



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Экономики и управления на предприятии природопользования»

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**  
(бакалаврская работа)  
по направлению подготовки 09.03.03 Прикладная информатика  
(квалификация – бакалавр)

На тему «Инновационные технологии наблюдения за лесными пожарами в труднодоступных районах»

Исполнитель Рукинов Даниил Анатольевич

Руководитель к.г.н., доцент по кафедре информатики и прикладной математике  
Полупанов Владимир Николаевич

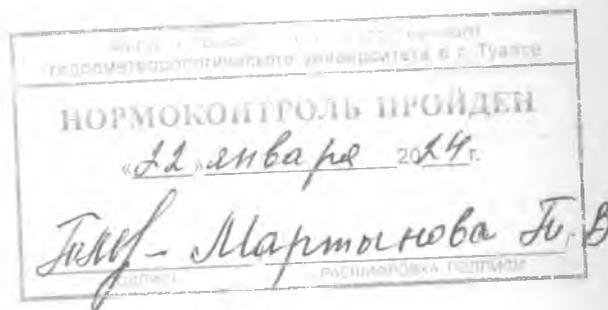
«К защите допускаю»

Руководитель кафедры 

кандидат экономических наук

Майборода Евгений Викторович

«23» января 2024 г.



Туапсе  
2024

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
1 Теоретическо-методологические основы наблюдения за лесными пожарами в труднодоступных районах.....	5
1.1 Понятие и общие положения наблюдения за лесными пожарами .....	5
1.2 Зарубежный опыт наблюдения за лесными пожарами в труднодоступных районах .....	21
2 Наблюдение за лесными пожарами в труднодоступных районах (на примере Челябинской области).....	38
2.1 Исследование беспилотных летательных аппаратов на практике ФПС Центра управления силами федеральной противопожарной службы по Челябинской области.....	38
2.2 Расчет критериев опасностей при применении беспилотных летательных аппаратов .....	42
2.3 Осуществляемые организационно-технические решения наблюдения за лесными пожарами.....	46
3 Внедрение инновационных технологий наблюдения за лесными пожарами в труднодоступных районах.....	50
3.1 Применение беспилотных летательных аппаратов в специализированной пожарно-спасательной части для обеспечения мониторинга пожарной опасности .....	50
3.2 Технико-экономическое обоснование предложенных решений.....	55
Заключение .....	59
Список литературы .....	62

## Введение

В настоящее время проблемы, связанные с технологическим и экологическим развитием, становятся все более сложными. Среди экологически значимых проблем лесные пожары представляют собой серьезную угрозу глобальной экосистеме. Ущерб, нанесенный лесам, многообразен и приводит не только к разрушению наземных экосистем, но и к изменению климата. Следовательно, снижение их воздействия как на людей, так и на природу требует принятия эффективных подходов к предотвращению, раннему предупреждению и хорошо скоординированным вмешательствам. В настоящей выпускной работе представлен анализ эволюции различных технологий, используемых при обнаружении, мониторинге и предотвращении лесных пожаров, с прошлых лет до настоящего времени. В нем подчеркиваются сильные стороны, ограничения и будущие разработки в этой области. Лесные пожары стали серьезной экологической проблемой из-за их разрушительного воздействия на экосистемы и потенциальных последствий для климата.

Актуальность темы заключается в том, что исследования эволюции технологий в решении проблемы наблюдения за лесными пожарами в труднодоступных районах имеет важное значение для разработки более эффективных стратегий смягчения и предотвращения лесных пожаров.

Объектом исследования являются общественные отношения в сфере наблюдения за лесными пожарами в труднодоступных районах.

Предмет исследования – это инновационные технологии наблюдения за лесными пожарами в труднодоступных районах.

Целью исследования является определение основных особенностей инновационных технологий наблюдения за лесными пожарами в труднодоступных районах.

Для достижения обозначенной цели были поставлены следующие задачи исследования:

- Определить понятие и общие положения наблюдения за лесными

пожарами;

- Рассмотреть зарубежный опыт наблюдения за лесными пожарами в труднодоступных районах;

- Исследовать применение беспилотных летательных аппаратов на практике ФПС Центра управления силами федеральной противопожарной службы по Челябинской области;

- Провести расчет критериев опасностей при применении беспилотных летательных аппаратов;

- Изучить осуществляемые организационно-технические решения наблюдения за лесными пожарами;

- Рассмотреть применение беспилотных летательных аппаратов в специализированной пожарно-спасательной части для обеспечения мониторинга пожарной опасности;

- Провести технико-экономическое обоснование предложенных решений.

В процессе исследования были применены следующие общенаучные и специальные методы исследования:

- метод системного анализа;

- сравнительный метод;

- структурно-системный метод исследования.

Работа, в соответствии с выделенными задачами исследования, структурно состоит из трех глав, введения, заключения и библиографического списка.

# 1 Теоретическо-методологические основы наблюдения за лесными пожарами в труднодоступных районах

## 1.1 Понятие и общие положения наблюдения за лесными пожарами

Уничтожение мировых лесов стремительно ускоряется как из-за интенсивной вырубki, так и из-за пожаров. По сравнению с началом века площадь лесов сократилась вдвое. Другие факторы включают повышение температуры и засуху, которые, в свою очередь, вызваны изменением климата. Только в 2021 году, как отмечает Крылова А.А., было потеряно 9 миллионов гектаров — площадь размером с Португалию (Европа). Из них 7,8 миллиона потеряли Россия, Канада и США. В Италии (Европа-Средиземноморский регион) за предыдущие 14 лет сгорело 723 924 га, а только в 2021 году пламя уничтожило 159 437 га лесных массивов, что является пограничным состоянием для мира, который год за годом эксплуатируется все более интенсивно [35, с. 57-58].

Различают три основных вида лесных пожаров: низовые (95-97% от общего количества), верховые (1-5%) и почвенные (примерно 1%) [11].

Низовой лесной пожар распространяется по нижним ярусам растительности, лесной подстилке, опаду. Основным горючим материалом является травяной покров, подрост и подлесок.

Верховой лесной пожар охватывает полог леса. Этот пожар возникает из низового как дальнейшая стадия его развития, причём низовой огонь является составной частью верхового пожара.

Почвенный лесной пожар — при котором беспламенное горение распространяется в органической части почвы лесного биогеоценоза. Древостой полностью погибает вследствие обнажения и обгорания корней деревьев.

По принятой в России системе оперативной информации о лесных пожарах для регионов Севера, Сибири и Дальнего Востока крупными считаются пожары, площадь которых превысила 200 га, а для остальных

регионов – 25 га [11].

Отдельные авторы разных областей науки дают определение понятия «труднодоступная местность». Так, А.А. Власов дает юридическое определение труднодоступной местности полагает, что к числу труднодоступных относится «район, который в силу погодно-климатических условий, техногенных обстоятельств и (или) отсутствия элементов инфраструктуры оказывается исключенным на длительные периоды от транспортных путей» [31, с. 128].

По мнению А.Ф. Абдулвалиева, «труднодоступная местность - это местность, удаленная от населенных пунктов и представляющая в силу социально - экономических, географических и климатических условий особую сложность для проведения следственных и судебных действий» [28, с. 141].

Мы полагаем, что понятие «труднодоступная местность» можно сформулировать следующим образом: труднодоступная местность - район, который вследствие географических, погодных или инфраструктурных условий в течение семи и более дней подряд в течение года является недоступным для регулярного транспортного и иного сообщения и по этим причинам наблюдения за лесными пожарами и их тушения в этом районе связано с большими дополнительными затратами времени и средств.

Лесные пожары представляют собой серьезную и многогранную угрозу для лесов и наземных экосистем, требующую немедленного внимания и превентивных мер. Эти пожары имеют серьезные экологические, экономические и социальные последствия, приводя к значительному ущербу лесным массивам и за их пределами.

Как отмечают Зайцев А.Б., Назарчук И.Д, причины лесных пожаров включают как природные, так и антропогенные факторы. Естественные причины включают удары молний, вулканическую активность и самовозгорание. Антропогенные причины включают неконтролируемые методы ведения сельского хозяйства, изменения в землепользовании, поджоги и халатность. Кроме того, изменение климата способствует эскалации пожарной обстановки, усиливая возникновение и тяжесть лесных пожаров [32,

с. 123-125].

С экологической точки зрения лесные пожары имеют серьезные последствия. Они приводят к потере биоразнообразия, разрушая среду обитания и ставя под угрозу виды растений и животных. Деграция почв является еще одним значительным воздействием, приводящим к эрозии, потере питательных веществ и снижению плодородия. Кроме того, лесные пожары нарушают важнейшие экологические процессы, такие как круговорот питательных веществ, и меняют закономерности сукцессии и регенерации. Эти пожары также повышают уязвимость экосистем к инвазивным видам [35, с. 57-58].

Воздействие лесных пожаров распространяется на наземные экосистемы. Вырубка лесов и потеря среды обитания — это непоправимый ущерб, причиненный пожарами, который имеет серьезные последствия для целостности экосистем. Лесные пожары приводят к выбросам значительного количества углерода, усугубляя изменение климата и глобальное потепление [34, с.167-169]. Водные ресурсы и гидрологические циклы также страдают, что приводит к проблемам с качеством воды, снижению ее доступности и нарушениям функций водосбора. В социально-экономическом отношении лесные пожары приводят к потере средств к существованию, перемещению населения и значительному экономическому бремени для пострадавших регионов.

Для эффективного устранения этой угрозы необходимы комплексные стратегии управления пожарами. Системы раннего обнаружения и быстрого реагирования играют решающую роль в мониторинге и наблюдении, обеспечивая своевременные действия [40].

Дистанционное зондирование играет важную роль в обнаружении и мониторинге лесных пожаров. Он предполагает использование спутниковых изображений, аэрофотосъемки других технологий для сбора данных о пожарах, шлейфах дыма и горящих территориях. Дистанционное зондирование позволяет выявлять и отслеживать лесные пожары на больших географических

территориях, предоставляя ценную информацию для принятия решений и распределения ресурсов.

Анализ данных является жизненно важным компонентом обнаружения и мониторинга лесных пожаров. Он включает в себя обработку и интерпретацию данных, собранных из различных источников, таких как спутниковые снимки, метеостанции и наземные датчики [31, с.104]. Методы анализа данных, включая обработку изображений, статистический анализ и машинное обучение, помогают идентифицировать признаки пожара, обнаруживать аномалии и предоставлять своевременную информацию для управления пожаром [37, с.60-64].

Теоретические основы обнаружения и мониторинга лесных пожаров включают понимание поведения пожаров, использование технологий дистанционного зондирования, методов анализа данных и разработку моделей для прогнозирования и мониторинга лесных пожаров. Интегрируя эти теоретические основы, исследователи и практики могут повысить эффективность систем обнаружения и мониторинга лесных пожаров, что приведет к более эффективному управлению пожарами и усилиям по смягчению их последствий.

Беспрепятственно интегрируя передовые системы информационно-коммуникационных технологий (ИКТ) в окружающую среду до такой степени, что эти высокотехнологичные системы становятся ее неотъемлемой частью, мы можем улучшить среду с помощью дополнительных функций. Эти функции в первую очередь включают в себя возможности самоконтроля и самозащиты, предоставляющие окружающей среде базовый уровень интеллекта. Этот интеллект позволяет окружающей среде действовать не только реактивно, но и упреждающе, отдавая приоритет самозащите.

Следовательно, среда превращается в интеллектуальную среду или, точнее, в интеллектуальную среду самоконтроля, самозащиты и самосознания. Он оперативно реагирует на изменения и предупреждает ответственных лиц в режиме реального времени, позволяя им принять соответствующие меры для

предотвращения дальнейшей деградации. Обсуждаемый подход основан на идеях формального наблюдателя, предложенных в 1987 г. Беннетом и др. [40]. Они представили подход к изучению восприятия, который пытался быть одновременно строгим и общим. Математическая модель применялась в нескольких сценариях в составе систем обнаружения лесных пожаров и интеллектуальных систем мониторинга лесных пожаров.

Однако необходимо решить несколько проблем. Последствия изменения климата и связанная с этим эскалация рисков пожаров требуют принятия адаптивных стратегий. Баланс между природоохранными целями и социально-экономическими потребностями требует тщательного рассмотрения и комплексных подходов. Объединение традиционных экологических знаний и местных методов управления пожарами может дать ценную информацию и способствовать разработке более эффективных стратегий. Достижения в области технологий, такие как системы раннего предупреждения и инновационные методы пожаротушения, открывают многообещающие пути для совершенствования. Укрепление международного сотрудничества и обмена информацией имеет жизненно важное значение для устранения глобального характера этой угрозы.

Более того, значительная угроза лесных пожаров лесам и наземным экосистемам требует немедленных действий. Принимая упреждающие меры, в том числе методы устойчивого лесопользования, эффективные стратегии предотвращения пожаров и продуманную политику, мы можем смягчить разрушительные последствия лесных пожаров. Невозможно переоценить необходимость глобального сотрудничества и согласованных усилий по защите наших драгоценных лесов и земельных экосистем от этой широко распространенной угрозы.

Таким образом, профилактика играет решающую роль в минимизации возникновения и серьезности лесных пожаров, предлагая упреждающий и устойчивый подход. Это не только спасает жизни, ресурсы и экосистемы, но также защищает благополучие и средства к существованию подверженных

пожарам сообществ. Управление топливом для предотвращения лесных пожаров в Южной Европе часто является экономически неустойчивым. Инновационные инициативы привлекают как государственные, так и частные ресурсы для повышения ценности продуктов и услуг по управлению топливом. Они использовали пространственный кластерный анализ для выявления однородных регионов и использовали регрессионные модели, чтобы понять вклад различных элементов в обширное распространение пожара. В результате исследования выявлена пространственная изменчивость влияния структурных факторов на распространение пожара. А.В. Смоляков, О.Е. Федорович [38, с. 39-42] проанализировали распространение пожаров в лесных районах зарубежных стран с 1976 по 2016 год. Промышленные лесохозяйственные операции в Онтарио, Канада, ограничены, чтобы снизить риск лесных пожаров в соответствии с Модифицированным протоколом промышленных операций (МПОР). Они обнаружили повторяющиеся улучшения в реагировании на рост пожара с течением времени, что указывает на эффективность МПОР в снижении негативных последствий. МПОР обеспечивает эксплуатационную гибкость, одновременно продвигая безопасные методы ведения промышленного лесного хозяйства с целью минимизировать негативное воздействие пожаров, вызванных промышленной деятельностью. Проект включает запланированные полевые эксперименты для сбора знаний о поведении пожаров и их влиянии на почву, деревья и биоразнообразие растений. Эти экспериментальные пожары также предоставляют возможности обучения пожарным, землепользователям и исследователям. Другие интересные темы, такие как изучение использования огня, разрешения на пожар и методы безопасного сжигания, особенно среди сельских жителей лесного района. Соответствующее исследование показало, что, хотя большинство респондентов использовали огонь на своей собственности и знали о местном риске пожара, вклад использования сельскохозяйственного огня в возникновение лесных пожаров был ограничен.

