

На правах рукописи



Коморовский Витольд Станиславович

**КОНТРОЛЬ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КРУПНЫХ  
ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ КАК ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА  
ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ**

Специальность 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ,  
материалов и изделий

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Красноярск – 2010

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Сибирский государственный технологический университет» (ГОУ ВПО СибГТУ), г. Красноярск

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Доррер Георгий Алексеевич

Официальные оппоненты: д. б. н., профессор  
Харук Вячеслав Иванович  
к. т. н., научный сотрудник  
Ничепорчук Валерий Васильевич

Ведущая организация: ГОУ ВПО «Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева» (г. Красноярск)

Защита диссертации состоится «11» февраля 2011 в 14:00 часов на заседании диссертационного совета ДМ 212.099.05 при Сибирском федеральном университете по адресу 660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, 26

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Сибирского федерального университета по адресу 660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, 26, Г274

Автореферат разослан «    » декабря 2010 года

Ученый секретарь  
диссертационного совета



О. В. Непомнящий

## **Общая характеристика работы**

Диссертация посвящена разработке методов оценки и прогнозирования крупных лесных пожаров как динамических процессов на поверхности Земли, имеющих характер подвижных множеств. Предложен метод прогнозирования интегральных характеристик крупных лесных пожаров, основанный на использовании нейросетей в сочетании с геометрической моделью фронта пожара. Рассмотрены вопросы практического применения полученных результатов.

## **Актуальность работы**

В настоящее время созданы и успешно эксплуатируются системы дистанционного, в первую очередь космического, мониторинга состояния лесов, например, информационная система дистанционного мониторинга лесных пожаров федерального агентства лесного хозяйства РФ (ИСДМ-Рослесхоз). Такие системы позволяют в режиме реального времени получать информацию о пожарной обстановке в лесах на всей территории РФ. Однако глубина обработки этой информации не всегда достаточна, в частности, не реализованы функции прогнозирования динамических параметров лесных пожаров.

На данный момент отсутствуют математические модели динамики крупных лесных пожаров, опирающиеся на данные дистанционного мониторинга и соответствующие методы прогнозирования интегральных характеристик лесных пожаров. Также отсутствуют способы оценки интенсивности противопожарных мероприятий. Эта проблема особенно актуальна для крупных пожаров, которые наносят наибольший ущерб лесному фонду, населенным пунктам и объектам инфраструктуры, что ярко показал пожароопасный сезон 2010 года.

Если шире взглянуть на проблему, можно обнаружить, что в связи с бурным развитием методов дистанционного мониторинга, появляются новые возможности для нахождения сходных особенностей различных процессов на поверхности Земли и создания единых математических моделей и онтологий.

## **Цель работы**

Целью работы является создание методов оценки и прогнозирования параметров крупных лесных пожаров по данным дистанционного мониторинга как динамических процессов на поверхности Земли.

## **Задачи работы**

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести статистический анализ взаимосвязи между параметрами крупных лесных пожаров на основе ретроспективной информации.
2. Предложить метод прогнозирования динамических параметров крупных лесных пожаров.
3. Разработать методы оценки параметров динамики крупных лесных пожаров на основе геометрической модели процесса распространения и применить их для более широкого класса процессов.
4. Создать метод оценки интенсивности процессов борьбы с крупными лесными пожарами по данным дистанционного мониторинга.

### **Объект исследования**

Объектом диссертационного исследования являются крупные лесные пожары, как динамические процессы на поверхности Земли.

### **Предмет исследования**

Предмет исследования – данные дистанционного мониторинга лесных пожаров и методы их обработки, данные мониторинга других процессов на поверхности Земли.

### **Методы исследования**

Для решения поставленных задач были применены методы математической статистики, обработки данных дистанционного зондирования Земли, методы искусственного интеллекта – нейроинформатики и онтологического описания.

### **Научная новизна работы**

1. Предложена математическая модель динамики площади крупного лесного пожара вида  $S(t)=k(t-t_0)^\alpha$ , на ее основе, при использовании дополнительных гипотез, оценены другие параметры динамики лесного пожара. Модель позволяет описывать динамику площади лесного пожара на основе данных дистанционного мониторинга. Отличие предложенной модели от существующих моделей динамики лесных пожаров заключается в возможности описания динамики крупных многодневных пожаров при использовании небольшого числа доступных входных параметров.
2. Предложен метод нейросетевого прогнозирования прироста площади крупного лесного пожара по данным дистанционного мониторинга, оценена эффективность его применения. Использование данного метода делает возможным прогнозирование динамики лесного пожара по данным, содержащимся в информационных системах

мониторинга лесных пожаров. Для данных космического мониторинга крупных лесных пожаров метод нейросетевого прогнозирования предложен впервые.

3. Разработан метод оценки интенсивности процесса тушения лесного пожара по данным мониторинга. Использование фазовых портретов динамики площади крупного лесного пожара позволяет оценить интенсивность противопожарных мероприятий как качественно, так и количественно.

### **Практическая значимость работы**

1. Метод нейросетевого прогнозирования динамики площади лесного пожара используется ФГУ «Авиалесоохрана» и в центре НИОКР сибирского филиала Санкт-Петербургского университета государственной противопожарной службы МЧС России. Часть работ по тематике диссертации выполнена в рамках договора «Тестирование моделей поведения лесных пожаров и методики прогнозирования распространения лесного пожара для оценки возможности использования их в ИСДМ – Рослесхоз» между ФГУ «Авиалесоохрана», Институтом космических исследований РАН, Институтом леса им. В. Н. Сукачева СО РАН и ГОУ ВПО СибГТУ.

2. Предложенные модели и методы могут быть использованы в природоохранных информационных системах и системах поддержки принятия решений. Разработано программное средство, реализующее предложенные модели и методы.

