



ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • Электронная библиотека

Препринты ИПМ • Препринт № 24 за 2022 г.

ISSN 2071-2898 (Print)  
ISSN 2071-2901 (Online)

**В.Т. Жуков, А.В. Колдомов,  
Ю.Н. Орлов, М.А. Шахраманьян**

Концепция создания  
автоматизированной системы  
аэрокосмического  
мониторинга лесных пожаров

Статья доступна по лицензии  
Creative Commons Attribution 4.0 International



**Рекомендуемая форма библиографической ссылки:** Концепция создания автоматизированной системы аэрокосмического мониторинга лесных пожаров / В.Т. Жуков [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2022. № 24. 18 с. <https://doi.org/10.20948/prepr-2022-24>  
<https://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2022-24>

**Ордена Ленина  
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ  
имени М.В.Келдыша  
Российской академии наук**

**В.Т. Жуков, А.В. Колдомов, Ю.Н. Орлов,  
М.А. Шахраманьян**

**Концепция создания  
автоматизированной системы  
аэрокосмического мониторинга  
лесных пожаров**

**Москва — 2022**

**Жуков В.Т., Колдомов А.В., Орлов Ю.Н., Шахрамьян М.А.**

### **Концепция создания автоматизированной системы аэрокосмического мониторинга лесных пожаров**

Предложены структура автоматизированной системы аэрокосмического мониторинга лесных пожаров, а также модель совместного использования данных спутникового мониторинга лесопожарной обстановки на территории России и уточняющих наблюдений беспилотных летательных аппаратов. Проведено теоретическое сравнение эффективности применения спутникового мониторинга и аэромониторинга с использованием данных спутниковых наблюдений. Показано на теоретическом уровне, что аэромониторинг с использованием данных спутниковых наблюдений дает значительное сокращение среднего времени обнаружения очага лесного пожара. Для моделирования движения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) используется нестационарное многомерное уравнение Фоккера-Планка с меняющимися коэффициентами диффузии и дрейфа, обусловленными как исходной целью полетного задания, так и локальными измерениями градиентов параметров атмосферы (задымленность, температура). Сформулирован принцип моделирования, который предлагается положить в основу оптимизации проектируемой системы аэрокосмического мониторинга.

**Ключевые слова:** лесной пожар, аэрокосмический мониторинг, беспилотный летательный аппарат, случайная траектория, уравнение Фоккера-Планка.

**Zhukov V.T., Koldomov A.V., Orlov Yu.N., Shakhramanyan M.A**

### **The concept of creating an automated system of aerospace monitoring of forest fires**

A structure of an automated aerospace monitoring system for monitoring of forest fires and a model for the joint use of satellite monitoring data of the forest fire situation in Russia and clarifying observations of unmanned aerial vehicles are proposed. A comparison of the effectiveness of each of the methods separately is carried out and an assessment of the improvement of the quality of control when they are used together is given. It is shown at the theoretical level that aerial monitoring using satellite observation data gives a significant reduction in the average time to detect a forest fire. To simulate the movement of unmanned aerial vehicles (UAVs), a non-stationary multidimensional Fokker-Planck equation is used with varying diffusion and drift coefficients, determined both by the initial goal of the flight task and by local measurements of gradients of atmospheric parameters (smoke content, temperature). The simulation principle is formulated, which is proposed to be the basis for the optimization of the projected aerospace monitoring system.

**Key words:** forest fire, aerospace monitoring, unmanned aerial vehicle, random trajectory, Fokker-Planck equation

## Оглавление

<b>1. Введение .....</b>	<b>3</b>
<b>2. Проблемы спутникового мониторинга.....</b>	<b>6</b>
<b>3. Проблемы аэромониторинга с БПЛА .....</b>	<b>10</b>
<b>4. Модель случайного блуждания БПЛА.....</b>	<b>11</b>
<b>5. Сравнительный анализ эффективности различных вариантов использования БПЛА.....</b>	<b>13</b>
<b>6. Заключение .....</b>	<b>15</b>
<b>Библиографический список .....</b>	<b>16</b>

### 1. Введение

Лесные пожары остаются одним из мощных природных факторов, влияющих на происходящие на планете глобальные изменения окружающей среды. Среди методов контроля состояния лесов, с точки зрения оперативного обнаружения пожаров на ранней стадии их развития, наряду с широко известными наземными системами наблюдения (визуальными, телевизионными и т.п.) и авиационным патрулированием также используются системы спутникового мониторинга. Хотя охват территории при этом достигается достаточно большой, но как раз в силу этого точность и своевременность выявления пожара или предшествующего ему состояния только посредством обработки данных со спутников в настоящее время недостаточна.