Для мониторинга, обнаружения и предотвращения лесных пожаров

используется ряд методологий, систем и датчиков для повышения качества раннего обнаружения, реагирования и управления лесными пожарами. Методы дистанционного зондирования, такие как спутники и воздушные платформы, предоставляют данные в режиме реального времени о горячих точках, шлейфах дыма и горящих территориях. Географические информационные системы (ГИС) объединяют пространственные данные для картирования рисков и распределения ресурсов. Системы мониторинга погоды и модели прогнозирования помогают в прогнозировании пожарной погоды и системах раннего предупреждения. Системы обнаружения пожара, в том числе наземные и спутниковые датчики, идентифицируют тепловые признаки, дым и пламя для быстрого реагирования.

Практика контролируемого сжигания и обращения с топливом снижает риск пожара. Программы взаимодействия с общественностью и информирования общественности способствуют распространению практики пожарной безопасности и раннему оповещению об опасностях пожара. Внедряя эти подходы, усилия по мониторингу, обнаружению и предотвращению лесных пожаров могут быть более эффективными, уменьшая воздействие лесных пожаров на экосистемы и сообщества.

Научные исследования делают многочисленные шаги, чтобы попытаться как минимум противостоять этим тенденциям, предлагая различные альтернативы, которые с начала 2000-х годов по настоящее время представляют собой различные изменения и инновации. Фактически, сегодня предпринимаются попытки, например, с использованием передовых инструментов анализа изображений, за счет использования методов искусственного интеллекта, применяемых к основе каждого кадра видео, которые позволяют извлекать каждую деталь.

Эти технологические достижения позволяют своевременно обнаруживать вспышки пожаров, совершенствовать системы раннего предупреждения и принимать упреждающие меры. Однако важно признать ограничения этих технологий, такие как необходимость постоянного мониторинга,

потенциальные ложные тревоги и проблемы, связанные с их внедрением в различных географических контекстах.

В настоящее время все большее внимание уделяется разработке доступного метода раннего обнаружения пожара в режиме реального времени с использованием беспроводных сенсорных сетей (английская аббревиатура WSN). WSN состоит из нескольких узлов, каждый из которых имеет несколько функций. Разнообразие WSN зависит от топологии их сети, подходов к связи, типов датчиков и методов обработки данных. Благодаря использованию датчиков различных типов беспроводные узлы имеют возможность определять ряд физических параметров, включая температуру, давление и влажность, а также химические параметры, такие как окись углерода, диоксид углерода и диоксид азота. Принятие этого подхода позволяет быстрее обнаруживать пожар по сравнению с традиционными методами, такими как спутниковые снимки, которые требуют более длительной регистрации и обработки. Сенсорные сети предлагают дополнительное преимущество по сравнению со спутниковыми изображениями, поскольку последние могут сталкиваться с ограничениями точности в определенных условиях (например, пасмурная погода), а также с увеличенными интервалами сканирования и более низким разрешением на некоторых спутниках.

Расширенные возможности обнаружения позволяют своевременно вмешаться, прежде чем пожар выйдет из-под контроля. Благодаря интеграции методологий беспроводных сенсорных сетей, машинного обучения и искусственного интеллекта (ИИ) становится возможным предвидеть потенциальные схемы пожара, например, используя данные датчиков, такие как направление ветра, что позволяет проводить прогнозный анализ. Обеспечение энергетической автономности устройств представляет собой серьезную проблему для таких сетей, особенно при стратегическом расположении беспроводных узлов в лесных регионах. Помимо борьбы с ограниченными энергетическими ресурсами, сенсорные сети уязвимы к неблагоприятным условиям окружающей среды, что требует тщательного рассмотрения и

эффективных стратегий смягчения последствий.

Сеть принимает измеренные данные в качестве входных данных и выдает «индекс погоды», который измеряет вероятность пожара, вызванного погодой. В некоторых чрезвычайных ситуациях узлы могут обнаружить дым или аномальную температуру, а затем отправить сигнал тревоги определенного типа менеджеру узла. Измеренными данными являются относительная влажность, температура, задымленность и скорость ветра. Это определяет уровень пожароопасности леса. Они предлагают сеть, состоящую из большого количества небольших и экономичных узлов, с преимуществом быстрого получения информации и точных прогнозов. Эти узлы распределены по всей зоне мониторинга. Целью этой сети является сбор динамической информации в реальном времени, такой как температура, влажность и атмосферное давление. Собранные данные передаются маршрутизаторам внутри сети, которые затем создают локальную базу данных и отправляют информацию через Интернет. В рамках WSN существует два типа узлов: координационные (COORD) и узлы делегированных функций (RFD). Протокол ZigBee используется для беспроводной связи, позволяя передавать данные, а также переходить в спящее состояние, что значительно снижает потребление энергии.

Важно отметить, что точная геолокация играет жизненно важную роль в этой настройке. Авторы подчеркивают важность точного позиционирования, поскольку оно обеспечивает надежные измерения и облегчает принятие обоснованных решений. Они предлагают алгоритмы локализации, такие как индикатор мощности принятого сигнала (RSSI), время прибытия (ToA), угол прибытия (AoA) и разница во времени прибытия (TDoA), для достижения точного геолокации. Исследования представляют убедительные идеи относительно архитектуры беспроводных сенсорных сетей (WSN), включая схемы развертывания датчиков, кластеризацию и протоколы связи. Основная цель авторов — обнаружить потенциальные угрозы пожара на как можно более ранней стадии, принимая во внимание энергопотребление сенсорных узлов и влияние условий окружающей среды на надежность сети. В своей статье они

разрабатывают заслуживающий внимания симулятор для проверки и оценки предлагаемой сетевой архитектуры.

С помощью моделирования авторы успешно демонстрируют достижение нескольких целей, а именно: энергоэффективность, раннее обнаружение и точная локализация угроз пожара, возможности прогнозирования и адаптация к суровым условиям. Кроме того, авторы предлагают ценную информацию об организации сенсорных узлов, подчеркивая ее влияние на конструкцию и производительность системы. Они предполагают, что следует уделять пристальное внимание таким факторам, как среднее расстояние между узлами датчиков и моделью распределения, чтобы обеспечить эффективную связь между ними. Например, выбор компоновки, например квадратной или шестиугольной, влияет на количество узлов датчиков в кластере. Квадратная компоновка с меньшим количеством узлов в кластере эффективно управляет перегрузками и повышает надежность системы.

Такая конструкция обеспечивает преимущество масштабируемости системы. Одним из примечательных нововведений, которые они представляют, является использование беспроводных IP-камер в сочетании с мультисенсорными системами, соединенными между собой посредством стандарта IEEE 802.11 g. Используя этот подход, они могут обнаружить наличие огня. Первоначально различные датчики вызывают тревогу, а затем в соответствующей зоне активируются IP-камеры для проверки факта фактического возгорания. Этот метод помогает исключить ложные срабатывания.

Благодаря этому методу они также могут обнаружить подземные пожары и понять, как огонь влияет на напочвенный покров, стволы и верхушки деревьев. Благодаря низкому энергопотреблению прототип узла позволяет измерять внутреннюю и внешнюю температуру, относительную влажность, барометрическое давление и интенсивность света. Использование алгоритмов представляет собой еще один путь улучшения WSN. Авторы подчеркивают важность включения возможностей интеллектуального принятия решений

(IDM) в сетевую архитектуру. Используя IDM и predetermined уровни чувствительности, они успешно активируют необходимые действия и эффективно снижают потребление энергии. WSN собирает данные для использования в качестве необработанных входных данных, которые передаются в систему управления. Алгоритм нечеткой логики разрабатывается с использованием таких параметров, как температура, дым, освещенность, влажность и расстояние [36, с.645-647].

Этот подход сопровождается подходящей логистической инфраструктурой, симуляционным обучением и передовыми технологиями тушения. Для предотвращения ложных тревог для мониторинга потенциальных пожаров используется дистанционно управляемый беспилотный летательный аппарат (БПЛА), оснащенный датчиками газа и тепловизионной камерой. Для повышения эффективности мониторинга на дирижабле установлено различное оборудование, в том числе микроволновый радиометр (для обнаружения горячих точек), датчики газа и дыма, тепловизионная камера. После тушения пожара беспилотный дирижабль действует как противопожарная защита, сводя к минимуму риск повторного возгорания

В сети наблюдения каждое устройство Интернета вещей устанавливает связь через подключение к Интернету 4G. Различные типы датчиков служат устройствами мониторинга, измеряя такие переменные, как температура, атмосферное давление, влажность и наличие загрязняющих веществ, таких как CO и CO<sub>2</sub>. Один конкретный подход предполагает использование животных, оснащенных датчиками, известными как мобильные биологические датчики (MBS). Эти датчики, в том числе тепловые и радиационные датчики с функцией GPS, прикрепляются к животным. Они передают местоположение MBS, позволяя центральной компьютерной системе классифицировать поведение животных.

Основное свойство системы радиоакустического зондирования (РСЗ) связано с большой чувствительностью к изменениям температуры и возможностью дистанционного управления изменениями температуры воздуха

лучше, чем любой другой геодезический прибор в научных исследованиях. Кроме того, он способен непрерывно отслеживать интервалы в одновременных кратных интервалах с пространственным и временным разрешением более точно, эффективнее и экономичнее, чем любое другое решение, предлагаемое сетью статических датчиков. Объемный акустический сканер (ВАС) — это инструмент, который позволяет обнаруживать объект по звуковым волнам. В случае лесных пожаров авторы А.В. Смоляков, О.Е. Федорович [38, с.39-42] анализируют систему, которая позволяет обнаруживать шум, излучаемый пожаром, анализируемый в диапазоне частот от 200 до 500 Гц. Чтобы иметь возможность обнаружить и определить местонахождение огня, он использует несколько микрофонов, которые посредством процесса формирования луча могут выводить местоположение источника через сумму различных сигналов, улавливаемых серией микрофонов, использованных при тестировании. Эти сигналы, чтобы убедиться в эффективном сдерживании огня, обрабатываются нейронной сетью, чтобы обеспечить более высокую точность.

Среди других методов дистанционного зондирования возможным решением является метод обнаружения и определения дальности света (LiDAR), позволяющий построить карту для анализа интересующей лесной территории с упором на оценку объема деревьев, характеристику среды обитания и лесные пожары. оценка. В частности, LiDAR посредством лазерного импульса может определить расстояние до объекта или поверхности. Таким образом, его можно использовать для создания возможных сценариев пожара на основе карты интересующей лесной зоны.

Другой альтернативой может быть сеть датчиков, подключенных к оптоволоконному кабелю. Волоконно-оптическая сенсорная сеть (FOSN) представляет собой улучшение по сравнению с традиционными сенсорными сетями в том смысле, что ее можно использовать точно так же, как традиционную сенсорную сеть, но с преимуществами, связанными с оптоволоконном: небольшими электромагнитными помехами и большей эффективностью с точки зрения распространения сигнала. Широкая полоса

пропускания и низкие потери при передаче имеют столь же важное значение, как и покрытие большой географической территории и большая сложность перехвата данных во время передачи по сравнению с распространением радиосигнала по металлическим кабелям. Оптоволоконные соединения позволяют устанавливать датчики внутри контролируемых конструкций без локального электропитания за пределами оконечных узлов, что снижает риск возникновения искр в легковоспламеняющихся средах.

Обнаружение пожаров на видео с использованием как видимого, так и (ИК) спектра — это мощный подход, расширяющий возможности систем обнаружения пожара. Анализируя видеозаписи, снятые в обоих спектрах, передовые алгоритмы компьютерного зрения могут эффективно идентифицировать и предупреждать власти о наличии пожаров в режиме реального времени. Видеообнаружение пожара с использованием видимого и ИК-спектра использует различные характеристики пламени, дыма и тепла, излучаемого пожаром. Видимый спектр улавливает визуальные сигналы пламени и дыма, а ИК-спектр обнаруживает тепловые сигнатуры и температурные аномалии, связанные с пожаром.

На протяжении многих лет проводились обширные исследования по обнаружению огня и дыма на видеозаписях в визуальном спектральном диапазоне. Этот подход использовал спектральные, пространственные и временные свойства огня для достижения точных результатов. Алгоритм можно разделить на четыре основных компонента. Первоначально алгоритм делит изображение на сетку для эффективного анализа. Затем он определяет прямоугольники внутри сетки, которые могут представлять собой пожары. Впоследствии алгоритм маркирует связанные компоненты пожара и, наконец, интерпретирует помеченные компоненты.

В 1996 году в США представили систему видеообнаружения пожара для самолетов, которая опиралась на такие статистические характеристики, как медиана, стандартное отклонение и импульс первого порядка, полученные с помощью анализа гистограмм. Кроме того, система использовала вычитание

двух последовательных кадров изображения для извлечения соответствующих функций [39]. После этой новаторской работы другие исследования начали использовать статистический подход для предлагаемых ими систем обнаружения пожара. Метод заключался в использовании цветовой гистограммы, сглаженной по Гауссу, для обнаружения пикселей огненного цвета. Опираясь на эту статистическую основу, реализовали алгоритм обнаружения и отслеживания пожара, основанный на медианной фильтрации. Аналогично, для инфракрасных изображений использовался аналогичный подход с использованием медианной фильтрации.

Нейронные сети нашли широкое применение в видеообнаружении пожаров. Такой подход позволит за короткие промежутки времени определить наличие или отсутствие пожара. Они подходят к процессу обнаружения как к задаче контролируемой байесовской классификации, включающей пространственно-временные окрестности пикселей.

Обнаружение дыма является не менее важным аспектом наряду с обнаружением пожара, поэтому требует краткого обзора. Основной целью является уменьшение количества ложных срабатываний, и их подход основывался на накопительной модели движения, в которой использовались интегральные изображения. Процесс включал интеграцию изображений, оценку ориентации и ускорения движения с использованием векторов скорости и, наконец, использование накопления движения для оценки ориентации дыма. В системе обнаружения дыма использовались два критерия принятия решений для определения пикселей дыма, основанные на цветности и характеристиках диффузии дыма. Обнаружение дыма также осуществляется путем моделирования дыма с использованием метода смеси гауссиан, который анализирует изменение энергии в вейвлет-области. Используя этот подход, система учитывает изменения энергии изображения, вызванные внешними факторами, такими как изменения яркости или присутствие дыма.