3. Разработанные модели и методы используются в образовательном процессе, при изучении студентами спецкурса «Распределенные системы экологического мониторинга» в Сибирском государственном технологическом университете.

### **Значение для теории**

Результаты, полученные при выполнении диссертационной работы, имеют значение для развития теоретических основ обработки данных дистанционного зондирования Земли. Показана принципиальная возможность прогнозирования динамических параметров крупных лесных пожаров на основе данных дистанционного мониторинга. Приведены черты сходства ряда динамических процессов, происходящих на поверхности Земли.

### **Достоверность полученных результатов**

Валидация результатов работы проведена с использованием большого объема данных о лесных пожарах как природных процессах на поверхности Земли. Достоверность результатов также определяется корректным использованием

современных методов научных исследований, подтверждается отсутствием противоречий с известными научными публикациями.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Математическая модель процесса распространения лесного пожара как подвижного множества на поверхности Земли вида  $S(t)=k(t-t_0)^\alpha$  удовлетворительно описывает динамику площади лесного пожара и может быть перенесена на другие классы динамических процессов на поверхности Земли.
2. Метод прогнозирования интегральных характеристик крупных лесных пожаров по данным дистанционного мониторинга, основанный на использовании искусственных нейронных сетей и геометрической модели процесса распространения пожара, позволяет получать прогнозы прироста площади пожара с приемлемой точностью.
3. Метод оценки интенсивности мероприятий по тушению многодневного лесного пожара по данным дистанционного мониторинга динамики площади имеет важное значение при борьбе с крупными, многодневными пожарами.

### **Апробация работы**

Основные результаты работы представлены на следующих научных мероприятиях:

1. Всероссийская научно-практическая конференция «Молодые ученые в решении актуальных проблем науки» (Красноярск, 2009).
2. XI Всероссийская научно-практическая конференция «Проблемы информатизации региона» (Красноярск, 2009).
3. VII Всероссийская конференция по теоретическим основам проектирования и разработки распределенных информационных систем (Красноярск, 2009).
4. XI Международная научно-техническая конференция «Информационно-вычислительные технологии и их приложения» (Пенза, 2009).
5. IX Международная конференция «Финансово-актуарная математика и эвентоконвергенция технологий» (Красноярск, 2010).
6. Всероссийская научно-практическая конференция «Молодые ученые в решении актуальных проблем науки» (Красноярск, 2010).
7. Межкафедральный семинар «Концепции и методологии создания современных информационных систем» (Красноярск, 2009, 2010).

8. International Conference on Forest Fires: Management and International Cooperation for Preventing Forest Fires in the APEC region (Хабаровск, 2010).

9. Всероссийская научная конференция с участием зарубежных ученых «Математическое и физическое моделирование опасных природных явлений и техногенных катастроф» (Томск, 2010).

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 13 работ, из них 3 по списку ВАК. Из работ, выполненных в соавторстве, в диссертацию включены результаты полученные автором лично.

### **Структура и объем работы**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 119 наименований и трех приложений. Объем диссертации составляет 138 машинописных страниц, приложений 16 страниц. Диссертация содержит 37 рисунков и 19 таблиц.

### **Основное содержание работы**

Во **введении** дана общая характеристика работы, сформулирована актуальность, поставлена цель и определены задачи работы, показаны научная новизна и практическая значимость результатов.

В **первой главе** определены объект и предмет исследования, рассмотрены существующие на сегодняшний день математические модели лесных пожаров, лесопирологические информационные системы, постановлена задача моделирования параметров лесного пожара по данным дистанционного мониторинга.

В **разделе 1.1** предложена следующая классификация динамических процессов на поверхности Земли: 1) геоморфологические процессы (выветривание, денудация, аккумуляция); 2) биологические процессы (экспансия организмов); 3) метеорологические и гидрологические (наводнения, сели); 4) антропогенные (разливы нефтепродуктов, загрязнение). Лесные пожары относятся как к антропогенным, так и биологическим процессам.

Наиболее полно круг проблем, связанных с изучением динамических процессов на поверхности земли, можно показать на примере лесных пожаров. Лесной пожар распространяется в неоднородной, анизотропной среде, его распространение неравномерно по времени. Лесные пожары являются сложными,

многопараметрическими системами, моделирование которых представляет актуальную задачу.

В разделе 1.2 приведен обзор существующих математических моделей динамики лесного пожара, которые можно подразделить на следующие типы: 1) аналитические (А. М. Гришин, Ю. А. Гостинцев, Г. А. Доррер, С. Е. Van Wagner и др.); 2) экспериментально-статистические (Г. Н. Коровин, Н. П. Курбатский, Г. М. Вуган и др.); 3) смешанные экспериментально-аналитические (В. Г. Гусев, М. А. Софронов, F. A. Albin, M. E. Alexander, R. Rothermel, и др.).

Основными недостатками всех перечисленных типов моделей являются:

1. Большое количество трудно определяемых параметров, что влечет за собой повышенные требования к информационной базе.
2. Локальность, т.е. большинство моделей ориентированы на описание пожара в конкретной местности, на небольшой площади, на сравнительно короткий срок.

В разделе 1.3 рассмотрены информационные системы мониторинга лесных пожаров. Среди российских систем наиболее подробно рассмотрена Информационная система дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства РФ. Основной задачей ИСДМ-Рослесхоз является информационное обеспечение работ по организации мониторинга и тушения пожаров, а также оценки их последствий на всей территории страны (Котельников Р.В., Лупян Е.А., Щетинский В.Е. и др.). Для сбора, хранения и обработки лесопожарной информации предназначено семейство информационных систем «Ясень», которое интегрировано с ИСДМ-Рослесхоз.

