

Александров Александр Алексеевич – Южный федеральный университет; e-mail: alea@sfedu.ru; г. Ростов-на-Дону, Россия; Международный исследовательский институт интеллектуальных материалов Южного федерального университета; инженер.

Мизюков Григорий Сергеевич – Ростовский государственный университет путей сообщения; e-mail: g.miziukov@yandex.ru; г. Ростов-на-Дону, Россия; кафедра вычислительной техники и автоматизированных систем управления; к.т.н.; доцент.

Бутакова Мария Александровна – Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте АО «НИИАС», Ростовский филиал; e-mail: m.butakova@vniias.ru; г. Ростов-на-Дону, Россия; д.т.н.; профессор; г.н.с.

Aleksandrov Aleksandr Alekseevich – Southern Federal University; e-mail: alea@sfedu.ru; Rostov-on-Don, Russia; the International Research Institute of Intelligent Materials of the Southern Federal University; engineer.

Miziukov Grigorii Sergeevich – Rostov State Transport University; e-mail: g.miziukov@yandex.ru; Rostov-on-Don, Russia; the Department of Computer Engineering and Automated Control Systems; cand. of tech. sc.; associate professor.

Butakova Maria Aleksandrovna – JSC NIIAS; e-mail: m.butakova@vniias.ru; dr. of tech. sc.; professor; leading researcher.

УДК 65:614.842: 005.591.1

DOI 10.18522/2311-3103-2024-5-131-142

О.С. Малютин, Р.Ш. Хабибуллин

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПОЖАРОВ В ЗДАНИЯХ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ПЛОТНОСТИ И ИМИТАЦИИ ОТЖИГА

Решение задачи определения оптимального пространственного размещения пожарных подразделений представляет собой достаточно сложную научно-техническую проблему, включающую, как показали предыдущие исследования, обширный перечень факторов, в том числе необходимость оценки ожидаемых частот возникновения пожаров в разных частях населенных пунктов в зависимости от характера застройки. В настоящее время в Российской Федерации подходы и методы, позволяющие решить эту проблему, не достаточно проработаны. Как правило исследователи ограничиваются фактом существования пространственного распределения пожаров, не углубляясь в причины, приведшие к тому или иному характеру такого распределения. Между тем их понимание позволит строить модели оценки ожидаемых плотностей потоков пожаров в различных районах городов. В статье предложен подход, основанный на методе оценки пространственной плотности случайных событий (KDE, Kernel Density Estimation) и алгоритме имитации отжига для подбора значений расчетных частот возникновения пожаров в зданиях различных классов функциональной пожарной опасности. Существующая классификация расширена за счет добавления класса Ф1.5 для садовых домиков и дач. Подход апробирован на имеющихся данных о пожарах за период 2010–2020 годов и городской застройке города Красноярск. Подход реализован в виде программного решения на языке программирования Python с использованием инструментов ГИС, пространственного и сетевого анализа. Исследование показало, что предложенный подход позволяет получить такие значения частот возникновения пожаров, при которых их прогнозируемая плотность будет максимально близка к фактической. Полученные результаты расширяют набор исследовательских инструментов в области оценки как фактической, так и прогнозируемой пожарной обстановки и направлены на развитие методов и алгоритмов определения оптимальных мест размещения пожарных подразделений. Предложенный подход также может быть использован и при решении иных задач пространственной оптимизации в области обеспечения общественной безопасности, безопасности дорожного движения, защиты населения от чрезвычайных ситуаций, а также в области урбанистики и градостроительства.

Пожарная охрана; частота пожара; геоинформационные системы; оптимизация; метод оценки плотности.

O.S. Malyutin , R.Sh. Khabibulin

BUILDINGS FIRES FREQUENCY DETERMINING METHODOLOGY BASED ON DENSITY ESTIMATION AND SIMULATED ANNEALING METHODS

Solving the problem of determining the optimal spatial location of fire departments is a rather complex scientific and technical problem, including, as previous studies have shown, an extensive list of factors, including the need to assess the expected frequencies of fires in different parts of settlements, depending on the nature of the development. Currently, in the Russia, approaches and methods to solve this problem are not sufficiently developed. As a rule, researchers limit themselves to the fact of the existence of a spatial distribution of fires, without delving into the causes that led to one or another nature of such a distribution. Meanwhile, their understanding will allow us to build models for estimating the expected densities of fire flows in various areas. The article proposes an approach based on the method of estimating the spatial density of random events (KDE, Kernel Density Estimation) and a simulated annealing algorithm to select the values of the calculated frequencies of fires in buildings of various classes of functional fire hazard. The approach has been tested on the available data on fires for the period 2010-2020 and urban development in the city of Krasnoyarsk. The study showed that the proposed approach allows us to obtain such values of fire occurrence frequencies at which their predicted density will be as close as possible to the actual one. The results obtained expand the set of research tools in the field of assessing both the actual and predicted fire situation and are aimed at developing methods and algorithms for determining the optimal locations of fire departments. The proposed approach can also be used to solve other problems of spatial optimization in the field of public safety, road safety, protection of the population from emergency situations, as well as in the field of urbanism and urban planning.