С другой стороны, использование для целей мониторинга беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) требует достаточно большого их количества в силу незначительной площади обзора, хотя и с более высоким разрешением, чем у обычных метеоспутников. Представляет интерес провести сравнение эффективности использования данных со спутников и с БПЛА по отдельности, а также в режиме совместного их использования.

Идея совместного использования данных спутникового мониторинга и данных, получаемых с БПЛА, в виде некой автоматизированной системы основывается на том, что если иметь ориентировочную привязку к более-менее

локализованному проблемному участку территории, то направление в указанный участок БПЛА позволит провести позиционирование и выявить проблему на нужном уровне точности. В то же время использование одних только БПЛА без данных спутникового мониторинга представляет собой не очень эффективный процесс случайного блуждания и, соответственно, случайного обнаружения очага лесного пожара или иной нештатной ситуации. В простейшем варианте оценки эффективности за таковую естественно принять среднее время, требуемое для выявления очага лесного пожара с учетом вероятности ошибочной тревоги и/или пропуска события. В общем виде автоматизированную систему аэрокосмического мониторинга лесных пожаров можно представить следующим образом (рис. 1).

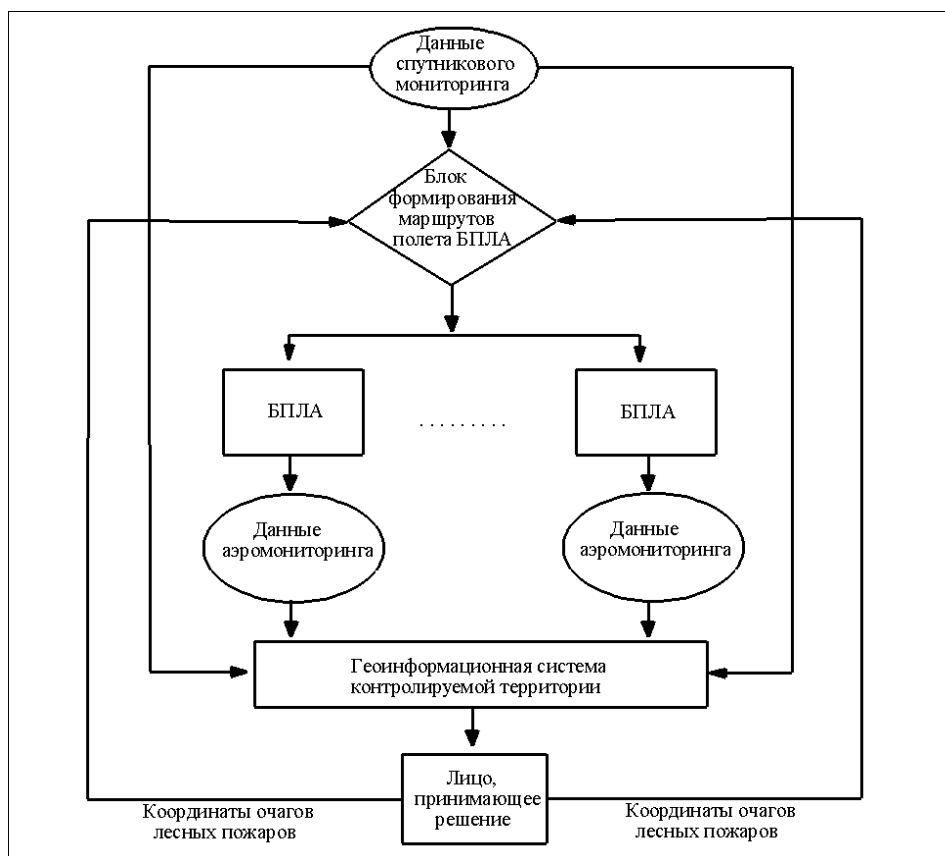


Рис. 1. Структура автоматизированной системы аэрокосмического мониторинга лесных пожаров