Существуют также зарубежные разработки в данной области, это системы Behave Plus, FlamMap, FARSITE, FSPro, европейская система мониторинга лесных пожаров European Forest Fire Information System и др. Как на базе этих разработок, так и независимо от них существуют различные системы визуализации моделей лесных пожаров, симуляторы для обучения пожарных и т.п.

**Раздел 1.4** посвящен исследованию источников информации, используемой в работе и анализу результатов применения различных методов дистанционного мониторинга лесных пожаров.

В работе, в основном, использовалась информация из ИСДМ-Рослесхоз. В этой системе информация о лесных пожарах разделена, в зависимости от ее источника. Наиболее полная и проверенная информация представлена в разделе «Зона



космического мониторинга 1 уровня и зона авиационного мониторинга», поэтому в работе пользовались информацией этого раздела. Еще один источник информации о пожарах – это данные, представленные Красноярской базой авиационной охраны лесов. Это те данные, которые составляют основу раздела «Авиационный мониторинг» в ИСДМ-Рослесхоз. Ценность этих данных заключалась в подробной информации о площади каждого пожара на конкретную дату.

Для получения информации о лесных пожарах используются следующие космические аппараты и приборы: 1) Метеорологические и природоведческие спутники NOAA (сканер AVHRR); 2) Спутники Terra и Aqua (прибор Modis); 3) Спутник «Ресурс-01» (два сканера МСУ-Э с линейной разверткой); 4) Спутник LANDSAT-5 (два сканера с цилиндрической разверткой: Multi-Spectral Scanner и Thematic Mapper); 5) Спутник SPOT-3 (два сканера HVR с линейной разверткой); 6) Спутник ERS (радиолокационная станция микроволнового зондирования AMI). Данные со спутников приходят в форматах TLE, IMG и других.

Таким образом, информационной базой, на которой получены все представленные в работе результаты, являются данные дистанционного, а именно космического и авиационного, мониторинга динамических процессов на поверхности Земли.

В разделе 1.5 проведена постановка задачи моделирования лесного пожара по данным дистанционного мониторинга. Исходя из наличия существующих в рассмотренных в обзоре моделях ограничений, необходимо:

1. Определить доступную для использования информацию о лесных пожарах, т.е. информационную базу для моделирования лесных пожаров.
2. Предложить математическую модель распространения крупного лесного пожара, т.е. выбрать исходные допущения и разработать математический аппарат модели, интерпретировать результаты моделирования.
3. Проверить адекватность разработанной модели на доступной информации о реальных лесных пожарах.
4. Разработать методики применения полученной модели для решения задач охраны лесов от пожаров.

**Раздел 1.6** содержит заключение по первой главе.

Во **второй главе** диссертации приведено исследование применимости классических методов математической статистики к описанию и прогнозированию лесных пожаров и предложен новый метод прогнозирования их параметров.

В **разделе 2.1** приведены результаты статистической обработки данных аэрокосмического мониторинга лесных пожаров. Было предпринято исследование законов распределения случайных величин, представляющих собой данные о крупных лесных пожарах (площадью более 200 га) в Красноярском крае в 2008 году (219 записей) и Магаданской области в 2009 году (213 записей). В качестве независимых переменных использовались: 1) площадь регистрации пожара; 2) температура воздуха; 3) точка росы; 4) количество осадков; 5) показатель Нестерова (все на дату регистрации пожара).

Для проверки гипотезы о нормальности закона распределения случайных величин был применен критерий согласия Колмогорова. По виду кривой плотности распределения практически всех случайных величин (за исключением количества осадков) можно выдвинуть гипотезу о нормальном распределении случайных величин. Однако проверка гипотезы показывает, что она должна быть отклонена. Для оценки влияния факторов на процесс и степени коррелированности факторов между собой был применен метод парной корреляции. Выяснилось, что значимо с приростом площади коррелирует только параметр «Площадь регистрации пожара», факторы не коррелируют между собой. Исходя из этого, было решено построить регрессионные зависимости с одним параметром – площадью регистрации.

Были определены коэффициенты построенных регрессионных зависимостей (линейной и степенной), однако проверка адекватности по критерию Фишера, показала, что построенные уравнения регрессии не адекватны. Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Данные ИСДМ-Рослесхоз позволяют сформировать выборки достаточные для проведения статистических исследований.
2. Гипотеза о нормальности распределения параметров прогнозирования должна быть отклонена.
3. На основании корреляционного анализа выявлено, что с приростом площади пожара значимо коррелирует только один фактор – площадь регистрации пожара.
4. Адекватных уравнений регрессии по использованным данным построить не удалось.

Причинами неудачи при построении статистических зависимостей классическими методами, по-видимому, являются большое количество параметров, от которых зависит динамика площади крупного лесного пожара и неявный характер зависимостей.

В разделе 2.2 предложен метод прогнозирования интегральных характеристик лесных пожаров с использованием искусственных нейронных сетей. Для исследования использовались многослойные нейронные сети с учителем, обучение проводилось методом обратного распространения ошибки. В качестве нейромимитатора использовался программный продукт Neuro Pro 0.25 (А. Н. Горбань, В. Г. Царегородцев) Основной проблемой при формировании нейросети явилось определение входных полей сети, данные для которых доступны в ИСДМ-Рослесхоз. Исследования показали, что на вход нейронной сети целесообразно подавать следующие данные: 1) код лесхоза; 2) площадь регистрации пожара в гектарах; 3) количество дней наблюдения пожара; 4) код растительности местности пожара; 5) температура воздуха 6) точка росы 7) дефицит точки росы; 8) осадки за сутки на дату начала пожара; 9) Класс природной пожарной опасности (по разным методикам определения).

