

25. Belevtsev A.A., Belevtsev A.M., Balyberdin V.A. Metodika analiza i otsenki prioritetrov tekhnologicheskikh trendov i tekhnologiy [Methodology for analysis and assessment of priorities of technological trends and technologies], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2022, No. 6.

**Белевцев Андрей Михайлович** – Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет); e-mail: ambelevtsev@yandex.ru; г. Москва, Россия; тел.: +79037691788; д.т.н.; профессор.

**Белевцев Андрей Андреевич** – ПАО «Сбербанк»; e-mail: Andrey.Belevtsev@gmail.com; г. Москва, Россия; тел.: + 74959575731.

**Балыбердин Валерий Алексеевич** – 3 Центральный научно-исследовательский институт МО РФ; e-mail: balyberdinvaleri@yandex.ru; г. Москва, Россия; тел.: +79162386854; д.т.н.; профессор; заслуженный деятель науки РФ; в.н.с.

**Belevtsev Andrey Michailovitch** – Moscow Aviation Institute (National Research University); e-mail: ambelevtsev@yandex.ru; Moscow, Russia; phone: +79037691788; dr. of eng. sc.; professor.

**Belevtsev Andrey Andreevich** – Sberbank PJSC; e-mail: Andrey.Belevtsev@gmail.com; Moscow, Russia; phone: + 74959575731.

**Balyberdin Valery Alekseevich** – 3 Central Research Institute of the Ministry of Defense of the Russian Federation; e-mail: balyberdinvaleri@yandex.ru; Moscow, Russia; phone: +79162386854; dr. of eng. sc.; professor; Honored Scientist of the Russian Federation; leading researcher.

УДК 004.4

DOI 10.18522/2311-3103-2025-6-58-80

**Н.Д. Болдырев, В.В. Гилка, А.С. Кузнецова, Д.А. Морозов**

### **СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К МОНИТОРИНГУ И ПРОГНОЗИРОВАНИЮ ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ: ОБЗОР И КОНЦЕПЦИЯ АВТОНОМНОЙ СИСТЕМЫ НА БАЗЕ БПЛА**

*Природные пожары ежегодно наносят серьёзный урон экосистемам, экономике и безопасности населения, а своевременное обнаружение возгораний и прогнозирование их развития повышает оперативность реагирования на угрозу и позволяет оптимально распределять ресурсы при ликвидации чрезвычайных ситуаций (ЧС). Существующие методы мониторинга ограничены скоростью обнаружения очагов возгорания и оперативностью их дальнейшего распространения, что снижает эффективность действий спасательных служб. Для решения данной проблемы могут использоваться гетерогенные источники данных, включая беспилотные летательные аппараты (БПЛА), распределённые датчиковые сети, мобильные комплексы полевого наблюдения, наземные тепловизионные станции и т.д., которые могут способствовать проведению более точного анализа текущей обстановки и повышению достоверности прогнозных моделей распространения пожаров. Целью исследования стала разработка концепции автоматизированного подхода к мониторингу и прогнозированию природных пожаров на основе беспилотных летательных аппаратов. Мы считаем, что такой подход сумеет повысить оперативность обнаружения очагов возгорания и точность прогнозирования их распространения. Задачи включают анализ существующих методов мониторинга, формирование концепции системы, интегрирующей многоспектральную съёмку, оптимизированную передачу данных, автоматическую сегментацию и прогнозирование на основе машинного обучения, а также обеспечивающей взаимодействие оператора и специалистов по оповещению. В работе использовались методы сбора, анализа и передачи данных с БПЛА, обработка многоспектральных изображений, машинное обучение и нейронные сети для детекции очагов возгорания, алгоритмы сегментации изображений и имитационное моделирование для прогнозирования распространения огня, визуализация данных для поддержки принятия решений оператором и администратором, логирование и анализ результатов для обучения моделей, программная инженерия и технологии человеко-машинного взаимодействия. Система сократит время обнаружения и прогнозирования пожаров, предоставит возможность оператору запускать несколько дронов одновременно и автоматизирует обработку получаемых с них данных. Автоматизация процессов позволит сократить время реакции на ЧС и численность персонала,*

улучшить распределение ресурсов, повысить точность прогнозов и своевременность информирования экстренных служб. Это поможет снизить ущерб от природных пожаров и повысить безопасность населения и экосистем. Несмотря на существующие успехи, достигнутые в решении этой задачи, комплексная система, концепция которой описывается в данной статье, пока не существует в полной мере ни в России и странах СНГ, ни в западных и азиатских странах. Хотя отдельные компоненты, такие как БПЛА для мониторинга и искусственный интеллект (ИИ) для анализа данных, уже активно используются, интегрированного решения, которое бы объединяло все элементы (управление дронами, прогнозирование распространения огня в режиме, приближенном к реальному времени, передача данных и взаимодействие с экстренными службами), на данный момент нет. Эта концепция представляет собой новый подход, который может стать прорывной технологией для борьбы с природными катастрофами.

Природные пожары; мониторинг; прогнозирование; беспилотные летательные аппараты; автоматизированные системы; машинное обучение; обработка изображений; нейронные сети; ситуационное реагирование; анализ данных.

**N.D. Boldyrev, V.V. Gilka, A.S. Kuznetsova, D.A. Morozov**

### **MODERN APPROACHES TO NATURAL FIRE MONITORING AND FORECASTING: REVIEW AND CONCEPT OF AUTONOMOUS UAV-BASED SYSTEM**

*Natural fires cause serious damage to ecosystems, the economy, and public safety every year, and timely detection of fires and prediction of their development increases the speed of response to threats and allows for optimal allocation of resources during emergency response. Existing monitoring methods are limited by the speed of detecting fire outbreaks and the speed of their further spread, which reduces the effectiveness of rescue services. To solve this problem, heterogeneous data sources can be used, including unmanned aerial vehicles (UAVs), distributed sensor networks, mobile field observation systems, ground-based thermal imaging stations, etc., which can contribute to a more accurate analysis of the current situation and improve the reliability of predictive models of fire spread. The aim of the study was to develop a concept for an automated approach to monitoring and predicting wildfires based on unmanned aerial vehicles. We believe that this approach will improve the speed of detecting fire outbreaks and the accuracy of predicting their spread. The tasks include analyzing existing monitoring methods, developing a concept for a system that integrates multispectral imaging, optimized data transmission, automatic segmentation, and forecasting based on machine learning, as well as ensuring interaction between the operator and alert specialists. The work used methods of collecting, analyzing, and transmitting data from UAVs, processing multispectral images, machine learning and neural networks for fire detection, image segmentation algorithms and simulation modeling for fire spread prediction, data visualization to support decision-making by operators and administrators, logging and analysis of results for model training, software engineering, and human-computer interaction technologies. The system will reduce the time required to detect and predict fires, enable operators to launch multiple drones simultaneously, and automate the processing of data received from them. Process automation will reduce emergency response times and staffing levels, improve resource allocation, increase forecast accuracy, and improve the timeliness of emergency service notifications. This will help reduce damage from wildfires and improve the safety of people and ecosystems. Despite the progress made in addressing this challenge, the comprehensive system described in this article does not yet exist in its entirety in Russia, the CIS countries, or in Western and Asian countries. Although individual components, such as UAVs for monitoring and artificial intelligence (AI) for data analysis, are already in active use, there is currently no integrated solution that combines all elements (drone control, near real-time fire spread prediction, data transmission, and interaction with emergency services). does not currently exist. This concept represents a new approach that could become a breakthrough technology for combating natural disasters.*

*Wildfires; monitoring; forecasting; unmanned aerial vehicles; automated systems; machine learning; image processing; neural networks; situational response; data analysis.*

**Введение.** Природные пожары – это одна из самых острых экологических проблем, с которой сталкиваются многие регионы мира. Каждый год они наносят серьезный ущерб окружающей среде, экономике, а в ряде случаев – безопасности населения. Во многих странах фиксируются десятки и сотни очагов возгораний, а масштабы пострадавших территорий исчисляются миллионами гектаров. По данным «Всемирной метеорологической организации», ежегодно огонь уничтожает огромные площади, нарушает природный ба-

ланс, ухудшает качество воздуха и приводит к утрате уникальных экосистем [1, 2]. Рост числа пожаров и темпов их распространения во многом связан с изменениями климата, а также с деятельностью человека. Всё это делает задачу своевременного обнаружения и прогнозирования природных возгораний особенно важной – как для охраны природы, так и для обеспечения техногенной и экологической безопасности. Чем быстрее удаётся зафиксировать очаг и понять, куда может распространиться пламя, тем выше шансы на оперативное реагирование и минимизацию последствий.

В этом обзоре мы кратко остановимся на современных методах мониторинга природных пожаров и подходах к прогнозированию их развития, отметим их сильные стороны и недостатки. После этого рассмотрим существующие технические решения и подробно представим собственную концепцию системы, не имеющей прямых аналогов по степени интеграции и автономности. В её основе лежат передовые цифровые технологии, включая беспилотные летательные аппараты и интеллектуальный анализ данных. При подготовке обзора мы использовали общепринятый метод анализа источников: собирали и систематизировали информацию, сравнивали подходы и проводили обобщение. В качестве базы послужили как научные публикации последних лет, так и специализированные электронные ресурсы, посвящённые тематике прогнозирования распространения природных пожаров и средствам их мониторинга.

**Существующие методы мониторинга природных пожаров.** В настоящее время для мониторинга природных пожаров применяются несколько традиционных методов, каждый из которых обладает своими преимуществами и недостатками.

Один из наиболее известных подходов представленных в соответствии с рис. 1 – использование стационарных пожарных вышек, оснащённых оборудованием для визуального наблюдения и фиксации возгораний на обширных территориях. Такие вышки, как правило, устанавливаются в стратегически важных точках и обеспечивают удалённый сбор информации в течение продолжительного времени. К основным достоинствам можно отнести относительную простоту эксплуатации, стабильную работу в течение длительных периодов и сравнительно низкие затраты на техническое обслуживание. Однако этот подход не лишён недостатков. Возможности наблюдения с вышек ограничиваются зоной прямой видимости, поэтому для покрытия больших природных массивов, особенно если это леса, требуется значительное количество подобных сооружений. Это, в свою очередь, увеличивает затраты на их размещение и обслуживание. Кроме того, вышки лишены мобильности: в случае неблагоприятных погодных условий, природных катастроф или необходимости переноса зоны наблюдения, они остаются неподвижными и не могут быть быстро перемещены. Ещё один существенный недостаток – зависимость от погодных условий. Туман, дождь, дым и другие атмосферные явления могут серьёзно снижать эффективность визуального наблюдения.



