом, порядок взаимодействия моделей данных в разрабатываемом решении может быть таким как показано на рис. 1.

Описание применявшихся технологий

В настоящее время одним из наиболее распространенных языков программирования, применяемых в научных расчетах, является Python. Этот язык сочетает простоту и обширные возможности для проведения различного рода вычислений. Среди прочего он располагает обширным инструментарием для расчетов графов, а также для работы с геопространственными данными, что для решения поставленной задачи является решающим фактором.

Среди программных библиотек для работы с графами можно выделить библиотеку NetworkX, реализующую значительное количество расчетных алгоритмов, позволяющих решать задачи поиска кратчайшего маршрута, построения дерева маршрутов из произвольного узла, нахождения радиуса и диаметра графа и т.д. В данном случае предстоит работать не просто с графом, а с графом дорожной сети, узлами которого являются географические точки. Для этого в работе используется библиотека OSMnx, которая является расширением NetworkX и позволяет оперировать графами с конкретной географической привязкой. В качестве метода расчета кратчайших расстояний используется алгоритм Дейкстры [23], реализованный в инструментах библиотеки NetworkX.

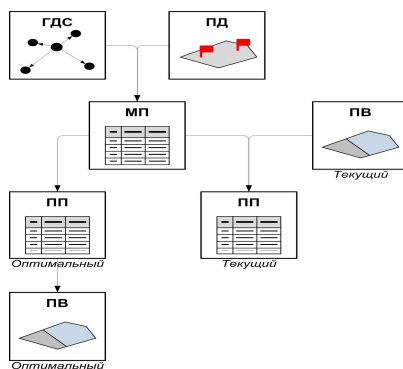


Рис. 1. Порядок взаимодействия данных

Часть данных для работы программы, таких как ГДС, может быть получена из открытых источников, но некоторые данные конечный пользователь должен указать самостоятельно. Так, данные о пространственном положении пожарных подразделений могут быть получены из заранее подготовленных табличных данных, но, как показала практика, в сведениях, предоставленных гарнизонами такие данные либо отсутствуют, либо серьезно искажены. Сведения с описанием границ районов выезда, опирающиеся на реальные географические координаты, как правило, вообще отсутствуют. Прямое внесение данных непосредственно в код программы на Python представляется слишком сложным решением для рядового пользователя. Поэтому для их указания следует использовать какую-либо геоинформационную систему (далее – ГИС) с необходимым инструментарием редактирования пространственных данных. В данной работе в качестве такой ГИС было использовано свободно распространяемое программное обеспечение QGIS. Помимо удобства редактирования пространственных данных, QGIS предоставляет обширные возможности по визуализации результатов расчета непосредственно поверх слоя географической карты местности, что упрощает окончательную обработку результатов и подготовку отчетных форм.

Источники данных

В качестве исходных данных для проведения расчета требуются: ГДС, сведения о пространственном положении пожарно-спасательных подразделений и границы их районов выезда.

Источником ГДС является открытый картографический сервис OpenStreetsMap (далее – OSM), предоставляющий на безвозмездной основе различного рода картографические данные. Среди прочего, OSM может поставлять данные о дорогах в любой произвольной области мира. Задачу получения этих данных и их компиляции в формат модели ГДС решает программная библиотека OSMnx, располагающая соответствующим инструментарием.

Для указания пространственного положения пожарно-спасательных подразделений и границ их районов выезда используется приложение QGIS. Пользователь должен, пользуясь средствами QGIS, получить карту города, разместить на ней метки размещения ПСЧ и указать границы районов выезда. Карта рассматриваемой в процессе расчета местности в векторном формате может быть получена с использованием инструментов библиотеки OSMnx.

Наконец, для расчета времени следования подразделений по отдельным участкам дорог необходимо составить профиль скоростей пожарных подразделений.

Выбор метрик

В качестве метрик, позволяющих объективно оценить параметры прикрытия территории в данной работе, были выбраны:

1. Среднее время прибытия.
2. Медиана времени прибытия.
3. Индекс прикрытия.

Наиболее очевидной метрикой представляется среднее время прибытия в любой узел ГДС в пределах некоторой территории. Эта метрика, как правило, использовалась ранее

в работах посвященных определению параметров реагирования пожарных подразделений [1, 3, 4, 13].

В качестве альтернативной метрики использовано медианное значение времени прибытия подразделений к месту вызова. Под медианным значением в данном случае понимается значение, находящееся в середине набора данных о временах прибытия.

Наконец, для оценки степени прикрытия территории с точки зрения соответствия требованиям Ф3-123 введена метрика названная Индекс прикрытия. Индекс прикрытия отражает долю некоторой территории время прибытия в любую точку которой составляет не более 10 минут для поселений и городских округов (далее – ИП-10) и 20 минут для сельских населенных пунктов (далее – ИП-20). Индекс прикрытия рассчитывается по формуле (1):

$$\text{ИП} = \frac{N_{\text{пр}}}{N_{\text{общ}} \cdot 100'} \quad (1)$$

где: $N_{\text{пр}}$ – количество узлов ГДС рассматриваемой области, время прибытия в каждый из которых не превышает 10 минут; $N_{\text{общ}}$ – общее количество узлов ГДС рассматриваемой области.

Перечисленные метрики могут быть применены как ко всей площади рассматриваемой территории, так и к отдельным ее частям, например, подрайонам выезда, административным районам города или любой произвольной территории. Сравнение показателей метрик исходного и рекомендуемого профилей выезда, позволяет сделать обоснованный вывод о том насколько изменятся показатели защищенности рассматриваемой территории с изменением профиля выезда (или профиля дислокации).

Результаты расчета

В качестве примера рассматриваемой территории выбран город Красноярск.

Согласно «Перечню сведений в области военной, военно-технической деятельности» [26], использование реальных сведений о дислокации подразделений ФПС ГПС МЧС России запрещено, поэтому в данной работе для примера были использованы произвольные данные о расположении вымышленных пожарно-спасательных подразделений и их границ районов выезда на территории города Красноярска. Эти данные были указаны посредством инструментов QGIS на карте города (см. рис. 2).

