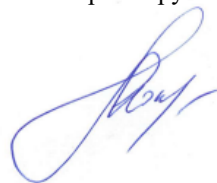


**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего  
образования «Московский авиационный институт (национальный  
исследовательский университет)»

На правах рукописи



Мокрова Мария Игоревна

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МОНИТОРИНГА ПОЖАРНОЙ  
ОБСТАНОВКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО  
АППАРАТА НА ОСНОВЕ АДАПТИВНОГО АЛГОРИТМА**

Специальность

2.3.1. «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика»  
(технические науки)

Автореферат

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2022 год

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: Козорез Дмитрий Александрович, доктор технических наук, доцент, проректор по учебной работе, профессор кафедры «Информационно-управляющие комплексы» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Официальные оппоненты: Холостов Александр Львович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Специальной электротехники автоматизированных систем и связи» ФГБОУ ВО «Академия Государственной противопожарной службы МЧС России»

Ведущая организация: Пашенко Василий Николаевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Мехатроника и робототехнические системы» КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»

Защита диссертации состоится «22» декабря 2022 года в «16:00» часов на заседании диссертационного совета 24.2.327.03 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» и на сайте МАИ по ссылке: [https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT\\_ID=168806](https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=168806)

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2022 года.

Отзывы, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 125993, Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, Ученый совет МАИ.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 24.2.327.03  
доктор технических наук, доцент



Старков А.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы и степень разработанности темы.** Стремительное развитие возможностей бортовых систем летательных аппаратов (ЛА) позволило использовать более сложные и ресурсоемкие алгоритмы, а снижение массогабаритных характеристик и энергопотребления датчиков и вычислителей дает возможность реализации их даже на малоразмерных беспилотных летательных аппаратах (МБЛА).

В течение последних десятилетий отмечается существенный рост интереса к данному классу беспилотных летательных аппаратов (БЛА), обусловленный, в частности, низкой стоимостью их эксплуатации, а также значительно более низкими, в сравнении с пилотируемыми и крупноразмерными беспилотными аппаратами, затратами на подготовку операторов.

В настоящее время МБЛА активно используются для решения задач в интересах МЧС, министерства обороны, МВД, коммерческих структур, включая разведывательные задачи, а также задачи поиска, обнаружения, целеуказания и слежения. Этот перечень включает и рассматриваемые в данной работе задачи мониторинга чрезвычайных ситуаций, связанных с пожаром. Существующий опыт убедительно показывает, что использование МБЛА как в автоматическом, так и в автоматизированном режиме для решения задач военного и гражданского назначения, приводит к повышению эффективности таких операций за счёт большей площади обследуемой местности, а также оперативности детектирования объектов интереса, поскольку современные МБЛА, оснащенные системами технического зрения (СТЗ), позволяют проводить обследование районов и автоматически обнаруживать людей и другие объекты поиска.

Эффективность мониторинга пожарной обстановки существенно зависит от условий выполнения операции: задымленности наблюдаемой сцены, турбулентности атмосферы, теплового воздействия пожара и высота наблюдения. Сложность задачи выбора высоты наблюдения состоит в том, что уменьшение высоты полёта влечет повышение риска потери БЛА из-за воздействия опасных факторов пожара (ОФП). В то же время, без снижения БЛА над наблюдаемой сценой объекты интереса (ОИ) остаются недоступными для обнаружения и распознавания. Таким образом, учёт экстремальных условий функционирования БЛА, а также анализ условий наблюдаемости постигающей поверхности дают возможность обосновать оптимальную, с точки зрения минимизации риска потери БЛА и максимизации вероятности обнаружения ОИ, высоту полёта. Однако, на данный момент остается нерешенной задача выбора оптимальной, с точки зрения эффективности мониторинга, высоты полёта БЛА для обследования местности в подобных условиях.

При решении указанной задачи оптимизации высоты полёта БЛА в процессе мониторинга пожарной обстановки необходимо учитывать тот факт, что объекты, попавшие под воздействие пожара, могут быть как инфраструктурными или природными, так и человеческими ресурсами. Очевидно, что существует возможность прогнозировать потери первых двух видов перечисленных ресурсов. Очевидно также, что прогноз потерь человеческого ресурса наиболее сложный для анализа, и, более того, остаётся наиболее приоритетным.

**Целью настоящей работы** является минимизация ущерба, наносимого пожаром человеческим ресурсам, путем повышения эффективности обнаружения объектов интереса в очагах пожара с учетом минимизации потерь БЛА.

Сформулированная цель определяет необходимость решения актуальной **научно-технической задачи** разработки алгоритма определения оптимальной, с точки зрения выбранного критерия эффективности, высоты полёта БЛА над наблюдаемой сценой в процессе выполнения мониторинга пожарной обстановки, обеспечивающего достижение поставленной цели, а также учитывающего ОФП.

В соответствии с поставленной задачей проводились исследования по следующим **направлениям**:

- анализ существующих проектов в области создания БЛА, а также состояние исследований в области разработки методов и алгоритмов управления БЛА при мониторинге пожарной обстановки,
- анализ существующих методов предварительной обработки зашумленных изображений для дальнейшего распознавания ОИ,
- разработка алгоритма выбора оптимальной, с точки зрения выбранного критерия эффективности, высоты полёта БЛА над наблюдаемой сценой в процессе выполнения мониторинга пожарной обстановки,
- разработка математических моделей пожарной обстановки,
- формирование критерия, характеризующего эффективность мониторинга пожарной обстановки с помощью БЛА,
- создание программного комплекса имитационного моделирования процесса оптимизации высоты полёта БЛА с использованием разработанного алгоритма,
- проведение имитационного моделирования с использованием созданного программного комплекса с учетом различных значений параметров, отражающих воздействие факторов пожара, для подтверждения адекватности созданных моделей и алгоритмов,

- анализ полученных результатов и формирование рекомендаций для бортовой реализации разработанного алгоритма,
- проведение экспериментальных полетов над задымленной местностью для подтверждения работоспособности алгоритма и анализ результатов.