*Рис. 1. Пожарная вышка на Ильменском хребте*

Также стоит учитывать ограниченность метода в контексте раннего обнаружения: небольшие очаги, скрытые под пологом деревьев или ещё не проявившиеся открытым пламенем, могут остаться незамеченными. Это увеличивает время реагирования и повышает риск быстрого распространения пожара [3].

Ещё один широко применяемый способ мониторинга – это использование спутниковых систем, способных фиксировать температурные аномалии, дымовые выбросы и отражённое излучение с поверхности Земли, чтобы находить возможные возгорания (рис. 2). Спутники позволяют охватывать огромные площади, что делает их особенно ценными для наблюдения за природными пожарами. К числу очевидных преимуществ относится возможность быстрого сбора данных с больших площадей, а также относительная независимость от времени суток – многие спутники работают в инфракрасном диапазоне и могут осуществлять наблюдение круглосуточно [4–7]. Кроме того, в некоторых случаях они остаются работоспособными даже при частичной облачности, обеспечивая почти непрерывный поток информации. Тем не менее, и у спутникового мониторинга есть свои ограничения. Прежде всего, это сравнительно низкое пространственное разрешение – особенно у систем с широким охватом. Это затрудняет точную локализацию небольших очагов пожара, особенно если они возникают под кронами деревьев или сопровождаются плотным задымлением. Также стоит учитывать временные задержки: между съёмкой и получением обработанных данных может проходить значительное время, что ограничивает возможности оперативного реагирования. В условиях, когда счёт идёт на часы, это критично. Дополнительную сложность создают и погодные условия. Обильная облачность, атмосферные помехи или сильные ветра могут существенно повлиять на качество снимков. Всё это делает спутниковый метод не самым эффективным инструментом для раннего обнаружения возгораний.

Далее рассмотрим метод, основывающийся на авиационном мониторинге представленном в соответствии с рис. 3. Он предполагает использование пилотируемых вертолётов, которые выполняют облёты территорий, проводят визуальную съёмку, фотографирование и тепловизионное сканирование очагов возгорания.



Рис. 2. Снимок природного пожара в Рязанской области со спутниковых систем

Такой подход позволяет оперативно получать данные о масштабах и характере пожаров, включая информацию, недоступную с земли или с использованием стационарных систем. К преимуществам этого метода относится широкая зона охвата – особенно это актуально для труднодоступных или удалённых регионов, где другие методы могут быть неэффективны или вовсе неприменимы. Авиация позволяет не только обнаруживать крупные и малые очаги пожара, но и быстро оценивать интенсивность горения, а также потенциальные риски для населённых пунктов, объектов инфраструктуры и охраняемых природных территорий. В некоторых случаях лётные средства участвуют не только в наблюдении, но и в активном тушении – например, сбрасывая воду или огнегасящие составы, чтобы сдержать

распространение огня до прибытия наземных подразделений. Вместе с тем у авиационного метода есть и серьёзные ограничения. В первую очередь – высокая стоимость: как сами транспортные средства, так и их обслуживание, топливо, экипажи и организация полётов требуют значительных финансовых и логистических ресурсов. Кроме того, погодные условия оказывают сильное влияние на эффективность воздушного мониторинга. Облачность, туман, осадки или сильный ветер снижают видимость и, соответственно, точность получаемой информации. Всё это делает авиацию ценным, но далеко не универсальным инструментом в системе мониторинга природных пожаров. Также важно учитывать, что авиационные наблюдения не могут вестись непрерывно – полёты ограничены по времени, требуют предварительной подготовки и часто требуют повторных вылетов для более подробного мониторинга. Это снижает оперативность реакции в случае резкого изменения обстановки на местности. Таким образом, несмотря на высокую информативность и мобильность, авиационный мониторинг сложно рассматривать как универсальное решение – он скорее выступает в роли дополнительного инструмента, особенно эффективного на стадии оценки масштабов уже обнаруженного возгорания и, конечно же, в процессе его тушения.

Беспилотные летательные аппараты начали активно использовать для мониторинга природных пожаров примерно с начала 2000-х годов. Это стало возможным благодаря развитию технологий – дроны стали компактнее, сенсоры точнее, а спутниковая навигация доступнее. С этого момента они начали всё чаще применяться не только в военных, но и в гражданских задачах, в том числе для наблюдения за природными пожарами.



Рис. 3. Вертолёт Ми-8, используемый МЧС России в авиационном мониторинге

Сегодня дроны – один из основных инструментов, когда речь идёт о мониторинге массивов территорий. Их используют для регулярных облётов и поиска новых очагов возгорания [8]. Такие аппараты оснащаются камерами, тепловизорами, датчиками климата и GPS-модулями, что позволяет получать точную информацию и быстро передавать её в центр управления. Благодаря своей манёвренности они легко добираются до труднодоступных мест и могут работать там, где другой транспорт попросту не пройдёт. В отличие от пилотируемых самолётов, дроны проще в обслуживании и быстрее в развёртывании. Они могут долго находиться в воздухе и практически не требуют вмешательства человека в процессе работы. Всё это делает их незаменимыми помощниками при мониторинге природных пожаров. БПЛА принято классифицировать на три основных типа, каждый из которых оптимизирован для различных условий применения [9] и обладает своими преимуществами и ограничениями.

Вертолётный тип (VTOL) включает в себя все дроны, способные вертикально взлетать и садиться. К таким БПЛА относят: Многоцелевые малые дроны (квадрокоптеры) и Большие VTOL-дроны (рис. 4).

Многоцелевые малые дроны (квадрокоптеры) применяются для локального мониторинга небольших территорий и обследования очагов возгорания в сложных условиях. Их ключевые достоинства – лёгкость управления, высокая манёвренность, в том числе в ограниченных и труднодоступных пространствах, сравнительно низкая стоимость эксплуатации и возможность полётов на малых высотах, включая ночное время с приме-

нием тепловизоров. Такие аппараты способны передавать фото- и видеоинформацию или обеспечивать видеотрансляцию в режиме, приближенном к реальному времени [10]. Основные недостатки – ограниченное время полёта и малая площадь покрытия. Большие VTOL-дроны способны выполнять долговременные миссии (до нескольких часов) на больших территориях, включая труднодоступные и удалённые участки. Эти аппараты обладают высокой грузоподъёмностью для установки разнообразных сенсоров и камер, а также достаточной манёвренностью для работы в ограниченных пространствах. Вместе с тем они требуют высококвалифицированных операторов, имеют более высокие эксплуатационные затраты и, из-за больших габаритов и веса, уступают в манёвренности квадрокоптерам [11].



Рис. 4. БПЛА вертолётного типа, применяемые МЧС России для мониторинга природных пожаров: а – квадрокоптер «Фантом 4»; б – Большой БПЛА вертолётного типа «BBC-VT 450»

Самолётный тип включает в себя дроны с традиционным горизонтальным взлётом и посадкой предназначены для длительного патрулирования обширных и удалённых территорий, таких как крупные лесные массивы, горные районы и труднодоступные зоны (рис. 5). Турбовинтовые БПЛА, способны осуществлять продолжительный полёт на большие расстояния (до сотен километров), работать на больших высотах и обеспечивать мониторинг в сложных климатических условиях. Они отличаются более низкой стоимостью эксплуатации на единицу полёта по сравнению с пилотируемой авиацией. Основные ограничения включают необходимость взлётно-посадочных полос или катапульт, меньшую манёвренность, невозможность зависать над очагами, а также ограниченную работоспособность в ночное время и при неблагоприятных погодных условиях без дополнительного оборудования.



Рис. 5. БПЛА самолётного типа «Орлан-10» [12], применяемый МЧС России для мониторинга природных пожаров

Категория Гибридные VTOL-дроны объединяет аппараты, сочетающие ключевые преимущества вертолётных и самолётных типов: возможность вертикального взлёта и посадки с последующим переходом в экономичный горизонтальный полёт (рис. 6). Они

обеспечивают расширенную дальность и время работы, сохраняя при этом манёвренность и гибкость. Применение таких дронов актуально для длительного мониторинга больших территорий с возможностью оперативного реагирования в сложных условиях. Их преимущества включают отсутствие необходимости в взлётно-посадочных полосах, увеличенное время полёта (до нескольких часов), а также адаптивность к разным ландшафтам благодаря переключению режимов полёта. Недостатки связаны с высокой стоимостью, сложностью эксплуатации и обслуживания, необходимостью в квалифицированных операторах, а также большими размерами и весом.



Рис. 6. БПЛА гибридного типа InnoVtol-3s

Использование распределённых сетей стационарных датчиков для мониторинга природных пожаров стало одним из наиболее современных и эффективных методов раннего обнаружения возгораний. Такие системы, часто обозначаемые как системы датчиков окружающей среды (Environmental Sensor Networks, ESN), предназначены для постоянного измерения и анализа ключевых параметров окружающей среды, что позволяет оперативно выявлять очаги возгорания на самых ранних стадиях [13]. Датчики размещаются на заранее выбранных участках, где они непрерывно регистрируют параметры, связанные с риском возгорания, такие как температура воздуха и поверхности, влажность, концентрация дыма и продуктов горения (газов, аэрозолей), а также скорость и направление ветра, оптические параметры с помощью фото- и видеодатчиков. Собранные данные передаются в центральную систему, где они подвергаются анализу с использованием алгоритмов для обнаружения аномалий и методов машинного обучения. В случае выявления признаков возгорания система автоматически генерирует тревожные сигналы, что позволяет оперативно реагировать на ситуацию. Среди главных достоинств этого подхода – возможность раннего обнаружения пожаров, когда возгорание ещё не сопровождается открытым пламенем, а только появляется дым или локальное повышение температуры. Системы с такими датчиками обеспечивают круглосуточный и непрерывный мониторинг, не зависящий от погодных условий и времени суток [13, 14].