Основываясь на [24] и результатах проведенного анализа статистических данных о прибытии пожарных подразделений, в данной работе за расчетную была принята скорость движения пожарных автомобилей равная 35 км/ч для основных дорог, 20 км/ч для жилых зон и дворовых проездов, 10 км/ч для движения по пешеходным тротуарам и 5 км/ч для прочих типов поверхностей пригодных для перемещения техники, но не предназначенных для этого (небольшие лестницы, дорожки для верховой езды, проезды внутри крупных зданий и т.д.).

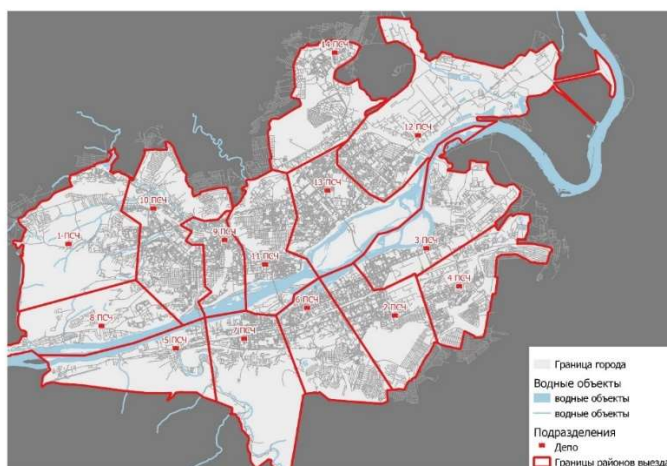


Рис. 2. Размещение маркеров пожарных подразделений и границ их районов выезда на карте QGIS

Расчет производился на ПК со следующей конфигурацией:

- Процессор: Intel® Core™ i7 CPU 975 @ 3.33GHz 3.33 GHz.
- ОС: Windows-10-10.0.19043-SP0 64x.
- Версия: 10.0.19043.
- Оперативная память: 24 Гб.

При такой конфигурации время проведения расчета составило 38,3 секунды.

Основной результат расчета – оптимальное распределение границ районов выезда представлено на рис. 3.

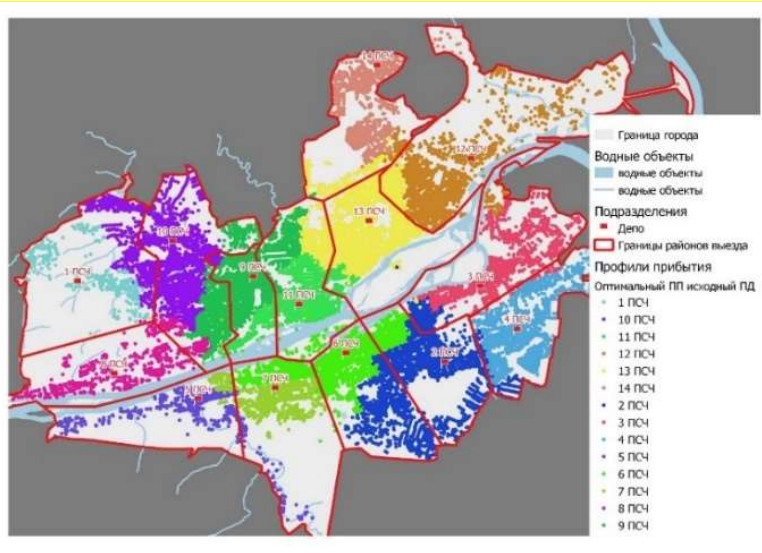


Рис. 3. Расчётное оптимальное распределение границ районов выезда пожарных подразделений в городе Красноярск

На рис. 4 показаны области, в которых согласно расчету, рекомендуется изменить очередность высылки подразделений по первому сообщению.

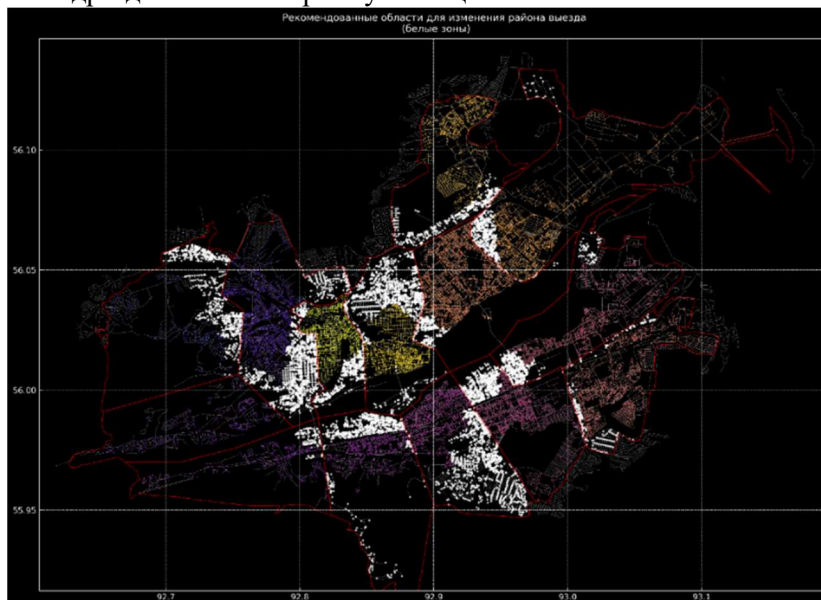


Рис. 4. Визуализация рекомендованных областей изменения границ районов выезда. Белые точки – зоны, в которых рекомендуется изменить высылкаемое, по первому сообщению, подразделение. Красный контур – границы исходных районов выезда.

Сравнение расчетных времен прибытия

Расчетное время прибытия по территории города в целом

Распределение расчетных времен прибытия в любую точку города показано на рис. 5.