**Объектом исследования** является БЛА, ориентированный на задачи мониторинга местности с целью поиска объектов интереса.

**Предмет исследования** – алгоритм определения оптимальной, с точки зрения разработанного критерия, высоты полёта БЛА при выполнении мониторинга пожарной обстановки.

Основным **методом исследования** является математическое моделирование.

**Основные положения**, выносимые на защиту:

- модель безопасности полёта БЛА при выполнении мониторинга пожарной обстановки, учитывающая тепловое воздействие ОФП, а также свойства подстилающей поверхности,
- модель наблюдаемости объектов интереса на наблюдаемой сцене при выполнении БЛА мониторинга пожарной обстановки, учитывающая воздействие факторов окружающей среды, таких как влажность воздуха, задымленность, освещенность, тип подстилающей поверхности, высота объектов и плотность дыма,
- критерий оптимальности выбора высоты полёта БЛА над очагом пожара при выполнении мониторинга, использующий разработанные модели,
- подход к оптимизации высоты полёта БЛА над областью пожара при выполнении мониторинга с учетом комплекса противоречивых требований,
- адаптивный алгоритм повышения эффективности мониторинга пожарной обстановки, допускающий возможность использования различных методов обработки изображений в зависимости от условий наблюдения и высоты полета,
- результаты полунатурных летных экспериментов, подтвердившие адекватность использованных моделей оценки достоверности обнаружения ОИ в условиях пожара, а также эффективность разработанного алгоритма оптимизации высоты полета БЛА и адаптивной обработки изображений.

**Научная новизна** полученных в диссертационной работе результатов заключается в следующем:

- впервые предложен подход к выбору оптимальной высоты полёта БЛА при мониторинге пожарной обстановки, учитывающий экстремальные условия проведения операции,
- разработан оригинальный специализированный программный комплекс имитационного моделирования, обеспечивающий реализацию адаптивного алгоритма определения оптимальной высоты полета БЛА и подтверждающий его эффективность.

**Обоснованность результатов** проведенного диссертационного исследования подтверждается:

- результатами обширного и содержательного анализа работ в исследуемой и смежных с ней предметных областях,
- результатами математического моделирования, подтверждающими адекватность разработанного критерия выбора оптимальной высоты полёта БЛА,
- результатами полунатурных летных экспериментов, подтвердивших эффективность разработанных алгоритмов и моделей наблюдаемости сцены,
- апробацией материалов диссертации на научно-технических конференциях и в опубликованных работах.

**Степень достоверности результатов** проведенных диссертационных исследований подтверждается:

- корректным применением современных методов исследования и результатами имитационного моделирования,
- экспериментальными данными.

**Научная значимость работы** состоит в разработке критерия, позволяющего выбрать оптимальную высоту полёта БЛА при мониторинге пожарной обстановки с учетом факторов, влияющих как на безопасность полёта БЛА над очагом пожара, так и на наблюдаемость ОИ.

**Практическая значимость** результатов работы состоит в повышении эффективности применения авиационного мониторинга пожара с целью обнаружения и распознавания ОИ.

**Личный вклад автора** диссертации заключается в разработке моделей воздействия окружающей среды на БЛА, а также критерия выбора оптимальной высоты полета БЛА. С использованием этих моделей автором проведен анализ условий наблюдаемости ОИ и воздействия ОФП на БЛА, а также реализованы полунатурные эксперименты с использованием МБЛА. Все результаты

исследований, приведенные в диссертации, получены автором лично и доложены им на международных и всероссийских конференциях.

**Апробация результатов работы** происходила на следующих научно-технических конференциях, конкурсах и семинарах различного уровня: XLII, XLIII Международные молодежные научные конференции «Гагаринские чтения» (г.Москва, 2016, 2017), XXI, XXII международные конференции «Системный анализ, управление и навигация» (г.Евпатория, 2016, 2017) 15-я, 17-я, 18-я, 19-я Международные конференции «Авиация и космонавтика» (г.Москва, 2016, 2018, 2019, 2020), XI Всероссийской студенческой научно-технической школы-семинара «Аэрокосмическая декада» (г.Алушта, 2017), IV Общероссийской молодежной научно-технической конференции «Старт» (г.Санкт-Петербург, 2018), Всероссийские НТК «Техническое зрение в системах управления» (г.Москва, 2019, 2020), V Всероссийский научно-практический семинар «Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта» (г.Санкт-Петербург, 2019), 12-я, 13-я Международные конференции «Developments in eSystems Engineering» (г.Казань, 2019, 2020), Молодежная научная конференция «АНТОК» (г.Москва, 2020), Международная мультидисциплинарная конференция по промышленному инжинирингу и современным технологиям «FarEastCon» (г.Владивосток, 2020), Международная конференция «Беспилотные летательные аппараты» (г. Москва, 2020), XI Международная НТК «Проблемы совершенствования робототехнических и интеллектуальных систем летательных аппаратов» (г.Москва, 2020), 16-я Всероссийская научно-практическая конференция «Перспективные системы и задачи управления» (п.Домбай, Карачаево-Черкесская республика, 2021), 15th Siberian Conference on Control and Communications (г.Казань, 2021), V Всероссийская конференция «Системы управления беспилотными космическими и атмосферными летательными аппаратами» (г.Москва, 2022).

**Публикации.** Основные положения настоящей диссертационной работы, включая результаты её практического применения, опубликованы в 11 статьях [1-11], в том числе в 3 статьях [1-3], опубликованных в изданиях из Перечня ВАК Минобрнауки России, в 8 статьях [4-11], опубликованных в научных изданиях, индексируемых в Scopus, а также в сборниках тезисов докладов конференций, семинаров [12-22], в том числе индексируемых в РИНЦ.