Данные спутникового мониторинга хранятся в постоянно обновляемой электронной библиотеке данных дистанционного зондирования Земли из космоса спутниками NOAA, Terra и другими спутниками низкого и среднего пространственного разрешения с широким диапазоном охвата. Спутниковые

данные отображаются на электронной карте с масштабом 1:100000 в геоинформационной системе контролируемой территории. Эта информационная система включает в себя базу данных о лесонасаждениях, населенных пунктах, потенциально опасных объектах, охраняемых территориях и других элементах инфраструктуры контролируемой территории. Лицо, принимающее решение (ЛПР), в случае если выявленные по результатам спутникового мониторинга очаги лесных пожаров находятся вблизи объектов инфраструктуры контролируемой территории и представляют для них потенциальную опасность, дает управляющий сигнал – команду для формирования маршрутов полета БПЛА к выявленным по данным спутникового мониторинга очагам лесных пожаров. В блоке формирования маршрутов полета БПЛА в автоматическом режиме осуществляется закладка в полетное задание маршрутов полета БПЛА к выявленным очагам лесных пожаров. Данные авиамониторинга с БПЛА в режиме реального времени отображаются на крупномасштабной электронной карте с масштабом не хуже, чем 1:5000, в геоинформационной системе контролируемой территории, что позволяет ЛПР детально оценить складывающуюся обстановку и степень угрозы для защищаемых объектов и принять эффективные управленческие решения.

Для оценки эффективности рассмотренной выше автоматизированной системы аэрокосмического мониторинга лесных пожаров необходимо оценить по отдельности эффективность подсистемы спутникового мониторинга и подсистемы аэромониторинга по критерию минимизации среднего времени обнаружения очага лесного пожара. Важность выбора именно этого критерия определяется чрезвычайно высокой скоростью распространения лесного пожара. После этого необходимо оценить эффективность автоматизированной системы аэрокосмического мониторинга лесных пожаров в случае совместного использования отмеченных выше подсистем.

## 2. Проблемы спутникового мониторинга

Вопросам спутникового мониторинга территорий для решения различных научных и прикладных задач посвящено достаточно много работ. Применительно к решению задачи спутникового мониторинга лесных пожаров в первую очередь следует отметить работы [1–7].

Рассмотрим некоторые аспекты спутникового мониторинга на примере функционирования спутника NOAA, входящего в состав метеорологической орбитальной группировки США. Система спутникового мониторинга лесных пожаров, базирующаяся на пятиканальных сканирующих радиометрах AVHRR, размещенных на спутниках NOAA, характеризуется следующими параметрами: тип орбиты (полярная), ее высота (870 км) и количество находящихся на орбите спутников (до 4 одновременно), что позволяет осуществлять контроль территории с периодичностью до десяти и более раз в сутки. Предполагается наличие в приборе AVHRR спектрального канала с длиной волны 2,75 мкм (частота, близкая к максимальной интенсивности инфракрасного излучения лесных пожаров), а также каналов в видимой и дальней ИК области спектра. Эти каналы позволяют разделять пожары, некоторые атмосферные фоны и поверхностные объекты, не различимые в канале 2,75 мкм.

Кроме того, полоса обзора прибора AVHRR достигает почти 3000 км. Это связано в том числе и с одним из основных недостатков этого прибора – со сравнительно низким пространственным разрешением сканера AVHRR (в подспутниковой точке это примерно 1 км<sup>2</sup>).

Последнее обстоятельство обуславливает сложность использования данных этого прибора для эффективного решения проблемы раннего обнаружения лесных пожаров. Именно эта задача является одной из центральных задач спутникового мониторинга лесных территорий.

Для совершенствования систем спутникового мониторинга лесных пожаров (территориального, федерального, ведомственного уровней) необходимо осуществлять сравнительную оценку их эффективности, что, как отмечено в [8 – 11], еще требует достаточно большого объема работ.

Основной базисной информацией в завершенной геоинформационной системе мониторинга лесных пожаров должна быть картографическая база данных по состоянию лесного и почвенного покрова. Эти данные необходимы прежде всего для оценки пространственного распределения степени пожарной опасности на заданной территории. Однако в настоящее время прогнозный блок пожароопасности территории не реализован с требуемой модельной точностью. В этой связи большое значение приобретают системы мониторинга.

