

На правах рукописи



Шаталов Павел Сергеевич

СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО УПРАВЛЕНИЮ
ПРИРОДНЫМИ ПОЖАРАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ И ДАННЫХ
КОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Специальность: 05.13.01 - Системный анализ, управление и обработка
информации (информатика, вычислительная техника, управление)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск - 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный технологический университет» (ФГБОУ ВО СибГТУ) на кафедре системотехники.

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор **Доррер Георгий Алексеевич**

Официальные оппоненты:

Дмитриев Михаил Геннадьевич, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление», лаборатория 11-3, главный научный сотрудник

Нежевенко Евгений Семенович, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Института автоматизации и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, тематическая группа опто-электронных специализированных процессоров, ведущий научный сотрудник

Ведущая организация:

Национальный исследовательский Томский государственный университет.

Защита состоится «04» февраля 2016 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 999.007.02 на базе Сибирского федерального университета и Института вычислительного моделирования СО РАН по адресу: 660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, 26, ауд. УЛК 115.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Сибирского федерального университета www.sfu-kras.ru.

Автореферат разослан 28 декабря 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Бронов Сергей Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Проблема природных пожаров, к которым относятся пожары в лесах, степях, на торфяниках и других природных объектах, приобрела во всем мире масштабы, с которыми человечество столкнулось впервые. Озабоченность этой проблемой, вызванной глобальным изменением климата Земли, отмечается не только во многих странах, в том числе и России, но и в профильных комитетах ООН.

Стихийные природные пожары – опасные и динамичные процессы, возникающие, как правило, случайно во времени и пространстве, зачастую в труднодоступных местах, являются весьма неудобным объектом для изучения и воздействия на него. С точки зрения теории управления – это объекты с распределенными параметрами типа движущейся волны в нестационарной и анизотропной среде на поверхности Земли. Управление такими объектами также носит пространственно распределенный характер.

Усилия по решению всего комплекса проблем, вызываемых природными пожарами, формулируются в РФ как пожароуправление. Это сложная природно-административная система, в которой участвуют различные ведомства, вырабатывается и принимается множество решений на различных уровнях управления, для чего создаются соответствующие системы поддержки принятия решений, основанные, как правило, на использовании различных математических моделей и соответствующих информационных систем, в том числе с использованием космических данных. Спектр принимаемых решений весьма широк. Они могут касаться как проектирования противопожарных мероприятий при лесоустройстве, устранения антропогенных рисков возникновения пожаров, так и управления противопожарными силами и средствами при борьбе с действующими пожарами. Во всех этих случаях большую роль играют автоматизированные системы поддержки принятия решений.

В настоящее время доступны данные трех отечественных систем мониторинга состояния лесов: ИСДМ-Рослесхоз (Рослесхоз), Космоснимки (фирма СКАНЭКС), Космоплан (МЧС России). За рубежом для поддержки принятия решений используются системы BehavePlus, FARSITE и ряд других. Однако в указанных системах либо совсем отсутствуют функции прогнозирования динамики пожаров, либо эти функции основываются на упрощенных математических (экспериментальных) моделях, которые не позволяют достаточно точно прогнозировать параметры пожара и принимать обоснованные решения по управлению пожарной ситуацией.

В тоже время интенсивно развиваются системы прогнозирования природных пожаров, опирающиеся на описание физико-химических процессов, протекающих при горении растительного горючего. В основе математических моделей таких систем лежат законы сохранения энергии, массы и импульса (А.М. Гришин с сотрудниками, 1984-2013, R.R.Lynn, 1997, W.Mell, 2007, D. Morvan, 2004 и др.). С помощью таких моделей можно достаточно точно рассчитывать параметры процесса горения растительного горючего в трехмерном пространстве, однако в силу своей сложности они требуют большого объема исходных данных и очень сложных вычислений, поэтому программные реализации таких моделей появились сравнительно недавно. Одной из таких систем является программа

WFDS (Wildland-urban interface Fire Dynamics Simulator), разработанная Национальным институтом стандартов и технологий (NIST) и Лесной службой (США). Подобные программы полезны при проведении компьютерного моделирования и проектировании систем пожарного лесоустройства, однако для решения динамических задач в реальном масштабе времени их быстродействие совершенно недостаточно даже при использовании современных многопроцессорных вычислительных систем. По оценкам специалистов, такой расчет осуществляется в 500-5000 раз медленнее реального процесса.

Таким образом, в области пожароуправления существует актуальная системная проблема разработки эффективных методов поддержки принятия решений на основе нового класса моделей, которые основаны на рациональном использовании физически обоснованных моделей, но при этом обладают достаточным быстродействием при их реализации на высокопроизводительных вычислительных системах, с использованием соответствующей информационной базы, включающей данные космического мониторинга.