**Объём и структура работы.** Работа состоит из введения, трех глав и заключения, изложенных на 122 страницах основного текста, включая 68 рисунка, 20 таблиц, 25 формул и 64 наименования литературных источников.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Введение** диссертационной работы посвящено обоснованию актуальности выбранной темы исследования, научной новизны и практической значимости решаемой задачи оптимизации высоты полета БЛА в процессе мониторинга пожарной обстановки. Во введении содержится анализ противоречивости условий проведения мониторинга, что, в свою очередь, приводит к необходимости постановки оптимизационной задачи исследования, а также изложена общая характеристика работы.

**В первой главе** работы изложены результаты анализа современного состояния исследований и разработок в области мониторинга пожарной обстановки с использованием БЛА. Имеющиеся статистические данные потерь вследствие пожаров подтверждают актуальность и востребованность повышения эффективности мониторинга пожара с целью сокращения потерь. В первой главе содержится описание общепринятых подходов к решению обсуждаемой проблемы поиска ОИ. Изложен обзор и анализ используемых в работе программных инструментов. Описаны современные подходы к классификации пожарной опасности, а также особенности, характеристики и варианты динамики пожара каждого класса, оценена возможность применения авиационного мониторинга при различных классах пожара. Приведен анализ текущих разработок в сфере мониторинга пожарной обстановки. Показано, что современные достижения позволяют с необходимой точностью локализовать очаг возгорания, получить геометрические характеристики, а также оценить динамику пожара. Как показывает существующий опыт, для поиска объектов в пожарной обстановке самым эффективным остается авиационный мониторинг. При этом, при выборе высоты полета БЛА необходимо учитывать особые условия проведения мониторинга местности, охваченной пожаром.

Традиционные методы оценки поиска опираются на вероятность обнаружения, зависящую от дальности до объекта, которая описывается зависимостью, показанной на рис.1. При мониторинге местности условия наблюдения уникальны для каждой ситуации, и коэффициенты этих кривых выбираются эмпирически индивидуально для каждого случая. Главный недостаток такого подхода в том, что упомянутые зависимости априори предполагают постоянство условий наблюдения, в связи с чем использование их для оценки мониторинга пожарной обстановки при динамически изменяемых условиях пожара неприемлемо. Следовательно, возникает задача разработки критерия оценки эффективности мониторинга, а также моделей, учитывающих изменяющиеся условия окружающей среды, коррелированных с традиционными показателями.



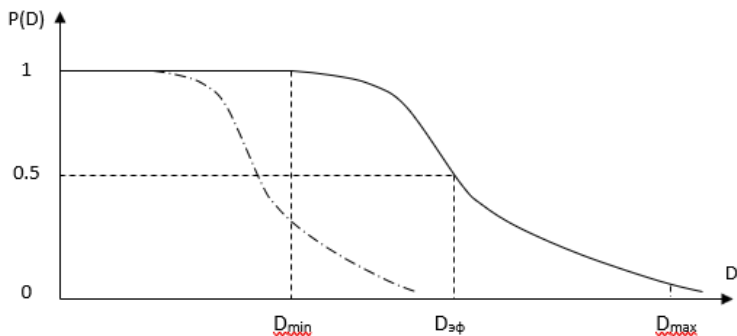


Рис.1. Зависимость вероятности обнаружения от дальности до объекта

Как известно, существуют критерии эффективности мониторинга, такие, как производительность, вероятность пропуска цели, время поиска и т.д., при определении которых используется значение вероятности правильного обнаружения. Таким образом, целесообразно считать данную вероятность наиболее существенным показателем качества мониторинга, так как она должна быть определена независимо от показателя эффективности поиска. Однако, применительно к мониторингу пожарной обстановки задача оценки эффективности усложняется. Иными словами, при неизменяющихся условиях наблюдаемости для оценки эффективности используются зависимости  $P(D)$ , приведенные на рис.1. В то время как для мониторинга пожарной обстановки на данный момент отсутствуют приемлемые для практического применения модели или методы оценки эффективности, что делает управление поисковыми средствами неэффективным.

В данной работе развит подход к оценке эффективности мониторинга, основанный на использовании эвристических моделей пожарной обстановки с учетом безопасности полета БЛА и наблюдаемости ОИ.

В рамках данного исследования под наблюдаемостью понимается возможность обнаружения и распознавания объекта с учетом его изменяющихся свойств с необходимым уровнем достоверности.

**Во второй главе** предложен подход к решению задачи повышения эффективности мониторинга пожарной обстановки на основе анализа факторов, влияющих на наблюдаемость ОИ и безопасность полета БЛА.

Вследствие того, что площади, охваченные пожаром, могут быть достаточно протяженными, характеристики пожарной обстановки могут быть различны. С целью учета этого факта в данной главе автором предложена классификация пожарной обстановки, основанная на использовании существующих алгоритмов, перечисленных в первой главе. В рамках

развиваемого подхода обследуемая местность разделяется на  $F$  областей согласно предложенной классификации. Каждой области присваивается свой номер  $f$  ( $f \in F$ ). Поскольку в каждой области пожара тип подстилающей поверхности, ОФП, а также воздействие окружающей среды имеют разные характеристики, в результате чего условия наблюдаемости ОИ и безопасности полета БЛА различны, в дальнейшем каждая из областей обследуется отдельно.

Далее вторая глава содержит описание разработанных моделей наблюдаемости ОИ и безопасности полета БЛА в условиях пожарной обстановки.

*Модель наблюдаемости ОИ.* Принимаемое на борту изображение представляет собой матрицу яркостей, формируемую бортовой ПЗС матрицей. В свою очередь, яркость зависит от контрастности изображения и шумов ПЗС матрицы. Как известно, шумы ПЗС-матрицы представляют собой случайные величины с известными характеристиками, зависящими от качества аппаратуры, а не от факторов пожарной обстановки, поэтому упомянутые характеристики шумов далее в работе не обсуждаются, т.е. считаются заданными.