При этом аэрокосмические средства должны обеспечивать решение следующих основных задач [9–11]:

- раннее обнаружение возникающих лесных пожаров с определением их координат, площади очагов горения и оперативное доведение информации до потребителей;

- наблюдение за динамикой развития ранее обнаруженных лесных пожаров до их полной ликвидации или самопроизвольного прекращения с определением направлений перемещения и скорости поступательного движения кромки пожара;

- энергетическая диагностика кромки лесных пожаров с оценкой уровня интенсивности тепловыделения;

- определение величины снеготалопа, наблюдение за границей схода снежного покрова;

- определение метеорологических параметров атмосферы (облачность, очаги гроз, температура воздуха, поле ветра);

- определение температуры поверхности, влажности почвы, фенологическое состояние лесов, лесопирологическое районирование лесного фонда;

- оценка степени пожарной опасности для прилегающих к зоне пожара участков насаждений и прогнозирование развития лесных пожаров;

Перечислим основные требования к системе спутникового мониторинга пожароопасности, следуя [9].



Обнаружение лесных пожаров должно осуществляться на территории лесного фонда страны, ограниченной 45–72 градусами с. ш. и 20–170 градусами в. д., общей площадью 1180 млн га.

Периодичность обзора территории с целью обнаружения лесных пожаров и слежения за динамикой их развития с момента наступления и до окончания пожароопасного сезона в светлое время суток не должна превышать 1 часа, а в ночное время – 3 часов. С учетом недостаточных технических возможностей допустима и меньшая периодичность обзора, поскольку в действующей системе периодичность авиационного наблюдения составляет менее 1 раза в сутки.

Информация о задымленности территории в районах лесных пожаров, а также о дымовых шлейфах и дымовых колонках должна выдаваться не менее двух раз в светлое время суток.

Вероятность обнаружения лесных пожаров площадью до 0,1 га должна быть не менее 0,8, площадью до 0,5 га – 0,95 и площадью до 2 га – 0,99, см. [12]. Вероятность правильного распознавания ресурсной облачности должна быть не менее 0,95.

Точность определения координат лесных пожаров – 0,5 км. Допустимая погрешность при оперативном определении границ пожаров 50–100 м, а площадей пожаров – 10–15%.

Точность определения границ задымленности территории в районе пожара должна быть не хуже 1 км.

Анализ литературных данных позволяет сделать следующие выводы.

1. Мониторинг лесных пожаров из космоса осуществляется на практике, как правило, без атмосферной коррекции спутниковых данных.

2. Существуют единичные примеры [15, 16] процедур приближенного учёта оптико-геометрических условий наблюдений в алгоритмах спутникового мониторинга лесных пожаров. Однако в них не исследуется влияние этого фактора на результативность раннего обнаружения очагов пожаров из космоса.

Следовательно, корректное решение проблемы раннего обнаружения очагов пожаров из космоса предполагает создание алгоритмов, которые:

(А) либо включают в явном виде этап атмосферной коррекции, которая позволяет сделать решающее правило не зависящим от оптико-геометрических условий наблюдения земной поверхности из космоса;

(В) либо адаптированы к атмосферным условиям.

Согласно [5], основными спутниками для выявления лесных пожаров являются спутники TERRA и AQUA с установленным на их борту спектрометром MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) и спутники NOAA со спектрометром AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), см. [13–16].

Спектрометр MODIS имеет 44 канала в различных диапазонах видимого и инфракрасного спектра. Пространственное разрешение изображения со спутника для одного пикселя в различных каналах меняется от 250 м до 1 км. В инфракрасном диапазоне пространственное разрешение равно 1 км. Данный прибор способен выявить пожар на площади от 50 м<sup>2</sup> при идеальных условиях съемки. При съемке спутниками TERRA и AQUA частота наблюдений за определенной точкой на поверхности Земли равна от 4 до 12 раз в сутки (в зависимости от географического положения территории).

Спектрометр AVHRR имеет 6 каналов. Пространственное разрешение одного пикселя изображения со спутника равно 1,1 км. Периодичность съемки от 2 до 4 раз за сутки.

Для нормального растительного покрова большая часть излучения приходится на 10 мкм.