Этот метод позволяет значительно повысить уровень автоматизации и снизить затраты, так как исключает необходимость постоянного ручного патрулирования территории, что в свою очередь сокращает трудозатраты и ускоряет реакцию. Дополнительно, географическое распределение датчиков повышает точность определения местоположения очагов возгорания, что особенно важно для быстрого реагирования. Тем не менее, система датчиков не лишена недостатков. Для эффективного охвата больших территорий требуется плотная сеть сенсоров, что приводит к высоким затратам и усложняет развёртывание. Ключевой проблемой остаётся зависимость от инфраструктуры: устойчивая передача данных критически важна, особенно в удалённых районах с плохой связью, а это дополнительно повышает требования к коммуникациям. Ещё один нюанс – ограниченный радиус действия датчиков. Чтобы избежать «слепых зон», их расположение приходится тщательно просчитывать, а это добавляет сложностей на этапе проектирования системы.

Ещё один широко применяемый способ мониторинга – это наземное патрулирование. Специалисты обходят определённые участки местности, визуально оценивая обстановку и выявляя возможные очаги возгорания. Такой подход также используется для контроля доступа в зоны повышенной пожарной опасности, особенно в жаркий сезон. Одним из главных плюсов этого метода считается высокая точность. Находясь непосредственно на месте, человек способен заметить то, что может быть упущено при съёмке с воздуха – едва уловимый запах гари, незначительное задымление, локальные изменения температуры. В процессе обхода сотрудники могут сразу проводить простые измерения: температуру воздуха, влажность, уровень задымлённости, концентрацию угарного газа и другие параметры, которые помогают более точно оценить ситуацию. Кроме того, этот способ позволяет оперативно реагировать на происходящее. Патруль может быть быстро направлен в нужную точку, если появилась информация о подозрительной активности или потенциальной угрозе. Такая гибкость особенно важна в условиях, когда обстановка может меняться буквально за часы. Однако у этого метода есть и серьёзные ограничения. В первую очередь – это низкая скорость и малая зона охвата. Один специалист может обследовать лишь ограниченный участок, а на полный обход больших территорий уходит много времени. В условиях активного пожара или угрозы распространения огня это может оказаться критичным. Кроме того, эффективность такого мониторинга сильно зависит от погодных условий – туман, дождь или снег могут сделать патрулирование невозможным. Метод также достаточно ресурсоёмкий: требует большого количества людей, оборудования и постоянной координации с центром управления. По этой причине наземные обходы сегодня чаще используются как вспомогательный инструмент – в сочетании с другими, более технологичными средствами наблюдения.

**Перспективность применения БПЛА и ИИ.** С развитием технологий беспилотные летательные аппараты (БПЛА) и системы на базе искусственного интеллекта (ИИ) становятся всё более доступными, что открывает новые возможности для организации эффективного мониторинга природных пожаров. Дроны обеспечивают высокую мобильность и позволяют быстро получать данные даже из труднодоступных районов, где применение традиционных средств наблюдения затруднено. При этом передаваемая информация может поступать практически в реальном времени, что особенно важно в условиях быстро меняющейся обстановки. В свою очередь, алгоритмы искусственного интеллекта и машинного обучения дают возможность не только обрабатывать и анализировать большие объёмы данных, но и строить прогнозы – например, моделировать возможные направления и скорость распространения огня. Сочетание этих технологий позволяет создать системы, способные действовать автономно, с высокой точностью и минимальной задержкой. Это в значительной степени повышает шансы на своевременное выявление угроз и даёт возможность более точно и эффективно управлять ситуацией в условиях природных катастроф.

**Обзор существующих решений для мониторинга и детекции пожаров.** Одним из ключевых инструментов, используемых для мониторинга природных пожаров, остаются спутниковые системы дистанционного зондирования, такие как Landsat [4], MODIS [5] и Sentinel-2 [6]. Эти платформы обеспечивают регулярную съёмку больших территорий и позволяют фиксировать как активные очаги возгорания, так и сопутствующие явления – дымовые шлейфы, термические аномалии и изменения в структуре растительности. Благодаря широкому охвату и независимости от наземной инфраструктуры, спутниковые системы играют важную роль в отслеживании динамики природных катастроф и оценке их последствий. Спутники семейства Landsat обеспечивают съёмку с пространственным разрешением до 30 метров, что позволяет достаточно точно регистрировать крупные очаги пожара, а также картографировать зоны, уже пройденные огнём. Эти данные широко используются для анализа последствий, построения тематических карт повреждённых участков и оценки общего масштаба ущерба. Однако у системы есть и серьёзное ограничение: съёмка одной и той же территории осуществляется с интервалом в несколько дней, а иногда и дольше [4]. При стремительном распространении огня такой темп обновления информации оказывается недостаточным для оперативного реагирования, что снижает эффективность применения Landsat в задачах реального времени.

Система MODIS, установленная на спутниках Terra и Aqua, отличается высокой частотой съёмки – одни и те же участки поверхности могут фиксироваться до двух раз в сутки. Это делает её особенно ценной для мониторинга пожаров в динамике, с возможностью приближённого отслеживания изменений в течение одного дня. Однако высокая частота наблюдений сопровождается сравнительно низким пространственным разрешением – около 1 километра [5], что не позволяет точно определить небольшие очаги возгорания, особенно если они частично скрыты плотной растительностью или сопровождаются сильным задымлением. Кроме того, даже при регулярной съёмке данные требуют времени на обработку, что создаёт дополнительную задержку и ограничивает применение MODIS в задачах моментального реагирования [15].

Спутники Sentinel-2, работающие в рамках европейской программы Copernicus, обеспечивают съёмку с разрешением до 10 метров, что позволяет довольно точно фиксировать очаги возгорания и оценивать масштабы пострадавших территорий. Интервалы между съёмками одной и той же области составляют примерно 5–7 дней, что делает эти данные полезными для анализа последствий пожаров и построения карт пройденных огнём участков. Однако даже при сравнительно высоком разрешении Sentinel-2 не всегда подходит для задач раннего обнаружения – между моментом съёмки и получением обработанных данных может проходить значительное время, особенно при большой нагрузке на систему или в условиях ограниченного доступа к быстрой обработке [6].

В целом, спутниковые платформы остаются важным инструментом в наблюдении за природными пожарами, особенно благодаря широкому охвату и возможности работать независимо от наземной инфраструктуры. Тем не менее, они имеют и ряд ограничений: не всегда достаточно точное разрешение, интервалы между съёмками и задержки в доступе к данным существенно снижают их эффективность в ситуациях, требующих немедленного реагирования.

Проект «Стрекоза» представляет собой перспективный беспилотный авиационный комплекс (рис. 7), разработанный специально для задач обнаружения и первичного тушения лесных пожаров. Аппараты оснащаются как оптическими, так и тепловизионными камерами, что позволяет эффективно выявлять очаги возгорания на ранних стадиях. Кроме того, дроны оборудованы специальными ёмкостями с огнетушащим составом, благодаря чему могут оперативно реагировать на обнаруженные очаги, производя локальное подавление пламени ещё до прибытия основных сил [16–18].

Такие решения особенно актуальны в труднодоступной местности, где использование наземной техники или пилотируемой авиации затруднено. Вместе с тем, проект пока находится в стадии испытаний. Для широкомасштабного внедрения «Стрекоза» требует доработки в части автономности, устойчивости к погодным условиям и адаптации под разные ландшафтные сценарии. Несмотря на это, концепция комплекса уже демонстрирует высокий потенциал и вызывает интерес со стороны служб, отвечающих за природную безопасность [18].



Рис. 7. Противопожарный БПЛА «Стрекоза»

Компания Geosalut применяет дроновые технологии (рис. 8) для мониторинга лесных территорий и своевременного обнаружения очагов возгорания. Используемые БПЛА оснащены тепловизорами, оптическими камерами и другими сенсорами, что позволяет собирать информацию в высоком разрешении и передавать её для анализа практически в режиме реального времени [19]. Такой подход даёт возможность оперативно отслеживать изменения на местности и быстро реагировать на возникающие угрозы. В то же время, как и большинство подобных решений, система имеет определённые ограничения. Радиус охвата одного аппарата остаётся относительно небольшим, что требует либо запуска сразу нескольких дронов, либо частого перемещения оборудования. Кроме того, эффективная передача данных требует стабильных и высокоскоростных каналов связи, что может быть затруднительно в удалённых или слабо покрытых сетями районах.



Рис. 8. БПЛА “Supercam S350”

Компания Geoscan представила первый отечественный комплекс для видеомониторинга пожарной обстановки, в состав которого входит беспилотный летательный аппарат (рис. 9) с возможностью передачи видеопотока в режиме, приближенном к реальному времени [20]. Такое решение позволяет оперативно получать визуальную информацию о происходящих пожарах, что особенно важно при координации действий наземных служб. Вместе с тем, система сталкивается с рядом технологических ограничений – в частности, с необходимостью передачи и обработки больших объёмов видеоданных, что требует устойчивых каналов связи и высокой вычислительной мощности.



Рис. 9. БПЛА “Геоскан 801”

Развитие подобных технологий продолжается и в научной среде. Так, в рамках проекта UTS МЕРФІ в России разрабатываются дроновые системы, ориентированные на раннее обнаружение очагов возгорания [21]. Аппараты оснащаются тепловизионными камерами и сенсорами, способными фиксировать горячие точки и температурные аномалии. Это позволяет значительно сократить время между началом пожара и его обнаружением.

Однако и здесь остаются нерешёнными задачи, связанные с ограниченным радиусом действия дронов, необходимостью регулярного обслуживания и затратами на поддержание инфраструктуры.

В последние годы заметно усилился интерес к применению технологий искусственного интеллекта в задачах обнаружения и анализа природных пожаров [22–25]. Особенно активно развиваются решения, основанные на алгоритмах машинного обучения и методах компьютерного зрения. Такие системы обучаются распознавать визуальные признаки возгораний – дым, пламя, термальные аномалии – по изображениям, поступающим с дронов или спутников [15, 24, 26].

Одним из ключевых преимуществ подобных подходов является возможность обработки данных практически в реальном времени, что существенно повышает скорость реагирования и снижает вероятность пропуска очагов. Интеллектуальные алгоритмы способны не только выявлять факт возгорания, но и фильтровать ложные срабатывания, отличая, например, дым от облаков или солнечные блики от настоящего огня [27].

Одним из примеров использования искусственного интеллекта в обнаружении пожаров является система Nix, в которой реализованы алгоритмы анализа изображений на основе нейросетевых моделей YOLO и Faster R-CNN. Эти модели хорошо зарекомендовали себя в задачах детекции объектов и позволяют с высокой точностью распознавать признаки возгорания – в том числе пламя и дым – даже в условиях задымления и ограниченной видимости [26, 28].