В диссертации описана разработанная эмпирическая модель контрастности (1) принимаемого на борту изображения, значение которой уменьшается с увеличением высоты полета, а также в условиях пожара вследствие присутствия в дыме мелких твёрдых частиц, находящихся во взвешенном состоянии.

$$K_f(h) = K_{fmax} \left[ 1 - \frac{1}{1 + e^{-k_a^f(h-h_a^f)}} \right], \quad (1)$$

где  $K_f(h)$  – контрастность изображения принимаемого на высоте  $h$ ;  $k_a$  – эмпирический коэффициент, зависящий от условий наблюдения, главным из которых является задымленность, следует отметить, что уровень задымленности, влияющий на данный коэффициент, выбирается средним для всей площади, охватываемой углом обзора камеры;  $h_a$  – эмпирический коэффициент, учитывающий условия пожарной обстановки, такие как плотность, интенсивность и наличие дыма на наблюдаемой сцене, а также вид и характеристики подстилающей поверхности, высоту и плотность насаждений;  $f \in F$  – индекс области пожара;  $K_{fmax}$  – максимальная возможная контрастность на данной местности;  $a$  – индекс наблюдаемости ОИ. Зависимость (1) была апробирована в ряде экспериментов, описанных в третьей главе работы.

На основе зависимости (1) предложена модель наблюдаемости ОИ применительно к области с номером  $f$ :

$$W_a^f(h) = 1 - \frac{1}{1 + e^{-k_a^f(h-h_a^f)}}, \quad (2)$$

где  $W_a^f$  – достоверность обнаружения ОИ – параметр, характеризующий уровень наблюдаемости ОИ. Объект будет абсолютно наблюдаемым, если значение  $W_a^f$  (достоверность его обнаружения) равна единице. Здесь и в дальнейшем под достоверностью понимается среднее значение количества обнаружений ОИ, полученное при конкретных условиях в диапазоне значений зависящих от них параметров.

*Модель безопасности полета БЛА.* Пожарная обстановка сопровождается наличием высоких температур, что влияет на безопасность полета БЛА. Под безопасностью полета в работе понимается достоверность события успешного мониторинга, т.е. отсутствие аварии или повреждения БЛА. Так как температура воздуха при пожаре является непостоянной величиной, то и безопасность полета БЛА, зависящая от температуры, будет варьироваться во времени.

С учетом градиента температур над местностью, охваченной пожаром, а также класса пожара и типа местности, разработана модель безопасности полёта БЛА, учитывающая перечисленные факторы. Предлагаемый вид данной модели безопасности полета БЛА представлена зависимостью (3).

$$W_s^f = \frac{1}{1 + e^{-k_s^f(h - h_s^f)}}, \quad (3)$$

где  $W_s^f$  – достоверность безопасного полета БЛА;  $k_s$  – эмпирический коэффициент, выбираемый с учетом интенсивности огня, которая определяется классом пожара, расположением и густотой насаждений, условиями полета;  $h_s$  – эмпирический коэффициент, учитывающий условия пожарной обстановки: объем и высоту пламени, а также вид и характеристики подстилающей поверхности, высоту и плотность насаждений;  $s$  – индекс критерия безопасности полета. Модель имеет вид сигмоиды (рис.2), характеризующей тенденцию зависимости снижения высоты и безопасности полета БЛА.

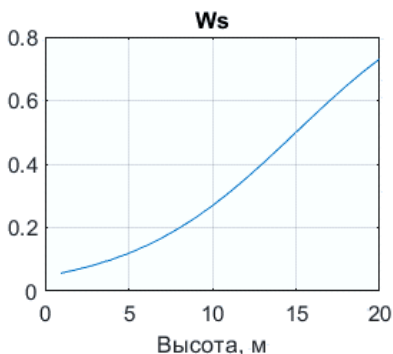


Рис.2. Модель безопасности полета БЛА

Во второй главе сформулированы формирующие базу знаний (БЗ) правила выбора параметров разработанных моделей. БЗ может пополняться и расширяться за счет количества учитываемых в представленных моделях наблюдаемости ОИ и безопасности полета БЛА факторов, которые, в свою очередь, влияют на «настройку» моделей. Конкретный вид данных сигмоид (2) и (3), в частности, их наклон и сдвиг, определяются выбранными, в соответствии с разработанными правилами параметрами моделей.

*Критерий выбора оптимальной высоты полета БЛА.* Из сказанного выше следует, что мониторинг пожаров с помощью БЛА представляет собой задачу оптимизации, определяемую двумя противоречивыми факторами, а именно: существует необходимость максимально обезопасить БЛА от теплового воздействия пожара, повышая высоту полета, и одновременно максимально улучшить наблюдаемость, что может быть достигнуто за счёт снижения высоты. С учетом этого, в качестве критерия оптимальности высоты полета БЛА выбраны соотношения, использующие понятия относительных потерь по безопасности полета БЛА и наблюдаемости ОИ:

$$R_{\Sigma} = R_s + R_a, \quad R_s = a_s(1 - W_s), \quad R_a = a_a(1 - W_a), \quad (4)$$

где  $R_{\Sigma}$  – общие (суммарные) относительные потери,  $R_s$  – относительные потери, связанные с безопасностью полета,  $R_a$  – относительные потери, связанные с ошибкой обнаружения. Значения  $W_a$  и  $W_s$  вычисляются с помощью (2) и (3).

Вариантом поставленной задачи повышения эффективности мониторинга может являться один из следующих:

- минимизация потерь аппаратов при ограничении уровня достоверности обнаружения:

$$\min R_s, \quad \text{при } W_a \geq W_a^0; \quad (5)$$

- максимизация достоверности обнаружения при ограничении безопасности полета МБЛА:

$$\max W_a, \quad \text{при } W_s \geq W_s^0; \quad (6)$$

- минимизация общего уровня потерь:

$$\min R_{\Sigma} \quad (7)$$

Значение высоты полета, определяющей минимум или максимум выбранного в постановке задачи критерия, зависит от параметров моделей, а также выбора нормированных коэффициентов ранжирования потерь, определяемых экспертно.