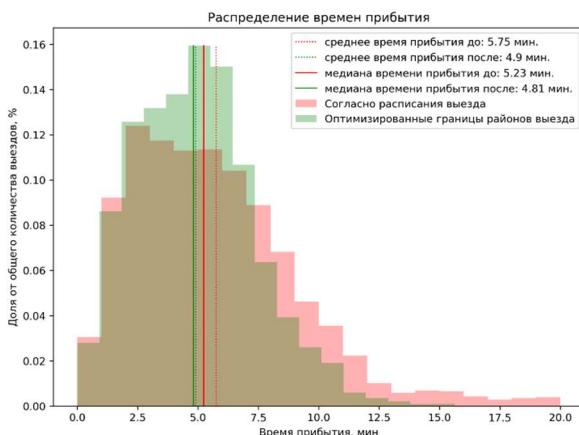


Рис. 5. Визуализация распределения времен прибытия подразделений в пределах города

Табл. 1. Изменение времени прибытия пожарных подразделений на территории города

Показатель	Значение
Средние времена прибытия:	
для текущего расписания выездов	5.75 мин.
для оптимизированного расписания выездов	4.9 мин.
разница	-0.85 мин.
процент улучшения	14.78%
Медианные времена прибытия:	
для текущего расписания выездов	5.23 мин.
для оптимизированного расписания выездов	4.81 мин.
разница	-0.42 мин.
процент улучшения	8.03%

Таким образом, позитивный эффект от изменения границ районов выезда должен составить от -0,84 мин (8%) до -0,42 мин (14%).

Сравнение времен прибытия подразделений

В данном случае сравниваются показатели исходной границы района выезда и оптимизированной (рис. 6).

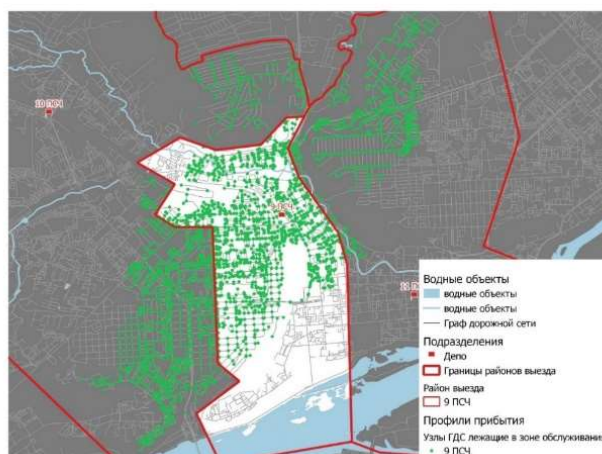


Рис. 6. Пример исходной и оптимизированной зоны обслуживания.
 Белый фон – исходная зона обслуживания. Сиреневые точки – оптимальная зона обслуживания.

Результаты первичного анализа изменения метрик времени приведены на рис. 7 и в табл. 2.

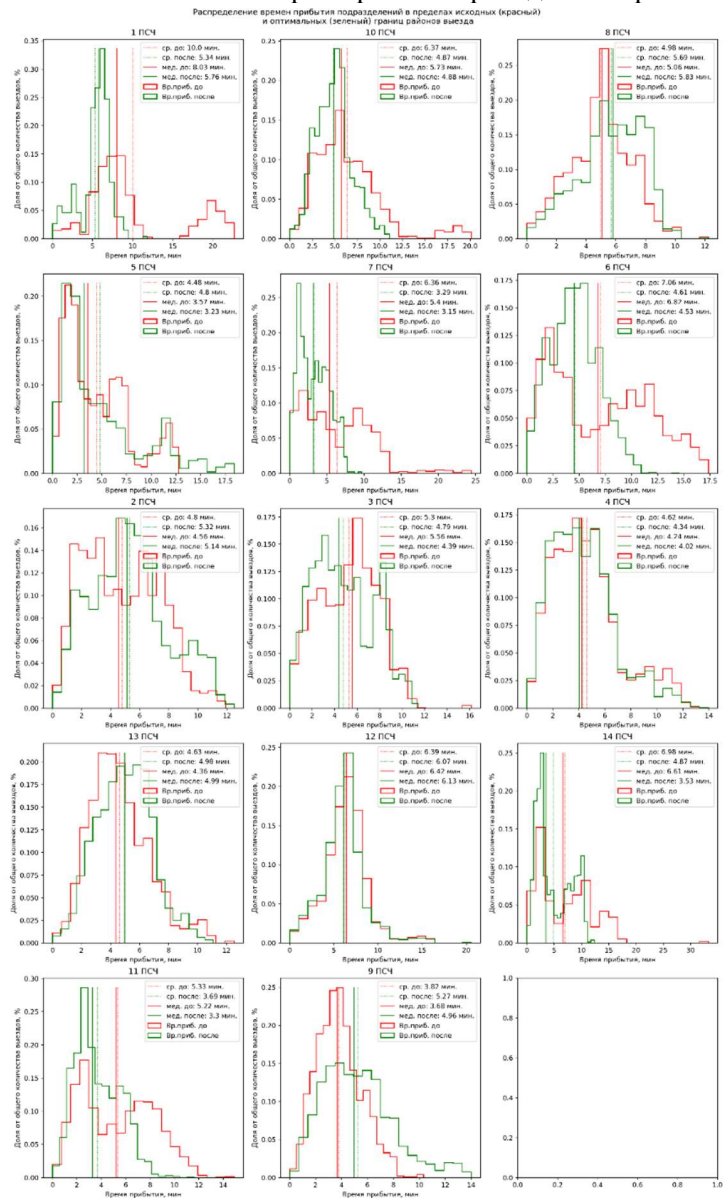


Рис. 7. Визуализация распределения времен прибытия подразделений

Табл. 2. Изменение времени прибытия пожарных подразделений

Подразделение	Исходный ПП (среднее)	Оптимизированный ПП (среднее)	Разница (среднее)	Исходный ПП (медиана)	Оптимизированный ПП (медиана)	Разница (медиана)
1 ПСЧ	10	5.34	-4.66	8.03	5.76	-2.27
10 ПСЧ	6.37	4.87	-1.5	5.73	4.88	-0.85
8 ПСЧ	4.98	5.69	0.71	5.06	5.83	0.77
5 ПСЧ	4.48	4.8	0.32	3.57	3.23	-0.34
7 ПСЧ	6.36	3.29	-3.07	5.4	3.15	-2.25
6 ПСЧ	7.06	4.61	-2.45	6.82	4.53	-2.29
2 ПСЧ	4.8	5.32	0.52	4.56	5.14	0.58
3 ПСЧ	5.3	4.79	-0.51	5.56	4.39	-1.17
4 ПСЧ	4.62	4.34	-0.28	4.24	4.02	-0.22
13 ПСЧ	4.63	4.98	0.35	4.36	4.99	0.63
12 ПСЧ	6.39	6.07	-0.32	6.42	6.13	-0.29
14 ПСЧ	6.98	4.87	-2.11	6.61	3.53	-3.08
11 ПСЧ	5.33	3.69	-1.64	5.22	3.3	-1.92
9 ПСЧ	3.82	5.27	1.45	3.68	4.96	1.28