Система обучена отличать реальные угрозы от визуальных аномалий, таких как солнечные блики или пар, что снижает количество ложных тревог. Однако полностью исключить ошибки пока не удаётся: в сложных погодных условиях, при плотном дыме или в сумерках возможны ложные срабатывания, особенно на фоне неоднородного ландшафта. Тем не менее, подобные решения демонстрируют высокий потенциал и активно развиваются в направлении повышения устойчивости к внешним искажающим факторам.

Компания Evolonis занимается разработкой интеллектуальных систем мониторинга, в которых сочетаются возможности беспилотных летательных аппаратов и алгоритмов искусственного интеллекта. Основная задача таких систем – автоматизированный анализ данных, поступающих с различных сенсоров, включая оптические камеры и тепловизоры, установленные на борту дронов (рис. 10).

Одной из ключевых особенностей решений Evolonis является способность адаптироваться к изменениям внешней среды. Система учитывает погодные условия, уровень освещённости и другие факторы, влияющие на качество наблюдения. Это позволяет проводить анализ практически в реальном времени и с высокой точностью фиксировать признаки возгорания на самых ранних стадиях (рис. 11), ещё до того, как пожар начнёт активно распространяться [29]. Подобный подход значительно повышает шансы на своевременное реагирование и минимизацию ущерба.



Рис. 10. БПЛА NF4 от “Evolonis”



Рис. 11. Детекция возгорания с помощью системы от “Evolonis”

Несмотря на активное развитие технологий искусственного интеллекта, ручной анализ изображений по-прежнему сохраняет своё значение, особенно в сложных условиях, где автоматические системы могут допускать ошибки. В частности, при неблагоприятной погоде, сильной задымлённости или наличии частичных перекрытий (например, плотного полога деревьев) даже современные ИИ-модели не всегда способны корректно интерпретировать визуальные данные. В подобных ситуациях к анализу подключаются специалисты, которые вручную просматривают снимки – в том числе в разных спектральных диапазонах: инфракрасном, ультрафиолетовом и видимом. Такой подход помогает выявить признаки возгорания даже тогда, когда пламя скрыто под пологом деревьев или визуально не различимо. При наличии опыта эксперт способен заметить тонкие температурные или визуальные аномалии, которые автоматические алгоритмы могут пропустить. Несмотря на трудоёмкость и необходимость высокой квалификации, ручной анализ по-прежнему востребован – особенно в нестандартных или сложных условиях, где точность и надёжность критически важны для своевременного принятия решений.

**Обзор существующих решений для прогнозирования распространения пожаров.** Современные подходы к прогнозированию распространения пожаров в основном основаны на использовании спутниковых данных в сочетании с метеорологической информацией и алгоритмами искусственного интеллекта [25, 30–34]. При этом снимки, получаемые с беспилотных летательных аппаратов, пока преимущественно применяются для обнаружения и наблюдения за уже возникшими очагами, но практически не используются для построения точных прогнозов распространения огня в режиме, близком к реальному времени. Этот аспект остаётся открытым направлением для дальнейших исследований и технологического развития.

Например, исследователи из Университета Южной Калифорнии разработали модель, которая сочетает спутниковые данные и генеративный ИИ для точного прогнозирования распространения пожаров [35].

Другие системы, такие как WRF-SFIRE [36] и CAWFE [37], интегрируют атмосферные и физические модели для предсказания поведения огня, учитывая такие факторы, как топография, влажность и скорость ветра. Эти модели позволяют более точно оценивать интенсивность и направление распространения пожара.

Кроме того, использование глубоких нейронных сетей, таких как CNN и LSTM, позволяет анализировать спутниковые изображения и метеорологические данные для прогнозирования распространения огня. Исследования показывают, что такие подходы могут значительно улучшить точность прогнозов по сравнению с традиционными методами.

Проект NASA "Wildfire Digital Twin" разрабатывает модели с высоким пространственным разрешением (10–30 м/пиксель) для прогнозирования распространения огня и дыма в реальном времени, используя данные с наземных, воздушных и спутниковых сенсоров [38, 39].

Модели, такие как MA-Net, применяют пространственные и метеорологические данные для прогнозирования направления и скорости распространения огня [40], учитывая такие факторы, как рельеф местности, тип растительности и погодные условия. Это позволяет более точно оценивать потенциальные зоны риска и заранее определять участки, требующие повышенного внимания со стороны служб реагирования.

**Новизна, цель и задачи исследования.** Целью данного исследования является разработка концепции эффективной и многоуровневой системы мониторинга природных пожаров, основанной на применении беспилотных летательных аппаратов и современных методов обработки данных с использованием алгоритмов машинного обучения. Предполагается, что такая система будет способна не только оперативно выявлять очаги возгорания, но и прогнозировать направление и скорость их распространения, тем самым повышая эффективность реагирования в самых разных ландшафтных и климатических условиях.

Новизна предлагаемого подхода заключается в интеграции всех компонентов – сбора, анализа и интерпретации данных – в единую архитектурную модель, ориентированную на автоматизацию процессов мониторинга и принятия решений.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- ◆ провести анализ современных методов мониторинга и прогнозирования природных пожаров, выявить их преимущества и ограничения;

- ◆ разработать архитектуру для предлагаемой системы мониторинга;
- ◆ реализовать методы автоматического обнаружения очагов возгорания на основе обработки изображений и видеоданных, получаемых с беспилотных летательных аппаратов;
- ◆ создать модель прогнозирования динамики распространения пожара с учётом метеорологических данных и характеристик местности;
- ◆ обеспечить интеграцию всех компонентов системы для работы в режиме, приближенном к реальному времени.

Данный круг задач был сформулирован, поскольку только комплексный подход даёт возможность создать действительно надёжную и практически применимую систему мониторинга. Анализ существующих решений позволяет не только выявить их сильные стороны, но и понять, какие элементы требуют доработки или даже пересмотра принципов реализации. Автоматическое обнаружение очагов и прогнозирование распространения пожара – ключевые функции, без которых невозможно обеспечить своевременное и эффективное реагирование. Интеграция всех компонентов системы и организация работы в режиме, приближенном к реальному времени, открывают возможность оперативного принятия решений и своевременного вмешательства в развитие чрезвычайной ситуации. При этом важно отметить, что в рамках данного исследования мы сосредотачиваем внимание именно на природных пожарах, таких как лесные и ландшафтные, и рассматриваем применение современных беспилотных платформ и методов машинного обучения именно в этом контексте. Система не ориентирована на мониторинг бытовых или промышленных возгораний. В перспективе рассматривается, что разработанная концепция станет не просто техническим решением, а основой для построения эффективной и масштабируемой системы, способной снизить последствия природных пожаров и стать отправной точкой для дальнейших исследований и практического внедрения.

**Концепция и архитектура системы.** Предлагаемая система мониторинга природных пожаров представляет собой многоуровневую платформу, состоящую из нескольких ключевых модулей, каждый из которых выполняет свою специализированную функцию. Основными компонентами системы являются: модуль управления дронами, модуль обработки изображений для обнаружения очагов возгорания, модуль прогнозирования распространения огня, модуль связи, обеспечивающий надёжную передачу данных, служебный модуль для логирования и хранения информации, а также пользовательский интерфейс для операторов, служб экстренного реагирования, аналитиков и администраторов системы. Такая архитектура (рис. 12) обеспечивает гибкость, масштабируемость и возможность интеграции с внешними источниками данных, включая метеосервисы и экстренные службы. Для наглядности и целостного восприятия рассмотрим типовой сценарий работы системы.

Сначала происходит планирование и запуск миссии. Оператор задаёт параметры патрулирования, включая маршрут или область, которую нужно обследовать, высоту полёта, настройки связи и передачи данных, а также время начала миссии. Либо он может активировать автоматический режим работы дрона, указав только время начала миссии и её тип: патрулирование области, по заданным точкам или позиционное наблюдение. При патрулировании области дрон автоматически рассчитывает оптимальный маршрут для покрытия заданной территории, учитывая ограничения ресурсов дрона и параметры, установленные оператором. На этапе построения маршрута, независимо от выбранного типа патрулирования, рассчитываются позиции съёмки, обеспечивающие оптимальное перекрытие кадров: достаточное для исключения «слепых зон», но минимизирующее количество снимков и, соответственно, нагрузку на систему хранения и обработки данных. При обнаружении очагов возгорания дрон может изменять маршрут для более детального мониторинга по указанию оператора, автоматически передавать данные на сервер и, при необходимости, возвращаться на базу. Оператор сохраняет возможность дистанционного контроля и вмешательства. После настройки параметров дрон вылетает с базы и приступает к выполнению миссии согласно заданным параметрам.

Далее происходит сбор и передача данных. Во время полёта дрон собирает изображения с камер, тепловизоров и других сенсоров. Полученные данные передаются на сервер для обработки в многоспектральном формате.

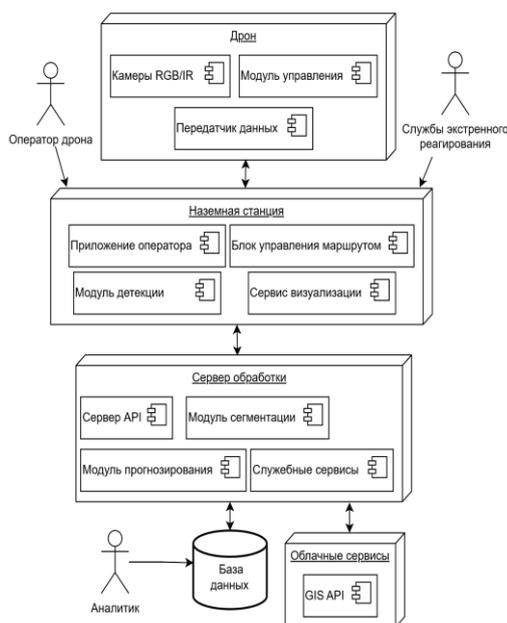


Рис. 12. Схема архитектуры автоматизированной системы мониторинга и прогнозирования природных пожаров с использованием БПЛА

В это время на сервере происходит анализ полученных данных на предмет обнаружения очагов возгорания. Модуль обработки изображений анализирует поступающие данные, выделяет очаги возгорания и оценивает степень угрозы на основе визуальной и тепловой информации.