ИК (инфракрасные) камеры обладают уникальной способностью улавливать тепловое излучение, излучаемое объектами или группами объектов

в окружающей среде. Эта характеристика делает их одинаково ценными и эффективными как в дневное, так и в ночное время, поскольку они могут обнаруживать и идентифицировать термальные источники особой значимости. Эта возможность позволяет собирать данные в широком диапазоне разрешений, учитывая различные сценарии обнаружения пожара.

Такой подход позволяет отличить зоны возгорания, характеризующиеся большей концентрацией ярких пикселей, от движущихся объектов (которые также имеют высокую долю светящихся пикселей), например животных. Аналогичная структура может быть включена в систему анализа спутниковых изображений, что позволит сравнивать результаты для подтверждения наличия лесного пожара.

На первом этапе анализируются различные атрибуты каждого пикселя в заданной последовательности изображений, включая поля яркости и движения. Эти атрибуты извлекаются для определения диапазона яркости и скорости. На втором этапе, известном как сегментация, выделяется кластер пикселей со схожими характеристиками, что позволяет классифицировать объект как пожарный или нет. Использование ИК-камер представляет собой выгодное решение для обнаружения и локализации пожара. Преимущества этого метода связаны с его способностью идентифицировать ярко светящиеся пиксели на темном фоне, что позволяет различать огонь и другие объекты, такие как животные, с помощью подходящих алгоритмов. Однако существуют определенные недостатки, связанные с этим подходом. Одним из основных ограничений является неспособность обнаруживать и классифицировать облака. Следовательно, становится сложно отличить облако с плотной концентрацией дыма, указывающее на пожар, от типичного гидрометеора.

В течение нескольких лет анализ спутниковых изображений был широко используемым методом, обеспечивающим всесторонний обзор областей, представляющих интерес для обнаружения потенциальных пожаров. Важно отметить, что не все спутники специально предназначены для наблюдения за Землей и мониторинга окружающей среды.

Спутники можно классифицировать в зависимости от их орбиты. Одна категория — это GEO (геостационарная орбита), расположенная на высоте 35 786 км и характеризующаяся нулевым наклоном. Эта орбита позволяет спутнику оставаться относительно неподвижным по отношению к поверхности Земли, обеспечивая постоянный обзор одной и той же территории. Хотя спутники GEO обеспечивают высокое временное разрешение, их пространственное разрешение относительно низкое.

Другая категория — LEO (низкая околоземная орбита), вращающаяся на высоте около 2000 км, и MEO (средняя околоземная орбита), вращающаяся на высоте до 11 000 км. По сравнению со спутниками GEO, спутники LEO и MEO обеспечивают более высокое временное разрешение, но более низкое пространственное разрешение [20]. Из-за значительного времени орбитального путешествия ГСО не особенно подходят для мониторинга пожаров в реальном времени. Однако их можно использовать ретроспективно для оценки площади выгоревших территорий, что делает их ценными для анализа после пожара, а не для исследований по обнаружению и предотвращению пожара.

В случае солнечно-синхронных спутников (т.е. LEO и MEO) были проведены обширные исследования по анализу получаемых ими изображений. Среди используемых мультиспектральных датчиков изображения основное внимание уделяется AVHRR (усовершенствованному радиометру очень высокого разрешения). AVHRR предлагает шесть каналов, включая три тепловых инфракрасных канала, с пространственным разрешением 1 км. Эти изображения измеряют отражательную способность Земли и обычно используются для глобального мониторинга облачного покрова. Используя нейронную сеть и анализируя спутниковые изображения NOAA-14, исследование различает дым от пожаров как от облаков, так и от поверхности Земли на основе свойств отражательной способности. Этот подход проливает свет на оценку плотности облаков для точного обнаружения пожара.

Итак, можно сделать вывод, что меры по предотвращению пожаров, включая контролируемые поджоги, управление топливом и кампании по

информированию общественности, имеют решающее значение для снижения рисков пожара. Методы пожаротушения предполагают использование противопожарных средств и инфраструктуры для сдерживания и тушения пожаров. Активное участие сообщества и наращивание потенциала повышают уровень пожарной безопасности и устойчивость сообщества. Международное сотрудничество и обмен знаниями облегчают совместные подходы к управлению пожарами, используя общий опыт и ресурсы. Теоретическая основа обнаружения и мониторинга лесных пожаров включает в себя множество научных дисциплин и принципов. Ключевые элементы включают поведение и распространение пожара, дистанционное зондирование, анализ данных и моделирование.

## 1.2 Зарубежный опыт наблюдения за лесными пожарами в труднодоступных районах

Автоматическое обнаружение лесных пожаров представляет собой серьезную проблему из-за сложности разработки детерминированного алгоритма, который может точно определить возникновение лесного пожара на основе заданного набора признаков. Однако машинное обучение (МО) оказывается очень ценным в таких сценариях, поскольку позволяет использовать мощные модели для извлечения информации и получения ценной информации непосредственно из данных. Эта архитектура рассматривает датчики как входной уровень нейронной сети, тогда как скрытый уровень, целью которого является агрегирование данных для расчета индексов погоды, реализуется через узлы заголовка кластера, по одному для каждого кластера сенсорной сети. Выходной уровень сети реализован с помощью узла менеджера, который, анализируя показатели погоды, полученные от узлов кластера, способен обнаруживать аномалии в данных и отправлять оповещения при возникновении лесного пожара. Коэффициенты опасности лесных пожаров могут дать ценную информацию для принятия превентивных мер, поскольку

они позволяют выявить зоны повышенного риска, склонные к возгоранию.

Такой всесторонний выбор переменных гарантирует, что в процессе обучения модели будут учтены различные важные аспекты окружающей среды. Нейронная сеть, используемая для обработки этих переменных, состоит из входного слоя из 16 нейронов, скрытого слоя из 28 нейронов, оптимальное количество нейронов которого было получено посредством трехкратной перекрестной проверки, и конечного выходного слоя, реализующего логистическую функцию, значение которой находится в диапазоне от нуля до один. Согласно этой модели, области пикселей с выходным значением, близким к 1, указывают на более высокую вероятность лесных пожаров. Эффективно обучая нейронную сеть, становится возможным создавать точные тепловые карты, выделяющие области большей уязвимости.

Исследования показывают, что относительная важность этих особенностей варьируется в зависимости от различных условий окружающей среды. Исследование дает ценную информацию о предотвращении лесных пожаров, внося значительную ценность в понимание ключевых факторов, способствующих возникновению лесных пожаров [35, с. 57-58, 36, с.645-647]. В заключение использовали данные об окружающей среде для разработки методологии, которая использует традиционную нейронную сеть прямого распространения для моделирования продвижения фронта пожара. Они провели сравнение с моделью физической скорости пожара, интегрированной со структурой клеточного автомата, и получили более точные результаты с точки зрения оценки распространения огня. Однако существуют определенные ограничения на использование данных об окружающей среде непосредственно для обучения моделей машинного обучения (МО).

Во-первых, хотя использование в моделях исторических данных, полученных из внешних архивов, может облегчить построение точных моделей прогнозирования, оно может не обеспечить активное обнаружение лесного пожара в его начале. С другой стороны, использование модели обнаружения лесных пожаров в реальном времени требует сбора данных в реальном времени

от удаленных датчиков, что накладывает значительные ограничения и требования на систему для обеспечения ее эффективности. Для эффективного обнаружения лесных пожаров в интересующих районах необходимо широко использовать датчики с высокой концентрацией, чтобы быстро обнаружить начало лесных пожаров. Кроме того, модели МО должны эффективно обрабатывать данные с датчиков и обеспечивать своевременную обратную связь для оповещения властей. Осознавая эти проблемы, некоторые исследователи начали изучать альтернативные решения для обнаружения лесных пожаров. Одно из таких решений, основанное на компьютерном зрении, будет обсуждаться в следующем разделе.

А.В. Смоляков, Б.О. Курзаков [37, с.60-64] предложили одноклассовую модель обнаружения пожара, ориентированную на высокую точность и обнаружение в режиме реального времени. Их подход напрямую создает обучающие выборки с использованием пикселей огня, без сложного преобразования функций, и включает стратегию пакетного принятия решений для повышения скорости обнаружения. С другой стороны, что касается предотвращения лесных пожаров, в некоторых странах использовали модель аддитивных объяснений Шепли (SHAP) для интерпретации результатов модели глубокого обучения (DL) для прогнозирования восприимчивости к лесным пожарам. Их исследование включало различные способствующие факторы и использовало графики SHAP для выявления влиятельных параметров, оценки их относительной важности и предоставления информации о процессе принятия решений.

Исследование продемонстрировало эффективность и статистическую надежность системы при анализе возникновения лесных пожаров, подчеркнув климат в качестве основной движущей силы. Кроме того, модель эффективно определила области, в которых другие факторы сыграли значительную роль. Целью исследования было внести вклад в научную литературу о применении ИИ для понимания стохастических стихийных бедствий, таких как лесные пожары.

В результате анализа пространственно-временные свойства и топографические характеристики являются важными признаками при определении классификации пожаров неизвестной причины в регионе.

Традиционные методы включают классические алгоритмы, такие как деревья решений и машины опорных векторов (английская аббревиатура SVM), тогда как методы глубокого обучения представляют собой преобладающие модели, включающие различные типы искусственных нейронных сетей. Модели глубокого обучения обладают способностью автоматически выбирать функции, что приводит к получению высокопроизводительных результатов. Однако они требуют значительных вычислительных мощностей и высококачественных наборов данных для эффективного обучения и развертывания в реальных сценариях. Иллюстрацию моделей глубокого обучения при обнаружении пожара можно найти в недавней работе В.С. Вавина [30, с. 58-60]. Они разработали систему глубокого обучения под названием Fire-Net, обучив ее спутниковым изображениям, сделанным Landsat-8 в различных регионах, таких как леса Австралии и Северной Америки, тропические леса Амазонки, Центральная Африка и Чернобыль (Украина). Кроме того, С.А. Денисов, А.А. Домрачев, А.С. Елсуков [31, с. 123] использовали модифицированную версию платформы Detectron2 от Meta AI для достижения высокоточного обнаружения пожара. Авторы сосредоточились на усовершенствовании зарубежной модели специально для задач обнаружения пожара. Литература изобилует предложениями по системам, использующим методы глубокого обучения, и эта тенденция, похоже, растет.

В исследованиях Р.М. Кагармановой, Г.А. Полунина [33, с.215-217, 34, с.167-169] была изучена и подтверждена возможность использования технологий искусственного интеллекта непосредственно на борту спутников для обнаружения пожара практически в реальном времени. Исследование продемонстрировало успешное использование комбинации специализированного оборудования, новейших парадигм искусственного интеллекта и гиперспектральных изображений. В документе представлена

одномерная сверточная нейронная сеть (английская аббревиатура CNN), специально разработанная для встроенной реализации, и в исследовании обсуждаются различные предлагаемые конструкции аппаратного обеспечения. Для реализации модели авторы рассмотрели три аппаратных ускорителя: Intel Movidius NCS-2, Nvidia Jetson Nano и Nvidia Jetson TX2.

Благодаря использованию специального встроенного оборудования для обнаружения лесных пожаров время реагирования значительно сокращается, а эффективность системы повышается. Такой подход исключает необходимость передачи гиперспектральных изображений на наземную станцию для обработки алгоритмами искусственного интеллекта. Вместо этого необходимо загрузить только векторные данные (точки или полигоны) пожара, а также уже помеченные данные, предназначенные для соответствующего диспетчера природных пожаров в зависимости от местоположения. За рубежом также представлена система, использующая методы трансферного обучения для разработки архитектуры нейронной сети, подходящей для встроенных систем. Чтобы создать модель, они начали с предварительно обученной архитектуры, разработанной Google, и внесли в нее изменения, чтобы адаптировать ее к своим требованиям, обеспечив сокращение времени отклика и эффективность вычислений. Авторы оценивали модели на основе различных показателей производительности, включая использование флэш-памяти, пиковое использование оперативной памяти, время вывода и общий показатель производительности, объединяющий эти показатели.

Эти показатели имеют решающее значение, поскольку авторы стремились разработать облегченную модель для развертывания во встраиваемых системах. В своем исследовании Д.Н. Степанов, И.П. Тищенко[39] разработал прототип системы, которая использовала как аудио, так и видеоданные для обнаружения и оповещения о наличии лесных пожаров. Чтобы добиться большей производительности, исследователи использовали две сверточные нейронные сети (английская аббревиатура CNN) в сочетании: одну для обработки аудиоданных, а другую для анализа видеоданных.

Другая область обширных исследований сосредоточена на использовании моделей компьютерного зрения для обнаружения пожара. Недавние достижения в разработке высоконадежных и эффективных моделей облегчили создание решений в реальном времени, которые ранее были недостижимы исключительно за счет использования датчиков. Среди различных типов моделей машинного обучения сверточные нейронные сети (CNN) оказались наиболее многообещающим решением в этой области. Большинство современных систем сегодня основаны на CNN или их вариантах, что обеспечивает значительно более высокий уровень надежности обнаружения пожара по сравнению с традиционными подходами на основе датчиков.

Лесные пожары на ранних стадиях, как правило, имеют относительно небольшой размер по сравнению с обширными территориями, охватываемыми системами обнаружения пожаров с глубоким обучением. Эта разница в размерах представляет собой проблему для модели, поскольку она может не уловить важную информацию, связанную с этими небольшими пожарами. Существующей модели может быть сложно изучить и эффективно обнаружить такие небольшие цели. Чтобы решить эту проблему, в 2022 году представили улучшенную модель. Предлагаемый метод направлен на повышение эффективности обнаружения небольших целей лесных пожаров. Улучшения в модели в первую очередь касаются усовершенствований уровня, добавления модуля внимания модуля сверточного блока и адаптации сети агрегации путей к двунаправленной пирамидальной сети функций. По полученным результатам предложенные усовершенствования продемонстрировали эффективное усовершенствование метода.

Среди нейронных сетей для анализа изображений довольно часто используется графовая нейронная сеть (английская аббревиатура GNN). По сути, он состоит из класса нейронных сетей для обработки данных, которые можно представить в виде графиков. В случае CNN компьютерного зрения (сверточные нейронные сети) их можно рассматривать как GNN, применяемую к структурированным графам, таким как пиксельные сетки. Метод преобразует

входные признаки узлов графа в различные реляционные признаки, устанавливая пары узлов, представляющие разные точки зрения тестовых изображений. Динамическое обновление характеристик изображений осуществляется с помощью отношений банка будущего, что позволяет оценить их сходство и повысить уровень их распознавания. Ядро этого преобразования связано с механизмом самовнимания при взаимодействии каждого входного элемента в сеть относительно других элементов. В исследовании предложены и протестированы две модели: TransUNet и MedicalTransformer.