Fire protection; fire frequency; geoinformation systems; optimization; density estimation method.

Введение. При решении задачи поиска оптимального размещения пожарных подразделений, одним из ключевых факторов, который следует учитывать, является частота возникновения пожаров в тех или иных частях населенного пункта. Исследованию данной проблематики посвящены работы [1–7], в которых отражены результаты исследований связанных с оценкой частот возникновения пожаров в зданиях и на территории населенных пунктов. Основным недостатком названных работ можно назвать выборочную оценку частот возникновения пожаров лишь для ряда случаев (жилые дома, промышленные предприятия и т.д.). В статистических сборниках «Пожары и пожарная безопасность» [8, 9] приводятся статистические сведения о количестве пожаров в зданиях различного назначения и классов функциональной пожарной опасности, однако, не располагая сведениями об общем количестве зданий соответствующих классов, оценить частоты возникновения пожаров в них невозможно. Сведения о статистических данных о частотах возникновения пожара в зданиях приводятся в приложении №3 к методике определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и пожарных отсеках различных классов функциональной пожарной опасности, утвержденной приказом МЧС России от 14.11.2022 № 1140 [10]. Из числа зарубежных работ стоит отметить [11], где для оценки плотности распределения пожаров используется метод оценки ядерной плотности (далее – *KDE* от англ. *Kernel Density Estimation*), а также работу [12], в которой описывается применение индекса Морана. В компьютерных имитационных системах, например [1], имеется возможность указывать плотности возникновения пожаров, но их значения выбираются самим пользователем. При этом, способов оценки ожидаемой плотности пожаров на территориях населенных пунктов, для которых сведения о пожарах недостаточны, или отсутствуют (например, при проектировании новых районов застройки), на сегодняшний день не существует.

Одним из подходов к оценке ожидаемой частоты возникновения пожаров может стать использование заранее определенных справочных значений о расчетных частотах возникновения пожаров в зданиях различного назначения.

Таким образом, работа посвящена оценке и подбору методов и справочных данных о частотах возникновения пожаров в зданиях различного назначения с точки зрения их предсказательной силы в отношении ожидаемой пространственной плотности пожаров с использованием методов пространственной аналитики и машинного обучения.

Объектом исследования являются частоты возникновения пожаров (на примере г. Красноярск). Предмет исследования – методика определения частот возникновения пожаров в зданиях различного назначения.

Методы

Метод KDE. Метод *KDE* позволяет оценить плотность пространственного распределения некоторых случайных событий (применительно к данному исследованию – мест возникновения пожаров и мест размещения зданий). Метод был предложен Е. Парценом (в 1956 году) [13] и М. Розенблаттом (в 1962 году) [14] независимо друг от друга, и основан на идее сглаживания количественного распределения за счет оценки влияния случайных величин в некоторой близости от них по некоторому закону. Метод может быть взвешенным или невзвешенным, что удобно как для оценки пространственной плотности мест возникновения пожаров, так и для оценки ожидаемой плотности возникновения пожаров в зданиях различного назначения. В качестве закона распределения влияния случайных величин могут использоваться следующие функции (ядра): Гаусса, tophat, Епанечникова, экспоненциальная, линейная и косинусная [15].

В данной работе использовалась программная реализация метода *KDE* из библиотеки языка программирования *Python Scikit-learn* версии 1.4.2.

Алгоритм имитации отжига. Алгоритм имитации отжига (англ. – *simulated annealing*, далее – ИО) – это метод оптимизации, основанный на идее термодинамической системы, охлаждающейся до состояния равновесия. В процессе работы алгоритма случайным образом выбирается новое решение задачи, которое сравнивается с текущим. Если новое решение лучше текущего, оно принимается как текущее. Если же новое решение хуже, то оно всё равно может быть принято, как текущее с некоторой вероятностью, зависящей от температуры системы. По мере того, как температура снижается в ходе вычислений, вероятность принятия худшего решения уменьшается, и система приближается к глобальному оптимуму [16].

Исходные данные

Данные о пожарах. Для проведения анализа частоты возникновения пожаров в качестве исходных данных были использованы сведения из Федеральной базы данных (ФБД) «Пожары» за период 2010-2020 годы. Была использована выборка по пожарам, произошедшим в зданиях на территории города Красноярск. Пожары, произошедшие на открытой территории (загорания мусора, пожары транспорта и т.д.) не рассматривались. Для анализа были выбраны следующие признаки: дата пожара, класс функциональной пожарной опасности (далее – КФПО), назначение объекта, адрес объекта. Поскольку в ФБД «Пожары» сведения о географических координатах отсутствуют, была проведена процедура геокодирования с использованием возможностей сервиса «Яндекс Геокодер». Часть пожаров произошла на территории садоводческих товариществ и дачных поселков, провести процедуру геокодирования для которых не представляется возможным в связи с отсутствием данных о точных адресах дачных построек – такие пожары были расположены случайным образом на территории садоводческих товариществ.