Общие потери при мониторинге, в соответствии с изложенными рассуждениями, для каждой области пожара  $f$  определяются как:

$$R_{\Sigma}^f(h) = a_a \left[ 1 - \frac{1}{1 + e^{-k_a^f(h-h_a^f)}} \right] + a_s \frac{1}{1 + e^{-k_s^f(h-h_s^f)}} \quad (8)$$

Минимум данной функции при варианте постановке задачи, сформулированной в (7), определяет оптимальную высоту полета БЛА над конкретной областью  $f$  местности с пожарной обстановкой:

$$h_{opt} = \arg[\min R_{\Sigma}(h)], \quad (9)$$

где  $h_{opt}$  – оптимальная, с точки зрения критерия (8), высота полета БЛА.

*Адаптивный алгоритм повышения эффективности мониторинга пожарной обстановки.* Функциональная схема описываемого алгоритма приведена на рис 3.

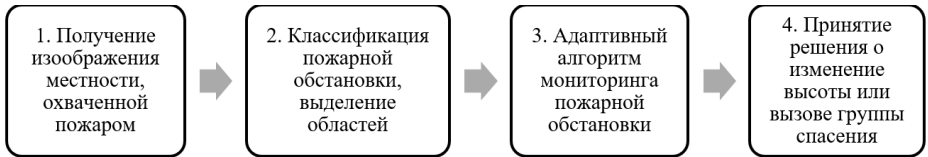


Рис.3. Функциональная схема алгоритма

Данный алгоритм можно интерпретировать как адаптивный вследствие того, что в соответствии с различными классами пожарной обстановки, определяемыми на этапе 2 (рис.3), обследуемая местность разделяется на области, для каждой из которых в соответствии с предложенным критерием, адаптирующимся под динамически изменяемые условия пожара, назначается своя высота полета. При этом в процессе мониторинга адаптивно, т.е. с учетом характеристик наблюдаемости сцены, выбирается метод предварительной обработки изображения, который повышает эффективность мониторинга. Проведенный анализ позволил выделить наиболее эффективные применительно к данной задаче виды методов и алгоритмов предварительной обработки изображений, перечисленные в таблице 1.

Таблица 1. Перспективные методы предварительной обработки изображений

№ п.п.	Класс метода	Используемый подход	Примечание
1.	Глобальные методы	Преобразование Фурье	Применение ФВЧ Баттерворта
2.			Применение ФВЧ Гаусса
3.	Локальные методы	Повышение контрастности	За счет нахождения математического ожидания (МО) яркостей и введения весового коэффициента
4.	Нейросетевые методы	Генеративно-состязательная сеть pix2pix	Применение для обучения НС шума Перлина
5.			Применения для обучения НС моделируемого тумана низкой и высокой плотности

Основная сложность использования предложенного алгоритма заключается в выборе метода обработки применительно к фактическим условиям наблюдаемости. Реализовать адаптацию выбора метода обработки к характеристикам наблюдаемости сцены предлагается на основе гистограммы получаемого на борту изображения местности. Для изображений с гистограммами вида (рис.4(а)) с равномерным распределением яркостей выбирается обработка глобальными методами, (рис.4(б)) с трудноразличимой границей объект-фон – локальными, (рис.4(в)) с явным наличием двух или более экстремумов – нейросетевыми.

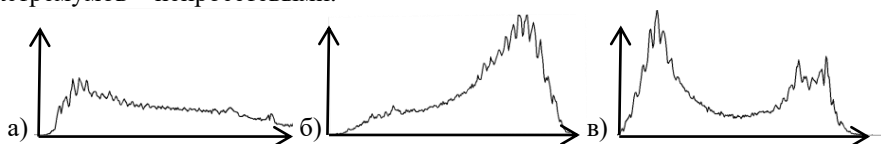


Рис. 4. Виды гистограмм задымленных изображений

Таким образом, предполагается, что с целью максимизации эффективности мониторинга пожарной обстановки при анализе каждой области полет БЛА происходит на оптимальной, с точки зрения предложенного критерия, высоте, а также используется наиболее эффективный метод обработки изображения.

В результате сформирован облик системы мониторинга, имеющей адаптивную структуру, функциональная схема которой приведена на рис.5. За счет описанной структуры обеспечивается повышение эффективности мониторинга при сильной задымленности, то есть при классе пожарной обстановки, при котором единственным возможным способом повышения эффективности мониторинга остается снижение. Предложенный алгоритм обеспечивает адаптацию к динамически изменяющимся условиям пожарной

обстановки за счет выбора коэффициентов моделей (2), (3) и адаптивного режима обработки изображения, а также снижения высоты полета БЛА в случае ухудшения условия наблюдения.



Рис.5. Функциональная схема адаптивного мониторинга

В третьей главе описаны результаты математического моделирования и полунатурных экспериментов, подтвердивших адекватность модели наблюдаемости, ее работоспособность, а также эффективность предлагаемого алгоритма в целом.

Для оценки повышения эффективности мониторинга пожарной обстановки было проведено имитационное математическое моделирование этого процесса при различных условиях наблюдаемости объектов интереса и безопасности полета БЛА. При этом была проведена экспериментальная отработка критерия (8), в ходе которой последовательно варьировались эмпирические коэффициенты моделей (рис.6): изменялись характеристики подстилающей поверхности, а также влажность воздуха, сила пожара, густота и высота насаждений, высота пламени, задымленность, интенсивность дыма, учитываемые в критериях. Коэффициенты ранжирования потерь задавались равными.

