

Научная статья  
УДК 614.842.4  
doi:10.34987/vestnik.sibpsa.2025.31.66.015

## Обзор последних достижений в области оперативного детектирования очагов возгорания

**Шамиль Абубакарович Османов**

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

<https://orcid.org/0000-0002-5407-8394>

**Автор, ответственный за переписку:** Шамиль Абубакарович Османов, [sh.osmanov@igps.ru](mailto:sh.osmanov@igps.ru)

**Аннотация.** Пожары ежегодно наносят колоссальный материальный и социальный ущерб по всему миру. Большая часть из которых вызывает настолько масштабные негативные последствия, что их достаточно сложно измерить и оценить. С целью минимизации негативного воздействия пожаров разрабатываются и внедряются технологии их раннего обнаружения в том числе оперативного детектирования очагов возгорания. Наиболее распространённый вариант – это использование пожарных извещателей различных модификаций. Однако такие средства достаточно часто ложно срабатывают, обладают низкой чувствительностью, сложно монтируются и требуют дорогостоящего коммутационного оборудования. Кроме того, для поддержания их высокой работоспособности необходимо своевременно проводить их обслуживание и ремонт. В рамках настоящей статьи проведён обзор современных достижений в области оперативного детектирования очагов возгорания за счёт непрерывного мониторинга основных показателей, таких как: температура, наличие пламени, а также газа и дыма в воздухе. Представлена структурная схема хронологии развития пожарных извещателей. Составлена сравнительная таблица рассмотренных образцов. В результате её анализа было выявлено, что технологии оперативного детектирования очагов возгорания не стоят на месте, а постоянно развиваются и совершенствуются. Ежегодно уменьшается количество ложных срабатываний, увеличивается чувствительность извещателей и повышается уровень пожарной безопасности в целом. Особое внимание было уделено системам с использованием комплексного подхода, объединяющих в себе несколько типов систем. Также были выделены перспективные направления дальнейших исследований, в том числе с применением элементов искусственного интеллекта.

**Ключевые слова:** обзор, пожар, очаг возгорания, пожарные извещатели, обнаружение пожаров, оперативное детектирование, пожарная безопасность

**Для цитирования:** Османов Ш.А. Обзор последних достижений в области оперативного детектирования очагов возгорания // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2025. № 3 (38). С. 157-166. <https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2025.31.66.015>.

Original article.

## Review of the latest achievements in the field of rapid detection of fire sources

**Shamil A. Osmanov**

*Saint-Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Saint Petersburg, Russia*  
<https://orcid.org/0000-0002-5407-8394>

**Corresponding author:** Shamil A. Osmanov, [sh.osmanov@igps.ru](mailto:sh.osmanov@igps.ru)

**Abstract.** Fires annually cause enormous material and social damage all over the world. Most of them cause such large-scale negative consequences that they are quite difficult to measure and assess. In order to minimize the negative impact of fires, technologies for their early detection, including prompt detection of fire sources, are developed and implemented. The most common option is the use of fire alarms of various modifications. However, such devices often trigger false alarms, have low sensitivity, are difficult to install and require expensive switching equipment. In addition, to maintain their high performance, it is necessary to carry out their maintenance and repair in a timely manner. This article provides an overview of modern achievements in the field of prompt detection of fire sources due to continuous monitoring of key indicators, such as temperature, presence of flame, as well as gas and smoke in the air. A structural diagram of the chronology of the development of fire alarms is presented. A comparative table of the considered samples is compiled. As a result of its analysis, it was revealed that technologies for prompt detection of fire sources do not stand still, but are constantly developing and improving. Every year, the number of false alarms decreases, the sensitivity of detectors increases, and the level of fire safety in general increases. Particular attention was paid to systems using an integrated approach, combining several types of systems. Promising areas for further research were also identified, including the use of elements of artificial intelligence.

**Keywords:** overview, fire, fire source, fire detectors, fire detection, rapid detection, fire safety

**For citation:** Osmanov S.A. Review of the latest achievements in the field of rapid detection of fire sources // Siberian Fire and Rescue Bulletin. 2025. № 3 (38). С. 157-166. (In Russ.) <https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2025.31.66.015>.