В результате был получен набор данных, состоящий из 5 620 записей вида:

Таблица 1

Пример исходных данных о пожарах

id	Дата	Идентификатор объекта по 1140	КФПО	Пожарных автомобилей всего	Адрес	Координаты
0	2011-12-14 02:46:00	25	Ф1.4	1	ул. Больше- вистская 175/5.	POINT (82.973415, 54.994442)
1	2010-11-29 11:23:00	40	Ф1.4	2	ул. Жуков- ского 106/1.	POINT (82.893686, 55.055223)
2	2019-10-21 00:58:00	16	Ф1.3	6	ул. Восточ- ная 26.	POINT (82.890907, 55.055125)

Данные о застройке города. В качестве исходных данных о застройке города были использованы данные из открытого картографического сервиса *Open street map* (далее – *OSM*). Получение данных осуществлялось посредством библиотеки *Python OSMNX* [17, 18]. Полученные данные были сохранены в формате пространственных данных *geopackage* и включены в проект приложения *QGIS* [19].

Сведения о назначении зданий для обеспечения дальнейшего сопоставления со значениями КФПО были соответствующим образом интерпретированы.

В результате было получено 85 094 записи вида:

Таблица 2

Пример исходных данных о зданиях

id	Назначение	Адрес	Этажей	КФПО
207766295	Жилой дом	ул. Береговая, 12	1	Ф1.4
791957821	Административное здание	ул. Песочная, 2	5	Ф4.3
1247655719	Торговое здание	ул. Мира 22	3	Ф3.1

Обзор данных. Записи о произошедших пожарах были размещены на интерактивной карте *QGIS* в виде точечных объектов в соответствии с полученными координатами. Далее встроенными средствами *QGIS* была построена тепловая карта пожаров для ячеек размером 25 м и зоной охвата 1 км (рис. 1).

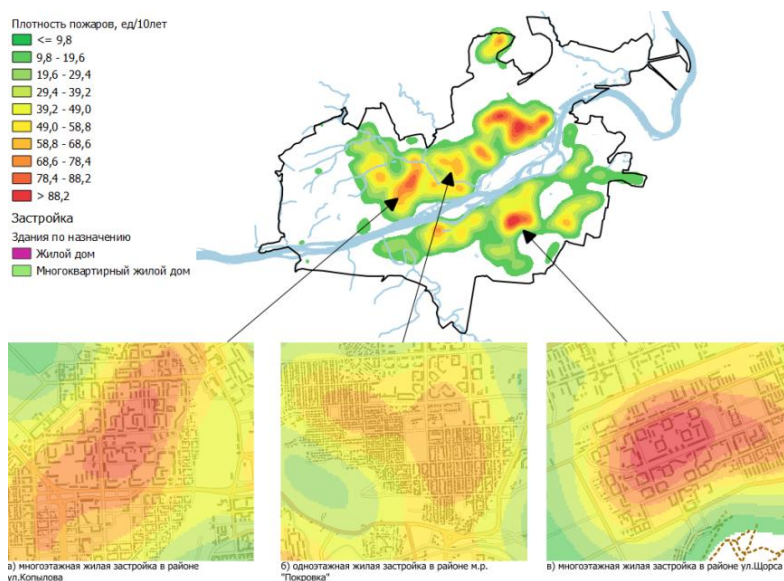


Рис. 1. Распределение плотностей возникновения пожаров на территории города Красноярск за период 2010- 2020 гг.

Обзор полученного распределения показывает наличие стойких паттернов пространственного распределения пожаров, связанных с характером застройки. Наибольшая плотность пожаров наблюдается в районах с многоэтажной жилой застройкой (78,4 пожара за 10 лет) (рис. 1 а,в). Несколько меньшая (58,8–78,4 пожара за 10 лет) плотность наблюдается в районах с одноэтажной жилой застройкой (рис. 3,б).

На следующем этапе была проведена оценка соответствия вероятностей возникновения пожаров, приведенная в методике определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и пожарных отсеках различных классов функциональной пожарной опасности [10]. Для этого зданиям, в зависимости от их назначения, было сопоставлено значение вероятности возникновения пожара. При этом, для ряда зданий, сопос-

тавить которые с конкретным классом не представлялось возможным, было установлено среднее значение по всем классам (0,015 ед/год). На основании полученных значений была составлена тепловая карта ожидаемой плотности возникновения пожаров с размером ячейки 25 м и зоной охвата 1 км (рис. 2). Для того, чтобы плотности можно было сопоставить между собой их значения были нормализованы, т.е. приведены к общему диапазону в пределах от 0 до 1, где 0 соответствует минимальному значению плотности, а 1 – максимальному.