Лесные пожары представляют значительную угрозу экосистемам, дикой природе и жизни людей. За прошедшие годы были достигнуты различные успехи в борьбе с лесными пожарами. В данной статье рассматриваются разработки в области обнаружения и мониторинга лесных пожаров с использованием методов видеонаблюдения. Кроме того, в нем рассматривается решающая роль, которую машинное обучение и искусственный интеллект играют в обнаружении и предотвращении пожаров. Эти технологии значительно повысили скорость и точность обнаружения и мониторинга пожаров, что позволяет оперативно реагировать и эффективно распределять ресурсы. По мере того, как мы продолжаем развивать и совершенствовать эти технологии, потенциал предотвращения и минимизации воздействия лесных пожаров растет.

Однако проблемы остаются, в том числе необходимость создания надежных и надежных сетей связи, интеграции данных и преодоления ложных тревог. Существующие системы раннего обнаружения и прогнозирования лесных пожаров сталкиваются с рядом ограничений, которые необходимо устранить. Что касается ограничений покрытия, существующие системы могут иметь пробелы в покрытии, особенно в отдаленных или густых лесных районах, где обнаружение затруднено. Что касается уровня ложных тревог, некоторые системы могут страдать от высокого уровня ложных тревог, что приводит к ненужному использованию ресурсов и снижению доверия общественности к системе. Задержки в обработке данных, а также

своевременная обработка данных и распространение предупреждений соответствующим органам власти и сообществ имеют решающее значение.

Однако могут возникнуть задержки в обработке, анализе и принятии решений, что снижает эффективность систем раннего предупреждения. Используя возможности технологий и сотрудничество между исследователями, пожарными и политиками, мы можем продолжать добиваться значительных успехов в защите наших лесов и сообществ от разрушительных последствий лесных пожаров. Будущие достижения могут быть сосредоточены на разработке более совершенных систем обнаружения пожаров, которые смогут быстро идентифицировать наличие пожаров и точно прогнозировать их поведение. Эти системы могут использовать передовые датчики, алгоритмы машинного обучения и анализ данных в реальном времени для повышения раннего обнаружения и сокращения времени реагирования. Более того, улучшенные методы моделирования пожаров могут помочь более точно прогнозировать поведение пожара. Интеграция различных источников данных и технологий представляет собой еще одну и важную задачу в предотвращении лесных пожаров. Для повышения эффективности систем раннего обнаружения и прогнозирования крайне важно интегрировать различные источники данных и технологии.

Одним из подходов является объединение спутниковых, сенсорных сетей и данных о погоде. Объединив данные со спутников, наземных сенсорных сетей и метеостанций, можно достичь более полного и точного понимания возникновения, распространения и поведения пожаров. Такая интеграция позволяет расширить зону покрытия и провести более детальный анализ условий окружающей среды, связанных с лесными пожарами. Другой аспект интеграции предполагает объединение методов дистанционного зондирования с наземными системами мониторинга. Путем объединения методов дистанционного зондирования с воздуха и спутников с наземными системами мониторинга, такими как камеры и наземные датчики, можно значительно повысить точность и охват систем раннего обнаружения. Такое сочетание

обеспечивает мультимодальный подход, позволяющий собирать как крупномасштабную, так и локализованную информацию о деятельности лесных пожаров. Объединяя различные источники данных, такие как погодные условия, топография, содержание влаги в топливе и исторические данные о пожарах, прогностические модели могут предоставить ценную информацию о распространении, интенсивности и потенциальных последствиях пожара. Эта информация может помочь в упреждающем управлении пожарами и распределении ресурсов.

Повышение точности прогнозирования и оценки неопределенности может быть достигнуто. Повышение точности и надежности моделей прогнозирования лесных пожаров имеет решающее значение для принятия эффективных решений по управлению лесными пожарами. Есть две ключевые стратегии достижения этой цели. Во-первых, важно улучшить методы калибровки и проверки моделей. Правильная калибровка и проверка моделей прогнозирования на основе исторических данных о лесных пожарах обеспечивает их точность.

Уточняя модели, основанные на моделях поведения и последствиях прошлых пожаров, можно улучшить их эффективность для будущих прогнозов. Во-вторых, жизненно важно устранить неопределенности во входных данных и предположениях модели. Модели прогнозирования лесных пожаров в значительной степени полагаются на данные об окружающей среде и погоде, которые по своей сути содержат неопределенность. Учет этих неопределенностей во входных данных и предположениях модели, например, с помощью вероятностного моделирования или ансамблевых подходов, может обеспечить более надежные прогнозы. Во-вторых, жизненно важно устранить неопределенности во входных данных и предположениях модели.

Будущие разработки могут быть сосредоточены на совершенствовании систем связи и информации во время пожаров. Это может включать в себя внедрение надежных и отказоустойчивых сетей связи, спутниковую съемку для картирования пожаров в режиме реального времени, а также использование

мобильных приложений для облегчения обмена данными в реальном времени между пожарными и группами реагирования на чрезвычайные ситуации. Достижения в области технологий открывают новые возможности для улучшения систем раннего обнаружения и прогнозирования. Одной из областей постоянных исследований является роль искусственного интеллекта, Интернета вещей и анализа больших данных. Использование методов искусственного интеллекта, алгоритмов машинного обучения и анализа больших данных может обеспечить более эффективную обработку и анализ больших объемов данных. Эти технологии могут извлекать ценную информацию из различных источников данных, совершенствовать методы объединения данных и повышать точность прогнозов, что в конечном итоге приводит к более своевременным предупреждениям и улучшению процесса принятия решений.

Кроме того, для сбора данных можно использовать потенциал беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), оснащенных технологиями дистанционного зондирования. БПЛА предоставляют данные с высоким разрешением в режиме реального времени, которые могут помочь в быстром и точном мониторинге лесных пожаров. Эти воздушные платформы могут собирать подробную информацию о поведении пожара, состоянии топлива и факторах окружающей среды, способствуя более точным системам раннего обнаружения и прогнозирования. Дальнейшие разработки должны быть направлены на повышение осведомленности и просвещения общественности в отношении предотвращения пожаров и обеспечения готовности. Это может включать в себя программы работы с населением, образовательные кампании и пропаганду практики пожарной безопасности. Предоставление людям знаний и ресурсов может существенно способствовать снижению количества пожаров и минимизации их последствий.

Более того, интеграция социальных и поведенческих факторов в системы раннего обнаружения и прогнозирования может повысить их эффективность и влияние на борьбу с лесными пожарами. Одним из аспектов является включение в модели поведения человека и динамики эвакуации. Понимание

того, как люди реагируют на ранние предупреждения и приказы об эвакуации во время лесных пожаров, может улучшить планирование эвакуации и принятие решений. Моделируя поведение человека и модели эвакуации, модели могут дать представление об эффективности эвакуации, потенциальных узких местах и областях, которые требуют дополнительного внимания при планировании действий в чрезвычайных ситуациях. Кроме того, решающее значение имеет понимание реакции общественности и процессов принятия решений. Такие факторы, как восприятие риска, распространение информации и участие сообщества, играют важную роль в управлении лесными пожарами.

Учет этих факторов позволяет разработать более эффективные коммуникационные стратегии, кампании по повышению осведомленности общественности и инициативы на уровне сообществ, способствуя активному подходу к предотвращению лесных пожаров и реагированию на них. В заключение, решение проблем раннего обнаружения и прогнозирования лесных пожаров требует интеграции нескольких источников данных, повышения точности прогнозирования и оценки неопределенности, учитывая социальные и поведенческие факторы и изучая новые технологии. Охватывая эти направления, можно повысить эффективность систем раннего обнаружения и прогнозирования, что приведет к улучшению управления лесными пожарами и снижению воздействия на экосистемы и сообщества.

Наиболее многообещающей технологией, безусловно, являются беспроводные датчики, по крайней мере, достаточно дешевые, чтобы их можно было вытеснить в крупных сетях. Однако у них есть сильное ограничение по энергоснабжению – необходимость обеспечивать их батареями означает вытеснение химических (загрязняющих) элементов в лесные массивы с возможными опасностями для людей и животных.

Акустические датчики с самого начала будут в первую очередь использоваться для обнаружения шума пожара. Благодаря большому радиусу действия и тому, что не требуется прямая видимость, будет установлена акустическая система для непрерывного объемного сканирования в

контролируемой зоне. Как только источник звука обнаруживается в определенном направлении, реализуется алгоритм распознавания образов, чтобы оценить, является ли это пожаром или нет. Напротив, оптоволоконные датчики не питаются электропитанием – они не требуют никакого обслуживания и поэтому могут быть установлены в самом сердце леса, в нескольких километрах от считывающего устройства. Хотя они могут обнаружить пожар только тогда, когда он находится очень близко (в пределах нескольких метров), они могут быть очень полезны во время чрезвычайной ситуации, чтобы получить информацию о поведении пожара в реальном времени. Благодаря своей гибкости их можно устанавливать вокруг чувствительных сооружений (например, дорог) концентрическими кругами длиной от 100 до 500 метров, чтобы предоставить информацию о том, находятся ли они в опасности, и рассчитать фактическую скорость распространения.

Прежде чем проектировать систему, необходимо было охарактеризовать событие лесного пожара. Пожар – это процесс горения, при котором горючий материал с достаточным количеством кислорода подвергается воздействию достаточного количества тепла. Таким образом, для запуска этого процесса необходимы три компонента:

- 1) источник воспламенения (например, тепло),
- 2) кислород,
- 3) топливо.

Топливо для лесных пожаров может быть разных видов, в том числе травянистое (растения, имеющие листья и недревесные стебли, отмирающие в конце вегетационного периода до уровня почвы в умеренных зонах), подстилка (верхний слой лесной подстилки, состоящий из рыхлых органические материалы и элементы упавших деревьев и растений), подрезы (обломки, оставленные в результате природных явлений, таких как ветер, снег, изменение леса и другой растительности в результате лесохозяйственной практики и другой деятельности человека, такой как прореживание и обрезка земель,

строительство, очистка сейсмических линий) и кустарники (низкие древесные растения, отличающиеся от дерева множественными и постоянными стеблями, растущими от общего основания и меньшей высоты). Только в особых условиях пожары фактически сжигают тяжелую биомассу в виде верховых пожаров. Поскольку для достижения этого условия требуется некоторое время, этот вид топлива не представлял большого интереса для проекта. С акустической и оптоэлектронной точек зрения необходимо было:

- Оценить тепло, излучаемое огнем на оптоволоконные датчики с кабелями, расположенными на открытом воздухе, под землей или внутри пламени, чтобы определить устойчивость датчиков при возгорании;

- Оценить возможности обнаружения микрофонной решетки с точки зрения:

- а) расстояния от микрофонной решетки путем измерения шума на разных расстояниях и вывода закона уменьшения амплитуды шума пожара, (б) распознавания образов или распознавания сигнатур пожарного шума, и

- б) оценка типичного лесного фонового шума путем измерения шумов от разных источников, распространенных в лесу в течение длительного времени наблюдения.

Шум, возникающий при горении  $1 \text{ м}^3$  древесно-кустарникового материала в режиме свободной турбулентности, обусловлен главным образом срывом вихревых структур горящих участков у основания пожара. Эти структуры были тщательно изучены [36, с.645-647], и было показано, что они являются периодическими с частотой, обратно пропорциональной корню квадратному из окружности поверхности горящего топлива, охватывая спектр примерно от 1,0 Гц до 100 Гц, как эффективный диаметр уменьшается с 2,0 до 0,02 м. В литературе хорошо известно, что эта часть шума очень зависит от размера пожара, вида и состояния топлива, погодных условий. Другой важный аспект связан с анализом временного сигнала, представляющего изменения давления, вызванные пожаром. Некоторые специфические явления, называемые акустической эмиссией [37, с.60-64], могут быть обнаружены из-за

микроскопических изменений напряжения, вызванных теплом и температурным градиентом, которые провоцируют механические модификации материала. Эти события производят отчетливые акустические импульсы. Если они повторяются с высокой частотой, как при большом количестве горящего топлива, возникает потрескивание.

Что касается волоконно-оптических датчиков, использовались волоконные брэгговские решетки (ВБР) [9]. ВБР были прикреплены к металлической конструкции, параллельной одной стороне участков горения, на расстоянии 0,5 метра, при этом для обеспечения эталонного изменения температуры использовались стандартные термопары. Также использовались песчаные столы с датчиками, зарытыми на глубине 4 см. Полученные результаты показали, что температурные профили характеризуются высокими температурами ( $> 1000^{\circ}\text{C}$ ), достигаемыми за небольшой промежуток времени (т.е. очень высокими температурными градиентами, если они измеряются с помощью ВБР в прямом контакте или очень близко, максимум один метр). к огню). Последствия пожара кажутся менее значительными, когда оптоволоконный кабель закопан под землю. Это означает, что датчики необходимо опирать на землю, но их необходимо каким-то образом защищать от высоких температур, поскольку ВБР должны сохранять работоспособность даже при контакте с огнем. Поэтому защитный корпус был спроектирован и разработан для обеспечения:

- Мгновенная передача тепла с внешней стороны покрытия на ВБР;
- Температурное ослабление, соответствующее максимальной рабочей температуре ВБР (около  $80\text{--}85^{\circ}\text{C}$ ).

Платформа моделирования была разработана в среде Labview для оценки производительности системы. Это показывает, что такая конфигурация эталонной системы имеет 67-процентную вероятность обнаружить шум пожара на расстоянии 1 км в течение 10 минут и с подтверждением в течение 5 минут. Производительность можно повысить до 95 процентов за счет улучшения обучения модуля распознавания образов..

Разработанная технология сравнивалась с широко используемыми технологиями обнаружения. Существующие методы с трудом могут точно обнаружить лесные пожары из-за смешанных сигналов, вызванных такими факторами, как влажность и положение солнца. Напротив, модель, разработанная командой профессора Има, учитывает несколько переменных одновременно, обеспечивая значительное преимущество в сохранении точности обнаружения, несмотря на изменения в окружающей среде.

Были проведены реальные эксперименты для проверки эффективности технологии в различных условиях окружающей среды. Результаты показали, что разработанная модель превосходит существующие методы обнаружения, демонстрируя свою способность более точно определять местонахождение лесных пожаров. Хотя разрешение спутника ниже по сравнению с технологиями обнаружения с узким диапазоном, более широкий пространственный диапазон, охватываемый моделью, компенсирует это, обеспечивая более высокую точность.

Итак, в сфере автоматического обнаружения лесных пожаров на основе машинного обучения используется несколько методов, наиболее распространенными из которых являются подходы компьютерного зрения, которые используют как изображения, так и видео, а также модели классификации, обученные на данных об окружающей среде. В последующих разделах будет дано подробное описание этих двух решений, поясняющее их работу и применение. Обучение модели машинного обучения данным об окружающей среде, таким как влажность, температура, скорость ветра и т. д. как в случае возникновения лесного пожара, так и в обычных условиях, может быть простым и понятным решением. Эта система реализует простую нейронную сеть прямого распространения, используемую для определения уровня опасности лесных пожаров в реальном времени для каждого кластера датчиков на основе собранных в реальном времени данных об окружающей среде.