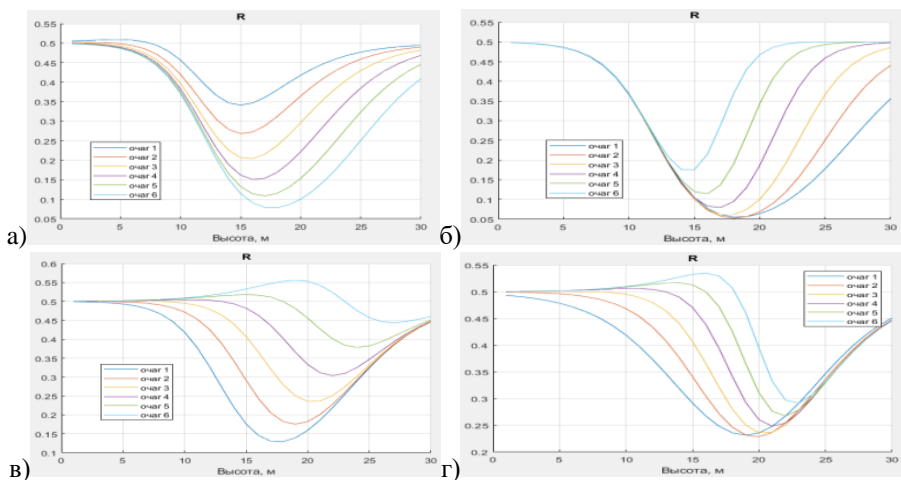


Рис.6. Результаты моделирования: общие потери при варьировании параметров моделей

Как следует из зависимостей, представленных на рис.6(а), изменение густоты насаждений ( $h_a^f$ ) влияет на уровень потерь, так как сильное изменение высоты невозможно с учетом безопасности полёта. Варьирование коэффициента  $h_s^f$  (рис.6(в)), учитывающего ограничение высоты по безопасности, при прочих равных условиях, как и интенсивность пожара ( $k_s^f$ ) (рис.6(г)) приводят к изменению оптимальной высоты полета. Данные зависимости демонстрируют факт адекватности критерия применительно к изменению условий пожарной обстановки, или, иными словами, к изменению условий, влияющих на безопасность полёта и наблюдаемость.

Для подтверждения адекватности разработанной эвристической модели наблюдаемости ОИ, необходимой для расчета общего критерия (8), была проведена серия лабораторных экспериментов, в ходе которых оценивалась достоверность распознавания ОИ при варьировании условий наблюдения, таких как высота съемки ОИ и контрастность наблюдаемой сцены. Была получена выборка, аппроксимированная методом наименьших квадратов с предварительным устранением из нее случайных выбросов (рис.7). В результате показано, что вид аппроксимирующей кривой близок к предложенной аналитической зависимости модели наблюдаемости (2).

Кроме этого, адекватность предложенной модели доказана с помощью летных полунатурных экспериментов. Первый эксперимент был организован следующим образом: была использована, т.н. «метка», т.е. эталон контрастности (рис.8(а)), сцена задымлялась (рис.8(б)), варьировалась высота полета, и



фиксируется факт «захвата» метки с помощью контурных методов. Целью эксперимента было выявление зависимости высоты «захвата» метки от уровня задымленности. Результаты данного эксперимента были использованы, в том числе, для уточнения правил по выбору коэффициентов модели, т.е. для расширения базы знаний и уточнения учитываемых параметров окружающей среды, в частности, коэффициентов  $k_a$  и  $h_a$ . Вторым экспериментом был организован аналогично, с той лишь разницей, что целью было распознавание ОИ (рис.8(в)) с использованием нейросети. Цель эксперимента состояла в выявлении зависимости достоверности распознавания ОИ от высоты и пожарной обстановки.

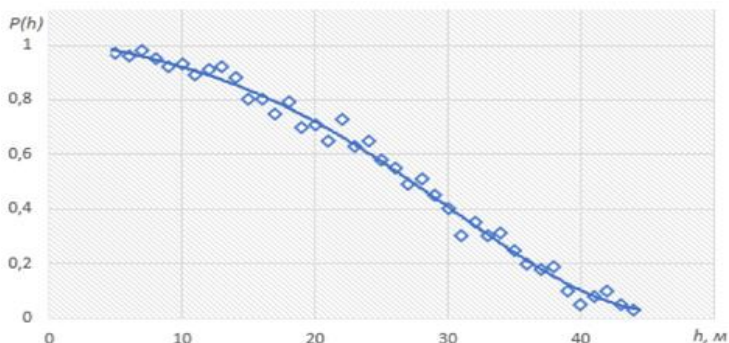


Рис.7. Результат аппроксимации результатов лабораторного эксперимента

В результате проведения серии экспериментов была получена выборка при разных соотношениях параметров модели и вариациях высоты и контрастности. Результаты, полученные в описанных полунатурных экспериментах, не имели статистически значимых различий с зависимостью (2). Тем не менее, эти результаты доказывают, что используемые эмпирические модели контрастности и наблюдаемости ОИ корректны и адекватно реагируют на изменения условий наблюдаемости и характеристики пожара.



Рис.8. Детектирование эталона и распознавание ОИ

Предварительная обработка видеопотока, полученного в ходе полунатурных экспериментов, проводилась поочередно всеми, указанными в таблице 1, предлагаемыми методами предварительной обработки. Средние

показатели достоверности обнаружения ОИ после обработки приведены в таблице 2. Эти результаты подтверждают эффективность предлагаемого подхода к выбору метода предварительной обработки изображения для разного вида гистограмм.

Таблица 2. Результаты адаптивного режима пред. обработки изображений

Режим обработки	Вид гистограммы		
	Равномерно распределенная	С одним явным экстремумом	С несколькими экстремумами
Глобальный метод	<b>0,76</b>	0,67	0,61
Локальный метод	0,5	<b>0,73</b>	0,6
Нейросетевой подход	0,54	0,47	<b>0,75</b>

Далее приведены результаты полунатурного эксперимента адаптивной обработки (рис.9) видеопотока при полете на постоянной высоте, содержащего кадры с различной задымленностью, что позволило получить различные виды гистограмм.

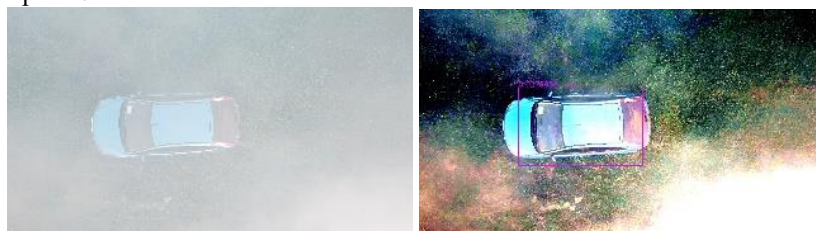


Рис.9. Демонстрация предварительной обработки изображения

Средняя достоверность распознавания объекта на обработанном адаптивным алгоритмом видеопотоке составила 0,86, что существенно выше достоверностей, полученных при обработке того же видео при использовании лишь одного метода: глобального – 0,575; локального – 0,574; нейросетевого – 0,556 (рис.10).