### Введение

Активное развитие научно-технологического прогресса затрагивает все сферы общества, в том числе и в области обеспечения пожарной безопасности, что влечет создание множества соответствующих технических решений. Бурное развитие информационных технологий и методов изготовления материалов позволило в существенной мере повысить безопасность людей при пожарах и снизить финансовые затраты на данную сферу. Пик активной разработки и внедрения технических решений в области пожарной безопасности наблюдается с конца 20 века. Разработанные технологии позволили кратно снизить количество смертей при пожарах, а также величину нанесённого социального и материального ущерба. Первыми ноу-хау в области повышения пожарной безопасности стали дымовые извещатели, системы спринклерного пожаротушения, а также появление планов эвакуации. Однако не смотря на все достигнутые технические решения возникновение пожаров остаётся существенной проблемой нанося материальный ущерб, эквивалентный 1% мирового ВВП. Также в результате пожаров происходит гибель тысяч людей по всему миру. В связи с этим на текущий момент все большее предпочтение отдается строительству зданий, оснащенных современными системами оперативного детектирования очагов возгорания. За последние несколько десятков лет созданы новые технологии с использованием извещателей и методов измерения концентрации практически всех стабильных газообразных веществ, образующихся до или во время горения. Обнаружение продуктов горения в современных системах осуществляется несколькими извещателями одновременно и далее с использованием специальных алгоритмов делается вывод о возгорании или его отсутствии. Системы пожарной сигнализации интегрированы с другими системами здания с целью минимизации ложных тревог,

оптимизации процесса эвакуации и оказания помощи в тушении пожаров [4]. Анализ статистических данных свидетельствует о том, что установка извещателей пожарной сигнализации позволяет в значительной мере снизить возникновение крупных пожаров в жилом секторе [5]. Следует отметить, что современное строительство подразумевает использование синтетических материалов, взамен их природных аналогов. При горении такие материалы выделяют опасные соединения и большое количество углекислого газа (по сравнению с натуральными материалами) [6] что в свою очередь приводит к уменьшению времени для эвакуации людей. В ряде случаев обнаружение пожара возможно только после активного развития пламени и нанесения серьёзного материального и социального ущерба. Необходимость обеспечения безопасности населения при пожарах в условиях постоянно меняющегося и активно развивающегося общества требует адаптивного подхода и к системам оперативного детектирования очагов возгорания. В частности, необходимо минимизировать количество ложных срабатываний, повышать чувствительность извещателей, а также скорость прохождения сигналов в системе обеспечения пожарной безопасности. В рамках настоящей статьи проведён обзор исследований, посвященных разработке и совершенствованию работы пожарных извещателей, в части касающейся оперативного детектирования очагов возгорания. По результатам которого была составлена сравнительная таблица с полученными результатами, в которой были укрупненно выделены и структурированы такие направления как: использование извещателей для раннего обнаружения пожара [7], совершенствование алгоритмов обнаружения пожара [8], видеообнаружение пожара [9] и дыма [10], совершенствование модулей извещателей пожара [11], разработка систем мониторинга пожаров [12], систем раннего обнаружения лесных пожаров [13]. Следует отметить, что ни одно из рассмотренных исследований не позволяет провести всеобъемлющий анализ существующих на сегодняшний день технологий обнаружения пожаров и очагов возгорания в частности, а также учесть возможные перспективы дальнейших исследований. Целью статьи является обзор последних достижений в области оперативного детектирования очагов возгорания, включающих использования сенсорных технологий, технологий обработки и мониторинга сигналов пожаров, а также внедрение интегрированных систем раннего обнаружения пожаров в зданиях. Выделены перспективные направления дальнейшего совершенствования и развития технологий оперативного детектирования очагов возгорания, с учётом уже достигнутых результатов.

### **Методы исследования**

В качестве материалов исследования были использованы публикации из баз данных научных исследований, отображающих как отечественные (Elibrary), так и зарубежные (Scholar Google Academy) достижения в области разработки извещателей для оперативного детектирования очагов возгорания. Отдельно также были проанализированы патенты, диссертации, конференции, семинары и другие материалы по тем или иным причинам не представленные в Elibrary или Scholar Google Academy. Посредством применения интегративного обзора были выделены наиболее значимые исследования и составлена их сравнительная характеристика, представленная в форме таблицы.

Проведение исследование было осуществлено пошагово, с декомпозицией на более узкие этапы.