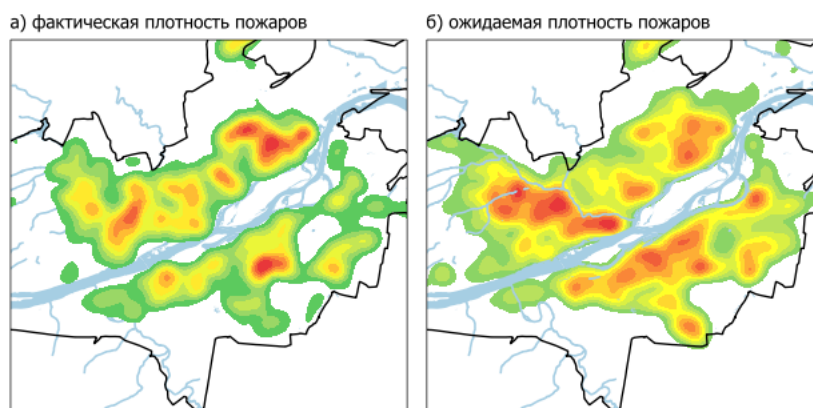


Рис. 2. Сравнение плотностей пожаров: а – фактическая плотность пожаров, б – ожидаемая плотность пожаров для вероятностей возникновения пожаров в соответствии с методикой [10]

Из рис. 2 видно, что фактическая и ожидаемая в соответствии со значениями риска возникновения пожара по методике [10], плотности пожаров не совпадают. Частоты возникновения пожаров в зданиях различного назначения оказывают существенное влияние на распределение плотностей пожаров, что говорит о том, что зная вероятности возникновения пожаров в зданиях различного назначения, можно предсказать какова будет плотность пожаров в тех или иных районах города и на основе этого прогноза вырабатывать управленческие решения по определению мест размещения пожарных депо.

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

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

$$P_o = \{p_{o1}, p_{oi}\}, i \in I, \quad (2)$$

$$I \subseteq S,$$

$$err(P_{\phi}, P_o) \rightarrow \min, \quad (3)$$

где $p_{\phi i}$ – фактическая плотность пожаров в точке i ; p_{oi} – ожидаемая плотность пожаров в точке i .

Для определения значений частоты возникновения пожаров в контрольных точках I была использована модель ядерной оценки плотности KDE [15]. Тогда фактическая плотность пожаров в любой i -й точке будет:

$$p_{\phi i} = KDE(i, F) \quad (4)$$

$$F \subseteq S,$$

где F – точки возникновения пожаров.

А ожидаемая плотность пожаров в каждой точке:

$$p_{oi} = KDE(i, J, P_{зд}), \quad (5)$$

$$P_{зд} = \{p_{зд1}, p_{здj}\}, j \in J, \quad (6)$$

$$J \subseteq S, \quad (7)$$

$$p_{здj} = p_{кл}(c_j), c_j \in C, \quad (8)$$

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

Предлагается два подхода:

1. Выдвижение и оценка теоретически обоснованных частотных моделей – кандидатов.
2. Подбор наиболее подходящих параметров частотной модели с использованием алгоритма имитации отжига.

Результаты исследования. По первому подходу в качестве кандидатов были рассмотрены следующие модели (табл. 3).

Таблица 3

Модели соотношения классификации зданий и частот возникновения пожаров

Обозначение	Описание	Выбор классификации и вероятностей возникновения пожаров
ПРВПЗ КФПО	Пространственное распределение плотности зданий, взвешенной по вычисленной вероятности возникновения пожара в зданиях различных классов функциональной пожарной опасности (ФЗ-123, ст. 32), далее – КФПО.	Классификация: по КФПО Частота возникновения пожаров: $c_k = N_k^n / N_k^{зд}$, где N_k^n – количество пожаров, произошедших в зданиях k -го КФПО, ед; $N_k^{зд}$ – количество зданий с k -м КФПО, ед.
ПРВПЗ 1140	Пространственное распределение плотности зданий, взвешенной по вероятности возникновения пожара в зданиях различного назначения в соответствии с приказом МЧС России №1140 от 14.11.2022	Классификация: прил. 3 к приказу МЧС России №1140 от 14.11.2022 Частота возникновения пожаров: прил. 3 к приказу МЧС России №1140 от 14.11.2022
ПРВПЗ 1140+	Пространственное распределение аналогично ПРВПЗ 1140, но дачные домики вынесены в отдельную категорию.	Классификация: прил. 3 к приказу МЧС России №1140 от 14.11.2022 Частота возникновения пожаров: аналогично ПРВПЗ 1140, для дачных домиков установлена вероятность вдвое меньше, чем для одноэтажных жилых домов.
ПРВФПЗ КФПО+	Пространственное распределение вычислено среднее значение фактической плотностей пожаров в центроидах зданий каждого их классов, но дачные домики вынесены в дополнительную категорию Ф1.5.	Классификация: КФПО + Ф1.5 Частота возникновения пожаров: определена по реальным плотностям пожаров.
ПРВПЗ КФПО+1140	Пространственное распределение плотности зданий, взвешенной по вероятности возникновения пожара в зданиях различного КФПО в соответствии с приказом 1140 плотности зданий с уточнениями	Классификация: по КФПО + Ф1.5 Частота возникновения пожаров: аналогично ПРВПЗ 1140, для Ф1.5, установлена вероятность вдвое меньше, чем для Ф1.4.