Сложные методы моделирования используют данные о погодных

условиях, топографии и историческом поведении пожаров для прогнозирования распространения, интенсивности и потенциальных последствий лесных пожаров. Эти прогнозы помогают в принятии стратегических решений и распределении ресурсов. Кроме того, искусственный интеллект, который может быстро анализировать огромные объемы данных, в сочетании с алгоритмами машинного обучения может улучшить моделирование поведения пожаров, системы раннего предупреждения и инструменты поддержки принятия решений для пожарных агентств.

Контролируемые и предписанные пожары тщательно планируются и осуществляются как стратегические меры по сокращению запасов топлива, уничтожению избыточной растительности и восстановлению экосистем. Внедряя эти методы, можно значительно снизить риск возникновения более крупных и разрушительных лесных пожаров.

Эти инновации в сочетании с эффективной межведомственной координацией и участием общественности имеют важное значение для смягчения последствий лесных пожаров, повышения безопасности пожарных и защиты жизни, имущества и природных ресурсов. Продолжающиеся исследования и разработки в области технологий борьбы с лесными пожарами способствуют более эффективной и устойчивой практике пожаротушения.

Итак, лесные пожары издавна причиняли большой ущерб. С течением времени и ростом населения они становятся все более нежелательным явлением, а борьба с ними — государственной проблемой не только в России, но и в других многолесных государствах. Недостаточные меры, направленные на тушение огня, способствуют распространению пожаров на огромной площади и делают их чрезвычайно опасными для жизни человека, о чем нельзя забывать.

Оперативное обнаружение и мониторинг очагов пожаров на территории обширных и труднодоступных лесных массивов России - актуальная природоохранная задача. Традиционное использование авиации для патрулирования пожароопасных районов требует значительных финансовых

средств, что объясняет возрастающую роль спутниковых систем дистанционного зондирования земной поверхности. Использование искусственных спутников земли (ИСЗ) является оптимальным для решения данной проблемы.

Можно сделать вывод, что сочетание зональной обработки изображений и их реконструкции позволит подойти к решению задач прогноза развития пожаров и выбора методов подавления. Очевидно, что при этом целесообразно использовать современные геоинформационные технологии и оболочки документирования результатов мониторинга лесных пожаров и принятия своевременных решений по борьбе с лесными пожарами.

Главным результатом математического моделирования лесных пожаров является определение предельных условий распространения лесных пожаров, при которых процесс горения прекращается. Разработанные к настоящему времени математические модели лесных пожаров позволяют правильно описывать механизмы их распространения и классифицировать основные режимы зажигания.

Решение этих вопросов позволит в первом приближении завершить создание математической теории лесных пожаров и использовать ее для создания как способов и средств для борьбы с лесными пожарами, так и прогнозов экологических последствий лесных пожаров.

2 Наблюдение за лесными пожарами в труднодоступных районах (на примере Челябинской области)

2.1 Исследование беспилотных летательных аппаратов на практике ФПС Центра управления силами федеральной противопожарной службы по Челябинской области

Защита лесов от пожаров включает в себя реализацию мер пожарной безопасности, которые включают в себя мониторинг [1]. При этом согласно п. 2 ст. 53.2. Лесного Кодекса Российской Федерации мониторинг пожарной опасности в лесах и лесных пожаров включает организацию системы обнаружения и учета лесных пожаров, системы наблюдения за их развитием с использованием наземных, авиационных или космических средств.

Традиционные системы обнаружения лесных пожаров уже более двух десятилетий полагаются исключительно на спутниковые данные. Мониторинг в Челябинской области проводится по заранее введенному полетному заданию [24]. В боевом расчете стоят следующие БПЛА: ZALA 421-21 P3; ZALA – 421-21 ФО; ZALA – 421-04 M P3; Phantom – 3; Inspire – 1 (рисунок 2.1), технические характеристики которых представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Технические характеристики БПЛА, находящихся на вооружении Челябинского гарнизона

Наименование характеристики	ZALA 421-21 P3	ZALA 421-21 ФО	ZALA 421-04 M P3	Phantom - 3	Inspire - 1
Продолжительность полета, мин	30	35	30	23	25
Дальность действия, км	2	2	25	2	2
Максимальная высота полета, м	1000	1000	3600	6000	4500
Максимальная скорость, м/с	11	30	33	16	22

Основной задачей данного подразделения являются: воздушный мониторинг для управления пожарами, сокращение сроков их действия на

стадиях, предшествующих началу тушения, и на последующих этапах их ликвидации [8,9]. На рисунке 2.2 представлено осуществление мониторинга Аргаяшского района в летний период.



ZALA 421-04 M P3



ZALA 421-21 P3



Phantom – 3



Inspire – 1

Рисунок 2.1 – БПЛА стоящие на вооружении в Челябинской области



Рисунок 2.2 – Мониторинг Аргаяшского района Челябинской области

В таблице 2.2 представлена статистика вылетов БПЛА за прошедший год. Анализ данных таблицы показывает, что наиболее часто аппараты применялись для мониторинга лесопожарной и ледовой обстановки.

Таблица 2.2 - Статистика вылетов БПЛА за 2022 год в Челябинской области

Назначение полетов	Количество применений, раз	Время налета, мин.
Мониторинг лесопожарной обстановки	73	1334
Мониторинг ледовой обстановки	10	165
Контроль за выбросами в атмосферный воздух	3	57
Мониторинг мероприятий с массовым пребыванием людей	5	59

Данные МЧС России по Челябинской области о лесных пожарах в горнолесной зоне с 5 апреля по 14 мая 2023 года представлены на рисунке 2.3.

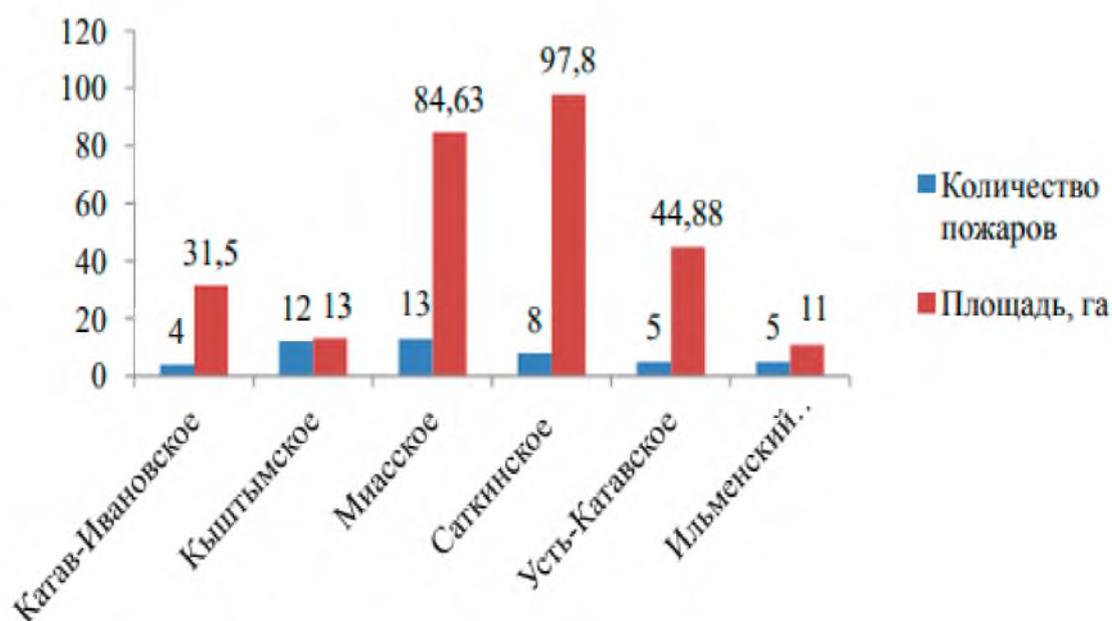


Рисунок 2.3 – Статистические данные о лесных пожарах в горно-лесной зоне Челябинской области

Данные МЧС России по Челябинской области о лесных пожарах в

лесостепной зоне с 5 апреля по 14 мая 2023 года представлены на рисунке 2.4.

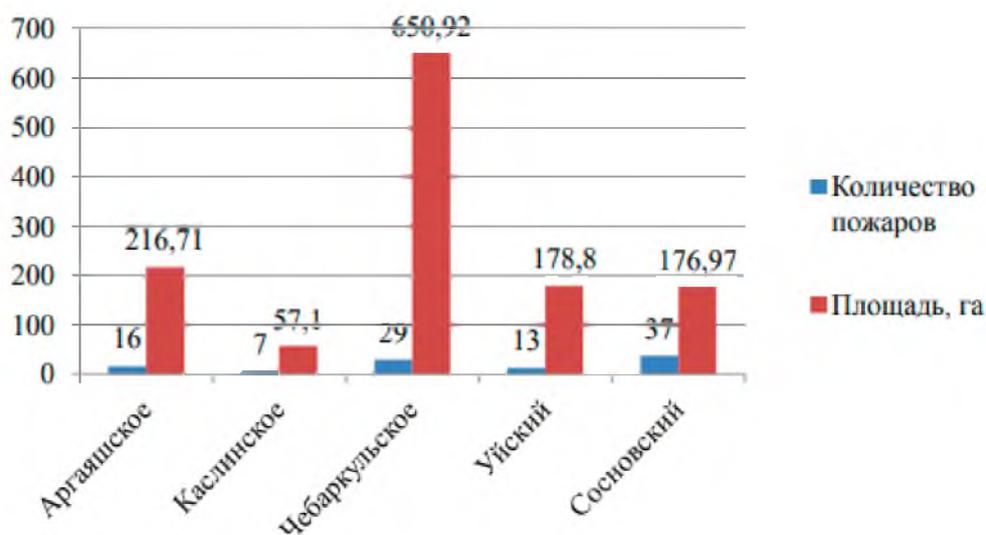


Рисунок 2.4 – Статистические данные о лесных пожарах в лесостепной зоне Челябинской области

Данные МЧС России по Челябинской области о лесных пожарах в степной зоне с 5 апреля по 14 мая 2023 года представлены на рисунке 2.5.

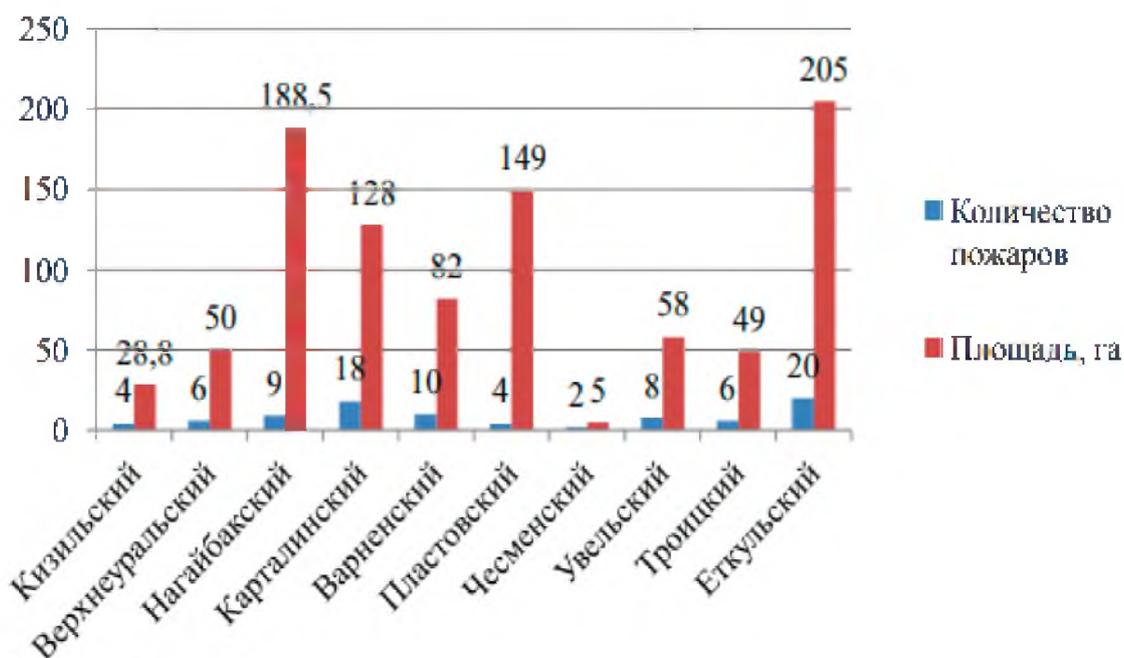


Рисунок 2.5 – Статистические данные о лесных пожарах в степной зоне Челябинской области

Степень пожарной опасности земель лесного фонда определена по

«Шкале оценки лесных участков по степени возникновения в них лесных пожаров», с корректировкой для условий Челябинской области. Распределение площади лесного фонда на территории Челябинской области по классам природной пожарной опасности представлено в рисунке 2.6.

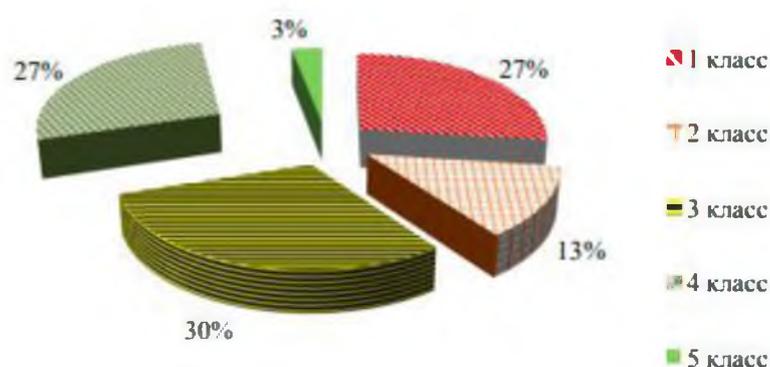


Рисунок 2.6 – Распределение площади лесного фонда на территории Челябинской области по классам природной пожарной опасности

Наиболее высокой природной пожарной опасностью характеризуется лесной фонд на территориях Кунашакского (1,3), Каслинского (1,4), Кыштымского (1,7), Красноармейского (1,8) и Карталинского (1,9) лесничеств [22].

## 2.2 Расчет критериев опасностей при применении беспилотных летательных аппаратов

Расчет критериев опасностей при применении беспилотных летательных аппаратов охранно-пожарных мероприятий является важным этапом в установлении безопасности и эффективности использования таких устройств. Данный расчет основан на анализе различных факторов, включающих в себя технические характеристики летательных аппаратов, а также условия эксплуатации и возможные риски.