Шаг 1. Формирование критериев отбора научных публикаций с целью более глубокого изучения. На данном этапе существенным критерием отбора выступало соответствие содержания публикации специфике журнала, а место защиты диссертации – профилю образовательной (научной) организации в которой она была опубликована (защищена). Этот факт существенно повышал вероятность того, что априорируемые результаты были прорецензированы несколькими компетентными специалистами и не содержат каких-либо неточностей и ошибок. Поскольку настоящее исследование посвящено обзору последних достижений в области разработки извещателей раннего обнаружения пожаров,

то дополнительным условием выступал срок опубликования исследования (не позднее 10 лет, то есть 2015 года).

Шаг 2. Сепарация дублирующихся результатов. После формирования первичной выборки из неё были исключены исследования, отражающие схожие результаты или опубликованные после первоисточника.

Шаг 3. Кластеризация исследований в полученной выборке. На данном этапе были отсортированы исследования по типу извещателя и элементу обнаружения пламени.

Шаг 4. Обработка и структурирование полученных результатов. После того, как выделены наиболее ценные и актуальные исследование была сформирована таблица, обобщающая полученные результаты

## Результаты исследования и их обсуждение

Выбор технологии обнаружения пожара зависит от его вероятного места возникновения и характера возгорания. В рамках настоящей статьи проанализированы технологии оперативного детектирования очагов возгорания посредством внедрения новых систем сигнализации, обладающих рядом преимуществ и недостатков, по сравнению с традиционными системами. На текущий момент часть методов и технологий устаревают в то время как другие обретают популярность. На Рис.1 представлена хронология развития извещателей пожара, отражающая основные этапы.



Рис.1. Хронология развития пожарных извещателей

Из анализа Рис.1 следует, что технологии постоянно развиваются, что обусловлено соответствующим развитием науки и техники в целом. На Рис.2 отображены основные виды пожарных извещателей.



Рис.2. Классификация и основные виды пожарных извещателей

На текущий момент на большинстве объектах защиты применяются автоматические системы, в которых применяются пожарные извещатели. Их классификация и отличительных особенности представлены на Рис.3.



Рис.3. Классификация и отличительные особенности автоматических систем, в которых применяются пожарные извещатели

По результатам проведённого анализа опубликованных исследований в упомянутых выше базах данных международных и отечественных исследований была составлена сравнительная Таблица.

**Таблица. Результаты проведённого анализа**

Извещатели	Элемент обнаружения	Конструкция и принцип работы	Время ответа	Зона обнаружения	Особенности и преимущества	Источник
Распределенные оптоволоконные извещатели	2 параллельных оптических волокна	Измеряется температура потока горячего воздуха	40 сек	Широкий диапазон	Простота и эффективность	[14]
	Оптоволоконно с покрытием (графеном)	Волоконная решетка брега	В 18 раз быстрее волоконно оптических извещателей	1 км	Дальняя и быстрая оптическая передача сигналов	[15]
	Многожильное волокно	Комбинированное рассеивание	В режиме реального времени	10 км	Самокалибровка	[16]
Извещатели термического сопротивления	Полифосфат аммония	Сублимационная сушка	≈2.5 сек	Небольшая (< 10 см)	Сжимаемость	[17]
	Функционализированный графит аргена	Послойное нанесение	≈5 сек	Небольшая (< 10 см)	Гибкость и возможность скручивания	[18]
	Серебрянная нанопроволка	Напыление покрытия	≈0.8 сек	Большая (> 30 см)	Гидрофобность и самоочистение	[19]
	Функциональная целлюлоза	Индукционная испарением самосборка	≈1 сек	Небольшая (< 10 см)	Сложенная и структурная устойчивость, возможность скручивания	[20]
	Бумага из восстановленного оксида графена	Самосборка, вызванная испарением	≈5 сек	Небольшая (< 10 см)	Может плавиться и может отключаться в огне, можно скручивать	[21]