Для оценки точности перечисленных моделей были применены следующие функции ошибки: MAE – средняя абсолютная ошибка (англ. – Mean Absolute Error), MSE – средняя квадратичная ошибка (англ. – Mean Square Error), R2 – коэффициент детерминации [20]. Результаты расчета приведены в табл. 4. Вычисления проводились для ячеек размером 200х200 м, охватом 1000 м и гауссовой функции оценки плотности.

Таблица 4

Результаты вычисления функций ошибки для моделей соотношения классификации зданий и частот возникновения пожаров

Обозначение	Функция ошибки		
	MAE	MSE	R2
ПРВПЗ КФПО	0,065929	0,012883	0,791836
ПРВПЗ 1140	0,06926	0,009375	0,857428
ПРВПЗ 1140+	0,06458	0,008229	0,874893
ПРВФПЗ КФПО+	0,10839	0,02803	0,153392
ПРВПЗ КФПО+1140	0,077557	0,011606	0,836134

Графическое представление результатов расчета представлено на рис. 3.

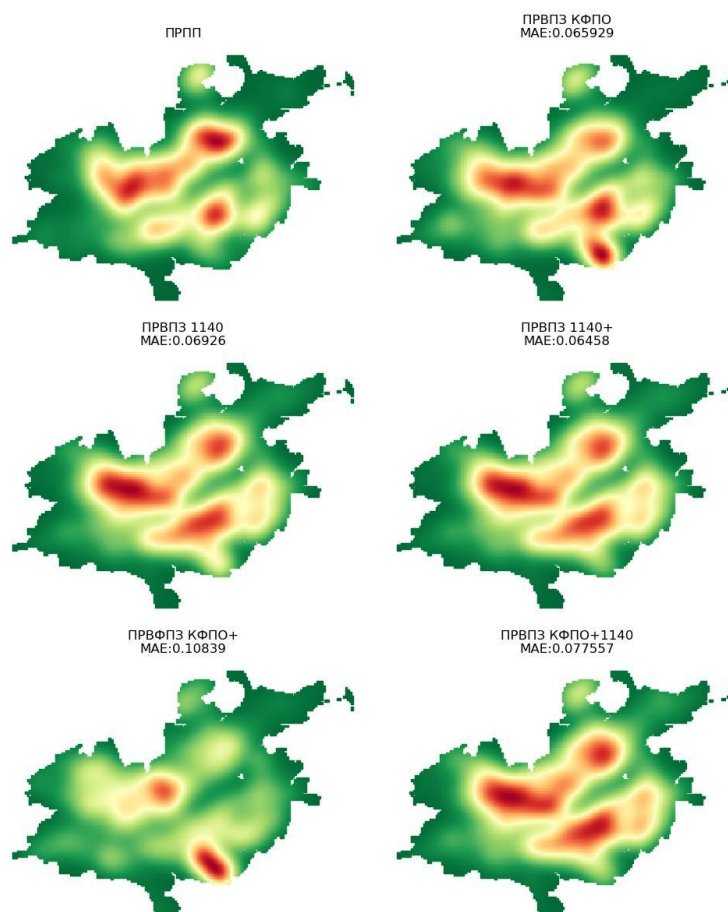


Рис. 3. Сравнение пространственного распределения фактической (ПРПП) и ожидаемой плотностей возникновения пожаров для моделей ПРВПЗ КФПО, ПРВПЗ 1140, ПРВПЗ 1140+, ПРВФПЗ КФПО+, ПРВПЗ КФПО+1140

Видно, что наиболее точной является ПРВПЗ 1140+ (MAE: 0,06458, MSE: 0,008229, R2: 0,874893), данная частотная модель послужила основой для дальнейшего уточнения.

Обозначение лучше поставить Вариант 1, Вариант 2 и т.д. А не ПРВПЗ КФПО!

Поиск с использованием алгоритма имитации отжига. Дальнейшее уточнение вероятностей возникновения пожаров в зданиях различного назначения проводилось с использованием алгоритма ИО.

Применительно к поставленной задаче охлаждающейся системой является частотная модель КФПО+, состоянием системы являются численные значения вероятностей возникновения пожаров в зданиях различных КФПО+, энергией системы является значение, возвращаемое функцией 1.4.

Гиперпараметрами алгоритма ИО являются:

- ♦ размер ячейки: *cell*;
- ♦ охват: *band_width*;
- ♦ функции оценки плотности: *kernel*;
- ♦ температура: *T*.

Алгоритм реализован с использованием языка программирования *Python*.

В табл. 5 приведены оценки точности и качества некоторых рассмотренных в работе реализаций ИО в зависимости от гиперпараметров модели. На рис. 4 они показаны графически.