При обнаружении возгорания на снимках происходит прогнозирование распространения пожара с учётом метеорологической информации и характеристик местности. Для определения временных промежутков прогноза необходимо учитывать несколько факторов. Во-первых, скорость распространения огня  $v$  зависит от растительности, метеоданных и рельефа. На основе эмпирических данных и моделей, таких как The Rothermel surface fire spread model [41], для лесных пожаров скорость фронта огня может варьироваться в пределах 5–15 м/мин, для степных и травяных пожаров – 10–30 м/мин, а для торфяников – 2–5 м/мин. Во-вторых, необходимо учитывать покрытие территории одним снимком с дрона. При вертикальной съёмке (надир), проекция кадра на землю будет прямоугольником, а размеры территории на изображении определяются с помощью формул:

$$W = 2 h \tan \left( \frac{HFOV}{2} \right);$$

$$H = 2 h \tan \left( \frac{VFOV}{2} \right),$$

где  $h$  – высота полёта дрона над землёй, HFOV и VFOV – горизонтальный и вертикальный углы обзора камеры в радианах.

Если углы обзора заранее неизвестны, их можно определить через размеры сенсора и фокусное расстояние объектива:

$$HFOV = 2 \arctan \left( \frac{W_s}{2f} \right);$$

$$VFOV = 2 \arctan \left( \frac{H_s}{2f} \right),$$

где  $W_s$  и  $H_s$  – ширина и высота сенсора камеры,  $f$  – фокусное расстояние объектива.

В-третьих, точность прогноза зависит от качества данных и модели прогнозирования. Чем длиннее временной промежуток, тем выше неопределённость из-за изменчивости погодных условий и динамики огня.

В случае подтверждения очага возгорания и определения его потенциальной угрозы система генерирует уведомления для операторов и служб экстренного реагирования, предоставляя информацию о местоположении и прогнозируемом развитии пожара. Оператор имеет возможность приостановить патрулирование, перейдя в ручной режим и задав новую миссию, например, по мониторингу развития обнаруженного возгорания. После чего дрон отправится на координаты, которые передал оператор, и зависнет в воздухе над пожаром. Оператор в любой момент времени патрулирования может получить видеопоток в режиме, приближенном к реальному времени.

Все события, изображения, результаты анализа и прогнозы сохраняются в базе данных для дальнейшего анализа, обучения моделей и отчётности.

**Основные модули и подходы к их реализации.** Модуль управления дроном – это ключевая часть системы, обеспечивающая автономное и ручное управление беспилотным летательным аппаратом. Данный модуль отвечает за планирование, запуск и сопровождение полётных заданий, а также за контроль за перемещением беспилотных аппаратов в процессе выполнения миссии. Он служит связующим звеном между оператором и системой автономного управления полётом.

Ключевые функции модуля включают в себя:

- ◆ задание маршрута. Оператор формирует маршрут патрулирования, указывая координаты контрольных точек, высоту полёта, приоритетные зоны наблюдения и временные ограничения.

- ◆ автоматический режим. дрон самостоятельно определяет оптимальную траекторию с учётом рельефа, погодных условий и полётных ограничений. Это снижает нагрузку на оператора и позволяет системе гибко адаптироваться к меняющейся обстановке на местности.

- ◆ мониторинг состояния дрона. Отображается информация о текущем статусе аппарата: уровень заряда аккумулятора, координаты по GPS, состояние сенсоров, качество связи и другие критически важные параметры.

- ◆ реакция на пожар. В случае обнаружения очага пожара оператор может приостановить выполнение текущей миссии и вручную изменить маршрут – направив дрон на повторное сканирование зоны возгорания для уточнения координат и масштабов.

- ◆ безопасность. Система отслеживает соблюдение установленных ограничений: запретных зон, минимальной высоты полёта, погодных условий. При отклонениях модуль способен автоматически корректировать маршрут или инициировать возврат на базу. отслеживание и соблюдение ограничений, таких как зоны запрета полётов, метеоусловия и другие.

Технологии и реализация:

- ◆ для управления беспилотными летательными аппаратами планируется использование стандартных API, таких как DJI SDK, PX4 или ArduPilot, которые обеспечивают поддержку как автономных, так и полуавтономных режимов полёта. Эти платформы позволяют реализовать гибкое взаимодействие между дроном и управляющей системой, включая маршрутизацию, задание высоты, контроль скорости и аварийное возвращение на базу.

- ◆ для точного позиционирования и соблюдения заданных траекторий в систему интегрируются данные от GPS, ГЛОНАСС, а также дополнительных навигационных сенсоров. Это позволяет обеспечить стабильное движение по маршруту и корректную реакцию на изменения в окружающей среде.

- ◆ отдельное внимание уделяется реализации адаптивных алгоритмов управления, которые на основе данных с сенсоров могут в реальном времени изменять параметры полёта – например, автоматически повышать высоту при обнаружении препятствий или корректировать маршрут при ухудшении погодных условий.

Модуль детекции пожара отвечает за обработку данных, поступающих с камер и сенсоров, установленных на борту беспилотного аппарата, с целью выявления признаков возгорания – таких как дым, открытое пламя или тепловые аномалии. Его основная задача – быстрое и надёжное обнаружение пожаров на ранних стадиях.

Ключевые функции модуля:

- ♦ обработка изображений. Анализ изображений и видеопотока с оптической камеры дрона для распознавания визуальных признаков пожара: клубов дыма, языков пламени, зон повышенного свечения.

- ♦ использование нейросетевых методов для детекции. Используются обученные модели машинного обучения (например, YOLO, Faster R-CNN), способные быстро и с высокой точностью распознавать огонь и дым на изображениях даже в сложных условиях – при задымлении, неравномерном освещении или частичном перекрытии объектов.

- ♦ тепловизионное обнаружение. Обработка данных с тепловизоров для выявления очагов с аномально высокой температурой, в том числе в тех случаях, когда пламя визуально не наблюдается (например, при сильном задымлении или в ночное время).

- ♦ многоспектральное обнаружение. Анализ изображений, полученных в различных спектральных диапазонах – от видимого света до инфракрасного и ультрафиолетового. Это позволяет повысить точность детекции за счёт выявления невидимых глазу характеристик очага.

- ♦ обработка в режиме, приближенном к реальному времени. Система осуществляет анализ данных на борту или на сервере с минимальной задержкой, формируя уведомление о потенциальном пожаре и передавая его оператору для принятия дальнейших решений.

Технологии и реализация:

- ♦ для обработки визуальных данных в системе используется библиотека OpenCV, обеспечивающая эффективную предварительную обработку изображений, включая масштабирование, коррекцию цветового пространства, применение фильтров и другие операции, необходимые перед подачей данных в модель;

- ♦ обнаружение признаков возгорания реализуется с помощью нейросетевых моделей, обученных на изображениях пожаров. Для обучения и развёртывания таких моделей используется фреймворк TensorFlow, в том числе интеграция архитектуры YOLO (You Only Look Once) – одной из самых популярных моделей для детекции объектов в режиме, приближённом к реальному времени. Благодаря этому алгоритму система способна быстро и точно определять наличие огня и дыма на изображениях;

- ♦ в качестве источников тепловых данных применяются тепловизоры и инфракрасные камеры, например, решения от FLIR, которые позволяют обнаруживать участки с аномально высокой температурой даже при отсутствии видимого пламени – например, в условиях сильного задымления или ночью;

- ♦ дополнительно используются модели машинного обучения, обученные классифицировать и локализовать очаги возгорания по различным признакам, что позволяет значительно повысить общую точность системы и снизить количество ложных срабатываний.

Модуль прогнозирования отвечает за построение моделей распространения огня на основе анализа различных источников данных. В его работу включается обработка информации о температуре воздуха, уровне влажности, скорости и направлении ветра, а также данных с бортовых сенсоров и внешних сервисов – в том числе сведений о рельефе местности, типе растительности и плотности лесного покрова.

Функции модуля:

- ♦ прогнозирование распространения огня. На основе метеорологических данных – таких как температура воздуха, влажность, скорость и направление ветра – а также характеристик местности (тип растительности, рельеф, плотность лесного покрова) модуль строит прогноз распространения огня. Это позволяет оперативно оценивать возможные зоны риска и своевременно принимать меры по их защите;

- ♦ моделирование различных сценариев. Система позволяет формировать и анализировать несколько сценариев развития пожара, включая как наиболее вероятные, так и менее вероятные варианты. Такой подход обеспечивает гибкость в планировании и помогает учитывать влияние переменных факторов;

- ◆ использование машинного обучения. Для повышения точности прогнозов используются обучаемые модели, основанные на анализе исторических данных о пожарах. Эти модели способны выявлять скрытые закономерности в поведении огня, адаптироваться к различным ландшафтным и климатическим условиям и уточнять предсказания по мере поступления новых данных;

- ◆ анализ географической и климатической информации. Для точного пространственного анализа модуль подключается к картографическим сервисам и ГИС-системам. Это позволяет учитывать особенности рельефа, тип местности и другие географические параметры, которые существенно влияют на траекторию и скорость распространения пожара.

Технологии и реализация:

- ◆ для построения прогнозов распространения огня используются различные модели, сочетающие методы машинного обучения и моделирования природных процессов. В частности, применяются нейросетевые архитектуры, такие как рекуррентные нейросети и LSTM-модели, способные обрабатывать временные ряды и учитывать динамику изменений погодных условий, а также данные, поступающие от сенсоров с дронов и наземных источников.

- ◆ для более детализированного моделирования применяется подход агентного моделирования (АВМ), в рамках которого распространение огня представлено в виде взаимодействия множества агентов – локальных участков возгорания. Каждый агент реагирует на внешние факторы, такие как направление ветра, уровень влажности, тип растительности, что позволяет более точно воспроизводить реальные сценарии развития пожара.

- ◆ интеграция с геоинформационными системами (ArcGIS, QGIS) позволяет учитывать сложный рельеф, структуру ландшафта и плотность растительного покрова, что критически важно для построения достоверных пространственных прогнозов;

- ◆ разработка и обучение моделей осуществляется с использованием современных фреймворков машинного обучения, таких как Python, TensorFlow и PyTorch, что обеспечивает гибкость в построении архитектуры и масштабируемость решений.

Модуль связи является неотъемлемой частью системы и обеспечивает обмен данными между дроном и центральной системой.