Тепловые извещатели	Термистор	Уравнение Стейнхарта-Харта	≈250 сек	Небольшая (< 10 см)	Подходит для спринклеров	[22]
	Биспектральная камера	Вывод нейронной сети Тьюринга	≈0.6 сек	Ограничена типом используемой камеры	Низкая стоимость и автоматическая утилизация устройства	[23]
	Термопара и цифровой мультиметр	Оперативный алгоритм	≈2 сек	Небольшая (< 10 см)	Устойчив к большим перепадам температуры	[24]
	Искусственный интеллект	Транспонированная сверточная нейронная сеть	≈1 сек	5 м	Прогнозирование опасности пожара с точностью до минуты	[25]
	Скорость повышения температуры	Оперативный алгоритм	≈150 сек	Небольшая (< 10 см)	Устойчив к большим перепадам температуры	[26]

Из анализа составленной таблицы следует, что технологии оперативного детектирования очагов возгорания не стоят на месте, а постоянно развиваются и совершенствуются. Ежегодно уменьшается количество ложных срабатываний, увеличивается чувствительность извещателей и повышается уровень пожарной безопасности в целом. Особое внимание было уделено системам с использованием комплексного подхода, объединяющих в себе несколько типов систем. По результатам проведённого анализа было выявлено, что системы тепловых извещателей медленней реагируют, однако имеют меньшее количество ложных срабатываний и обладают большей надёжностью. К недостаткам оптических извещателей следует отнести их высокую чувствительность к незначительным изменениям температуры, поэтому их установка целесообразна в шахтах и туннелях. Их применение может заменить целый комплекс точечных тепловых извещателей и как следствие снизить затраты на обеспечение пожарной безопасности. Интеграция таких извещателей в уже существующие системы обеспечения пожарной безопасности является перспективным направлением.

Помимо оптических средств обнаружения пожара существуют также невизуальные методы обнаружения, которые являются дополнением к уже существующим подходам. Однако такие средства не лишены недостатков. В частности, камеры ближнего инфракрасного диапазона имеют маленький диапазон действия и на большом расстоянии плохо регистрируют пламя. Также на инфракрасные извещатели воздействуют различного рода помехи, вызванные тепловым отражением. Данные недостатки решаются на текущий момент внедрением технологий искусственного интеллекта и созданием глубоких нейронных сетей с семантической сегментации [27]. Такой подход позволяет одновременно регистрировать как факт возникновения пожара, так и место его расположения. Применение нейронных сетей имеет ряд преимуществ, по сравнению с применением классических приложений, поскольку они самообучаются и не требуют ручной корректировки человеком во время эксплуатации [28]. В ряде исследований в качестве следующего перспективного направления развития извещателей раннего обнаружения пожара является применение робототехники в комбинации с методами искусственного интеллекта (ИИ) [29]. Однако данная сфера находится на стадии активного развития и с каждым годом предпринимаются всё новые попытки внедрения технологий ИИ для решения тех или иных задач.

Следует отметить, что в ст. 116 Федерального закона от 22.07.2008 N 123-ФЗ определены требования к роботизированным установкам пожаротушения определены, однако требования к пожарным извещателям в части касающейся оперативного детектирования очагов возгорания

не регламентированы. Между тем их применение целесообразно при мониторинге пожароопасных работ, для охвата больших территорий промышленных объектов, а также лесных массивов в пожароопасный период. На текущий момент на территории РФ и в ряде других стран применяются различные беспилотные системы для мониторинга лесопожарной и паводковой обстановки. Однако в условиях сильного ветра и обильных осадков их применение весьма затруднительно, а зачастую и невозможно [30]. Тогда оптимальным решением будет использование робототехнических комплексов.

Касаемо же применения технологий искусственного интеллекта с целью оперативного детектирования очагов возгорания, то в данном направлении перспектив развития значительно больше. В частности, использование средств видеоаналитики позволяет распознать признаки возгорания и предсказать возникновение и развитие пожара; применение компьютерного зрения позволяет осуществлять мониторинг больших территорий, а средства предиктивной аналитики предотвращать возгорания.

### **Заключение**

Обзор последних достижений в области разработки извещателей раннего обнаружения пожаров показал, что данная область активно развивается и в данном направлении работает большое количество исследователей. Каждый класс извещателей имеет свои преимущества и недостатки. Между тем обнаружение и контроль пожара представляет собой сложный процесс, включающий определение различных фаз, видов, цветов и спектров светового и теплового излучения пламени что влечёт за собой ряд сложностей. В связи с этим для обеспечения должного уровня пожарной безопасности и минимизации количества ложных срабатываний необходимо использовать комплексные системы, включающие несколько технологий обнаружения пожаров. Дополнительно происходит активное внедрение технологий искусственного интеллекта и машинного обучения для совершенствования систем раннего обнаружения пожара. В связи с чем дальнейшие исследования необходимо выстраивать «на стыке» различных технологий, параллельно разрабатывая научно-методические средства по интеграции работы извещателей и систем между собой.