Алгоритмы для выявления пожаров делятся на два типа: пороговые и контекстуальные. Пороговые алгоритмы основаны на превышении температуры определенной точке от нормы, которая соответствует температуре земной поверхности. Контекстуальные алгоритмы сравнивают температуру соседних пикселей, находя аномалии температур на фоне более холодных пикселей.

### 3. Проблемы аэромониторинга с БПЛА

В последнее время системы видеонаблюдения, установленные на беспилотные летательные аппараты, находят все более широкое применение. Группы летательных аппаратов, взаимодействующие между собой через сеть связи 5G, применяются для решения различных задач: мониторинг местности, спасательные операции, отслеживание распространения лесных пожаров, наблюдение за сельскохозяйственными территориями [5, 17].

Однако информация, собираемая с платформы БПЛА для видеомониторинга, может давать большие объемы данных, обработка которых невозможна локально теми же БПЛА, которые осуществляют мониторинг.

Увеличивается и количество БПЛА, используемых одновременно. Это ставит перед исследованиями целый ряд задач. Во-первых, каждый участник группы БПЛА получает большое количество видеоматериалов, которое должно обрабатываться в режиме реального времени. Обработка данных большего объема невозможна локально теми же БПЛА, которые осуществляют мониторинг. Во-вторых, отдельные БПЛА должны находиться в постоянной коммуникации друг с другом. В-третьих, они могут общаться с облаком данных и/или базой данных наземной станции, например, для получения цифровой модели местности или для пересылки коллективно значимой информации при работе группы БПЛА на местах возникновения чрезвычайных ситуации. Но из-за ограниченной пропускной способности беспроводных каналов, соединяющих БПЛА с вычислительной инфраструктурой, установленной на земле, выгрузка этих данных создает определенные трудности. Поэтому для надежного функционирования требуется исследование количественных характеристик качества канала связи в условиях нестационарного меняющегося потока внешних данных. В настоящей работе мы не будем касаться этого важного аспекта, предполагая использование одного аппарата.

Патрулирование лесной авиацией является эффективным средством обнаружения лесных пожаров в режиме реального времени. Однако эта

технология мониторинга имеет высокую стоимость на этапе ее создания и эксплуатации и в данной работе не рассматривается.

Математической основой расчета траекторий БПЛА является модель случайного блуждания, предложенная в [18, 19]. Случайное блуждание объясняет наблюдаемое поведение многих процессов в различных областях и служит фундаментальной моделью для стохастической активности.

#### 4. Модель случайного блуждания БПЛА

Мы предполагаем, что модель случайного блуждания БПЛА описывается уравнением Фоккера-Планка со сносом и диффузией относительно плотности функции распределения  $f(\mathbf{r}, t)$  положения  $\mathbf{r}$  летательного аппарата (ЛА) в момент времени  $t$ :

$$\frac{\partial f(\mathbf{r}, t)}{\partial t} + \operatorname{div}(\mathbf{u}(\mathbf{r}, t) f(\mathbf{r}, t)) - D(t) \Delta f = 0, \quad (1)$$

где  $\mathbf{u}(\mathbf{r}, t)$  – вектор скорости дрейфа,  $D(t) > 0$  – зависящий от времени коэффициент диффузии,  $\Delta$  – в общем случае трехмерный оператор Лапласа. Однако применительно к БПЛА на начальном этапе достаточно ограничиться моделью двумерного движения аппарата (на постоянной высоте). Обобщение на случай трехмерного движения принципиальных трудностей не доставляет.

Такая модель выбрана по следующим соображениям. Получив запрограммированное полетное задание, ЛА движется так, что его скорость как двумерный вектор зависит от координаты, то есть не является независимой переменной в аргументах плотности функции распределения. Если датчики, установленные на ЛА, фиксируют однородное состояние окружающей среды, то ЛА движется, допустим, равномерно и прямолинейно в соответствии с изначально заданным направлением «туда и обратно». Вид программно заданного маршрута облета непринципиален, важно то, что это некоторая детерминированная кривая  $\mathbf{r}(t)$ . Однако параметры среды (уровень сажи, влажность, температура поверхности и т.п.) заранее неизвестны и потому трактуются как случайные. Если считать, что направление движения выбирается в каждый момент времени по градиенту измеряемых параметров