Расчет критериев опасности при применении беспилотных летательных

аппаратов (БПЛА) в охранно-пожарных мероприятиях может включать следующие факторы и параметры:

- Расчет степени риска столкновения или аварии. Это включает в себя анализ вероятности столкновения БПЛА с другими объектами, определение возможных последствий и оценку вероятности аварийных ситуаций. Для этого необходимо учитывать характеристики БПЛА (скорость полета, маневренность), местоположение и плотность населения или объектов, с которыми может произойти столкновение.

- Расчет вероятности возникновения пожара или взрыва. Это требует анализа возможных источников и причин возникновения пожара или взрыва на борту БПЛА, а также его влияния на окружающую среду. Параметры, такие как наличие топлива или химических веществ на борту, электрическая система и возможность их возгорания, должны быть учтены при расчете вероятности возникновения пожара или взрыва.

- Оценка уровня шума и вибраций. БПЛА могут создавать шум и вибрации, которые могут быть опасными для окружающих людей или объектов. Расчет должен включать анализ звуковых и вибрационных характеристик БПЛА, его рабочих режимов и их воздействия на близлежащие объекты или людей.

- Анализ возможных последствий и ущерба. Расчет должен включать оценку возможных последствий, которые могут возникнуть в результате аварийного или неконтролируемого полета БПЛА. Это может включать в себя повреждения или разрушения объектов, травмы или гибель людей, загрязнение окружающей среды, ущерб имуществу и прочее.

Основной задачей на этом уровне управления является формирование полетного задания (ПЗ) для БЛА для решения поставленной перед БАК задачи.

Как правило, задача функционирования БЛА в составе БАК \* Т представляет собой совокупность некоторых типовых задач

$$T^* = \{T^1, T^2, \dots, T^m\}, \quad (2.1)$$

где  $T^i, i = (\overline{1, m})$  – полный перечень задач типа: взлет, набор высоты, полет по маршруту и т.д., посадка.

Последовательность можно представить в виде цепочки:



Рисунок 2.7 – Алгоритм действий, необходимых непосредственно для выполнения ПЗ

Рассмотрим САУ БЛА в составе БАК. Задача сеанса функционирования БАК (ЗСФ БАК) поступает в блок типовых задач, где преобразуется в совокупность типовых задач  $T$ , передающихся затем в блок формирования полетного задания БФ ПЗ:

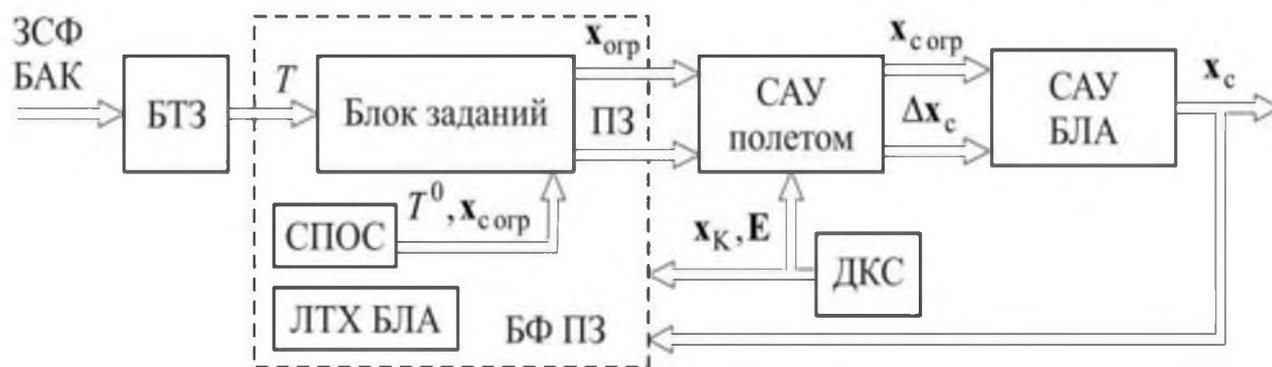


Рисунок 2.8 – САУ БЛА в составе БАК

При облете препятствия, находящегося на расчетном пути (его крайней точки  $K$  с известными координатами  $x_K, z_K$ ) возможно введение поправок по курсу с учетом расстояния  $d_K$  (по границе  $v$ ), на котором следует пройти мимо него:

$$\varphi_{cor} = \arcsin(d_K / r_K) \quad (2.2)$$

где  $r_K$  – расстояние от БЛА до контрольной точки препятствия К.

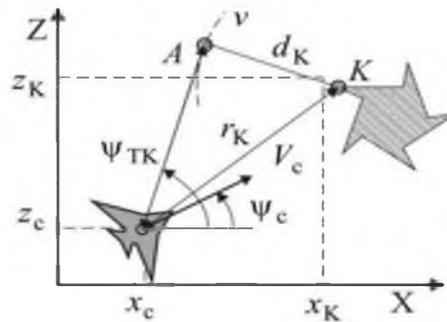


Рисунок 2.9 – Облет препятствия в горизонтальной плоскости

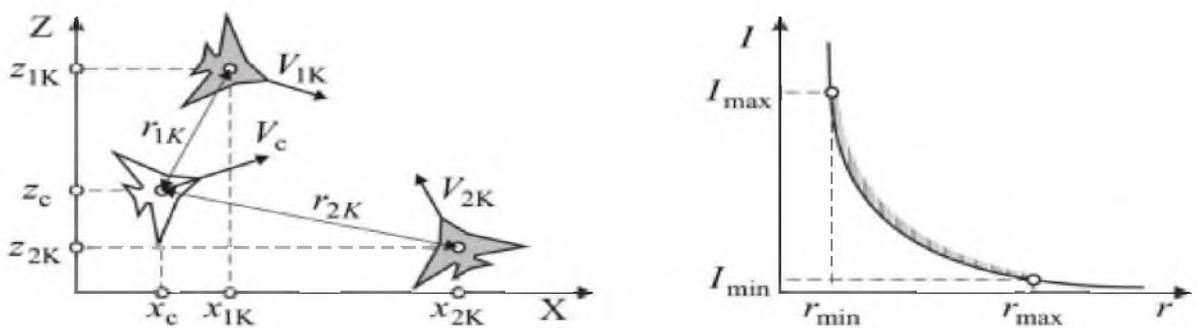


Рисунок 2.10 – Сближение БЛА дистанции между конфликтующими БЛА и примерное изменение функционала опасности  $I$  при изменении дистанций между БЛА

Тогда требуемый курс на точку А (по касательной к границе  $v$ ):

$$\psi_{TK} = \varphi_K + \arcsin(d_K / r_K) \quad (2.3)$$

где  $\varphi_K$  – направление на К.

Поскольку при полетах информационных БЛА обычно необходимо поддерживать определенную высоту полета, стратегия TCAS для них не желательна.

## 2.3 Осуществляемые организационно-технические решения наблюдения за лесными пожарами

Повышенные требования отказоустойчивости предъявляются к оборудованию БЛА. Это оборудование входит в первую группу классификации и обеспечивает надежность комплекса БЛА в целом. Остальное же оборудование ЛА входит во вторую группу классификации (Рис. 2.11).

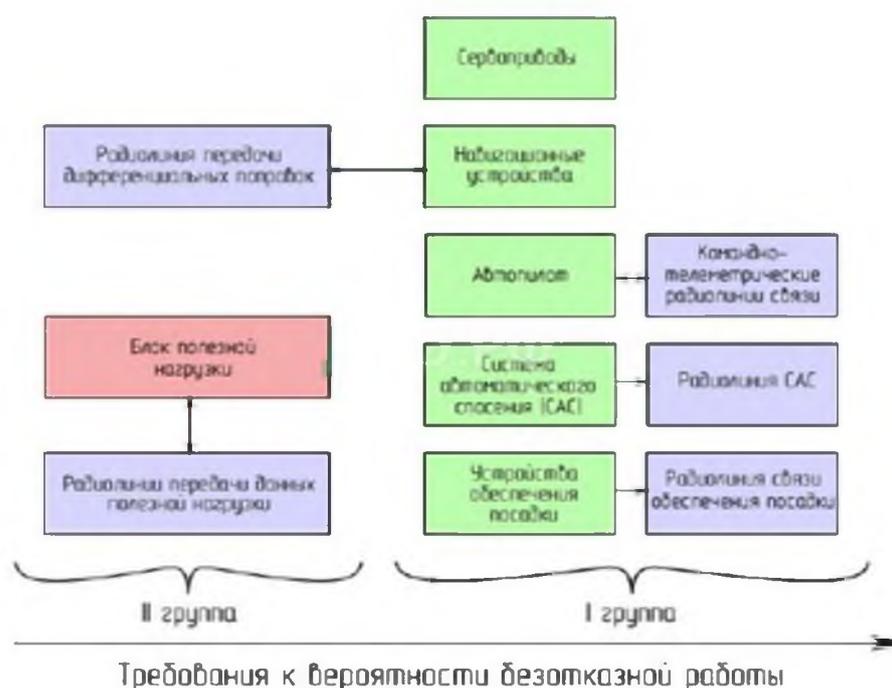


Рисунок 2.11 – Упрощенная классификация оборудования БЛА по требованиям к вероятности безотказной работы.

Во время полета, как правило, управление БЛА автоматически осуществляется посредством бортового комплекса навигации и управления, в состав которого входят:

- приемник спутниковой навигации, обеспечивающий прием навигационной информации от систем ГЛОНАСС и GPS;
- система инерциальных датчиков, обеспечивающая определение ориентации и параметров движения БЛА;
- система воздушных сигналов, обеспечивающая измерение высоты и

воздушной скорости;

- различные виды антенн, предназначенные для выполнения задач.

Бортовая система навигации и управления обеспечивает:

- полет по заданному маршруту (задание маршрута производится с указанием координат и высоты поворотных пунктов маршрута);
- изменение маршрутного задания или возврат в точку старта по команде с наземного пункта управления.

Предотвращение и ликвидация аварий, катастроф и снижение ущерба от стихийных бедствий требуют реализации различных организационно-технических решений.

В первую очередь необходимо строительство и поддержание надежной инфраструктуры, включающей дороги, мосты, здания, водоснабжение, энергетические системы и т.д.

При этом все объекты должны соответствовать современным стандартам безопасности и быть подвергнуты регулярным проверкам и обслуживанию.

Кроме того, необходимо разрабатывать и реализовывать комплексные планы по предотвращению и ликвидации аварийных ситуаций. Они должны включать в себя широкий спектр мероприятий, начиная от обучения населения правилам безопасности и проведения тренировок эвакуации, до создания специализированных служб, оборудованных специальной техникой, для оперативного реагирования на чрезвычайные ситуации.

Контроль за природными явлениями также является неотъемлемой частью организационно-технических решений. Современные системы мониторинга и прогнозирования позволяют улучшить предупреждение о надвигающихся стихийных бедствиях, таких как наводнения, пожары, землетрясения и другие. Это позволяет своевременно эвакуировать население из опасных зон и принять необходимые меры для минимизации возможных последствий.

Важным элементом организационно-технических решений является также обеспечение эффективной системы коммуникаций и информирования

населения. Введение современных технологий, таких как системы оповещения, SMS-уведомления, интернет-ресурсы и социальные сети, позволяет оперативно донести до граждан необходимую информацию о возможных угрозах, правилах поведения в чрезвычайных ситуациях и организации помощи.

Для предотвращения и ликвидации аварий, катастроф и снижения ущерба от стихийных бедствий используются следующие организационно-технические решения:

1. Разработка и внедрение систем предупреждения и мониторинга.
2. Создание и соблюдение строгих правил и норм безопасности.
3. Разработка и реализация планов эвакуации и аварийной помощи.
4. Усиление конструкций и инфраструктуры объектов.
5. Создание систем автоматического управления и контроля.
6. Организация оперативной реагирования и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций.
7. Разработка и внедрение систем страхования и финансовой поддержки при ЧС.

Эти организационно-технические решения позволяют минимизировать риски возникновения аварий и катастроф, а также сократить ущерб от стихийных бедствий путем эффективного предупреждения, быстрой реакции и эффективной ликвидации последствий.

Таким образом, осуществление организационно-технических решений является неотъемлемой частью системы предотвращения и ликвидации аварий, катастроф и снижения ущерба от стихийных бедствий. Они включают в себя строительство надежной инфраструктуры, разработку и реализацию комплексных планов, контроль за природными явлениями и обеспечение эффективной системы коммуникаций.

Резюмируем:

- Ошибки и нежелательные ситуации могут возникать в любой организации, но правильные организационно-технические решения могут предотвратить их возникновение или быстро и эффективно их ликвидировать.

- Проактивный подход к управлению рисками стихийных бедствий позволяет значительно снизить ущерб и потери.

- Комплексная система предупреждения и мониторинга позволяет оперативно реагировать на угрозы и предотвращать катастрофы.

- Обучение сотрудников и создание компетентных команд по аварийной службе способствует быстрой реакции и эффективной ликвидации последствий стихийных бедствий.

- Использование современных технических средств, таких как системы автоматического мониторинга и обнаружения, позволяет аккуратно прогнозировать и реагировать на возможные угрозы.

- Сотрудничество с другими организациями, в том числе правоохранительными, позволяет эффективно координировать усилия в предотвращении и ликвидации аварий и катастроф.

- Регулярное техническое обслуживание и модернизация существующих систем безопасности помогают гарантировать их надежность и эффективность в долгосрочной перспективе.

3 Внедрение инновационных технологий наблюдения за лесными пожарами в труднодоступных районах

3.1 Применение беспилотных летательных аппаратов в специализированной пожарно-спасательной части для обеспечения мониторинга пожарной опасности

В лесах необходимо проводить мероприятия по мониторингу и предупреждению чрезвычайных ситуаций, тем самым снижая ущерб от пожаров и гибели людей, а также своевременное обнаружение источника пожара и его локализация. К основным факторам своевременного обнаружения источника пожара можно отнести:

- способ поиска (профиль и маршрут полета, последовательность просмотра местности);
- аппаратура;
- характер объектов.

Главным критерием эффективности применения БПЛА для обнаружения очага пожара в лесах является относительная эффективность

$$U = \frac{W_p}{W} \quad (3.1)$$

где  $W_p$ ,  $W$  – соответственно вероятности выполнения поставленной задачи с привлечением БПЛА и без него.

Вероятность выполнения полетного задания поисковым БПЛА определяется выражением

$$P_p = P_u \cdot P_{\text{вых}} \cdot P_{\text{пнв}} \cdot P_{\text{обн}} \cdot P_d \cdot P_{\text{инф}} \quad (3.2)$$

где  $P_u$  – вероятность того, что БПЛА будет исправным в течении всего вылета или уровень его исправности не окажет влияния на выполнение задачи

(вероятность безотказной работы);

$R_{\text{вых}}$  – вероятность того, что БПЛА выйдет в район поиска;

$R_{\text{пнв}}$  – вероятность преодоления неблагоприятных воздействий в исполнительной зоне и при подлете к ней.