Таблица 5

Оценка точности некоторых рассмотренных настроек алгоритма ИО

Метрика	ИО M0: <i>cell=200м,</i> <i>band_width = 1000м,</i> <i>kernel = 'gaussian',</i> <i>T = 0,0001</i>	ИО M1: <i>cell=200м,</i> <i>band_width = 400м,</i> <i>kernel = 'tophat',</i> <i>T = 0,0001</i>	ИО M2: <i>cell=200м,</i> <i>band_width = 1000м,</i> <i>kernel = 'tophat',</i> <i>T = 0,0001</i>
MAE	0,071375	0,056051	0,057503
MSE	0,008966	0,00607	0,006656
R2	0,865552	0,909139	0,886433
Время расчета, час	32	3	3

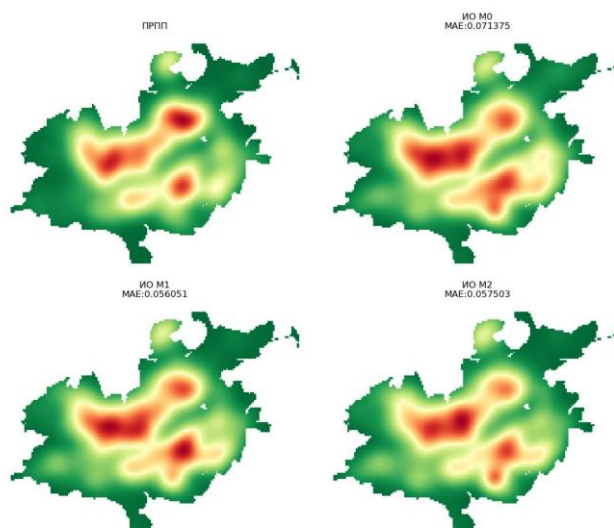


Рис. 4. Сравнение пространственного распределения фактической (ПРПП) и ожидаемой плотности возникновения пожаров для моделей ИО M0, ИО M1, ИО M2

В табл. 6 приведены результаты моделирования вероятностей возникновения пожаров в зданиях различного КФПО. Полученные результаты сопоставлены с фактическими значениями.

Таблица 6
Сравнение вычисленных и фактических значений частоты возникновения пожаров в зданиях различных КФПО

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

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

Из табл. 6 видно, что наибольшая вероятность возникновения пожаров – в зданиях класса Ф1.3 (многоквартирные жилые дома), наименьшая – в зданиях Ф1.5 (дачные домики, предназначенные для сезонного проживания).

Обсуждение. Необходимо отметить, что полученные теоретические и фактические значения для ряда классов объектов защиты заметно отличаются, что возможно стало следствием малого количества пожаров в зданиях соответствующих классов. Это не по-

звolyет на данном этапе построить достаточно точную модель определения вероятности возникновения пожаров. Однако, как видно из табл. 4 и рис. 3, модели ПРВПЗ КФПО и ПРВПЗ КФПО+ построенные на вычисленных значениях вероятностей возникновения пожаров уступают по точности построения пространственных распределений ожидаемой плотности пожаров моделям полученным в результате применения алгоритма имитации отжига (ИО М0, ИО М1, ИО М2) (табл. 5, рис. 4).

Существенное влияние на результаты работы может оказывать качество исходных данных – данные о пожарах и данные о городской застройке. Используемые в работе данные *OSM* не содержат в полной мере всех необходимых для анализа данных. Так, например, использование в сервисе собственной системы идентификации объектов, позволяющей к тому же указывать любые значения помимо принятых, приводит к необходимости интерпретации имеющихся данных с точки зрения принятой в России пожарно-технической классификации. Заметная доля объектов не имеет или имеет ошибочные сведения о назначении объектов, этажности, адресах и т.д. Все это приводит к необходимости трудоемкой ручной обработки данных, что делает невозможным использование данных *OSM* в чистом виде.

Заключение. В ходе работы предложен и апробирован метод оценки частоты возникновения пожаров в зданиях различного назначения на основе пространственной плотности пожаров и алгоритма имитации отжига. Установлено, что предложенный метод позволяет определить частоты возникновения пожаров, на основе которых можно получить максимально согласующиеся с реальностью ожидаемые плотности пожаров на территории городов. А это в свою очередь позволяет оценить оптимальность размещения существующих и необходимость создания новых пожарных подразделений на территории городов с целью повышения защиты населения от пожаров.

Направления дальнейших исследований:

- ♦ оценка перспектив замены использованного алгоритма имитации отжига на иные алгоритмы машинного обучения;
- ♦ разработка прикладной методики предварительной подготовки данных для использования с предложенным методом;
- ♦ реализация предложенного метода в виде программного обеспечения для ЭВМ;
- ♦ оценка необходимости включения в учет дополнительных параметров, таких как площадь и этажность здания, социальные факторы и т.д.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Соколов С.В., Брушлинский Н.Н., Фам К.Х. Разработка и адаптация имитационной системы оперативной деятельности пожарных подразделений к условиям Вьетнама // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2021. – № 2. – С. 5-14. – DOI: 10.25257/FE.2021.2.5-14.
2. Брушлинский Н.Н. [и др.] Безопасность городов. Имитационное моделирование городских процессов и систем. – М.: ФАЗИС, 2004. – 172 с.
3. Брушлинский Н.Н. [и др.]. Математические методы и модели управления в Государственной противопожарной службе: учебник. – 2-е изд., испр. и допол. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2019. – 194 с.
4. Гордиенко Д.М. [и др.]. Данные о частотах возникновения пожаров и пожароопасных ситуаций в общественных зданиях различного назначения и на производственных объектах // Пожарная безопасность. – 2009. – № 2. – С. 42-46.
5. Кожевников М.Л. Моделирование временных характеристик процесса функционирования пожарно-спасательных подразделений и анализ частоты использования пожарной техники // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2021. – № 2. – С. 79-86. – DOI: 10.25257/FE.2021.2.79-86.
6. Власов К.С. [и др.]. Оценка распределения выездов пожарно-спасательных подразделений на пожары различных объектов. – Железногорск: Сибирская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации стихийных бедствий, 2021. – С. 574-581.
7. Власов К.С. [и др.]. Применение технологий машинного обучения для исследования характеристик пожаров // Сибирский пожарно-спасательный вестник. – 2023. – 2 (29). – С. 80-87.