Из полученных данных видно, что наилучшим образом эффект оптимизации границ сказывается на временах прибытия 1 ПСЧ (среднее время –4,66 мин, медиана –2,27), 7 ПСЧ (среднее время –3,07 мин, медиана –2,25) и 6 ПСЧ (среднее время –2,45 мин, медиана –2,29). При этом показатели некоторых подразделений наоборот увеличились: 9 ПСЧ (среднее время +1,45 мин, медиана +1,28), 8 ПСЧ (среднее время +0,71 мин, медиана +0,77) и 13 ПСЧ (среднее время +0,35 мин, медиана +0,63). Последнее обстоятельство связано с тем, что в результате оптимизации границ районов выезда эти подразделения станут обслуживать большую территорию с более удаленными границами района выезда.

Сравнение показателей полученных профилей прибытия на территории исходных границ района выезда

Отличие данного сравнения (см. табл. 3 и рис. 8) от предыдущего заключается в том, что для обоих профилей прибытия оцениваются времена прибытия в общих зонах (в данном случае – исходных границах районов выезда), что делает оценку более объективной.

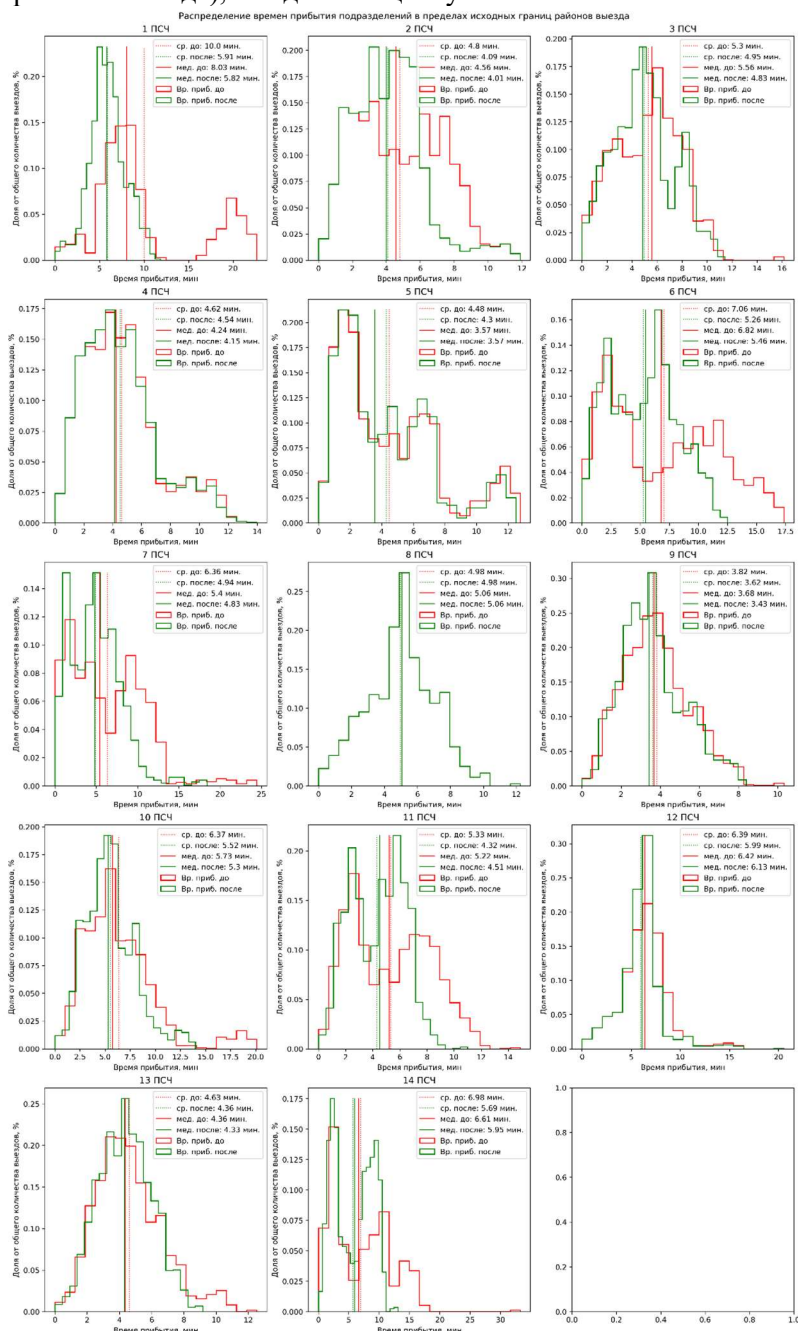


Рис 8. Визуализация распределения времен прибытия в районах выезда

Табл. 3. Изменение времени прибытия пожарных подразделений в пределах районов выезда

Подразделение	Исходный ПП (среднее)	Оптимизированный ПП (среднее)	Разница (среднее)	Исходный ПП (медиана)	Оптимизированный ПП (медиана)	Разница (медиана)
1 ПСЧ	10	5.91	-4.09	8.03	5.82	-2.21
2 ПСЧ	4.8	4.09	-0.71	4.56	4.01	-0.55
3 ПСЧ	5.3	4.95	-0.35	5.56	4.83	-0.73
4 ПСЧ	4.62	4.54	-0.08	4.24	4.15	-0.09
5 ПСЧ	4.48	4.3	-0.18	3.57	3.57	-0
6 ПСЧ	7.06	5.26	-1.8	6.82	5.46	-1.36
7 ПСЧ	6.36	4.94	-1.42	5.4	4.83	-0.57
8 ПСЧ	4.98	4.98	0	5.06	5.06	0
9 ПСЧ	3.82	3.62	-0.2	3.68	3.43	-0.25
10 ПСЧ	6.37	5.52	-0.85	5.73	5.3	-0.43
11 ПСЧ	5.33	4.32	-1.01	5.22	4.51	-0.71
12 ПСЧ	6.39	5.99	-0.4	6.42	6.13	-0.29
13 ПСЧ	4.63	4.36	-0.27	4.36	4.33	-0.03
14 ПСЧ	6.98	5.69	-1.29	6.61	5.95	-0.66

В данном случае видно, что показатели всех районов выезда улучшились, либо не изменились, что говорит о том, что оптимизация границ районов выезда в целом несет только положительный эффект. Наилучшим образом оптимизация границ районов выезда сказалась на районах выезда 1 ПСЧ (среднее время -4,09 мин, медиана -2,21), 6 ПСЧ (среднее время -1,8 мин, медиана -1,36) и 3 ПСЧ (среднее время -0,35 мин, медиана -0,73).