### **Список источников**

1. Gaur A. et al. Video flame and smoke based fire detection algorithms: A literature review // Fire technology: науч. журн. 2020. Т. 56. С. 1943–1980.
2. Perilla F. S. et al. Fire safety and alert system using arduino sensors with IoT integration // Proceedings of the 2018 7th International Conference on Software and Computer Applications. 2018. С. 199-203.
3. Кулагина Л.В., Шефер Э.А. Сравнительный анализ современных систем обнаружения очага возгорания // Известия Тульского государственного университета. Технические науки: электрон. журн. 2024. № 7. С. 181–185. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-7-181-182.
4. Петров А.А., Шенбергер А.Ю., Щеглов Е.В. Пожарные извещатели во взрывозащищенном исполнении — особенности применения // Специальная техника и технологии транспорта: электрон. журн. 2023. № 20. С. 27–35.
5. Способ повышения помехозащищённости пожарного извещателя пламени / Членов А.Н., Буцынская Т.А., Рубцов Д.Н. [и др.] // Технологии техносферной безопасности: электрон. журн. 2024. № 1(103). С. 140–151. DOI: 10.25257/TTS.2024.1.103.140-151.
6. Пути повышения пожарной безопасности жилых помещений для многократного снижения количества погибших и пострадавших при пожарах / Осавелюк П.А., Калюжина Ж.С., Татаркин И.Н., Пашкина Т.М. // Экономика строительства: электрон. журн. 2023. № 11. С. 80–82.
7. Русских Е.В. Устройства тепловизионного контроля для повышения пожарной безопасности электроустановок // Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования: электрон. журн. 2022. № 2(12). С. 220–223.

8. Вахрушева Ю.В., Шенбергер А.Ю., Щеглов Е.В. Развитие средств раннего обнаружения признаков пожара // Специальная техника и технологии транспорта: электрон. журн. 2022. № 14. С. 172–181.
9. Ukil A., Braendle H., Krippner P. Distributed temperature sensing: Review of technology and applications // IEEE Sensors Journal. 2011. Т. 12. №. 5. С. 885-892.
10. Fang H. et al. Development of a machine-learning approach for identifying the stages of fire development in residential room fires // Fire safety journal. 2021. Т. 126. С. 103-469.
11. Elhami Khorasani N., Garlock M.E.M. Overview of fire following earthquake: historical events and community responses // International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment. 2017. Т. 8. № 02. С. 158-174.
12. Wang S.H. et al. Applying building information modeling to support fire safety management // Automation in construction. 2015. Т. 59. С. 158-167.
13. Lotfi N., Behnam B., Peyman F.A BIM-based framework for evacuation assessment of high-rise buildings under post-earthquake fires // Journal of Building Engineering. 2021. Т. 43. С. 102-559.
14. Sun M. et al. Fire source localization based on distributed temperature sensing by a dual-line optical fiber system // Sensors. 2016. Т. 16. № 6. С. 829.
15. Guo Y. et al. Kilometers long graphene-coated optical fibers for fast thermal sensing // Research. 2021. С. 12-22.
16. Du H. et al. Single-ended self-calibration high-accuracy Raman distributed temperature sensing based on multi-core fiber // Optics Express. 2021. Т. 29. №. 21. С. 34-762.
17. Cao C., Yuan B. Thermally induced fire early warning aerogel with efficient thermal isolation and flame-retardant properties // Polymers for Advanced Technologies. 2021. Т. 32. № 5. С. 2159-2168.
18. Chen W. et al. A temperature-induced conductive coating via layer-by-layer assembly of functionalized graphene oxide and carbon nanotubes for a flexible, adjustable response time flame sensor // Chemical Engineering Journal. 2018. Т. 353. С. 115-125.
19. Xie H. et al. A sandwich-like flame retardant nanocoating for supersensitive fire-warning // Chemical Engineering Journal. 2020. Т. 382. С. 122-929.
20. Zhang Z. H. et al. Temperature-responsive resistance sensitivity controlled by L-ascorbic acid and silane co-functionalization in flame-retardant GO network for efficient fire early-warning response // Chemical Engineering Journal. 2020. Т. 386. С. 123-894.
21. Chen G. et al. Functionalized graphene paper with the function of fuse and its flame-triggered self-cutting performance for fire-alarm sensor application // Materials Chemistry and Physics. 2020. Т. 252. С. 123-292.
22. Qualey J. R., Desmarais L., Pratt J. Response-time comparisons of ionization and photoelectric/heat detectors // NIST SPECIAL PUBLICATION SP. 2001. С. 283-299.
23. Ma Y. et al. Smart fire alarm system with person detection and thermal camera // Computational Science–ICCS 2020: 20th International Conference, Amsterdam, The Netherlands, June 3–5, 2020, Proceedings, Part VII 20. Springer International Publishing, 2020. С. 353-366.
24. Kushnir A., Kopchak B., Gavryliuk A. Operational algorithm for a heat detector used in motor vehicles. 2021. С. 87-95.
25. Wu X. et al. A real-time forecast of tunnel fire based on numerical database and artificial intelligence // Building Simulation. Tsinghua University Press, 2022. С. 1-14.
26. Schmoetzer K. Aircraft Fire Detection: Requirements, Qualification, and Certification Aspects. 2001. С. 18-27.
27. Maraveas C. et al. Applications of artificial intelligence in fire safety of agricultural structures // Applied Sciences. 2021. Т. 11. № 16. С. 7-16.
28. Wu X. et al. Smart detection of fire source in tunnel based on the numerical database and artificial intelligence // Fire Technology. 2021. Т. 57. № 2. С. 657-682.
29. Latif A., Chung H. Fire detection and spatial localization approach for autonomous suppression systems based on artificial intelligence // Fire Technology. 2023. Т. 59. № 5. С. 2621-2644.
30. Wahyono et al. Real-time forest fire detection framework based on artificial intelligence using color probability model and motion feature analysis // Fire. 2022. Т. 5. № 1. С. 23.