Функции модуля:

- ◆ передача данных с дронов. Модуль обеспечивает передачу ключевой информации с беспилотных аппаратов на центральный сервер. Это включает изображения, видеопотоки, телеметрию и данные с бортовых сенсоров, необходимые для последующей обработки и анализа;

- ◆ взаимодействие с внешними API. Реализовано взаимодействие с внешними API – метеорологическими и геоинформационными платформами, службами экстренного реагирования, а также ГИС-системами. Это позволяет в режиме реального времени получать актуальные данные об обстановке, погодных условиях и состоянии местности;

- ◆ мониторинг качества связи. Система постоянно отслеживает параметры соединения – уровень сигнала, скорость передачи, стабильность канала – и при необходимости автоматически переключается между доступными технологиями связи, такими как радиоканал, LTE, спутниковая связь или Mesh-сети;

- ◆ резервирование связи. Для повышения надёжности предусмотрено использование нескольких каналов связи. Это позволяет обеспечить устойчивую передачу данных даже при временных перебоих или ухудшении качества соединения в отдельных зонах покрытия.

Технологии и реализация:

- ◆ для обеспечения устойчивой и быстрой передачи данных в режиме, приближенном к реальному времени, используется протокол MQTT и WebSocket-соединения, позволяющие организовать лёгкий и надёжный обмен информацией между дроном и серверной частью системы. Эти технологии обеспечивают двустороннюю связь с минимальной задержкой, что критически важно для управления и обработки видеопотоков, телеметрии и сигналов тревоги;

- ◆ передача данных в удалённых и труднодоступных регионах осуществляется через различные каналы связи: радиоканал, LTE, 5G, а также спутниковые коммуникационные платформы, что обеспечивает гибкость и отказоустойчивость системы в условиях нестабильного покрытия;

- ◆ дополнительно модуль реализует интеграцию с внешними API, включая метеорологические и геоинформационные сервисы. Это позволяет автоматически получать актуальные погодные данные, которые используются в модулях прогнозирования и адаптации полётных заданий. Пользовательский интерфейс (UI) обеспечивает доступ к системе для разных категорий пользователей – операторов дронов, сотрудников экстренных служб и аналитиков.

Функции модуля:

- ◆ визуализация данных. Интерфейс позволяет в режиме реального времени отображать на карте местоположение дронов, зоны активного наблюдения, маршруты патрулирования и зафиксированные очаги возгорания. Дополнительно могут отображаться зоны риска, предсказанные системой прогнозирования;

- ◆ уведомления и оповещения. Пользователь получает оперативные уведомления о критических событиях – появлении новых очагов, изменении погодных условий, потере сигнала или других инцидентах, требующих вмешательства;

- ◆ контроль дронов. В интерфейс встроен функционал ручного и полуавтоматического управления полётом. Оператор может задавать маршрут, корректировать высоту, приостанавливать выполнение миссии или переключаться на ручной режим при необходимости;

- ◆ прогнозирование и анализ. Отображаются прогнозируемые траектории распространения огня, зоны потенциального риска, а также аналитические данные, полученные от системы обработки и моделирования.

Технологии и реализация:

- ◆ для фронтенд-разработки интерфейса используются современные веб-фреймворки, такие как React или Vue.js, что позволяет создавать отзывчивые и удобные интерфейсы для разных типов устройств, включая планшеты и рабочие станции;

- ◆ интерактивная карта реализуется с помощью интеграции с картографическими платформами: Google Maps API, Leaflet, OpenLayers и другими, обеспечивающими гибкую визуализацию пространственных данных;

- ◆ серверная логика взаимодействия с backend-частью реализована на базе Node.js или Python Flask, что обеспечивает быструю обработку запросов, взаимодействие с API модулей и поддержку многопользовательского доступа с разграничением прав.

**Заключение.** В данной статье был представлен обзор современных решений для мониторинга и прогнозирования природных пожаров, с акцентом на использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), спутниковых данных и искусственного интеллекта. Мы рассмотрели как традиционные методы, так и инновационные подходы, которые активно применяются и развиваются в сфере мониторинга чрезвычайных ситуаций, относящихся к пожарам.

Спутниковые системы, несмотря на свои преимущества в покрытии больших территорий, сталкиваются с ограничениями, связанными с частотой обновлений и разрешением данных. Эти системы эффективны для мониторинга в крупном масштабе, но для оперативного реагирования в режиме, приближенном к реальному времени их возможностей недостаточно.

Технологии, основанные на БПЛА, предоставляют значительные преимущества с точки зрения мобильности и маневренности, позволяя оперативно реагировать на возникновение пожаров в труднодоступных районах. Тем не менее, эти решения также имеют свои недостатки, такие как ограниченность по времени полета и затратам на инфраструктуру.

Внедрение искусственного интеллекта в анализ данных, получаемых с БПЛА и спутников, значительно улучшает точность и оперативность обнаружения пожаров. Системы машинного обучения, такие как YOLO и Faster R-CNN, уже активно используются для детекции объектов, таких как огонь и дым, в режиме, приближенном к реальному времени. Однако проблемы с ложными срабатываниями и необходимостью валидации остаются актуальными.

Несмотря на достижения в этих областях, комплексная система, концепция которой была рассмотрена в статье, пока не существует в полной мере ни в России и странах СНГ, ни в западных и азиатских странах. Хотя отдельные компоненты, такие как БПЛА для мониторинга и ИИ для анализа данных, уже активно используются, интегрированного решения, которое бы объединяло все элементы (управление дронами, прогнозирование распространения огня в режиме, приближенном к реальному времени, передача данных и взаимодействие с экстренными службами), на данный момент нет. Эта концепция представляет собой новый подход, который может стать прорывной технологией для борьбы с природными катастрофами.

Таким образом, внедрение такой системы будет способствовать не только сохранению природы и экосистем, но и снижению ущерба для экономики, предотвращению разрушений инфраструктуры, а также спасению жизней людей в условиях природных катастроф.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Всемирная метеорологическая организация (ВМО). В бюллетене ВМО по качеству воздуха и климата внимание уделяется воздействиям лесных пожаров / Всемирная Метеорологическая организация. – 2022. – URL: <https://goo.su/gCGr> (дата обращения: 07.03.2025).
2. Организация Объединённых Наций. Ежегодно в мире пожары уничтожают более 350 миллионов гектаров лесных угодий / Организация Объединённых Наций. – 2010. – URL: <https://goo.su/89s9zTt> (дата обращения: 07.03.2025).
3. Akay A.E., Wing M.G., Büyüksakallı H., Malkoçoğlu S. Evaluation of fire lookout towers using GIS-based spatial visibility and suitability analyzes // *Baltic Forestry*. – 2020. – Vol. 144, No. 5–6. – URL: <https://doi.org/10.31298/sl.144.5-6.5> (дата обращения: 05.06.2025).
4. NASA. Спутник Landsat 8. – URL: <https://goo.su/zytsZZX> (дата обращения: 17.03.2025).
5. ScanEx. Terra, Aqua/MODIS. – URL: <https://goo.su/FVHXsh> (дата обращения: 23.03.2025).
6. Innoter. Спутники Sentinel-2A и Sentinel-2B. – URL: <https://goo.su/kWXDS> (дата обращения: 02.04.2025).
7. Adewunmi D., Adelusi J.B. Analyzing Satellite Data for Environmental Monitoring and Disaster Management. – 2024. – URL: <https://goo.su/8pMG8> (дата обращения: 03.05.2025).
8. Главное управление МЧС России по Тульской области. Мониторинг лесопожарной обстановки на контроле спасателей. – URL: <https://goo.su/ITln1mt> (дата обращения: 05.04.2025).
9. Альбатрос. Мониторинг лесных пожаров с БПЛА. – URL: <https://goo.su/gKmwaw> (дата обращения: 06.04.2025).
10. Главное управление МЧС России по Калининградской области. Техника МЧС России: беспилотные авиационные системы. – URL: <https://goo.su/IUDLE> (дата обращения: 17.04.2025).
11. Беспилотные «Стрелы» вертолетного типа // *Стрела*. – 10.10.2021. – URL: <https://goo.su/dFht> (дата обращения: 04.06.2025).
12. Главное управление МЧС России по Республике Саха (Якутия). На вооружении МЧС России – разведывательный беспилотник «Орлан-10». – URL: <https://goo.su/nvp4Szt> (дата обращения: 16.04.2025).
13. GJR Publication. Various Types of Sensors are Used for Forest Fires Detection. – 2025. – URL: <https://goo.su/2OaUruS> (дата обращения: 05.06.2025).
14. Srujan H.R., Srushti S.M., Gowda S.H., Sudhakara H.M. Forest Fire Detection using Optimized Solar Powered Zigbee Wireless Sensor Networks // *International Journal of Advanced Research in Science Communication and Technology*. – 2024. – December. – URL: <https://doi.org/10.48175/IJARST-22808> (дата обращения: 05.06.2025).
15. Indradjad A., Sunarmodo W., Salyasari N. Development of National Forest/Land Fire Monitoring System Using Remote Sensing Satellite Data (Terra/Aqua MODIS and SNPP) by Automation and Nearly Real-time // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2019. – Vol. 280, No. 1. – URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/280/1/012032> (дата обращения: 03.05.2025).
16. Проект «Стрекоза» – летающая пожарная машина (БПЛА) // Национальная технологическая инициатива. – URL: <https://goo.su/Av3UU> (дата обращения: 06.06.2025).
17. Проект «Стрекоза»: летающая пожарная машина (БПЛА) // Университет 2035. – URL: <https://pt.2035.university/project/proekt-strekoza-letausaa-pozarna-masina-bpla> (дата обращения: 06.06.2025).
18. Закавин А., Страхов Д. «Оперативный подход»: как новые БПЛА «Стрекоза» могут облегчить работу российских пожарных // *RT на русском*. – 2024. – URL: <https://russian.rt.com/russia/article/1286390-bpla-pozhar-strekoza-nti> (дата обращения: 06.06.2025).