(в пределах заданной точности), а при отсутствии выделенного градиента ЛА движется равномерно и прямолинейно в соответствии со своим состоянием в предыдущий момент времени, то такое движение реализуется как случайное блуждание со сносом. В этом смысле положение ЛА является случайным и может быть описано некоторой плотностью функции распределения  $f(\mathbf{r}, t)$ . Потенциальная зависимость коэффициента диффузии от времени отвечает различным погодным условиям, а также отражает изменение состояния атмосферы в различное время суток и, более крупно, в различные сезонные периоды. Если никаких отклонений от полетного задания нет, то распределение на прямолинейном участке движения имеет вид дельта-функции от заданной траектории:  $f(\mathbf{r}, t) = \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}(t))$ . При этом параметры кинетического уравнения (1) равны  $\mathbf{u}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{u}_0$  (движение с постоянной скоростью),  $D(t) = 0$ .

Если охват наблюдения БПЛА характеризуется площадью поверхности  $S_0$ , то при мониторинге региона площадью  $S$  в виде условного квадрата время на линейный облет территории приближенно оценивается величиной (в ЛА-часах)

$$T_0 \approx \frac{S}{u_0 \sqrt{S_0}} \left( 1 - \sqrt{\frac{S_0}{S}} \right) \approx \frac{S}{u_0 \sqrt{S_0}}. \quad (2)$$

Пусть движение БПЛА моделируется уравнением (1). Тогда при постоянных значениях скорости и коэффициента диффузии фундаментальным решением такого уравнения является сдвинутое двумерное распределение Гаусса:

$$f(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{4\pi Dt} \exp\left(-\frac{(\mathbf{r} - \mathbf{u}_0 t)^2}{4Dt}\right). \quad (3)$$

На основе этого решения можно провести оценочный сравнительный анализ вариантов обнаружения пожаров: отдельно на основе спутниковых данных; отдельно с использованием БПЛА; суммируя независимое использование обоих подходов; с применением данных от спутников в уточнении полетного задания для БПЛА.

## 5. Сравнительный анализ эффективности различных вариантов использования БПЛА

Характерные параметры точности и эффективности использования метеоспутников обсуждались выше. Рассмотрим более детально две ситуации: самостоятельный поиск очага возгорания посредством БПЛА и поиск с использованием коррекции спутниковых данных.

Для качественного анализа предположим, что требуется обнаружить очаг возгорания площадью  $S_f$ , центр которого расположен на расстоянии  $L$  от начала координат (точки старта).

Вариант 1. Движение БПЛА без спутниковой коррекции.

В этом случае направление движения БПЛА является случайным. Тогда требуется оценить среднее время  $T$ , за которое аппарат окажется на расстоянии  $L$  от базы, после чего разделить это время на вероятность попадания в окрестность возгорания. Характерный размер очага возгорания есть  $\sqrt{S_f}$ , так что угол, под которым очаг «виден» из точки старта, равен  $\varphi = \sqrt{S_f}/L$ . Поэтому если БПЛА будет находиться на расстоянии  $L$  в указанном секторе, то очаг будет обнаружен. Вероятность попадания в него равна  $p = \varphi/(2\pi)$ .

Определим теперь средний квадрат расстояния, на которое БПЛА удаляется от старта за время  $t$ . Имеем из (3), полагая  $\mathbf{r} = (x, y)$ :

$$\langle r^2 \rangle = \frac{1}{4\pi Dt} \int r^2 \exp\left(-\frac{(\mathbf{r} - \mathbf{u}_0 t)^2}{4Dt}\right) dx dy.$$

Считая скорость БПЛА изотропной, получаем отсюда

$$\langle r^2 \rangle = \frac{1}{4\pi Dt} \int (x^2 + y^2 + u_0^2 t^2) \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{4Dt}\right) dx dy = u_0^2 t^2 + Dt. \quad (4)$$

Приравнивая это расстояние величине  $L$ , получаем характерное время, которое требуется для удаления на это расстояние от центра:

$$T_1 = \frac{D}{2u_0^2} \left( \sqrt{1 + \Pi^2} - 1 \right), \quad \Pi = \frac{u_0 L}{D/2}. \quad (5)$$