Преодоление таких факторов, как плохие метеоусловия, а также факторов, действующих на БПЛА в случае его применения в зонах стихийных бедствий и техногенных катастроф (пожар, аварии и т.д.).

$$P_{\text{пнв}} = e^{-\sum_{i=1}^N \lambda_i t_{ni}} \quad (3.3)$$

где  $\lambda_i$  – интенсивность эффективного воздействия  $i$ -го неблагоприятного фактора;

$t_{ni}$  – время нахождения БПЛА в области непосредственного воздействия  $i$ -го неблагоприятного фактора;

$R_{\text{инф}}$  – вероятность того, что информация, переданная потребителю, не потеряет своей актуальности за время, проходящее от получения информации БПЛА до ее передачи потребителю.

$$P_{\text{инф}} = e^{-\frac{T_{\text{обп}}}{T_{\text{ож}}}} \quad (3.4)$$

где  $T_{\text{обп}}$  – время обнаружения и передачи данных, представляющее собой сумму времени на обнаружение объекта оператором на экранном поле, времени идентификации объекта оператором и времени определения координат объекта;

$1/T_{\text{ож}}$  – параметр подвижности объекта ( $T_{\text{ож}}$  – среднее время пребывания объекта разведки в данном состоянии или месте);

$R_{\text{обн}}$  – вероятность обнаружения объекта;

$R_{\text{д}}$  – вероятность доставки информации потребителю. Стоимость выполнения полетного задания определяется как сумма затрат на выполнение одиночного полетного задания.

$$P_{\text{БПЛА}} = \text{Слч} \cdot n \quad (3.5)$$

где Слч – стоимость летного часа БПЛА;

n – количество дней в пожароопасный период.

Стоимость съема информации с единицы площади земной поверхности является универсальным удельным критерием, так как позволяет оценить эффективность применения любого поискового БПЛА с учетом его выживаемости и производительности его целевой нагрузки:  $P_p F_1 \Sigma$ .

$$\overline{C}_n = \frac{P_{бпла}}{P_p F_1 \Sigma} \quad (3.6)$$

где  $F_1 \Sigma$  – суммарная просматриваемая площадь земной поверхности в одном вылете.

Рассмотрим это на примере. Рационально осуществить сопоставление эффективности применения БПЛА для двух вариантов их использования – случайного (рисунок 3.1) и закономерного (рисунок 3.2). Результаты расчетов по вышесказанной методике, представлены на графиках (рисунок 3.3), показывают эффективность преодоления БПЛА неблагоприятных воздействий в зависимости от скорости и высоты полета.

На рисунке 3.4 представлено изменение вероятности обнаружения очага пожара от скорости для двух способов поиска – закономерного и случайного. Результаты определения вероятности того, что полученная при поиске информация не утратит актуальности, даны на рисунке 3.5, из которого следует, что увеличение скорости полета БПЛА положительно сказывается на этом параметре.

После определения сомножителей, входящие в состав формулы 3.1 в соответствии с блоком алгоритма, можно определить вероятность нахождения очага пожара. На рисунке 3.6 представлены окончательные результаты расчетов – эффективность применения БПЛА, выполняющего мониторинг пожароопасной обстановки. Таким образом, скорость полета БПЛА значительно влияет на эффективность выполнения поставленной задачи: чем больше скорость, тем выше эффективность БПЛА.

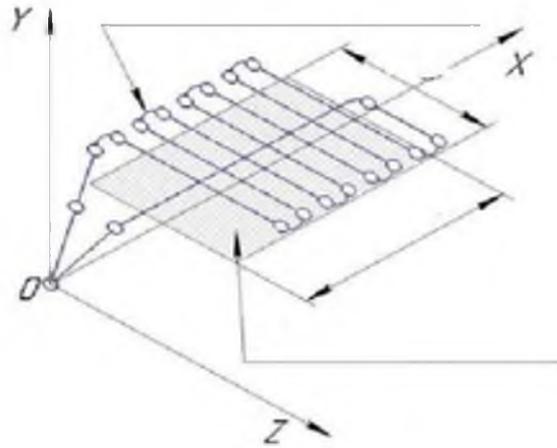


Рисунок 3.1 – Случайный способ ведения поиска

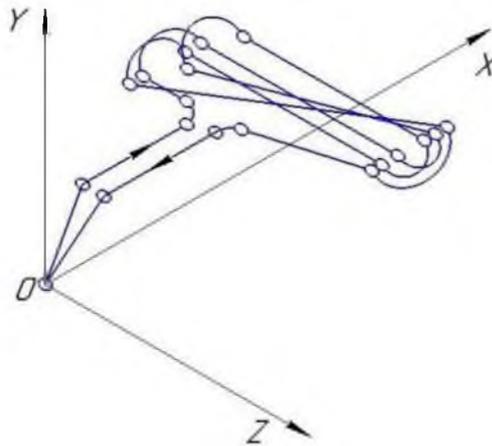


Рисунок 3.2 – Закономерный способ ведения поиска

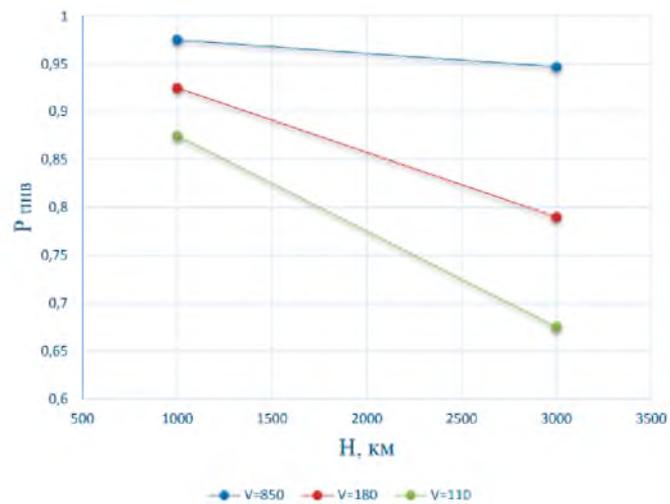


Рисунок 3.3 – Результаты расчетов определения эффективности БПЛА

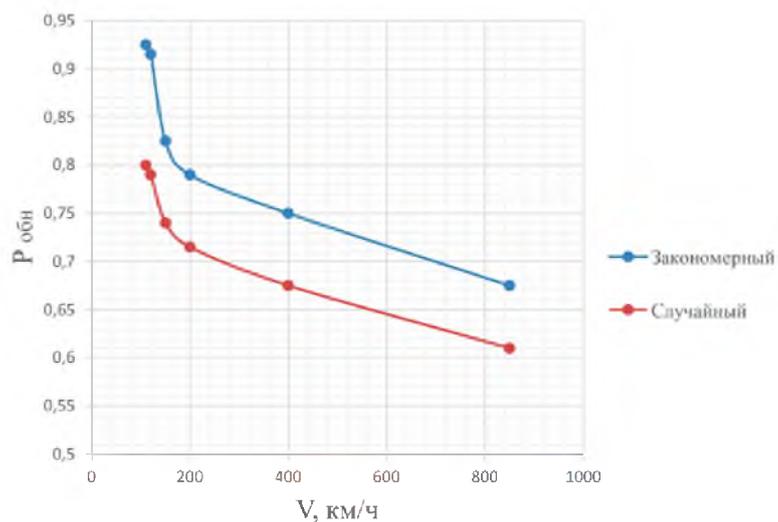


Рисунок 3.4 – Изменение вероятности обнаружения очага пожара от скорости

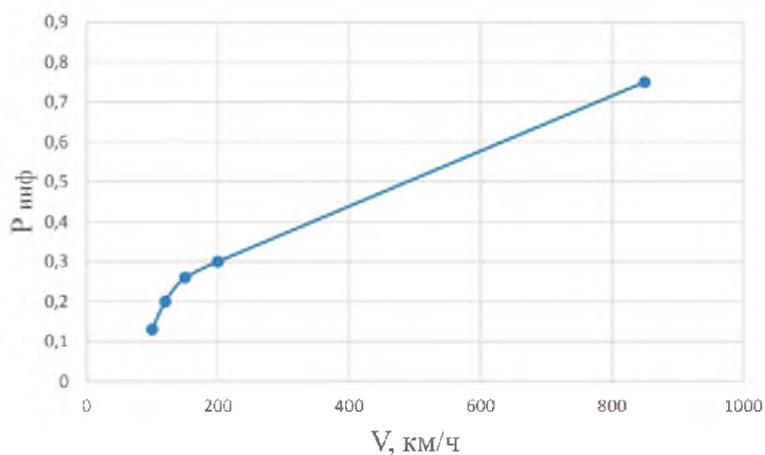


Рисунок 3.5 – Определение вероятности актуальности

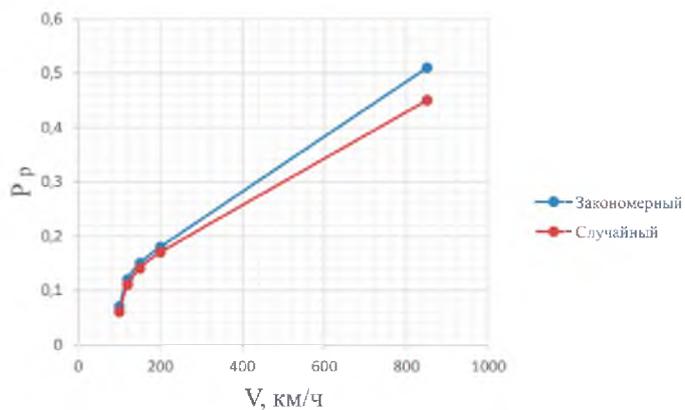


Рисунок 3.6 – Окончательные результаты расчетов определения эффективности БПЛА, выполняющего мониторинг пожароопасной обстановки

Для реализации этих мероприятий используется авиационная техника вертолеты Ми-8, с тепловизионным оборудованием на которой выполняются мониторинг пожароопасных районов.

### 3.2 Технико-экономическое обоснование предложенных решений

Проведем сравнение стоимость закупки и эксплуатации комплекса БПЛА, в пересчете на час работы с ценой аренды вертолета «Ми-8».

В данных условиях более выгодно использовать вертолетную технику. Рассмотрим применение распространенного вертолета «Ми-8».

Аренда данного вертолета составляет 130000 руб. в час.

Состав комплекса БПЛА:

- Транспортно-пусковая установка (ТПУ) на автомобиле УАЗ-3303
- Пункт дистанционного управления (ПДУ) на автомобиле УАЗ-3303
- Комплект БПЛА (4 шт.)

Технические и экономические характеристики комплекса БПЛА:

- Цена комплекса БПЛА 500000 руб.
- Ресурс работы ТПУ и ПДУ не менее 10 лет.
- Ресурс работы БПЛА около 300 часов.
- Цена одного БПЛА 90000 руб.

Общая цена затрат на использования БПЛА рассчитывается по формуле:

$$Ц = АБПЛА + АТПУ + СТ + СТПУ+ПУ + СЗП \quad (3.7)$$

Где: Ц – Цена эксплуатации комплекса БПЛА за 1 час;

АБПЛА — амортизация БПЛА;

АТПУ — амортизация ТПУ и ПДУ;

СТ — затраты на топливо для БПЛА;

СТПУ+ПУ — затраты на топливо для автомобилей;

СЗП — заработная плата экипажа (10 чел.). Расчет амортизация производится по формулам:

Для БПЛА:

$$АБПЛА = ЦБПЛА/РБПЛА \quad (3.8)$$

Где: ЦБПЛА – стоимость БПЛА;

РБПЛА – ресурс работы БПЛА;

$$АБПЛА = 90000/300 = 300 \text{ руб/час.}$$

Для ТПУ и ПДУ:

$$АТПУ = ЦТПУ/РТПУ \quad (3.9)$$

Где: ЦТПУ – стоимость ТПУ и ПДУ;

РТПУ – ресурс работы ТПУ и ПДУ;

Для определения стоимости ТПУ и ПДУ необходимо из стоимости комплекса вычесть стоимость четырех БПЛА:

$$ЦТПУ = ЦКБПЛА - 4 * ЦБПЛА \quad (3.10)$$

Где: ЦКБПЛА – стоимость комплекса БПЛА;

ЦБПЛА – цена одного БПЛА;

$$ЦТПУ = 500000 - 4 * 90000 = 140000 \text{ руб.}$$

Годовой фонд рабочего времени составляет 1080 часов, следовательно, ресурс работы ТПУ и ПДУ за 10 лет составляет

$$РТПУ = 1080 * 10 = 10800 \text{ часов.}$$

Амортизация ТПУ и ПДУ составит:

$$АТПУ = 140000 / 10800 = 13 \text{ руб/час.}$$

Принимая во внимание расход топлива БПЛА 2 л/час и цену топлива 30 руб/л, затраты на топлива составят:

$$С_{т} = Р_{т} * Ц_{т} \quad (3.11)$$

Где:  $Р_{т}$  – расход топлива БПЛА;

$Ц_{т}$  – цена топлива за 1 литр;

$$С_{т} = 30 * 2 = 60 \text{ руб.}$$

Принимая во внимание расход топлива автомобилей «УАЗ – 3303», 8 л/час и цену топлива 30 руб/л, затраты на топлива для ТПУ и ПДУ составят:

$$СТПУ+ПУ = СТПУ+СДУ \quad (3.12)$$

Где:  $СТПУ$  – стоимость топлива для ТПУ;

$СДУ$  – стоимость топлива для ПДУ;

Аналогично рассчитывается стоимость топлива для ТПУ и ПДУ:

$$СТПУ = 8 * 30 = 240 \text{ руб.}$$

$$СПУ = 8 * 30 = 240 \text{ руб.}$$

$$СТПУ+ПУ = 240 + 240 = 480 \text{ руб.}$$

Фонд заработной платы с учетом 22 дневного рабочего месяца по 8 часов

в сутки, рассчитываем по формуле:

$$\begin{aligned} \text{СЗП} = \text{РЗП} / (22 * 8) \quad (7) \quad \text{РЗП} = \text{ЗКМ} + \text{ЗСТ} + 2 * \text{ЗРТ} \\ + \text{ЗНР} + 2 * \text{ЗСТ.ОП} + 2 * \text{ЗОП} + \text{ЗВД} \end{aligned} \quad (3.13)$$

где РЗП – Зарплата обслуживающего персонала в месяц;

ЗКМ – зарплата командира (65 т.р.);

ЗСТ – зарплата старшего техника (53 т.р.);

ЗРТ – зарплата радиотелефониста (40 т.р.);

ЗНР – зарплата начальника расчета (47 т.р.);

ЗСТ.ОП – зарплата старшего оператора (35 т.р.);

ЗОП – зарплата оператора (30 т.р.);

ЗВД – зарплата водителя (30 т.р.);

$$\begin{aligned} \text{РЗП} = 65 + 53 + 2 * 40 + 47 + 2 * 35 + 2 * 30 + 25 = 400 \text{ т.р.} \quad \text{СЗП} = 400000 / (22 * 8) = \\ 2273 \text{ руб/час} \end{aligned}$$

Стоимость 1 час эксплуатации по БПЛА (1) составит:

$$\begin{aligned} \text{Ц} = \text{АБПЛА} + \text{АТПУ} + \text{СТ} + \text{СТПУ} + \text{ПУ} + \text{СЗП} = 300 + 13 + 60 + 480 + 2273 = 3126 \\ \text{руб/час} \end{aligned}$$

При использовании вертолетов затраты составят 130000 рублей в час, затраты на эксплуатацию БПЛА 3126 рублей в час, что в 42 раза дешевле. Следовательно, для срочности целесообразно использовать БПЛА.