8. Пожары и пожарная безопасность в 2021 году: статист. сб. – Балашиха: ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2022. – 114 с.
9. Пожары и пожарная безопасность в 2022 году: статист. сб. – Балашиха: ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2023. – 80 с.
10. Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и пожарных отсеках различных классов функциональной пожарной опасности: Приказ МЧС России от 14 ноября 2022 г. № 1140.
11. Mazur Robert. Assessment of Safety Level in the Aspect of 2000-2012 Fire Statistics. Temporal And Spatial Characteristics of Residential Buildings Fires in Geographical Information System. Warsaw Case Study // *Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza*. – 2014. – No. 34. – P. 47-56.
12. Chen C.-Y., Yang Q.-H. Hotspot Analysis of the Spatial and Temporal Distribution of Fires // *Proceedings of the 4th International Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management*. – Funchal, Madeira, Portugal: SCITEPRESS - Science and Technology Publications, 2018. – P. 15-21.
13. Parzen E. On Estimation of a Probability Density Function and Mode // *Ann. Math. Statist.* – 1962. – Vol. 33, No. 3. – P. 1065-1076.
14. Rosenblatt M. Remarks on Some Nonparametric Estimates of a Density Function // *Ann. Math. Statist.* – 1956. – Vol. 27, No. 3. – P. 832-837.
15. Fan T. et al. Density peaks clustering algorithm based on kernel density estimation and minimum spanning tree // *IJICA*. – 2022. – Vol. 13, No. 5/6. – P. 336.
16. Kirkpatrick S., Gelatt C.D., Vecchli M.P. Optimization by Simulated Annealing // *Science, New Series*. – 1983. – Vol. 220, No. 4598. – P. 671-680.
17. Boeing G. OSMnx: New methods for acquiring, constructing, analyzing, and visualizing complex street networks // *Computers, Environment and Urban Systems*. – 2017. – Vol. 65. – P. 126-139.
18. Boeing G., Ha J. Resilient by design: Simulating street network disruptions across every urban area in the world // *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. – 2024. – Vol. 182. – P. 104-116.
19. Матушкин А.С. Картографирование и анализ пространственных данных с использованием геоинформационной системы QGIS: учеб. пособие. – Киров: ВятГУ, 2018. – 100 с.
20. Матеров Е.Н., Бабенюшев С.В. Методы оптимизации: учеб. пособие. – Железногорск: Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2019. – 135 с.

REFERENCES

1. Sokolov S.V., Brushlinskiy N.N., Fam K.Kh. Razrabotka i adaptatsiya imitatsionnoy sistemy operativnoy deyatelnosti pozharnykh podrazdeleniy k usloviyam V'etnama [Development and adaptation of the simulation system of operational activities of fire departments to the conditions of Vietnam], *Pozhary i chrezvychaynye situatsii: predotvrashchenie, likvidatsiya* [Fires and emergencies: prediction, liquidation], 2021, No. 2, pp. 5-14. DOI: 10.25257/FE.2021.2.5-14.
2. Brushlinskiy N.N. [i dr.]. Bezopasnost' gorodov. Imitatsionnoe modelirovanie gorodskikh protsessov i system [The safety of cities. Simulation of urban processes and systems]. Moscow: FAZIS, 2004, 172 p.
3. Brushlinskiy N.N. [i dr.]. Matematicheskie metody i modeli upravleniya v Gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhbe: uchebnik [Mathematical methods and management models in the State Fire Service: Textbook]. 2nd ed. Moscow: Akademiya GPS MChS Rossii, 2019, 194 p.
4. Gordienko D.M. [i dr.]. Dannye o chastotakh vozniknoveniya pozharov i pozharoopasnykh situatsiy v obshchestvennykh zdaniyakh razlichnogo naznacheniya i na proizvodstvennykh ob'ektakh [Data on the frequency of fires and fire-hazardous situations in public buildings for various purposes and at industrial facilities], *Pozharnaya bezopasnost'* [Fire safety], 2009, No. 2, pp. 42-46.
5. Kozhevnikov M.L. Modelirovanie vremennykh kharakteristik protsessov funktsionirovaniya pozharno-spasatel'nykh podrazdeleniy i analiz chastoty ispol'zovaniya pozharnoy tekhniki [Modeling of the time characteristics of the functioning of fire and rescue units and analysis of the frequency of use of fire equipment], *Pozhary i chrezvychaynye situatsii: predotvrashchenie, likvidatsiya* [Fires and emergencies: prediction, liquidation], 2021, No. 2, pp. 79-86. DOI: 10.25257/FE.2021.2.79-86.
6. Vlasov K.S. [i dr.]. Otsenka raspredeleniya vyezdov pozharno-spasatel'nykh podrazdeleniy na pozhary razlichnykh ob'ektov [Assessment of the distribution of visits of fire and rescue units to fires of various facilities]. Zheleznogorsk: Sibirskaya pozharno-spasatel'naya akademiya Gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby Ministerstva Rossiyskoy Federatsii po delam grazhdanskoy oborony, chrezvychaynym situatsiyam i likvidatsii stikhiynykh bedstviy, 2021, pp. 574-581.
7. Vlasov K.S. [i dr.]. Primenenie tekhnologiy mashinnogo obucheniya dlya issledovaniya kharakteristik pozharov [The use of machine learning technologies to study the characteristics of fires], *Sibirskiy pozharno-spasatel'nyy vestnik* [Siberian Fire and Rescue Bulletin], 2023, 2 (29), pp. 80-87.