Можно сделать вывод, что наиболее показательным является сравнение изменения показателей прибытия на некоторой территории, в пределах которой оцениваются времена прибытия первого подразделения как для исходного профиля выезда, так и для оптимального.

Оценка индекса прикрытия

Поскольку в данном примере рассматривается территория городского населенного пункта, то для оценки степени прикрытия использован ИП-10 (рис. 9).

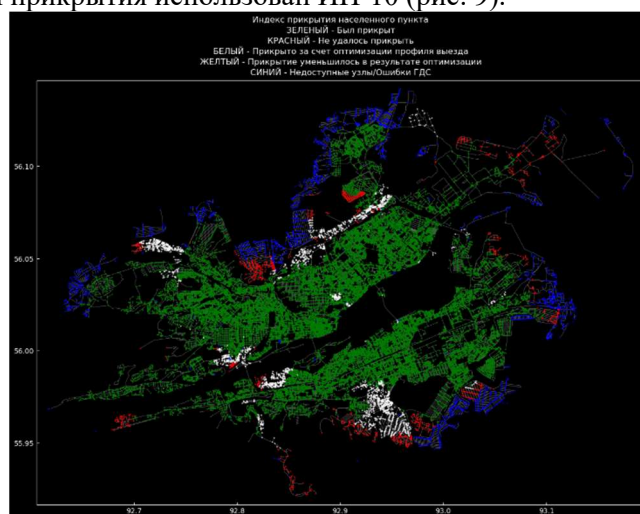


Рис. 9. Визуализация индекса прикрытия города Красноярска. Зеленые точки – зоны, прикрытые до оптимизации. Красные точки – зоны, которые не удалось прикрыть. Белые точки – зоны, прикрытые которых улучшилось в результате оптимизации. Синие точки – недоступные зоны, зоны за пределами границ города Красноярска или ошибки ГДС

ИП-10 для исходного профиля выезда составляет 89.32%. ИП-10 для оптимизированного профиля выезда составляет 96.71%. Таким образом, увеличение ИП-10 в результате оптимизации границ районов выезда в городе Красноярске составляет 7,39%.

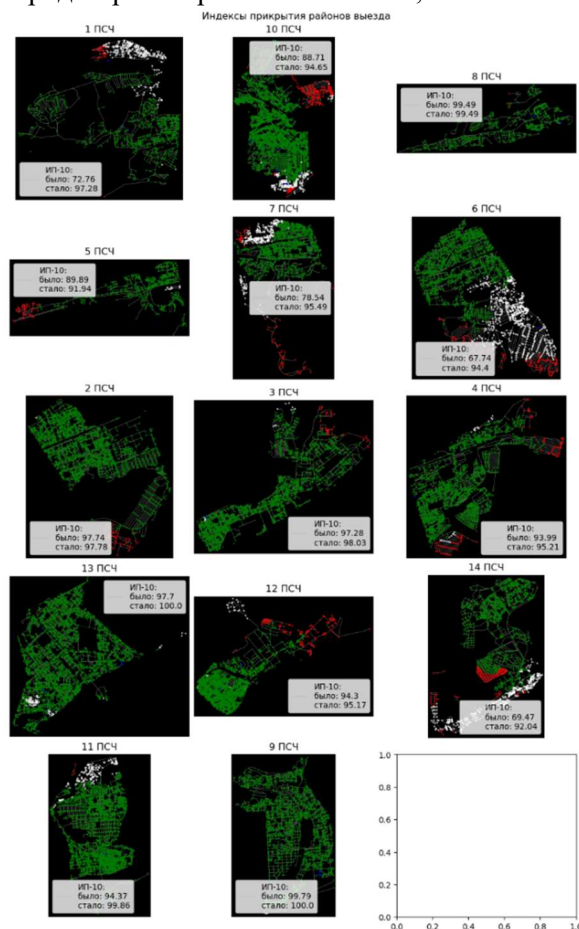


Рис. 10. Визуализация индекса покрытия районов выезда подразделений города Красноярска. Зеленые точки – зоны, покрытые до оптимизации. Красные точки – зоны, которые не удалось покрыть. Белые точки – зоны, покрытие которых улучшилось в результате оптимизации. Синие точки – недоступные зоны, зоны за пределами границ города Красноярска или ошибки ГДС

Таблица 4. Изменение индексов покрытия районов выезда пожарно-спасательных подразделений

Подразделение	Исходный ИП, %	Оптимизированный ИП, %	Разница, %
1 ПСЧ	72.76	97.28	24.52
10 ПСЧ	88.71	94.65	5.94
8 ПСЧ	99.49	99.49	0
5 ПСЧ	89.89	91.94	2.05
7 ПСЧ	78.54	95.49	16.95
6 ПСЧ	67.74	94.4	26.66
2 ПСЧ	97.74	97.78	0.04
3 ПСЧ	97.28	98.03	0.75
4 ПСЧ	93.99	95.21	1.22
13 ПСЧ	97.7	100	2.3
12 ПСЧ	94.3	95.17	0.87
14 ПСЧ	69.47	92.04	22.57
11 ПСЧ	94.37	99.86	5.49
9 ПСЧ	99.79	100	0.21

Из табл. 4 следует, что в результате оптимизации границ районов выезда индекс покрытия вырос на территории почти всех исходных районов выезда. При этом, наибольшее увеличение

можно увидеть на территории районов выезда 6 ПСЧ (+16,66%), 1 ПСЧ (+24,52%) и 14 ПСЧ (+22,57). Практически не изменился индекс прикрытия на территории района выезда 8, 2, 3, 12 и 9 ПСЧ.