На выходе получался прогноз среднесуточного прироста площади пожара. Размерность входного слоя варьировалась в зависимости от количества входных параметров, которое изменялось от эксперимента к эксперименту.

Для крупных, общей площадью более 200 га, пожаров, по мнению экспертов, достаточной является точность прогноза  $\pm 25$  га. Такая точность в дальнейшем и закладывалась во все обучающие выборки. Наилучшие результаты показывают нейросети с конфигурациями 7 – 8 скрытых слоёв по 10 – 12 нейронов. Процент достоверности выдаваемых ими ответов колеблется в пределах 82 – 97 %.

Пример нейросетевого прогноза. Пожар номер к-1506 обнаружен 15.05.2008 в Кодинском лесничестве на площади 50 га, последнее наблюдение 18.05.2008, пожар ликвидирован на площади 978 га. По прогнозу нейронной сети прирост площади составляет 147 га/сут, фактически прирост площади составляет 150,7 га/сут, ошибка прогноза 3,7 га/сут.

В разделе 2.3 подведены итоги третьей главы.

В третьей главе предложена геометрическая модель динамики распространения крупного лесного пожара.

В разделе 3.1 приняты исходные допущения для создания математической модели с позиций единого концептуального подхода к рассмотрению динамических процессов на поверхности Земли:

1. Динамика изменения площади пожара может быть представлена в виде кривой, приведенной на рисунке 1. На рисунке период времени от начального момента  $t_0$  до  $t_s$  соответствует свободному распространению пожара, площадь пожара увеличивается с нарастающей скоростью. С момента  $t_s$  вследствие противопожарных мер скорость прироста площади уменьшается и становится равной нулю в момент ликвидации пожара  $t_f$ . Рассмотренная модель описывает идеальный теоретический случай, когда пожар распространяется в стационарных по времени и однородных по пространству условиях, а борьба с пожаром ведется эффективно. Динамика изменения площади свободно распространяющегося пожара описывается формулой:

$$S(t) = k_0(t - t_0)^\alpha, \quad (1)$$

где  $t$  – текущее время, сут;  $t_0$  – время возникновения пожара, сут;  $\alpha$  – показатель динамики пожара;  $k_0$  – постоянный коэффициент, га/сут $^\alpha$ .

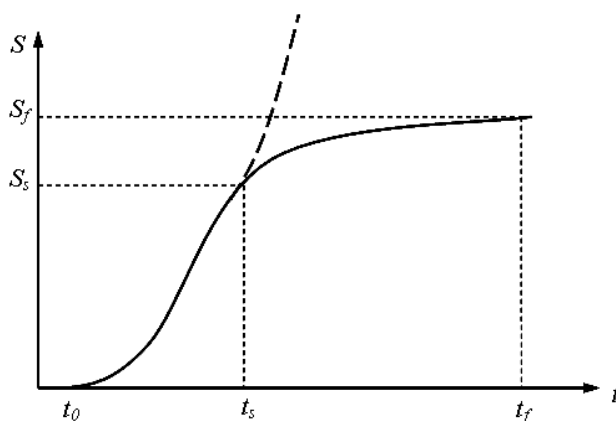


Рисунок 1 – Динамика изменения площади пожара

2. Уравнение контура динамического процесса в неявном виде имеет вид:

$$G(x, t) = 0,$$

где  $x = [x_1, x_2]^T$  – вектор координат на плоскости.

В каждой точке контура должно выполняться условие неразрывности  $dG/dt = 0$ , откуда следует уравнение Гамильтона – Якоби, описывающее динамику фронта пожара в соответствии с принципом Гюйгенса:

$$\frac{\partial G}{\partial t} + \mathbf{v}(\phi, t) \cdot \mathbf{grad} G = 0. \quad (2)$$

Вектор скорости фронта пожара представляется в виде:

$$\mathbf{v}(\phi, t) = v_0(t) \xi(\phi), \quad (3)$$

где  $v_0(t)$  – максимальная скорость распространения фронта пожара;  $\xi(\phi)$  ( $|\xi| \leq 1$ ) – индикатриса полной скорости фронта, определяющая конфигурацию пожара,  $\phi$  – направление распространения ( $0 \leq \phi \leq 2\pi$ ). Под индикатрисой понимается функция, характеризующая зависимость скорости от направления распространения.

3. Индикатриса определяется скоростью и направлением ветра, угол  $\phi$  отсчитывается от направления ветра по часовой стрелке.

В разделе 3.2 выведены формулы для расчета скорости фронта пожара и скорости прироста периметра пожара. На основе моделей (1) – (3) показано, что скорость продвижения фронта пожара в направлении ветра определяется выражением:

$$v_0 = \frac{\alpha \sqrt{k_0}}{2 \int_0^\pi \xi^2(w, \phi) d\phi}, \quad (4)$$

где  $w$  – скорость ветра в зоне пожара, м/с.

Рассматривая уравнения (1) и (2) – (4) совместно, и положив  $t_0=0$ , можно оценить показатель динамики скорости фронта пожара:

$$v_0(t) = v_0 \cdot t^\beta,$$

где  $\beta = \alpha/2 - 1$ . С показателями  $\alpha$  и  $\beta$  связано изменение динамики пожара: при  $\alpha=2$ ,  $\beta=0$ , т.е. скорость фронта пожара постоянна, при  $\alpha < 2$ ,  $\beta < 0$ , эта скорость со временем уменьшается, а при  $\alpha > 2$ ,  $\beta > 0$ , скорость возрастает. При моделировании лесных пожаров рядом авторов показатель  $\alpha$  принимается равным 2, однако проведенные в диссертации исследования показали, что во многих случаях он существенно отличается от 2.