Таким образом, была подтверждена эффективность адаптивного алгоритма обработки изображения, среднее повышение достоверности распознавания ОИ составило 29%.

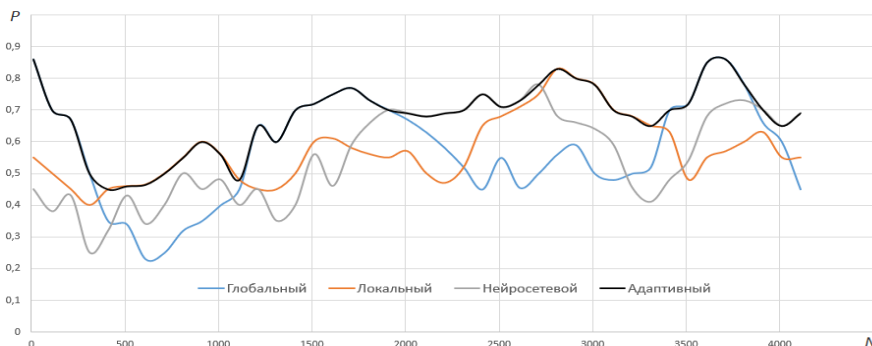


Рис.10. Достоверность распознавания ОИ после предварительной обработки  
 Далее в третьей главе приведены результаты полунатурного эксперимента, иллюстрирующего эффективность работы адаптивного алгоритма предварительной обработки изображений на оптимальной, с точки зрения критерия (8), высоте полета (рис.11).

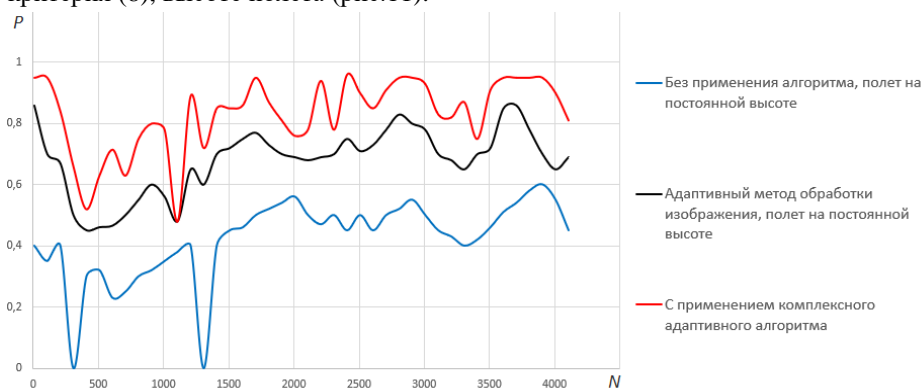


Рис.11. Достоверность распознавания ОИ

Таким образом, приведенные результаты показывают, что использование адаптивного алгоритма приводит к повышению эффективности мониторинга в среднем на 41%, а на отдельных областях прирост эффективности составил до 70%. Повышение эффективности мониторинга по уровню потерь в соответствии с критерием (8) составило 45%.

**В заключении** диссертационной работы перечислены основные результаты, полученные в ходе исследования.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

В диссертационной работе решена актуальная задача повышения эффективности мониторинга пожарной обстановки за счет выбора оптимальной, с точки зрения критерия, учитывающего относительные потери, связанные как с наблюдаемостью объектов интереса, так и с безопасностью БЛА, высоты полета над обследуемой местностью, а также адаптации режима обработки изображений на основе анализа гистограмм изображений.

Основные научно-методические и практические результаты работы состоят в следующем:

1. Разработаны модели процесса мониторинга пожарной обстановки:
  - безопасности полёта БЛА с учетом теплового воздействия факторов пожара, а также типа подстилающей поверхности и высоты насаждений,
  - наблюдаемости объектов интереса на сцене с учетом воздействия факторов окружающей среды: влажности воздуха, задымленности, освещенности, типа подстилающей поверхности, высоты насаждений.
2. Экспериментально подтверждены результаты исследований, отражающие воздействие задымленности наблюдаемой сцены на уровень наблюдаемости объектов интереса.
3. Предложен критерий оптимальности выбора высоты полёта БЛА над очагом пожара, использующий разработанные модели и учитывающий относительные потери наблюдаемости объектов интереса и безопасности БЛА.
4. Предложен адаптивный алгоритм определения оптимальной, с точки зрения предложенного критерия, высоты полёта БЛА при мониторинге пожарной обстановки и подтверждена его работоспособность и эффективность.
5. Проведен ряд экспериментов: лабораторных, использующих математическое моделирование, и полунатурных с использованием МБЛА, подтвердивших эффективность разработанных адаптивных алгоритмов выбора высоты полета и обработки изображений, позволивших повысить эффективность мониторинга пожарной обстановки.

В результате удалось повысить эффективность мониторинга, с точки зрения наблюдаемости объектов интереса, до 15% относительно полета на постоянной высоте. Показано, что выбор оптимальной высоты полета БЛА с учетом

критерия, а также адаптация режима обработки изображения позволяют уменьшить значения потерь до 45%.

Созданы предпосылки к разработке системы автоматического мониторинга и обнаружения объектов интереса. Предложенные эвристические модели безопасности полёта БЛА и наблюдаемости объектов интереса могут быть использованы при выборе рабочей высоты полета БЛА в процессе мониторинга пожарной обстановки.