8. Pozhary i pozharnaya bezopasnost' v 2021 godu: statist. sb. [Fires and fire safety in 2021: a statistical collection]. Balashikha: FGBU VNIPO MChS Rossii, 2022, 114 p.
9. Pozhary i pozharnaya bezopasnost' v 2022 godu: statist. sb. [Fires and fire safety in 2022: a statistical collection]. Balashikha: FGBU VNIPO MChS Rossii, 2023, 80 p.
10. Ob utverzhdenii metodiki opredeleniya raschetnykh velichin pozharnogo riska v zdaniyakh, sooruzheniyakh i pozharnykh otsekakh razlichnykh klassov funktsional'noy pozharnoy opasnost': Prikaz MChS Rossii ot 14 noyabrya 2022 g. № 1140 [On approval of the methodology for determining the calculated values of fire risk in buildings, structures and fire compartments of various classes of functional fire hazard: Order of the Ministry of Emergency Situations of Russia dated November 14, 2022 No. 1140].
11. Mazur Robert. Assessment of Safety Level in the Aspect of 2000-2012 Fire Statistics. Temporal And Spatial Characteristics of Residential Buildings Fires in Geographical Information System. Warsaw Case Study, *Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza*, 2014, No. 34, pp. 47-56.
12. Chen C.-Y., Yang Q.-H. Hotspot Analysis of the Spatial and Temporal Distribution of Fires, *Proceedings of the 4th International Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management*. Funchal, Madeira, Portugal: SCITEPRESS - Science and Technology Publications, 2018, pp. 15-21.
13. Parzen E. On Estimation of a Probability Density Function and Mode, *Ann. Math. Statist.*, 1962, Vol. 33, No. 3, pp. 1065-1076.
14. Rosenblatt M. Remarks on Some Nonparametric Estimates of a Density Function, *Ann. Math. Statist.*, 1956, Vol. 27, No. 3, pp. 832-837.
15. Fan T. et al. Density peaks clustering algorithm based on kernel density estimation and minimum spanning tree, *IJICA*, 2022, Vol. 13, No. 5/6, pp. 336.
16. Kirkpatrick S., Gelatt C.D., Vecchi M.P. Optimization by Simulated Annealing, *Science, New Series*, 1983, Vol. 220, No. 4598, pp. 671-680.
17. 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.
18. Boeing G., Ha J. Resilient by design: Simulating street network disruptions across every urban area in the world, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2024, Vol. 182, pp. 104-116.
19. Matushkin A.S. Kartografirovaniye i analiz prostranstvennykh dannykh s ispol'zovaniem geoinformatsionnoy sistemy QGIS: ucheb. posobie [Mapping and analysis of spatial data using the geographic information system QGIS: tutorial]. Kirov: VyatGU, 2018, 100 p.
20. Materov E.N., Babenyshev S.V. Metody optimizatsii: ucheb. posobie [Optimization methods: a text-book]. Zheleznogorsk: Sibirskaya pozharno-spasatel'naya akademiya GPS MChS Rossii, 2019, 135 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор Г.В. Куповых.

Малютин Олег Сергеевич – Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России; e-mail: malyutin@sibpsa.ru; г. Железногорск, Россия; тел.: +79835752398; отдел информационных технологий и компьютерного моделирования; начальник.

Хабибулин Ренат Шамильевич – Академия Государственной противопожарной службы МЧС России; e-mail: kh-r@yandex.ru, г. Москва, Россия; учебно-научный комплекс автоматизированных систем и информационных технологий; начальник.

Malyutin Oleg Sergeevich – Siberian Fire-Rescue academy; e-mail: malyutin@sibpsa.ru; Zheleznogorsk, Russia; phone: +79835752398; Informational Technology and Computer Modelling Branch; chief.

Habibulin Renat Shamil'evich – State Fire Academy; e-mail: kh-r@yandex.ru; Moscow, Russia; Educational and Scientific Complex of Automated Systems and Information Technologies; chief.