Скорость прироста периметра пожара важна при определении стратегии его ликвидации и определяется формулой:

$$v_p = 2v_0(t) \int_0^\pi \sqrt{\xi^2(w, \phi) + \xi'^2(w, \phi)} d\phi. \quad (5)$$

В разделе 3.3 подробно рассмотрены выражения для индикатрис скорости фронта. В диссертационном исследовании использовались два вида индикатрис: экспоненциальная и эллиптическая. Экспоненциальная индикатриса имеет вид:

$$\xi(\phi) = \exp(\alpha(w)(\cos(\phi) - 1)), \quad (6)$$

где  $\alpha(w)$  – коэффициент, зависящий от скорости ветра:  $\alpha(w)=0,785w-0,06w^2$ .

Формула справедлива при условиях  $0 \leq w \leq 3$  м/с.

Эллиптическая индикатриса имеет вид:

$$\xi(\phi) = \frac{1 - e(w)}{1 - e(w) \cos(\phi)}, \quad (7)$$

где  $e(w)$  – эксцентриситет эллипса, зависящий от скорости ветра, для него была использована следующая аппроксимация:  $e(w) = 1 - \exp(-0,4w)$ ,  $0 \leq w \leq 15$  м/с. Выбор вида индикатрисы зависит от скорости ветра в зоне пожара.

В разделе 3.4 оценены погрешности параметров модели (1). Пусть погрешность определения площади пожара составляет  $\delta S$  га. Погрешность в оценке коэффициента  $k$ :

$$\delta k = \frac{\delta S}{t^\alpha}. \quad (8)$$

Погрешность в оценке времени распространения пожара:

$$\delta t = \frac{\delta S}{k \alpha t^{\alpha-1}}. \quad (9)$$

Погрешность в оценке показателя  $\alpha$ :

$$\delta \alpha = \frac{\delta S}{k t^\alpha \ln t}. \quad (10)$$

Погрешности всех переменных, от которых зависит модель (1), зависят от времени и уменьшаются с ростом  $t$ .

В разделе 3.5 приведены численные примеры расчета скорости распространения пожара. Рассмотрен зарегистрированный в системе ИСДМ-Рослесхоз пожар К-1002. Он действовал в Идринском лесничестве Красноярского края с 10.05.2008 по 16.05.2008 г. Пожар был зарегистрирован на площади 393 га, площадь ликвидации 1163 га. Скорость ветра – 1 м/сек, направление ветра – 180 град.

Принимаем показатель  $\alpha=2$ , т.е. полагаем скорость фронта пожара постоянной. Вычислим коэффициент  $k$  и его погрешность в модели:

$$k = \Delta S / \Delta t^2 = 770 / 36 = 21,4 \text{ га/сут}^2, \quad \delta k = 100 / 36 = 2,7 \text{ га/сут}^2.$$

Для скорости ветра  $w=1$  м/сек, воспользуемся экспоненциальной индикатрисой. В соответствии с формулой (4), переведя гектары в квадратные метры, получим:  $v_0(t) = 426$  м/сут.

С учетом возможной погрешности  $\delta k$  величина скорости фронта будет находиться в следующем диапазоне:  $275 \leq v_0(t) \leq 577$  м/сут. По формуле (5) можно оценить скорость прироста периметра пожара:  $v_p = 1498 \pm 531$  м/сут.

В разделе 3.6 приведена оценка параметров модели площади свободно развивающегося пожара (1). Предположим, что по данным мониторинга определена площадь свободно развивающегося пожара в  $n$  последовательных моментов времени. Требуется определить параметры  $\alpha$ ,  $k$  и  $t_0$  модели (1). В соответствии с методом наименьших квадратов неизвестные параметры следует подобрать так, чтобы сумма квадратов отклонений расчетных данных от опытных была минимальной. Пусть время начала пожара  $t_0$  известно заранее. Для вычисления параметра  $\alpha$  обозначим:

$$\sigma_i = \frac{S_i}{S_n}, \tau_i = \frac{t_i - t_0}{t_n - t_0}, i = 1, \dots, n-1.$$

По методу наименьших квадратов, получим:

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \ln \sigma_i \ln \tau_i}{\sum_{i=1}^{n-1} (\ln \tau_i)^2}. \quad (11)$$

Для вычисления параметра  $k$ , подставим исходные данные в уравнение (1), прологарифмируем полученные выражения и получим:

$$k = \exp\left(\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (\ln S_i - \alpha \ln(t_i - t_0))\right). \quad (12)$$

Время начала пожара  $t_0$  (если оно не известно заранее) вычислим по формуле:

$$t_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(t_i - \left(\frac{S_i}{k}\right)^{1/\alpha}\right). \quad (13)$$

Поскольку в общем случае не известны все величины  $\alpha$ ,  $k$ ,  $t_0$  то решения по формулам (11) – (13) уточняются путем последовательных приближений.

Пример. По данным Красноярской базы охраны лесов лесной пожар в Туранском лесничестве был зарегистрирован 21.04.08. Полагаем  $t_0=19$ . Тогда по формулам (11) и (12), зная площади пожара в каждый момент времени, получаем  $\alpha = 2.15, k_0 = 10.23$  га/сут<sup>2,15</sup>. График роста площади пожара и расчетная кривая представлены на рис. 2.

В разделе 3.7 проведена оценка времени начала тушения пожара и скорости тушения по данным мониторинга. Идея метода состоит в том, что на графике роста площади пожара обнаруживается точка перегиба графика, и по изменению наклона

кривой оценивается момент начала и интенсивность противопожарных мероприятий (см. рис.2).