19. Geosalut. Мониторинг лесных угодий с применением БПЛА // Официальный сайт компании Geosalut. – URL: <https://goo.su/GSsl> (дата обращения: 07.06.2025).
20. Geoscan. Создан первый отечественный комплекс для видеомониторинга пожарной обстановки с беспилотника в режиме реального времени. – URL: <https://goo.su/LP37Ex> (дата обращения: 17.04.2025).
21. Центр беспилотных транспортных систем национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ". Инновационная технология с использованием беспилотных летательных аппаратов способствует раннему выявлению лесных пожаров. – URL: <https://goo.su/w8y18R2> (дата обращения: 05.04.2025).
22. NASA Science Editorial Team. Through Smoke and Fire, NASA Searches for Answers // NASA. – 2019. – URL: <https://goo.su/xDDWQW> (дата обращения: 23.04.2025).
23. Lee S.J.J., Oh J., Choi J. Improved Fire Recognition in VTOL UAVs through Convolutional Neural Network Algorithms // Proceedings of the 6th International Conference on Advanced Natural Language Processing. – 2025. – URL: <https://doi.org/10.5121/csit.2025.150907> (дата обращения: 03.06.2025).
24. Yandouzi M., Mohammed B., Grari M., Boukabous M., Moussaoui O., Azizi M., Ghoumid K., Elmiaid A.K. Semantic segmentation and thermal imaging for forest fires detection and monitoring by drones // Bulletin of Electrical Engineering and Informatics. – 2024. – Vol. 13, No. 4. – URL: <https://doi.org/10.11591/eei.v13i4.7663> (дата обращения: 03.06.2025).
25. Li X., Wang X., Sun S., Wang Y., Li S., Li D. Predicting the Wildland Fire Spread Using a Mixed-Input CNN Model with Both Channel and Spatial Attention Mechanisms // Fire Technology. – 2023. – Vol. 59, No. 3. – URL: <https://doi.org/10.1007/s10694-023-01427-2> (дата обращения: 03.06.2025).
26. Ranjani D., Santhi S. An Optimized Deep Learning Framework for Early Detection and Prevention of Forest Fires Using Advanced Training Techniques. – 2025. – URL: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-6734052/v1> (дата обращения: 03.06.2025).
27. Rahman H.I., Saad A.F., Yani A. Drone Based Fire Detection System Based on Convolutional Neural Network // International Journal of Artificial Intelligence. – 2024. – Vol. 11, No. 1. – P. 26-36. – URL: <https://doi.org/10.36079/lamintang.ijai-01101.669> (дата обращения: 25.05.2025).
28. Kurasinski L., Tan J., Malekian R. Using Neural Networks to Detect Fire from Overhead Images // Wireless Personal Communications. – 2023. – Vol. 130, No. 17. – P. 1-21. – URL: <https://doi.org/10.1007/s11277-023-10321-7> (дата обращения: 03.06.2025).
29. Evolonc GmbH. – URL: <https://evolonic.de/> (дата обращения: 07.06.2025).
30. Liu P., Zhang G. A Case Study on the Integration of Remote Sensing for Predicting Complicated Forest Fire Spread // Remote Sensing. – 2024. – Vol. 16, No. 21. – URL: <https://doi.org/10.3390/rs16213969> (дата обращения: 03.06.2025).
31. Ning J., Liu H., Yu W., Deng J., Sun L., Yang G., Wang M., Yu H. Comparison of Different Models to Simulate Forest Fire Spread: A Case Study // Forests. – 2024. – Vol. 15, No. 3. – URL: <https://doi.org/10.3390/f15030563> (дата обращения: 03.06.2025).
32. Meng Q., Lu H., Huai Y., Xu H., Yang S. Forest Fire Spread Simulation and Fire Extinguishing Visualization Research // Forests. – 2023. – Vol. 14, No. 7. – URL: <https://doi.org/10.3390/f14071371> (дата обращения: 04.06.2025).
33. Shadrin D., Illarionova S., Gubanov F. et al. Wildfire spreading prediction using multimodal data and deep neural network approach // Scientific Reports. – 2024. – Vol. 14, No. 2606. – URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-52821-x> (дата обращения: 25.04.2025).
34. Pang B., Cheng S., Huang Y., Jin Y., Guo Y., Prentice I.C., Harrison S.P., Arcucci R. Fire-Image-DenseNet (FIDN) for predicting wildfire burnt area using remote sensing data // Computers & Geosciences. – 2025. – Vol. 195. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2024.105783> (дата обращения: 03.05.2025).
35. Shaddy B., Ray D., Farguell A., Calaza V., Mandel J., Haley J., Hilburn K., Mallia D.V., Kochanski A., Oberai A. Generative Algorithms for Fusion of Physics-Based Wildfire Spread Models with Satellite Data for Initializing Wildfire Forecasts // Artificial Intelligence for the Earth Systems. – 2024. – Vol. 3, No. 3. – URL: <https://doi.org/10.1175/AIES-D-23-0087.1> (дата обращения: 08.06.2025).
36. Kale M., Meher S.S., Chavan M., Kumar V. et al. Operational Forest-Fire Spread Forecasting Using the WRF-SFIRE Model // Remote Sensing. – 2024. – Vol. 16, No. 13. – URL: <https://doi.org/10.3390/rs16132480> (дата обращения: 07.06.2025).
37. Gill F., Valencia A., Baker G. Prescribed Burns and UAV Drone Analysis: Towards a Coupled Wind-Fire Spread Model // Journal of Physics: Conference Series. – 2024. – Vol. 2885, No. 1. – URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2885/1/012071> (дата обращения: 07.06.2025).
38. Huang Y., Li J., Zheng H. Modeling of Wildfire Digital Twin: Research Progress in Detection, Simulation, and Prediction Techniques // Fire. – 2024. – Vol. 7, No. 11. – URL: <https://doi.org/10.3390/fire7110412> (дата обращения: 07.06.2025).

39. NASA Science Editorial Team. NASA Wildfire Digital Twin Pioneers New AI Models and Streaming Data Techniques for Forecasting Fire and Smoke // NASA Science. – 2024. – URL: <https://goo.su/41cxT> (дата обращения: 07.06.2025).
40. Chen J., Yang Y. Measuring Fire Spread Rate with Digital Image Processing Method // In: Computational and Experimental Simulations in Engineering. – 2023. – P. 257-267. – URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-42987-3\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-031-42987-3_19) (дата обращения: 04.06.2025).
41. Andrews P.L. The Rothermel Surface Fire Spread Model and Associated Developments: A Comprehensive Explanation // Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-371. – Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station; 2018. – URL: <https://doi.org/10.2737/RMRS-GTR-371> (дата обращения: 08.06.2025).
42. Лесные стражи: как создаются российские беспилотники для борьбы с природными пожарами // Научная Россия. – 2025. – URL: <https://goo.su/2Wejwz> (дата обращения: 05.06.2025).

## REFERENCES

1. Vsemirnaya meteorologicheskaya organizatsiya (VMO). V byulletene VMO po kachestvu vozdukhа i klimata vniimanie udelyaetsya vozdeystviyam lesnykh pozharov [World Meteorological Organisation (WMO). WMO Air Quality and Climate Bulletin focuses on the impacts of wildfires], World Meteorological Organisation, 2022. Available at: <https://goo.su/gCGr> (accessed 07 March 2025).
2. Organizatsiya Ob'edinennykh Natsiy. Ezhegodno v mire pozhary unichtozhayut bolee 350 millionov gektarov lesnykh ugodiy [United Nations Organisation. Every year in the world fires destroy more than 350 million hectares of forest land], United Nations, 2010. Available at: <https://goo.su/89s9zTt> (accessed 07 March 2025).
3. Akay A.E., Wing M.G., Büyüksakallı H., Malkoçoglu S. Evaluation of fire lookout towers using GIS-based spatial visibility and suitability analyzes, *Baltic Forestry*, 2020, Vol. 144, No. 5–6. Available at: <https://doi.org/10.31298/sl.144.5-6.5> (accessed 05 June 2025).
4. NASA. Sputnik Landsat 8 [NASA. Landsat 8 satellite]. Available at: <https://goo.su/zytsZZX> (accessed 17 March 2025).
5. ScanEx. Terra, Aqua/MODIS. Available at: <https://goo.su/FVHXsh> (accessed 23 March 2025).
6. Innoter. Спутники Sentinel-2A и Sentinel-2B. Available at: <https://goo.su/kWXDS> (accessed 02 April 2025).
7. Adewunmi D., Adelusi J.B. Analyzing Satellite Data for Environmental Monitoring and Disaster Management, 2024. Available at: <https://goo.su/8pMG8> (accessed 03 May 2025).
8. Glavnoe upravlenie MChS Rossii po Tul'skoy oblasti. Monitoring lesopozharnoy obstanovki na kontrole spasateley [Main Directorate of the Ministry of Emergency Situations of Russia in the Tula Region. Monitoring of forest fire situation on the control of rescuers]. Available at: <https://goo.su/ITln1mt> (accessed 05 April 2025).
9. Al'batros. Monitoring lesnykh pozharov s BPLA [Albatross. Monitoring of forest fires from UAVs]. Available at: <https://goo.su/gKmaw> (accessed 06 April 2025).
10. Glavnoe upravlenie MChS Rossii po Kaliningradskoy oblasti. Tekhnika MChS Rossii: bespilotnye aviatsionnye sistemy [Main Directorate of the Ministry of Emergency Situations of Russia for the Kaliningrad Region. Technique of the Russian Emergencies Ministry: unmanned aerial systems]. Available at: <https://goo.su/IUDLE> (accessed 17 April 2025).
11. Bespilotnye «Strely» vertoletnogo tipa [Unmanned “Arrows” of helicopter type], Arrow. 10.10.2021. Available at: <https://goo.su/dFht> (accessed 04 June 2025).
12. Glavnoe upravlenie MChS Rossii po Respublike Sakha (Yakutiya). Na vooruzhenii MChS Rossii – razvedyvatel'nyy bespilotnik «Orlan-10» [Main Directorate of the Ministry of Emergency Situations of Russia for the Republic of Sakha (Yakutia). The Orlan-10 reconnaissance drone is in service with the Russian Ministry of Emergency Situations]. Available at: <https://goo.su/nvp4Szt> (accessed 16 April 2025).
13. GJR Publication. Various Types of Sensors are Used for Forest Fires Detection, 2025. Available at: <https://goo.su/2OaUruS> (accessed 05 June 2025).
14. Srujan H.R., Srushiti S.M., Gowda S.H., Sudhakara H.M. Forest Fire Detection using Optimized Solar Powered Zigbee Wireless Sensor Networks, *International Journal of Advanced Research in Science Communication and Technology*, 2024. December. Available at: <https://doi.org/10.48175/IJARSC-22808> (accessed 05 June 2025).
15. Indradjad A., Sunarmodo W., Salyasari N. Development of National Forest/Land Fire Monitoring System Using Remote Sensing Satellite Data (Terra/Aqua MODIS and SNPP) by Automation and Nearly Real-time, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, Vol. 280, No. 1. Available at: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/280/1/012032> (accessed 03 May 2025).