Время работы всего программного кода, включая визуализацию и сохранение результатов составило 370,56 сек.

Дискуссия

Несомненным достоинством оптимизации границ районов выезда представляется тот факт, что для этого не требуется материальных затрат. Всего лишь административными мерами можно добиться заметного увеличения показателей прибытия первого пожарного подразделения.

В процессе работы был рассмотрен также метод расчета ПП на основе волнового алгоритма поиска пути для нескольких точек на основе алгоритма Ли [27], однако его реализация потребовала заметно больших вычислительных ресурсов, что привело к увеличению времени расчета в несколько раз. Вместе с тем, такой метод имеет и определённые достоинства, заключающиеся в получении помимо времен прибытия в любую точку ГДС, и пути к каждой из них, что может потребоваться при решении задачи поиска оптимального расположения ПСЧ.

Матрица прибытия также может быть использована в дальнейшем расчете времени сосредоточения сил и средств гарнизона по повышенному рангу пожара, что в свою очередь представляет отдельную задачу для исследования. МП, будучи рассчитана единожды, может быть в дальнейшем использована многократно, без необходимости ее перерасчета, при условии, что ПД пожарных подразделений не изменился.

В ходе работы было установлено, что важным фактором, способным оказать серьезное влияние на результаты расчета является связность ГДС. Так, например, в ГДС города Красноярска имеются отдельные участки попасть в которые можно только преодолев некоторое расстояние по сельской местности. Поэтому при получении ГДС из OSM следует добавлять некоторую буферную зону, которая позволит учитывать объезд. Размер буферной зоны может быть различным для разных населенных пунктов. Аналогичная сложность наблюдается и в меньшем масштабе, при рассмотрении районов выезда конкретных подразделений – в некоторые зоны района выезда можно попасть только, преодолев часть пути по территории района выезда других подразделений. Следовательно, при расчете параметров прибытия подразделений применительно к отдельно взятым подразделениям рекомендуется включать в ГДС некоторую буферную зону, территорию смежных районов выезда или всего населенного пункта.

Определение параметров прибытия пожарных подразделений расчетом, используя в качестве математической основы теорию графов, позволяет получить точные аналитические решения поставленной задачи, вместе с тем, она не позволяет учитывать особенности прибытия подразделений в те или иные районы населенного пункта, с учетом вероятности возникновения пожаров. Это представляется существенным недостатком, так как на территории населенных пунктов могут располагаться некоторые, зачастую достаточно протяженные, зоны, вероятность возникновения пожаров в которых невелика. Примером таких зон являются городские леса.

В последующих работах предполагается выработать механизм учета вероятности возникновения пожаров и ее влияния на расчет оптимальных границ районов выезда.

Еще одним направлением работы по дальнейшему совершенствованию предложенного в работе решения является необходимость уточнения расчетных скоростей движения пожарных автомобилей по различным типам дорог. Кроме того, следует предусмотреть возможность указания различных скоростей движения для различных подразделений, что позволит учитывать особенности движения по дорогам в различных районах города.

Описанный в работе пример отражает параметры реагирования вымышленного пожарно-спасательного гарнизона, что не позволяет оценить результаты работы применительно к реальным условиям. Результаты расчета для реальных данных будут опубликованы в закрытых изданиях.

Заключение

Предложенный способ решения задачи оптимизации границ районов выезда и качественной оценки влияния изменения границ районов выезда с использованием языка программирования Python и специальных программных решений для анализа геопространственных данных, позволяет быстро и без дополнительных усилий по сбору сведений о ГДС получить оптимальное распределение границ районов выезда для произвольного числа подразделений. Кроме того, метод позволяет определять границы района выезда для вновь создаваемых подразделений, что может быть полезным, как руководству пожарно-спасательных подразделений и представителям местных властей, так и в дальнейшей научной работе при решении задачи поиска наиболее оптимальных мест строительства новых пожарных депо.

Список источников

1. Брушлинский Н. Н., Соколов С. В. (2021). О нормировании времени прибытия пожарных подразделений к месту // Пожаровзрывобезопасность. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-normirovanii-vremeni-pribytiya-pozharny-h-podrazdeleniy-k-mestu-pozhara>.
2. Брушлинский Н. Н., Алехин Е. М., Соколов С. В. (2016). Опыт применения компьютерных имитационных систем моделирования деятельности экстренных служб // Пожаровзрывобезопасность 25 (8): 6-16. DOI: <https://doi.org/10.18322/PVB.2016.25.08.6-16>.
3. Алехин Е. М., Вагнер П., Брушлинский Н. Н. (2016). Решение проблемы оргпроектирования экстренных и аварийно-спасательных служб в городах // Технологии техносферной безопасности 67 (3): 192-99.
4. Соколов С. В. (2016). Анализ и оценка времени прибытия пожарных подразделений к местам вызовов в Санкт-Петербурге в 2006-2015 гг. // Технологии техносферной безопасности 66 (2): 86-93.
5. Соколов С. В., Попков С. Ю., Портнов Д. А. (2018). Имитационная модель процесса функционирования территориальных добровольных пожарных команд для оценки параметров оперативного реагирования // Технологии техносферной безопасности 82 (6): 22-31. DOI: <https://doi.org/10.25257/TTS.2018.6.82.22-31>.
6. Соколов С. В., Фам К. Х., Брушлинский Н. Н. (2021). Разработка и адаптация имитационной системы оперативной деятельности пожарных подразделений к условиям Вьетнама // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация, вып. 2: 5-14. DOI: <https://doi.org/10.25257/FE.2021.2.5-14>.
7. Матюшин А. В., Матюшин Ю. А., Порошин А. А. (2013). Проектирование размещения подразделений пожарной охраны в населенных пунктах с использованием геоинформационных технологий // Safety & Fire Technology 31: 81-86. DOI: <https://doi.org/DOI:10.12845/bitp.31.3.2013.9>.
8. Бобринев Е. В., Удавцова Е. Ю., Кондашов А. А. (2019). Использование регрессионного анализа показателей гибели людей при пожарах от времени прибытия первого пожарного подразделения на пожар // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России, 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-regressi-onnogo-analiza-pokazateley-gibeli-lyudey-pri-pozharah-ot-vremeni-pribytiya-pervogo-pozharnogo-podrazdeleniya-na>.
9. Подольская Е. С., Ершов Д. В., Ковганко К. А. (2017). Создание геоинформационной модели планирования оптимального маршрута перемещения наземных сил и средств к месту

тушения лесных пожаров // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: Материалы второй международной научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 24–26 мая 2017 года, 200-202.