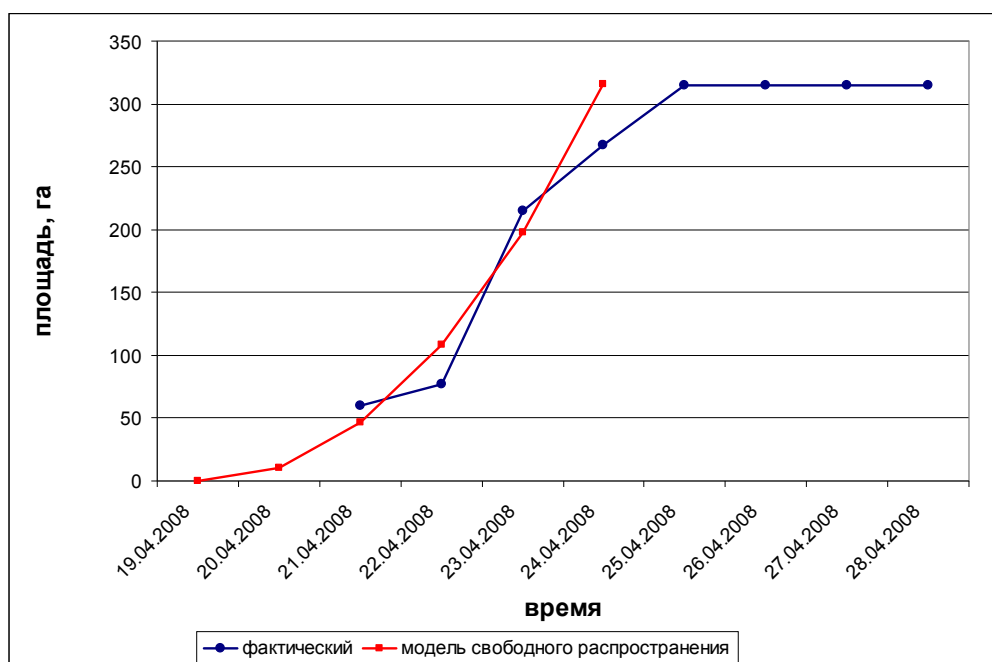


Рисунок 2 – Динамика изменения площади пожара

Вычислим приращение площади пожара в  $n$  последовательных моментов времени  $\Delta S(t_i)$  а также приращение приращения  $\Delta^2 S(t_i)$ . Анализ этих величин позволяет сделать следующие выводы:

1. Величины  $\Delta S(t_i)$  всегда положительны (или равны нулю, когда пожар локализован или остановился по другим причинам).
2. Величины  $\Delta^2 S(t_i)$  положительны при свободном распространении пожара, становятся отрицательными при тушении пожара и обращаются в нуль при завершении его локализации.

Для анализа процесса тушения пожара можно построить фазовый портрет динамики площади лесного пожара, отложив по оси абсцисс площадь пожара, а по оси ординат первую разность  $\Delta S(t_i)$  (рис. 3). Анализируя данные кривые можно качественно оценить интенсивность мероприятий по тушению. Точка перегиба кривой соответствует моменту начала тушения. Вычислив отношение площади, пройденной огнем до начала тушения и после, можно оценить эффективность мероприятий по ликвидации пожара количественно: чем больше это отношение, тем быстрее потушен пожар. В данном случае отношение равно 1,55.

В разделе 3.8 рассмотрена динамика пожара, находящегося под воздействием противопожарных сил и средств. Рассмотрены две модели локализации –



упрощенная, основанная на гипотезе о снижении скорости прироста площади пожара со временем, и более точная, основанная на подсчете длины локализованной кромки пожара.

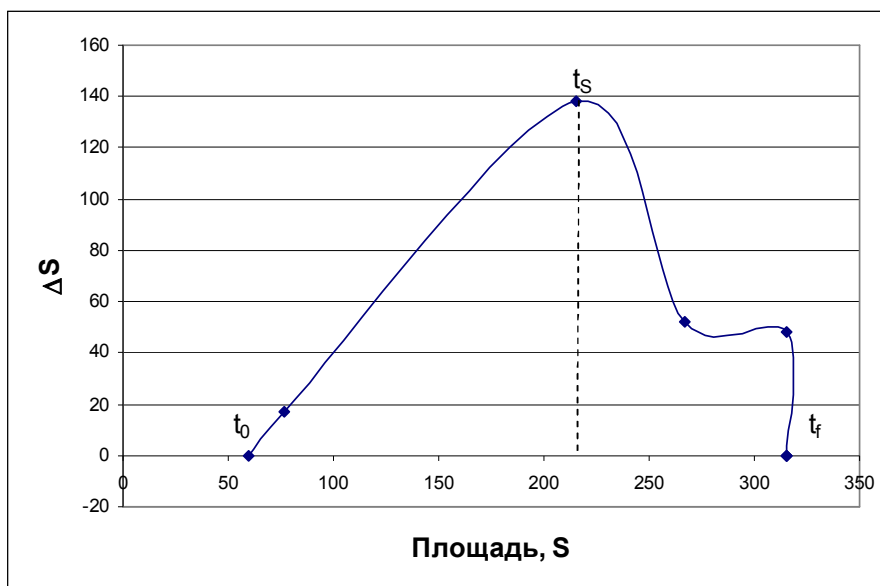


Рисунок 3 – Фазовый портрет динамики площади лесного пожара

Используя упрощенную модель, будем считать, что противопожарные силы, начиная с момента начала тушения, уменьшают скорость прироста площади пожара, т. е. уменьшают значение коэффициента  $k_0$  в формуле (1). Если принять линейный закон уменьшения скорости распространения, тогда скорость прироста площади в соответствии с (1) определится формулой

$$R(t) = \frac{dS(t)}{dt} = \begin{cases} \alpha k_1 t^{\alpha-1}, & t \leq t_s, \\ \alpha(k_1 - k_2(t - t_s))t^{\alpha-1}, & t_s \leq t \leq t_f, \\ 0, & t \geq t_f. \end{cases} \quad (14)$$

где  $t_s$  – время начала тушения пожара, при  $t = t_s$  коэффициент  $k_0 = k_1$ ,  $k_2$ ,  $ga/cyт^{\alpha+1}$  – скорость изменения коэффициента  $k_0$ ,  $t_f$  – время локализации пожара. В случае, когда известны коэффициент  $k_1$ , моменты  $t_s$  и  $t_f$ , а также  $S(t_f)$ , можно оценить коэффициент  $k_2$ , характеризующий интенсивность тушения.