## Заключение

В работе рассмотрена тема: «Иновационные технологии наблюдения за лесными пожарами в труднодоступных районах».

При исследовании было установлено следующее:

1) Лесные пожары являются естественной частью многих экосистем и случались на протяжении всей истории. Однако на возникновение и силу лесных пожаров могут влиять такие факторы, как засуха, высокие температуры и антропогенные изменения ландшафта. В некоторых регионах лесные пожары более распространены и происходят регулярно. Например, в районах со средиземноморским климатом или склонных к сезонной засухе, лесные пожары, как правило, случаются чаще. В этих регионах часто наблюдается естественный цикл пожаров как часть процессов регенерации и обновления их экосистем.

2) Кроме того, человеческая деятельность может способствовать увеличению частоты лесных пожаров. Такие факторы, как практика землепользования, вырубка лесов, изменения в землепользовании, а также случайные или преднамеренные возгорания, могут увеличить возникновение лесных пожаров в определенных районах.

Для предотвращения и ликвидации аварий, катастроф и снижения ущерба от стихийных бедствий используются следующие организационно-технические решения:

- Разработка и внедрение систем предупреждения и мониторинга. Это включает в себя установку датчиков, мониторящих состояние объектов (например, датчики для обнаружения пожара или подземных потоков воды) и систем связи для передачи предупреждающей информации в режиме реального времени.

- Создание и соблюдение строгих правил и норм безопасности. Это включает в себя обучение персонала правилам пожарной безопасности, соблюдение норм строительства и эксплуатации объектов, регламентирование

хранения и использования опасных веществ.

- Разработка и реализация планов эвакуации и аварийной помощи. Это включает в себя разработку схем эвакуации с указанием путей и выходов, организацию тренировок и учений по эвакуации, создание и обучение спасательных команд.

- Усиление конструкций и инфраструктуры объектов. Это включает в себя применение современных материалов и технологий при строительстве и реконструкции, а также усиление и модернизацию инженерных систем (например, установка дополнительных защитных стен или создание систем автоматического пожаротушения).

- Создание систем автоматического управления и контроля. Это включает в себя использование компьютеризированных систем управления для оперативного контроля состояния объектов, определения и ликвидации проблем и аварийных ситуаций.

- Организация оперативного реагирования и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. Это включает в себя создание службы спасателей, оснащенной специализированной техникой, проведение тренировок и учений, координацию действий различных служб и организаций при аварийных ситуациях.

- Разработка и внедрение систем страхования и финансовой поддержки при ЧС. Это включает в себя разработку программ страхования от аварий и стихийных бедствий, создание фондов и резервов для финансовой помощи пострадавшим, а также обеспечение финансирования проектов по предотвращению и ликвидации чрезвычайных ситуаций.

Одним из основных ограничений этих технологий, рассмотренных в работе, является их стоимость производства и срок службы. Высокая стоимость препятствует их широкому распространению, а ограниченная долговечность влияет на эффективность борьбы с лесными пожарами.

В заключительной части работы приводятся расчеты предложенных мероприятий, и рекомендуется использовать БПЛА для общего осмотра

территории вместо вертолетов. Также для общего осмотра территории наиболее целесообразным является кольцевой замкнутый маршрут. Основные достоинства этого метода – охват большой площади, оперативность и быстрота проведения мониторинга, возможность обследования труднодоступных участков местности, относительно простое планирование полетного задания и оперативная обработка полученных результатов. Маршрут полета должен обеспечивать осмотр всей рабочей зоны.

## Список литературы

1. Лесной Кодекс Российской Федерации от 4.12. 2006 № 200–ФЗ. [Электронный ресурс]. URL: [https:// base.garant.ru](https://base.garant.ru) (дата обращения: 14.12.2023)
2. Воздушный кодекс Российской Федерации от 19.03.1997 № 60–ФЗ. [Электронный ресурс]. URL: [https:// base.garant.ru](https://base.garant.ru) (дата обращения: 14.12.2023)
3. Федеральный закон от 6.05.2011 № 100–ФЗ «О добровольной пожарной охране». [Электронный ресурс]. URL: [https:// base.garant.ru](https://base.garant.ru) (дата обращения: 14.12.2023)
4. Федеральный закон от 21.12.1994 № 69–ФЗ «О пожарной безопасности». [Электронный ресурс]. URL: [https:// base.garant.ru](https://base.garant.ru) (дата обращения: 14.12.2023)
5. Федеральный закон от 22.07.2008 № 123–ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности». [Электронный ресурс]. URL: [https:// base.garant.ru](https://base.garant.ru) (дата обращения: 14.12.2023)
6. Федеральный закон от 21.12.1994 № 68–ФЗ «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера». [Электронный ресурс]. URL: [https:// base.garant.ru](https://base.garant.ru) (дата обращения: 14.12.2023)
7. Указ Президента Российской Федерации от 11.01.2018 № 12 «Об утверждении Основ государственной политики Российской Федерации в области защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций на период до 2030 года». [Электронный ресурс]. URL: [https:// base.garant.ru](https://base.garant.ru) (дата обращения: 10.12.2023)
8. Указ Президента Российской Федерации от 01.01.2018 № 2 «Об утверждении Основ государственной политики Российской Федерации в области пожарной безопасности на период до 2030 года». [Электронный ресурс]. URL: [https:// base.garant.ru](https://base.garant.ru) (дата обращения: 10.12.2023)
9. Указ Президента РФ от 09.11.2001 № 1309 «О совершенствовании государственного управления в области пожарной безопасности». [Электронный ресурс]. URL: [https:// base.garant.ru](https://base.garant.ru) (дата обращения: 10.12.2023)

10. Указ Президента РФ от 11.07.2004 № 868 «Вопросы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий». [Электронный ресурс]. URL: [https:// base.garant.ru](https://base.garant.ru) (дата обращения: 10.12.2023)

11. Постановление Правительства Российской Федерации от 12.04.2012 № 290 «О федеральном государственном пожарном надзоре». [Электронный ресурс]. URL: [https:// base.garant.ru](https://base.garant.ru) (дата обращения: 8.12.2023)

12. Постановление Правительства Российской Федерации от 25.04.2012 № 390 «О противопожарном режиме». [Электронный ресурс]. URL: [https:// base.garant.ru](https://base.garant.ru) (дата обращения: 8.12.2023)

13. Постановление Правительства РФ от 29.06.2017 № 774 «О внесении изменений в Положение о федеральном государственном пожарном надзоре». [Электронный ресурс]. URL: [https:// base.garant.ru](https://base.garant.ru) (дата обращения: 8.12.2023)

14. Постановление Правительства Российской Федерации от 20.06.2005 г. № 385 «О федеральной противопожарной службе Государственной противопожарной службы». [Электронный ресурс]. URL: [https:// base.garant.ru](https://base.garant.ru) (дата обращения: 8.12.2023)

15. Постановление Правительства РФ от 31.01.2012 № 69 «О лицензировании деятельности по тушению пожаров в населенных пунктах, на производственных объектах и объектах инфраструктуры, по тушению лесных пожаров». [Электронный ресурс]. URL: [https:// base.garant.ru](https://base.garant.ru) (дата обращения: 7.12.2023)

16. Постановление Правительства РФ от 12.04.2012 № 290 «О федеральном государственном пожарном надзоре». [Электронный ресурс]. URL: [https:// base.garant.ru](https://base.garant.ru) (дата обращения: 7.12.2023)

17. Постановление Правительства РФ от 14.01.2003 № 11 «О Правительственной комиссии по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций и обеспечению пожарной безопасности». [Электронный ресурс]. URL: [https:// base.garant.ru](https://base.garant.ru) (дата обращения: 7.12.2023)

18. Постановление Правительства Российской Федерации «Об

утверждении Правил привлечения сил и средств подразделений пожарной охраны для ликвидации чрезвычайной ситуации в лесах, возникшей вследствие лесных пожаров» от 5.05.2011 г. № 344. [Электронный ресурс]. URL: <https://base.garant.ru> (дата обращения: 7.12.2023)

19. Постановление Правительства Российской Федерации «Об утверждении Правил разработки сводного плана тушения лесных пожаров на территории субъекта Российской Федерации» от 18.05.2011 года № 378. [Электронный ресурс]. URL: <https://base.garant.ru> (дата обращения: 5.12.2023)

20. Постановление Правительства Российской Федерации от 11.03.2010 № 138 «Об утверждении Федеральных правил использования воздушного пространства Российской Федерации. Инструкция по авиационной охране лесов, утверждена приказом Федеральной службы лесного хозяйства России» от 22.09.1997 № 122. [Электронный ресурс]. URL: <https://base.garant.ru> (дата обращения: 5.12.2023)

21. Приказ Министерства чрезвычайных ситуаций Российской Федерации от 16.10.2017 № 444 «Об утверждении боевого устава пожарной охраны, определяющего порядок организации тушения пожаров и проведения аварийно-спасательных работ». [Электронный ресурс]. URL: <https://fireman.club/normative-documents/prikaz-mchs-> (дата обращения: 15.12.2023)

22. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 8.07.2014 № 313 «Об утверждении Правил тушения лесных пожаров». [Электронный ресурс]. URL: <https://base.garant.ru> (дата обращения: 17.12.2023)

23. Приказ МЧС России от 26.10.2017 № 472 «Об утверждении Порядка личного состава пожарной охраны». 24. Приказ МЧС России от 20.12.2013 № 815 «Об организации, планировании, финансировании и ведении научно-практической работы в системе МЧС России». [Электронный ресурс]. URL: <https://base.garant.ru> (дата обращения: 17.12.2023)

24. Приказ Главного управления лесами Челябинской области от

14.03.20111 № 134 «Об утверждении порядка формирования и учета затрат на тушение лесных пожаров». [Электронный ресурс]. URL: [https:// base.garant.ru](https://base.garant.ru) (дата обращения: 17.12.2023)

25. Приказ Главного управления лесами Челябинской области от 14.03.20111 № 134 «Об утверждении порядка формирования и учета затрат на тушение лесных пожаров». [Электронный ресурс]. URL: [https:// base.garant.ru](https://base.garant.ru) (дата обращения: 17.12.2023)

26. ГОСТ Р 22.0.05.-94. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Техногенные чрезвычайные ситуации. Принят и введен в действие Постановлением Госстандарта России от 26.12.1994 № 362.

27. ГОСТ 17.6.1.01–83 Охрана природы. Охрана и защита лесов. Термины и определения. Введен в действие постановлением Госстандарта СССР от 19.12.1983 г. № 6263. [Электронный ресурс]. URL: [https://ohranatruda.ru>upload/iblock/6cc/4294851900.pdf](https://ohranatruda.ru/upload/iblock/6cc/4294851900.pdf) (дата обращения: 19.12.2023)

28. Абдулвалиев В.Ф. Труднодоступная местность как особое географическое условие // Юридическая наука и правоохранительная практика. 2018.- С. 138-145.

29. Беляев, Б. И. Применение видеоспектральных данных авиационных съемок для оценки последствий лесных пожаров / Б. И. Беляев // Тр. Белорус. гос. технолог. ун-та. Сер. I. - Минск: Лесное хоз-во, 2015. - Вып. 11. - С. 133-141

30. Вавин, В.С. Классификация лесных пожаров / В.С.Вавин // Материалы научно-практической конференции аспирантов и молодых ученых. 2018 - С. 58 – 60.

31. Власов А.А. Адвокат в судопроизводстве: краткий учеб. курс. - М.: Норма, 2017. - 304 с.

32. Зайцев, А.Б., Беспилотные летательные аппараты зарубежных стран / Зайцев А.Б., Назарчук И.Д // Материалы VIII Всероссийской научной конференции, 2016. – С. 123 – 125.

33. Кагарманова, Р.М. Применение беспилотных летательных аппаратов

для мониторинга пожарной опасности в Челябинской области / Р.М. Кагарманова, // Материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции магистрантов, аспирантов и молодых ученых, 2018. – С. 215–217.

34. Кагарманова, Р.М. Сравнительный анализ БПЛА / Р.М. Кагарманова, Г.А. Полунин // Молодой исследователь. ЮУрГУ. – Материалы четвертой научной выставки конференции научно-технических работ студентов, 2017.– С. 167 – 169.

35. Крылова, А.А. Лесная пирология. Авиационные методы обнаружения лесных пожаров / Крылова А.А. Безопасность жизнедеятельности: сборник материалов VI Всероссийской научно-практической конференции, 2022. – С.57-58.

36. Свакунов, Л.А. Мониторинг пожароопасной обстановки в лесах / Л.А. Свакунов // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы, 2017. – № 6. – С.645-647.

37. Смоляков, А.В. Перспективы и проблемы гражданского применения беспилотных летательных аппаратов / А.В. Смоляков, Б.О. Курзаков // Журнал «Авиационно-космическая техника и технология» – 2016. – Вып.14 – С.60-64.

38. Смоляков, О.Е. Системное имитационное моделирование основных характеристик беспилотных авиационных комплексов / А.В. Смоляков, О.Е. Федорович // Авиационная космическая техника и технология. Вып.5 (31), 2016. – С 39 – 42.

39. Степанов, Д.Н. Задача моделирования полета беспилотного летательного аппарата на основе системы технического зрения / Д.Н. Степанов, И.П. Тищенко // Программные системы: Теория и приложения, 2017.- № 4 (8). – с.33-34.

40. Беспилотные системы // официальный сайт фирмы ОАО ZALA AERO GROUP. [Электронный ресурс]. URL: <https://zala.aero> (дата обращения: 17.12.2023)