10. Подольская Е.С., Ковганко Е.С., Ершов Д.В., Шуляк П.П., Сучков А.И. Использование модели транспортной сети региона для оценки времени и расстояния наземной доставки сил и средств до лесных пожаров // Вопросы лесной науки. 2019. № 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-modeli-transportnoy-seti-regiona-dlya-otsenki-vremeni-i-rasstoyaniya-nazemnoy-dostavki-sil-i-sredstv-do-lesnyh-pozharov> (дата обращения: 31.10.2022).

11. Кочегаров А.В., Денисов М.С., Плаксицкий А.Б. (2016). Математическая модель оптимизации прибытия пожарного подразделения с использованием информационных систем мониторинга транспортной логистики города Воронежа // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий, вып. 3: 116–22. DOI: <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2016-3-116-122>.

12. Порошин А.А., Бобринев Е.В., Маштаков В. А. (2018). Уровень прикрытия сельских поселений пожарно-спасательными подразделениями // Актуальные проблемы пожарной безопасности: тез. докл. XXX Междунар. науч.-практ. конф, 41-43.

13. Матюшин А.В., Бобринев Е.В., Порошин А.А. (2012). Современные геоинформационные технологии в проектировании гарнизонов пожарной охраны // Пожарная безопасность, вып. 3: 107-19.

14. Bing Han, Jiemin Zheng, Mingxing Hu (2021). Site Selection of Fire Stations in Large Cities Based on Actual Spatiotemporal Demands: A Case Study of Nanjing City // International Journal of Geo-Information. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijgil0080542>.

15. Farguell, Haley J., Mandel A. (2021). Machine Learning Estimation of Fire Arrival Time from Level-2 Active Fires Satellite // Remote sensing 13 (11). DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13112203>.

16. Szymon, Wiśniewski (2016). Fire service accessibility to potential intervention areas in Łódź voivodship // CNBOP-PIB 43 (3): 21-36. DOI: <https://doi.org/10.12845/bitp.43.3.2016.2>.

17. «Федеральный закон "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности" от 22.07.2008 № 123-ФЗ» (2008). URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_78699/?ysclid=17irogbnsc929728462.

18. «Методические рекомендации по определению мест размещения подразделений пожарной охраны в населенных пунктах в целях доведения времени прибытия первого подразделения пожарной охраны до нормативных значений», утв. Г.Н. Кирилловым 30 декабря 2009 г. № 2-60-14-18» (2009).

19. «Приказ МЧС России от 25 марта 2009 года № 181 об утверждении «Свода правил СП 11.13130.2009 «Места дислокации подразделений пожарной охраны. Порядок и методика определения».

20. «Приказ МЧС России от 25 октября 2017 г. № 467 "Об утверждении Положения о пожарно-спасательных гарнизонах"» (2017).

21. Малютин О. С. (2019). Возможности современных информационных технологий при определении расчетного времени следования пожарных подразделений к месту вызова // Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции, Железногорск, 25 октября 2019 года, 10-18.

22. Казанцев К., Румянцева А. (2022). Доступность первичной медпомощи в России: модель оценки и результаты ее применения на допандемийных данных. Исследования по вопросам государственного управления. Т. 15. Центр перспективных управленческих решений.

23. Dijkstra W. E. (1959). A note on two problems in connexion with graphs // Numer Math 1 (1): 169-271. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01386390>.

24. Маштаков В. А., Удавцова Е. Ю., Бобринев Е. В. (2021). Сравнение показателей оперативного реагирования подразделений пожарной охраны территорий, находящихся в различных климатических условиях // Актуальные вопросы пожарной безопасности 10 (4). DOI: <https://doi.org/10.37657/vniipo.avpb.2021.89.74.001>.

25. Сибиряков М. В. (2018). Информационно-аналитическая поддержка управления оперативными пожарно-спасательными подразделениями. Москва. URL: <https://academygps.ru/upload/iblock/837/837ae1ebd76399e7955021ce5dad7af.pdf?ysclid=7iqdiupnr174302417>.

26. «Приказ ФСБ России от 28 сентября 2021 г. № 379 "Об утверждении Перечня сведений в области военной, военно-технической деятельности Российской Федерации, которые при их получении иностранным государством, его государственными органами, международной или иностранной организацией, иностранными гражданами или лицами без гражданства могут быть использованы против безопасности Российской Федерации"» (2021).

27. Lee, C. Y. 1961. An Algorithm for Path Connections and Its Applications // Electronic Computers 10 (3): 346–365.

List of sources

1. Brushlinsky N. N., Sokolov S. V. (2021). On the rationing of the time of arrival of fire departments to the place // Fire and Explosion Safety. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ornormirovanii-vremeni-pribytiya-pozharnyh-subrazdeleniy-k-mestu-pozhara>.

2. Brushlinsky N. N., Alekhin E. M., Sokolov S. V. (2016). Experience in the use of computer simulation systems for modeling the activities of emergency services // Fire and Explosion Safety 25 (8): 6-16. DOI: <https://doi.org/10.18322/PVB.2016.25.08.6-16>.

3. Alekhin E. M., Vagner P., Brushlinsky N. N. (2016). Solving the problem of organizational design of emergency and rescue services in cities//Tekhnologii tekhnosfernoi bezopasnosti 67(3):192-99

4. Sokolov S. V. (2016). Analysis and evaluation of the time of arrival of fire departments to call points in St. Petersburg in 2006-2015. // Technologies of technosphere safety 66 (2): 86-93.

5. Sokolov S. V., Popkov S. Yu., Portnov D. A. (2018). Simulation model of the process of functioning of territorial voluntary fire brigades to assess the parameters of operational response // Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti 82 (6): 22-31. DOI: <https://doi.org/10.25257/TTS.2018.6.82.22-31>.