Рассматривая более точную модель локализации при двустороннем охвате пожара с головной части, положим, что скорость фронта пожара постоянна во времени, т.е.  $v_0 = const$ . Время локализации пожара  $t_\Lambda$  определяется из условия  $\phi(t_\Lambda) = \pi$ , где  $\phi$  - угол, на который противопожарные команды обогнули очаг горения:

$$t_{\Lambda} = \frac{v_{\Lambda} t_s}{v_{\Lambda} - \pi v_0 \sqrt{\xi^2(\pi) + \xi'^2(\pi)}} = \frac{\lambda t_s}{\lambda - \pi \xi(\pi)}, \quad (15)$$

где  $\lambda = \frac{v_{\Lambda}}{v_0}$  - отношение скоростей локализации и фронта пожара. Отсюда

следует условие локализуемости:  $\lambda \geq \pi \xi(\pi)$ .

В разделе 3.9 подведены итоги третьей главы.

В четвертой главе рассмотрены вопросы применения модели (1) и следствий из нее, к описанию не только лесных пожаров, но и других динамических процессов. Также рассмотрены вопросы описания предметной области и прогнозирования динамических параметров крупных лесных пожаров, описаны особенности программной реализации результатов диссертации.

В разделе 4.1 проведен сравнительный анализ результатов космического мониторинга лесных пожаров в зонах 1 уровня и 2 уровня. Процент крупных пожаров в зоне космического мониторинга 1 и 2 уровня примерно одинаков. Средний процент крупных пожаров по двум регионам (Красноярский край и Магаданская область) за все года составил 29,8 %. Площадь ликвидации (по естественным причинам) пожара в зоне космического мониторинга 2 уровня больше чем в зоне мониторинга 1 уровня (исключение – Красноярский край, 2008 год). В среднем за все года по 2 регионам площадь ликвидации лесного пожара в зоне космического мониторинга 2 уровня превышает тот же показатель в зоне космического мониторинга 1 уровня на 510,9 га.

В разделе 4.2 проведено распространение результатов работы на более широкий класс динамических процессов на поверхности Земли. Общность этих процессов характеризуется следующими основными положениями:

1. Все указанные процессы могут быть описаны как подвижные области. В первом приближении границы таких областей можно представить как плоские волны, которые подчиняются принципу Гюйгенса.
2. Все указанные процессы, вследствие своих характерных размеров, поддаются картографированию.
3. Методы дистанционного мониторинга могут быть применены ко всем классам подобных динамических процессов.
4. С точки зрения теории управления – это объекты с распределенными параметрами и распределенным управлением.

Приведен пример адаптации разработанной модели поведения лесных пожаров для другого класса динамических процессов, а именно разлива нефтепродуктов на поверхности воды (взрыв нефтяной платформы Deepwater Horizon 22.04.2010 и последующий выброс нефтепродуктов). В открытом доступе находятся данные только о площади нефтяного пятна, и его примерная форма. Используя данные о времени начала распространения нефтепродуктов, и данные о площади загрязнения можно на основе разработанных методов построить модель процесса распространения, на основе формулы (1):

$$S(t) = 177 \cdot (t - t_0)^{1,88}$$

Следует отметить, что полученная модель достаточно груба, оценить скорость распространения пятна и применить весь комплекс разработанных для лесных пожаров методик не удалось. Однако полученная зависимость хорошо иллюстрирует общность динамических процессов на поверхности Земли.

В **разделе 4.3** рассмотрены некоторые вопросы особенностей проектирования информационных систем в выбранной предметной области. Приведены различные точки зрения на описание предметной области: онтологический подход, диаграммы в Unified Modeling Language - универсальном языке моделирования (UML).

**Раздел 4.4** посвящен реализации предложенных моделей и методов в виде программного средства. Для автоматизации расчетов и проверки возможности практического применения достигнутых в ходе исследования результатов, основные из предложенных методик были реализованы в виде программного средства. Программа была написана на языке Delphi с использованием среды визуального программирования Borland Delphi 7.0. Программа «Генератор моделей пожара» использует данные о времени пожара и его площади. Основной функцией программы является расчет параметров геометрической модели распространения лесного пожара описанной уравнениями (1) – (5). Установив параметры математической модели, пользователь может построить модель распространения пожара, отобразить ее на графике и рассчитать скорость прироста площади пожара и скорость приращения периметра пожара при различных скоростях ветра.

**Раздел 4.5** содержит выводы по четвертой главе.

В **приложении 1** приведены построенные модели крупных лесных пожаров в Красноярском крае в 2008 – 2009 годах. В **приложении 2** приведен сравнительный

анализ крупных лесных пожаров в зонах комического мониторинга 1 и 2 уровня. В **приложении 3** приведены документы о внедрении результатов диссертации.