## References

1. Gaur A. et al. Video flame and smoke based fire detection algorithms: A literature review // *Fire technology: науч. журн.* 2020. Т. 56. С. 1943–1980.
2. Perilla F. S. et al. Fire safety and alert system using arduino sensors with IoT integration // *Proceedings of the 2018 7th International Conference on Software and Computer Applications.* 2018. С. 199-203.
3. Kulagina L.V., Schafer E.A. Comparative analysis of modern ignition source detection systems // *Proceedings of Tula State University. Technical sciences: electron.journal.* 2024. № 7. pp. 181-185. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-7-181-182.
4. Petrov A.A., Schoenberger A.Yu., Shcheglov E.V. Fire detectors in explosion—proof design - application features // *Special equipment and technologies of transport: electron. Journal.* 2023. № 20. pp. 27-35.
5. A method to increase the noise immunity of a fire flame detector / Members A.N., Butsynskaya T.A., Rubtsov D.N. [et al.] // *Technosphere safety technologies: electron. Journal* 2024. № 1(103). pp. 140-151. DOI: 10.25257/TTS.2024.1.103.140-151.
6. Ways to increase the fire safety of residential premises for a multiple reduction in the number of dead and injured in fires / Osavelyuk P.A., Kalyuzhina Zh.S., Tatarkin I.N., Pashkina T.M. // *Economics of construction: electron. Journal.* 2023. № 11. pp. 80-82.
7. Ways to increase the fire safety of residential premises for a multiple reduction in the number of dead and injured in fires / Osavelyuk P.A., Kalyuzhina Zh.S., Tatarkin I.N., Pashkina T.M. // *Economics of construction: electron. Journal.* 2023. № 11. pp. 80-82.
8. Vakhrusheva Yu.V., Schoenberger A.Yu., Shcheglov E.V. Development of means of early detection of signs of fire // *Special equipment and technologies of transport: electron. Journal.* 2022. № 14. pp. 172-181.
9. Ukil A., Braendle H., Krippner P. Distributed temperature sensing: Review of technology and applications // *IEEE Sensors Journal.* 2011. Т. 12. № 5. С. 885-892.
10. Fang H. et al. Development of a machine-learning approach for identifying the stages of fire development in residential room fires // *Fire safety journal.* 2021. Т. 126. С. 103-469.
11. Elhami Khorasani N., Garlock M.E.M. Overview of fire following earthquake: historical events and community responses // *International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment.* 2017. Т. 8. № 02. С. 158-174.
12. Wang S.H. et al. Applying building information modeling to support fire safety management // *Automation in construction.* 2015. Т. 59. С. 158-167.
13. Lotfi N., Behnam B., Peyman F.A BIM-based framework for evacuation assessment of high-rise buildings under post-earthquake fires // *Journal of Building Engineering.* 2021. Т. 43. С. 102-559.
14. Sun M. et al. Fire source localization based on distributed temperature sensing by a dual-line optical fiber system // *Sensors.* 2016. Т. 16. № 6. С. 829.
15. Guo Y. et al. Kilometers long graphene-coated optical fibers for fast thermal sensing // *Research.* 2021. С. 12-22.