6. Sokolov S. V., Fam K. Kh., Brushlinsky N. N. (2021). Development and adaptation of a simulation system for the operational activities of fire departments to the conditions of Vietnam // Fires and emergency situations: prevention, liquidation, vol. 2:5-14. DOI: <https://doi.org/10.25257/FE.2021.2.5-14>.

7. Matyushin A. V., Matyushin Yu. A., Poroshin A. A. (2013). Designing the placement of fire departments in settlements using geoinformation technologies // Safety & Fire Technology 31: 81-86. DOI: <https://doi.org/DOI:10.12845/bitp.31.3.2013.9>.

8. Bобринев Е. В., Удавцова Е. Ю., Кондашов А. А. (2019). The use of regression analysis of indicators of deaths in fires from the time of arrival of the first fire department to the fire // Bulletin of the St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/use-regressionnogo-analiza-pokazateley-gibeli-lyudey-pri-pozharah-ot-vremeni-pribytiya-pervogo-pozharnogo-podrazdeleniya-na>.

9. Podolskaya E. S., Ershov D. V., Kovganko K. A. (2017). Creation of a geoinformation model for planning the optimal route for the movement of ground forces and means to the place of extinguishing forest fires // Forests of Russia: politics, industry, science, education: Proceedings of the second international scientific and technical conference, St. Petersburg, May 24–26, 2017, 200- 202.

10. Podolskaya E. S., Kovganko E. S., Ershov D. V., Shulyak P. P., Suchkov A. I. Using the regional transport network model to estimate the time and distance of ground delivery of forces and

means to forest fires // Questions of forest science. 2019. № 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-modeli-transportnoy-seti-regiona-dlya-otsenki-vremeni-i-rasstoyaniya-nazemnoy-dostavki-sil-i-sredstv-do-lesnyh-pozharov> (date of access: 31.10.2022).

11. Kochegarov A. V., Denisov M. S., Plaksitsky A. B. (2016). Mathematical model for optimizing the arrival of a fire department using information systems for monitoring the transport logistics of the city of Voronezh // Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies, vol. 3:116–22. DOI: <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2016-3-116-122>.

12. Poroshin A. A., Bobrinev E. V., Mashtakov V. A. (2018). The level of coverage of rural settlements by fire and rescue units // Actual problems of fire safety: abstract XXX Intl. Scientific-Practical Conference, 41-43.

13. Matyushin A. V., Bobrinev E. V., Poroshin A. A. (2012). Modern geoinformation technologies in the design of fire protection garrisons // Fire safety, vol. 3:107-19.

14. Bing Han, Jiemin Zheng, Mingxing Hu (2021). Site Selection of Fire Stations in Large Cities Based on Actual Spatiotemporal Demands: A Case Study of Nanjing City // International Journal of Geo-Information. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijgil0080542>.

15. Farguell, Haley J., Mandel A. (2021). Machine Learning Estimation of Fire Arrival Time from Level-2 Active Fires Satellite // Remote sensing 13 (11). DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13112203>.

16. Szymon, Wiśniewski (2016). Fire service accessibility to potential intervention areas in Łódź voivodship // CNBOP-PIB 43 (3): 21-36. DOI: <https://doi.org/10.12845/bitp.43.3.2016.2>.

17. Federal Law "Technical Regulations on Fire Safety Requirements", July 22, 2008 № 123-FZ" (2008). URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_78699/?ysclid=17irogbnsc929728462.

18. "Methodological recommendations for determining the locations of fire departments in settlements in order to bring the time of arrival of the first fire department to the standard values", approved by G.N. Kirillov. December 30, 2009 No. 2-60-14-18" (2009).

19. Order of the Ministry of Emergency Situations of Russia dated March 25, 2009 No. 181 on the approval of the "Code of Rules SP 11.13130.2009 "Places of deployment of fire departments. Order and method of determination".

20. Order of the Ministry of Emergency Situations of Russia dated October 25, 2017 № 467 "On approval of the Regulations on fire and rescue garrisons" (2017).

21. Malyutin O. S. (2019). Possibilities of modern information technologies in determining the estimated travel time of fire departments to the place of call // Collection of materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference, Zheleznogorsk, October 25, 2019, 10-18.

22. Kazantsev K., Rumyantseva A. (2022). Availability of primary health care in Russia: an assessment model and the results of its application on pre-pandemic data. Research on public administration. V. 15. Center for Advanced Management Decisions.

23. Dijkstra W. E. (1959). A note on two problems in connexion with graphs // Numer Math 1 (1): 169-271. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01386390>.

24. Mashtakov V. A., Udavtsova E. Yu., Bobrinev E. V. (2021). Comparison of operational response indicators of fire departments of territories located in different climatic conditions // Aktualnyy problemy pozharnoy bezopasnosty 10 (4). DOI: <https://doi.org/10.37657/vniipo.avpb.2021.89.74.001>.

25. Sibiryakov M. V. (2018). Information and analytical support for the management of operational fire and rescue units. Moscow. URL: <https://academygps.ru/upload/iblock/837/837ae1ebd76399e7955021ce5dad7af.pdf?ysclid=17iqdiupnr174302417>.

26. Order of the FSB of Russia dated September 28, 2021 № 379 "On approval of the List of information in the field of military, military-technical activities of the Russian Federation, which, upon

receipt by a foreign state, its state bodies, an international or foreign organization, foreign citizens or persons without citizenship can be used against the security of the Russian Federation” (2021).

27. Lee, C. Y. 1961. An Algorithm for Path Connections and Its Applications // Electronic Computers 10 (3): 346–365.

Информация об авторах

С.В. Бабенышев – кандидат физико-математических наук

Е.Н. Матеров – кандидат физико-математических наук

Information about the authors

S.V. Babenyshev – Ph.D. of Physico-mathematical Sciences

E.N. Materov – Ph.D. of Physico-mathematical Sciences

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 редакция 28.02.2023; одобрена после рецензирования 20.03.2023; принята к публикации 21.03.2023.

The article was submitted 28.02.2023, approved after reviewing 20.03.2023, accepted for publication 21.03.2023.