### **Заключение**

Поставленные в диссертационном исследовании задачи решены следующим образом:

1. Предложена классификация динамических процессов на поверхности Земли, на примере лесных пожаров рассмотрены математические модели лесного пожара как динамического процесса на поверхности Земли, их достоинства и недостатки. Описаны существующие информационные системы мониторинга лесных пожаров.
2. Регрессионный анализ показал сложность применения классических методов математической статистики к описанию процессов подобных крупным лесным пожарам. Проведено статистическое сравнение эффективности методов космического мониторинга в различных зонах.
3. Предложен метод прогнозирования динамических характеристик лесных пожаров, основанный на использовании искусственных нейронных сетей.
4. Впервые предложена простая геометрическая модель прироста площади лесного пожара и установлена зависимость скорости распространения горящей кромки от показателя степени этой модели.
5. Разработаны расчетные методы позволяющие оценить основные динамические характеристики лесного пожара и эффективность его тушения. Подробно рассмотрен вопрос практического применения разработанных моделей. Приведены некоторые сведения о программной реализации предложенных расчетных методов.

Достигнутые научные результаты позволяют продолжить исследования в выбранном направлении. Предполагается проведение исследований в следующих областях:

1. Совершенствование предложенного метода нейросетевого прогнозирования интегральных характеристик лесных пожаров.
2. Адаптация предложенных моделей к другим классам динамических процессов на поверхности Земли.
3. Разработка численных методов и алгоритмов решения математических задач моделирования и прогнозирования динамических процессов, а также процессов их локализации.

## **Список публикаций по теме диссертации**

### **В научных журналах, включенных в перечень ВАК:**

1. Коморовский, В. С. Методика расчета параметров лесных пожаров как динамических процессов на поверхности Земли с использованием данных космического мониторинга / В. С. Коморовский, Г. А. Доррер // Вестник сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М. Ф. Решетнева. – Вып. 3(29), Красноярск, 2010. – С. 47 – 51.
2. Коморовский, В. С. Модель процесса локализации лесного пожара при двустороннем охвате горящей кромки / В. С. Коморовский // Ученые записки Российского государственного социального университета. – 2010. - № 8. – С. 95 – 98.
3. Доррер, Г. А. Методика оценки и прогнозирования параметров крупных лесных пожаров на основе спутниковой информации / Г. А. Доррер, В. С. Коморовский, С. П. Якимов // Хвойные бореальной зоны. – 2010. – Т. 27, № 4. – С. 434 – 439.

### **Прочие публикации:**

1. Жуков, Л. А. Применение технологии OLAP для подготовки данных к нейросетевому прогнозированию / Л. А. Жуков, В. С. Коморовский // Проблемы информатизации региона : материалы XI науч.-практ. конф. – Красноярск, 2009. – С. 184-185.
2. Исследование возможности прогнозирования распространения лесных пожаров по данным информационной системы дистанционного мониторинга / В. С. Коморовский [и др.] // Молодые ученые в решении актуальных проблем науки : сб. ст. студ. и молодых ученых по итогам Всерос. науч.-практ. конф. – Красноярск, 2009. – Т. 2. – С. 419-424.
3. Коморовский, В. С. Методы прогнозирования параметров лесных пожаров на основе данных, хранящихся в информационной системе «ИСДМ-Рослесхоз» / М. В. Берестенькова, Г. А. Доррер, В. С. Коморовский // Проблемы информатизации региона : материалы XI науч.-практ. конф. – Красноярск, 2009. – С. 167-170.
4. Коморовский, В. С. Оценка возможности прогнозирования распространения лесных пожаров по данным «ИСДМ-Рослесхоз» [Электронный ресурс] / В. С. Коморовский // Современные проблемы информатизации в системах моделирования, программирования и телекоммуникациях : I Междунар. науч. конф. –

Электрон. дан. (размещено 6 окт. 2009 г.). – Режим доступа:  
<http://econf.rae.ru/article/4679>

5. Коморовский, В. С. Применение нейронных сетей с учителем для прогнозирования прироста площади лесного пожара на основе данных «ИСДМ» Рослесхоз / Р. С. Акинфеев, М. В. Берестенькова, В. С. Коморовский // Проблемы информатизации региона : материалы XI науч.-практ. конф. – Красноярск, 2009. – С. 165-167.

6. Коморовский, В. С. Прогнозирование распространения лесных пожаров по данным информационной системы дистанционного мониторинга / В. С. Коморовский, Г. А. Доррер // Молодые ученые в решении актуальных проблем науки : сб. ст. студ. и молодых ученых по итогам Всерос. науч.-практ. конф. – Красноярск, 2009. – Т. 2. – С. 368-373.

7. Коморовский, В. С. Статистическая оценка интегральных параметров лесных пожаров представленных в ИСДМ-Рослесхоз / В. С. Коморовский // VII Всероссийская конференция по теоретическим основам проектирования и разработки распределенных информационных систем. ПРИС-2009 : материалы конф., 10-11 дек. 2009 г. – С. 107-109.

8. Коморовский, В. С. Оценка параметров динамики лесных пожаров на основе данных космического мониторинга / В. С. Коморовский, Г. А. Доррер // Труды IX международной конференции по финансово-актуарной математике и эвентоконвергенции технологий. – Красноярск: КГТЭИ, СФУ, 2010. – С. 131-136.

9. Коморовский, В. С. Методика оценки времени начала тушения лесного пожара и эффективности тушения по данным лесопожарного мониторинга / Коморовский В. С. // Сборник статей студентов и молодых ученых по итогам Всероссийской научно-практической конференции «Молодые ученые в решении Актуальных проблем науки». Том 2., Красноярск, 2010 г. – С. 302-304.

10. Коморовский, В. С. Контроль и прогнозирование параметров крупных лесных пожаров как динамических процессов на поверхности Земли, на основе данных дистанционного мониторинга / В. С. Коморовский // Материалы всероссийской научной конференции с участием зарубежных ученых «Математическое и физическое моделирование опасных природных явлений и техногенных катастроф». – Томск, 2010. – С 74-75.