16. Du H. et al. Single-ended self-calibration high-accuracy Raman distributed temperature sensing based on multi-core fiber // *Optics Express.* 2021. Т. 29. № 21. С. 34-62.
17. Cao C., Yuan B. Thermally induced fire early warning aerogel with efficient thermal isolation and flame-retardant properties // *Polymers for Advanced Technologies.* 2021. Т. 32. № 5. С. 2159-2168.
18. Chen W. et al. A temperature-induced conductive coating via layer-by-layer assembly of functionalized graphene oxide and carbon nanotubes for a flexible, adjustable response time flame sensor // *Chemical Engineering Journal.* 2018. Т. 353. С. 115-125.
19. Xie H. et al. A sandwich-like flame retardant nanocoating for supersensitive fire-warning // *Chemical Engineering Journal.* 2020. Т. 382. С. 122-929.
20. Zhang Z. H. et al. Temperature-responsive resistance sensitivity controlled by L-ascorbic acid and silane co-functionalization in flame-retardant GO network for efficient fire early-warning response // *Chemical Engineering Journal.* 2020. Т. 386. С. 123-894.
21. Chen G. et al. Functionalized graphene paper with the function of fuse and its flame-triggered self-cutting performance for fire-alarm sensor application // *Materials Chemistry and Physics.* 2020. Т. 252. С. 123-292.

22. Qualey J. R., Desmarais L., Pratt J. Response-time comparisons of ionization and photoelectric/heat detectors // NIST SPECIAL PUBLICATION SP. 2001. С. 283-299.
23. Ma Y. et al. Smart fire alarm system with person detection and thermal camera // Computational Science–ICCS 2020: 20th International Conference, Amsterdam, The Netherlands, June 3–5, 2020, Proceedings, Part VII 20. Springer International Publishing, 2020. С. 353-366.
24. Kushnir A., Kopchak B., Gavryliuk A. Operational algorithm for a heat detector used in motor vehicles. 2021. С. 87-95.
25. Wu X. et al. A real-time forecast of tunnel fire based on numerical database and artificial intelligence // Building Simulation. Tsinghua University Press, 2022. С. 1-14.
26. Schmoetzer K. Aircraft Fire Detection: Requirements, Qualification, and Certification Aspects. 2001. С. 18-27.
27. Maraveas C. et al. Applications of artificial intelligence in fire safety of agricultural structures // Applied Sciences. 2021. Т. 11. № 16. С. 7-16.
28. Wu X. et al. Smart detection of fire source in tunnel based on the numerical database and artificial intelligence // Fire Technology. 2021. Т. 57. № 2. С. 657-682.
29. Latif A., Chung H. Fire detection and spatial localization approach for autonomous suppression systems based on artificial intelligence // Fire Technology. 2023. Т. 59. № 5. С. 2621-2644.
30. Wahyono et al. Real-time forest fire detection framework based on artificial intelligence using color probability model and motion feature analysis // Fire. 2022. Т. 5. № 1. С. 23.

Статья поступила в редакцию 01.07.2025, одобрена после рецензирования 15.08.2025, принята к публикации 15.09.2025.

The article was submitted 01.07.2025, approved after reviewing 15.08.2025, accepted for publication 15.09.2025.