### **ОСНОВНЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. *Мокрова М.И.* Исследование влияния сложных условий пожарной обстановки на качество наблюдения и безопасность полёта БЛА // Известия ЮФУ. Технические науки, №1(218), 2021, сс.112-124 (13 с.авт., №1174, перечень ВАК с 01.02.2022)
2. *Ким Н.В., Михайлов Н.А., Мокрова М.И.* Авиационный поиск наземных объектов в сложных условиях наблюдения. // Научно-технический журнал СТИН 02'2020. М.: Редакция журнала «СТИН», 2020, сс. 14-17 (1 с.авт., №1009, перечень ВАК МРБД от 12.04.2022)
3. *Ким Н.В., Мокрова М.И., Полянский В.В.* Организация согласованной работы манипулятора и системы технического зрения робота // Научно-технический журнал СТИН 09'2021. М.: Редакция журнала «СТИН», 2021, сс. 2-5 (3с.авт., №1009, перечень ВАК МРБД от 12.04.2022)
4. *Evdokimenkov V.N., Kim N.V., Kozorez D.A., Mokrova M.I.* Control of unmanned aerial vehicles during fire situation monitoring // INCAS Bulletin, Volume 11, Special Issue / 2019, pp. 66-73 (5 с.авт., Scopus)
5. *Kim N.V., Mokrova M.I., Mikhailov N.A.* Control of an UAV for Fire Monitoring // Proceedings - International Conference on Developments in eSystems Engineering, DeSE. – Kazan, Russia:IEEE, 2019, pp. 60-63 (2 с.авт., Scopus)
6. *Kim N.V., Mikhailov N.A., Mokrova M.I.* Drone Searches in Challenging Conditions // ISSN 1068-798X, Russian Engineering Research, 2020, Vol. 40, No. 7, pp. 583–585 (2 с.авт., Scopus)
7. *Polyansky V.V., Bodunkov N.E., Mokrova M.I.* Creating a Technology for Synthesizing Mechatronic Devices and VR Systems // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), 2020, pp. 1-6 (2,5 с.авт., Scopus)
8. *Bodunkov, N.E., Polyansky, V.V., Kim, N.V., Mokrova, M.I.* Preparing the guide robot to operation // Proceedings - International Conference on

- Developments in eSystems Engineering, DeSE. – Kazan, Russia:IEEE, 2020, 2020-December, pp. 146–151 (3 с.авт., Scopus)
9. *Mokrova M.I., Kotelnikov I.K.* Monitoring of the Earth's surface in conditions of low visibility // 2021 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), 2021, pp. 1-6 (5 с.авт., Scopus)
  10. *Kozorez, D.A., Mokrova, M.I., Kim, N.V.* Formation and research of UAV safety models and observability of objects when monitoring the fire setting // Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1958(1) (4 с авт., Scopus)
  11. *Kim, N.V., Mokrova, M.I., Polyanskii, V.V.* Coordinating the Operation of a Robot's Manipulator and Vision System // Russian Engineering Research, 2021, 41(12), pp. 1189–1192 (2 с авт., Scopus)
  12. *Ким Н.В., Мокрова М.И., Удалова Н.В.* Визуальная навигация роботизированных систем // Сб. докладов Молодежной научной конференции АНТОК 2020, сс. 46-48.
  13. *Козорез Д.А., Мокрова М.И.* Исследование производительности и безопасности мониторинга пожаров группой БЛА. Вопросы инновационного развития аэрокосмического комплекса России. Материалы первой общероссийской научно-практической конференции – М.: Издательство «Доброе слово», 2018, сс. 121-125.
  14. *Мокрова М.И.* Алгоритм оптимального выбора высоты полета и разделения функциональной группы БЛА при мониторинге пожарной обстановки. Тезисы докладов IV Общероссийской НТК «Старт». СПб., 2018, с. 57.
  15. *Ким Н.В., Мокрова М.И.* Мониторинг пожарной обстановки группой БЛА. // Техническое зрение в системах управления – 2019: сб. тез. 12-13 марта 2019, Москва, ИКИ РАН. М.: ИКИ РАН, 2019, с. 31.
  16. *Ким Н.В., Мокрова М.И.* Модель наблюдаемости объектов для авиационного мониторинга пожаров. // Пятый Всероссийский научно-практический семинар «Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта» (БТС-ИИ-2019): Труды семинара. – Переславль-Залесский: Российская ассоциация искусственного интеллекта, 2019, сс. 159-160.
  17. *Мокрова М.И.* Алгоритм выбора высоты полета БЛА при мониторинге пожарной обстановки. // 18-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2019». 18-22 ноября 2019 года. Тезисы. – М.: Типография «Логотип», 2019, сс. 169-170.
  18. *Н.В. Ким, Мокрова М.И.* Формирование описаний наблюдаемых сцен при авиационном мониторинге пожарной обстановки. // Техническое

зрение в системах управления – 2020: сб. тез. 17-18 марта 2020, Москва, ИКИ РАН. М.: ИКИ РАН, 2020.

19. Мокрова М.И. Алгоритм выбора оптимальной высоты полёта БЛА при мониторинге пожарной обстановки // 19-я Международная конференция «Авиация и космонавтика». 23-27 ноября 2020 года. Москва. Тезисы. – М.: Издательство «Перо», 2020, сс. 80-81.
20. Мокрова М.И., Козорез Д.А., Ким Н.В. Формирование и исследование моделей безопасности БЛА и наблюдаемости объектов при мониторинге пожарной обстановки. // Сборник тезисов XI Международной научно-технической конференции «Проблемы совершенствования робототехнических и интеллектуальных систем летательных аппаратов», – М.: Изд. Эдитус, 2020, сс. 297-300.
21. Мокрова М.И. Разработка критерия эффективности мониторинга пожарной обстановки с использованием БЛА // VI Всероссийский научно-практический семинар «Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта» (БТС-ИИ-2021): Труды семинара. – М., 2021.
22. Мокрова М.И. Стратегия управления беспилотным летательным аппаратом при мониторинге пожарной обстановки // Актуальные проблемы и перспективы развития гражданской авиации: сборник трудов X Международной НТК. Т. 2. 14-15 октября 2021 г. – Иркутск: Иркутский филиал МГТУ ГА, 2021. сс. 296-302.