Величина  $\Pi$  в (5) называется числом Пекле. Если  $\Pi \ll 1$ , то коэффициент диффузии относительно большой, движение в основном рыскающее. Если же  $\Pi \gg 1$ , то движение в основном детерминированное, вклад от диффузии мал. Тогда из (5) имеем оценки:

$$T_1 \approx \begin{cases} L^2 / D, & \Pi \ll 1 \\ L / u_0, & \Pi \gg 1 \end{cases}. \quad (6)$$

Таким образом, среднее время обнаружения очага пожара получается делением результата (6) на  $p = \varphi / (2\pi)$ , что дает величину

$$\theta_1 \approx \begin{cases} \frac{2\pi L^3}{D\sqrt{S_f}}, & \Pi \ll 1 \\ \frac{2\pi L^2}{u_0\sqrt{S_f}}, & \Pi \gg 1 \end{cases}. \quad (7)$$

Вариант 2. Движение БПЛА со спутниковой коррекцией.

В этом случае предполагаем, что спутник устанавливает район радиуса  $R$ , в котором возможен пожар, и выдает координаты центра этого района. Как и в примере 1, центр находится на расстоянии  $L$  от базы. Отличие этой ситуации от предыдущей состоит в том, что до точки вхождения в периметр, находящейся на расстоянии  $L - R$  от базы, БПЛА движется прямолинейно со скоростью  $u_0$ , на что потребуется время  $(L - R) / u_0$ . И только после достижения указанного района начинается блуждание по модели (1). Оставшееся время на определение места пожара вычисляется по формулам (7), в которых  $L$  надо заменить на  $R$ . В итоге получаем:

$$\theta_2 \approx \begin{cases} \frac{L - R}{u_0} + \frac{2\pi R^3}{D\sqrt{S_f}}, & \Pi \ll 1 \\ \frac{L - R}{u_0} + \frac{2\pi R^2}{u_0\sqrt{S_f}}, & \Pi \gg 1 \end{cases}. \quad (8)$$

Легко проверяется, что при  $L > R$  всегда  $\theta_2 < \theta_1$ . Например, при  $\Pi \gg 1$  из сравнения (7) и (8) получаем, что при локализации пожара внутри района облета, то есть при условии  $L > \sqrt{S_f}$ , выполняется условие

$$2\pi(L + R) > \sqrt{S_f}. \quad (9)$$

Очевидно, на практике характерные времена (7) и (8) могут отличаться на один-два порядка. Например, если имеется возгорание в случайно заданном районе леса на территории порядка  $900 \text{ м}^2$  и спутник позиционирует место пожара в квадрате со стороной 1 км, то при мониторинге лесного массива площадью  $400 \text{ км}^2$  получаем из (7) и (8) оценку  $\theta_1 / \theta_2 \approx 95$ .

Следовательно, эффективность от совместного использования двух рассмотренных средств для мониторинга лесопожароопасной обстановки значительно возрастает.

## 6. Заключение

В данной работе на концептуальном уровне рассмотрена возможность создания автоматизированной аэрокосмической системы мониторинга лесных пожаров и получена теоретическая оценка эффективности данной системы с точки зрения уменьшения среднего времени обнаружения очагов лесных пожаров. Показано, что совместное использование БПЛА и данных спутникового мониторинга позволяет существенно сократить время обнаружения нештатной ситуации.

В дальнейшем предполагается провести уточняющие расчеты возможных траекторий движения БПЛА в соответствии с моделями атмосферы применительно к определенным регионам России, исходя из реальных параметров лесных массивов. Принцип моделирования, который предлагается положить в основу оптимизации проектируемой системы аэрокосмического мониторинга, состоит в следующем.

При заданных модельных коэффициентах диффузии и граничных условиях численно решается уравнение Фоккера-Планка относительно приращений координат положения БПЛА с определенным шагом по времени. Поскольку тогда в каждый такой момент времени решение этого уравнения известно, то можно сгенерировать в общем случае трехмерный набор значений, отвечающих данному распределению. В данный момент времени этот набор



значений представляет собой сечение пучка возможных траекторий. Составляя такие сечения во все расчетные моменты времени, получаем собственно пучок траекторий, характеризующий движение БПЛА. После этого для каждой траектории пучка вычисляется вероятность обнаружения очага возгорания при известной скорости аппарата и заданном угле обзора. Такой инструментарий позволяет определить характеристики пучка (дрейф, диффузия), при которых время обнаружения возгорания минимально.