16. Proekt «Strekoza» – letayushchaya pozharaya mashina (BPLA) [Project “Strekoza” – flying fire engine (UAV)], National Technological Initiative. Available at: <https://goo.su/Av3UU> (accessed 06 June 2025).
17. Proekt «Strekoza»: letayushchaya pozharaya mashina (BPLA) [Project “Strekoza”: flying fire-fighting vehicle (UAV)], University 2035. Available at: <https://pt.2035.university/project/proekt-strekoza-letausaa-pozarna-masina-bpla> (accessed 06 June 2025).
18. Zakvasin A., Strakhov D. «Operativnyy podkhod»: kak novye BPLA «Strekoza» mogut oblegchit' rabotu rossiyskikh pozharnykh [“Operational Approach”: How the new Strekoza UAVs can facilitate the work of Russian firefighters], RT in Russian, 2024. Available at: <https://russian.rt.com/russia/article/1286390-bpla-pozhar-strekoza-nti> (accessed 04 June 2025).
19. Geosalut. Monitoring lesnykh ugodiy s primeneniem BPLA [Geosalut. Monitoring of forest lands using UAVs], Company’s official website Geosalut. Available at: <https://goo.su/GSsl> (accessed 07 June 2025).
20. Geoscan. Sozdan pervyy otechestvennyy kompleks dlya videomonitoringa pozharoy obstanovki s bespilotnika v rezhime real'nogo vremeni. Available at: <https://goo.su/LP37Ex> (accessed 17 April 2025).
21. Tsentr bespilotnykh transportnykh sistem natsional'nyy issledovatel'skiy yadernyy universitet "MIFI". Innovatsionnaya tekhnologiya s ispol'zovaniem bespilotnykh letatel'nykh apparatov sposobstvuet rannemu vyyavleniyu lesnykh pozharov. Available at: <https://goo.su/w8y18R2> (accessed 05 April 2025).
22. NASA Science Editorial Team. Through Smoke and Fire, NASA Searches for Answers, NASA, 2019. Available at: <https://goo.su/xDDWQW> (accessed 23 April 2025).
23. Lee S.J.J., Oh J., Choi J. Improved Fire Recognition in VTOL UAVs through Convolutional Neural Network Algorithms, *Proceedings of the 6th International Conference on Advanced Natural Language Processing*, 2025. Available at: <https://doi.org/10.5121/csit.2025.150907> (accessed 03 June 2025).
24. Yandouzi M., Mohammed B., Grari M., Boukabous M., Moussaoui O., Azizi M., Ghoumid K., Elmiad A.K. Semantic segmentation and thermal imaging for forest fires detection and monitoring by drones, *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 2024, Vol. 13, No. 4. Available at: <https://doi.org/10.11591/eei.v13i4.7663> (accessed 03 June 2025).
25. Li X., Wang X., Sun S., Wang Y., Li S., Li D. Predicting the Wildland Fire Spread Using a Mixed-Input CNN Model with Both Channel and Spatial Attention Mechanisms, *Fire Technology*, 2023, Vol. 59, № 3. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10694-023-01427-2> (accessed 03 June 2025).
26. Ranjani D., Santhi S. An Optimized Deep Learning Framework for Early Detection and Prevention of Forest Fires Using Advanced Training Techniques, 2025. Available at: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-6734052/v1> (accessed 03 June 2025).
27. Rahman H.I., Saad A.F., Yani A. Drone Based Fire Detection System Based on Convolutional Neural Network, *International Journal of Artificial Intelligence*, 2024, Vol. 11, No. 1, pp. 26-36. Available at: <https://doi.org/10.36079/lamintang.ijai-01101.669> (accessed 25 May 2025).
28. Kurasinski L., Tan J., Malekian R. Using Neural Networks to Detect Fire from Overhead Images, *Wireless Personal Communications*, 2023, Vol. 130, No. 17, pp. 1-21. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11277-023-10321-7> (accessed 03 June 2025).
29. Evolonik GmbH. – URL: <https://evolonic.de/> (accessed 07 June 2025).
30. Liu P., Zhang G. A Case Study on the Integration of Remote Sensing for Predicting Complicated Forest Fire Spread, *Remote Sensing*, 2024, Vol. 16, No. 21. Available at: <https://doi.org/10.3390/rs16213969> (accessed 03 June 2025).
31. Ning J., Liu H., Yu W., Deng J., Sun L., Yang G., Wang M., Yu H. Comparison of Different Models to Simulate Forest Fire Spread: A Case Study, *Forests*, 2024, Vol. 15, No. 3. Available at: <https://doi.org/10.3390/f15030563> (accessed 03 June 2025).
32. Meng Q., Lu H., Huai Y., Xu H., Yang S. Forest Fire Spread Simulation and Fire Extinguishing Visualization Research, *Forests*, 2023, Vol. 14, No. 7. Available at: <https://doi.org/10.3390/f14071371> (accessed 04 June 2025).
33. Shadrin D., Illarionova S., Gubanov F. et al. Wildfire spreading prediction using multimodal data and deep neural network approach, *Scientific Reports*, 2024, Vol. 14, No. 2606. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-52821-x> (accessed 25 April 2025).
34. Pang B., Cheng S., Huang Y., Jin Y., Guo Y., Prentice I.C., Harrison S.P., Arcucci R. Fire-Image-DenseNet (FIDN) for predicting wildfire burnt area using remote sensing data, *Computers & Geosciences*, 2025, Vol. 195. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2024.105783> (accessed 03 May 2025).
35. Shaddy B., Ray D., Farguell A., Calaza V., Mandel J., Haley J., Hilburn K., Mallia D.V., Kochanski A., Oberai A. Generative Algorithms for Fusion of Physics-Based Wildfire Spread Models with Satellite Data for Initializing Wildfire Forecasts, *Artificial Intelligence for the Earth Systems*, 2024, Vol. 3, No. 3. Available at: <https://doi.org/10.1175/AIES-D-23-0087.1> (accessed 08 June 2025).

36. Kale M., Meher S.S., Chavan M., Kumar V. et al. Operational Forest-Fire Spread Forecasting Using the WRF-SFIRE Model, *Remote Sensing*, 2024, Vol. 16, No. 13. Available at: <https://doi.org/10.3390/rs16132480> (accessed 07 June 2025).
37. Gill F., Valencia A., Baker G. Prescribed Burns and UAV Drone Analysis: Towards a Coupled Wind-Fire Spread Model, *Journal of Physics: Conference Series*, 2024, Vol. 2885, No. 1. Available at: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2885/1/012071> (accessed 07 June 2025).
38. Huang Y., Li J., Zheng H. Modeling of Wildfire Digital Twin: Research Progress in Detection, Simulation, and Prediction Techniques, *Fire*, 2024, Vol. 7, No. 11. Available at: <https://doi.org/10.3390/fire7110412> (accessed 07 June 2025).
39. NASA Science Editorial Team. NASA Wildfire Digital Twin Pioneers New AI Models and Streaming Data Techniques for Forecasting Fire and Smoke, *NASA Science*, 2024. Available at: <https://goo.su/41cxT> (accessed 07 June 2025).
40. Chen J., Yang Y. Measuring Fire Spread Rate with Digital Image Processing Method, In: *Computational and Experimental Simulations in Engineering*, 2023, P. 257-267. Available at: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-42987-3\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-031-42987-3_19) (accessed 04 June 2025).
41. Andrews P.L. The Rothermel Surface Fire Spread Model and Associated Developments: A Comprehensive Explanation, *Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-371*. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station; 2018. Available at: <https://doi.org/10.2737/RMRS-GTR-371> (accessed 08 June 2025).
42. Lesnye strazhi: kak sozdayutsya rossiyskie bespilotniki dlya bor'by s prirodnyimi pozharemi [Forest guards: how Russian drones are created to fight natural fires], *Nauchnaya Rossiya* [Scientific Russia], 2025. Available at: <https://goo.su/2Wejwz> (accessed 05 June 2025).

**Болдырев Николай Дмитриевич** – Волгоградский государственный технический университет; e-mail: [boldyrev.nickolay@yandex.ru](mailto:boldyrev.nickolay@yandex.ru); г. Волгоград, Россия; тел.: +79199877651; кафедра программного обеспечения автоматизированных систем; студент.

**Гилка Вадим Викторович** – Волгоградский государственный технический университет; e-mail: [gilka\\_vv@mail.ru](mailto:gilka_vv@mail.ru); г. Волгоград, Россия; тел.: +79996247154; кафедра программного обеспечения автоматизированных систем; к.т.н.; старший преподаватель.

**Кузнецова Агнесса Сергеевна** – Волгоградский государственный технический университет; e-mail: [agnessakyz@yandex.ru](mailto:agnessakyz@yandex.ru); г. Волгоград, Россия; тел.: +79275174399; кафедра программного обеспечения автоматизированных систем; старший преподаватель.

**Морозов Дмитрий Александрович** – Волгоградский государственный технический университет; e-mail: [dimka5rus@yandex.ru](mailto:dimka5rus@yandex.ru); г. Волгоград, Россия; тел.: +79823643521; кафедра программного обеспечения автоматизированных систем; студент.

**Boldyrev Nikolay Dmitrievich** – Volgograd State Technical University; e-mail: [boldyrev.nickolay@yandex.ru](mailto:boldyrev.nickolay@yandex.ru); Volgograd, Russia; tel.: +79199877651; the Department of Software for Automated Systems; student.

**Gilka Vadim Viktorovich** – Volgograd State Technical University; e-mail: [gilka\\_vv@mail.ru](mailto:gilka_vv@mail.ru); Volgograd, Russia; tel.: +79996247154; the Department of Software for Automated Systems; Candidate of Technical Sciences; Senior Lecturer.

**Kuznetsova Agnessa Sergeevna** – Volgograd State Technical University; e-mail: [agnessakyz@yandex.ru](mailto:agnessakyz@yandex.ru); Volgograd, Russia; tel.: +79275174399; the Department of Software for Automated Systems; Senior Lecturer.

**Morozov Dmitry Alexandrovich** – Volgograd State Technical University; e-mail: [dimka5rus@yandex.ru](mailto:dimka5rus@yandex.ru); Volgograd, Russia; tel.: +79823643521; the Department of Software for Automated Systems; student.