### **Библиографический список**

1. Бондур В.Г. Космический мониторинг природных пожаров в России в условиях аномальной жары 2010 года // Исследования Земли из космоса, 2011, №3. С. 3–13.
2. Бондур В.Г., Цидилина М.Н., Черепанова Е.В. Космический мониторинг воздействия природных пожаров на состояние растительного покрова в Федеральных округах РФ // Исследования Земли из космоса, 2019, №3. С. 13–32.
3. Бондур В.Г., Мохов И.И., Ситнов С.А. и др. Космический мониторинг сибирских пожаров и их последствий: особенности аномалий 2019 года и тенденций 20-летних изменений // ДАН, 2020, т.492, №1, С. 99–106.
4. Бондур В.Г., Воронова О.С., Гордо К.А., Зима А.Л. Космический мониторинг изменчивости площадей природных пожаров и эмиссий вредных примесей в атмосферу на территории различных регионов России за 20-летний период // ДАН, 2021, т.500, № 2. С.216–222
5. Шахраманьян, М.А., Дорошенко С.Г., Епихин А.В., Резников В.М., Щербенко Е.В. Методы тематической обработки космических снимков при мониторинге природных чрезвычайных ситуаций // Технологии гражданской безопасности. 2004. № 4. С. 8–39.
6. Шахраманьян М.А. Система космического мониторинга МЧС России // Аэрокосмический курьер. – М.: ЗАО «Издательский дом «Созвездие-4», 2000.– Ноябрь – декабрь.
7. Шахраманьян М.А., Рихтер А.А., Овсяник А.И. Экспресс-оценка величины экономического ущерба от лесных пожаров с использованием данных дистанционного зондирования Земли из космоса (программа для ЭВМ). Роспатент. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020664881 от 19.11.2020.
8. Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А., Шабанов Н.В. Спутниковое картографирование растительного покрова России. – М.: ИКИ РАН, 2016. – 208 с.

9. Спутниковый мониторинг лесных пожаров в России (под ред. В.В. Белова). Аналитический обзор / СО РАН. – Новосибирск, 2003. – 135 с.
10. Космическая система сбора данных о Земле (КОСДАН) / Системный проект. – М.: Российское космическое агентство, 1992.
11. Артюхин Ю.П. и др. Методы организации и проведения космовизуальных наблюдений в целях охраны лесов от пожаров / Ю.П. Артюхин, Ю.П. Семенов, В.И. Сухих, Е.А. Щетинский – М.: МЛХ РСФСР, ЦПК им. Ю.А. Гагарина, 1987.
12. Сухинин А.И. Вероятность обнаружения лесных пожаров дистанционными методами // Лесные пожары и борьба с ними. – Красноярск: ВНИИПОМлесхоз, 1991. С. 56– 69.
13. Dowty P.R. A Theoretical Investigation of Fire Detection with AVHRR Data, M.S. Thesis, Department of Environmental Sciences, University of Virginia, Charlottesville, Virginia, 1993.
14. Giglio L., Kendall J.D., Justice C.O. Evaluation of global fire detection algorithms using simulated AVHRR infrared data // Int. J. Remote Sensing. – 1999. Vol. 20. P. 1947–1985.
15. Kaufman Y.J., Justice C.O. MODIS ATBD: Fire Products (Version 2.2, Nov. 10, 1998), EOS ID#2741, 1998
16. Giglio, L., Schroeder, W., and Justice, C.O. The Collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products. // Remote Sensing of Environment, 2016, 178, 31–41.
17. Christian Grasso and Giovanni Schembra: A Fleet of MEC UAVs to Extend a 5G Network Slice for Video Monitoring with Low-Latency Constraints. // J. Sens. Actuator Netw. 2019, 8, 3; doi:10.3390/jsan8010003
18. Orlov Yu., Pleshakov R., Gaidamaka Yu. Software Complex for Modeling Non-Stationary Event Flows, Proc. of the 9th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems (ICUMT), pp. 112–116 (2017)
19. Orlov Yu.N., Fedorov S.L. Sample distribution function construction for non-stationary time-series forecasting, Mathematical Modeling, vol. 29, No. 5, pp. 61–72 (2017)