Целью диссертационной работы является создание системы поддержки принятия решений по управлению природными пожарами, состоящей из следующих компонентов:

- математические модели динамики природных пожаров;
- алгоритмы и численные методы реализации математических моделей на высокопроизводительных вычислительных системах;
- подсистема информационного обеспечения математических моделей;
- основные сценарии принятия решений по пожароуправлению.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

- анализ пожароуправления как сложной природно-административной системы;
- освоение и локализация программного пакета WFDS на отечественных высокопроизводительных вычислительных системах;
- проведение компьютерных экспериментов по уточнению экспериментальных моделей;
- разработка комплекса математических моделей, использующих отдельные модули программного пакета WFDS для получения быстродействующих моделей с приемлемой точностью;
- привязка моделей свойств растительных горючих материалов к отечественной системе лесной таксации;
- использование космических снимков лесов для создания входных данных для систем моделирования и поддержки принятия решений;
- разработка на базе предложенных моделей алгоритмов решения ряда конкретных задач принятия решений при пожароуправлении.

Объектом исследования являются алгоритмы описания типовых ситуаций при управлении пожарами, создаваемые на основе использования современных программных систем и космической информации.

Предметом исследования служат задачи поддержки принятия решений при пожароуправлении, решаемые с помощью математических моделей природных пожаров, их программные реализации и информационное обеспечение.

Методы исследования. В качестве методов исследования используются методы системного анализа: математическое моделирование, теория принятия решений, вычислительные эксперименты, обработка экспериментальных данных.

Научная новизна работы.

1. Разработан метод уточнения параметров экспериментальных моделей природных пожаров отличающийся тем, что дорогостоящие натурные эксперименты заменены компьютерным моделированием в системе WFDS, что позволило повысить точность моделирования без серьезных затрат. В частности, оценено совместное влияние скорости ветра и уклона местности на скорость распространения природного пожара, получены адекватные аналитические зависимости. Работа проводилась совместно с лабораторией Pacific Wildland Sciences Lab Лесной службы США (г. Сиэтл, руководитель W. Mell).
2. Предложена методика создания гибридных моделей, объединяющая возможности экспериментальных и аналитических систем, что позволяет повысить точность моделирования при сохранении достаточного быстродействия. Методика реализована путем учета в экспериментальной модели эффекта турбулентности локальных воздушных потоков перед фронтом пожара, рассчитанного с помощью аналитической модели.
3. Впервые решена комплексная задача по созданию информационной основы для моделирования растительных пожаров, включающая следующие подзадачи:
 - оценка параметров растительного горючего по данным таксационного описания лесных участков, что позволило привязать систему WFDS к отечественной системе лесоустройства;
 - представление растительного горючего как тонкого слоя на поверхности Земли(граничная модель), характеристики которого оцениваются на основе космических снимков лесных территорий и карт лесов, что необходимо для моделирования крупных природных пожаров;
 - разработка алгоритма получения входных данных о топографии местности для системы WFDS на основе свободно распространяемых цифровых моделей высот (Digital Elevation Model - DEM) со спутников SRTM и ASTERGDDEM.
4. Впервые на основе физически обоснованных моделей в 3D-пространстве предложены алгоритмы по поддержке принятия управленческих решений в следующих задачах:
 - прогнозирование процесса распространения природного пожара в нестационарных условиях в анизотропной среде;
 - определение безопасной ширины противопожарных разрывов в слое горючих материалов;
 - оценка возможности воспламенения объектов инфраструктуры от теплового воздействия приближающегося природного пожара;
 - расчет запаса времени для принятия противопожарных мер при угрозе объектам инфраструктуры;
 - расчет путей локализации природных пожаров силами пожарных команд;

- расчет путей безопасной эвакуации людей и техники из зоны действующего природного пожара.

Достоверность полученных в работе результатов определяется знакомством автора с научными и практическими разработками в данной области, использованием адекватных математических моделей и данных космического мониторинга лесов, сравнением расчетных и экспериментальных данных, большим количеством компьютерных экспериментов, показавших достаточное совпадение с наблюдением за реальными пожарами.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Программа WFDS локализована в отечественных кластерных системах, что позволяет использовать ее в системах поддержки принятия решений по пожароуправлению в РФ. Произведена оценка эффективности распараллеливания вычислений в системе WFDS на нескольких вычислительных узлах.
2. Разработан алгоритм создания входных файлов о характеристиках растительных горючих материалов для системы WFDS на основе таксационных описаний леса.
3. Разработан алгоритм для создания входных файлов модели тонкого слоя для WFDS на основе космических снимков лесных территорий и карт лесов.
4. На основе исходного кода WFDS создано программное обеспечение для решения ряда актуальных задач пожароуправления, которое может быть использовано для оперативного прогнозирования динамики природных пожаров в отечественных системах пожарного мониторинга лесов, таких как ИСДМ-Рослесхоз, КАСКАД (МЧС) и других.

Внедрение результатов работы:

1. Результаты, полученные в диссертации, включены в итоговый отчет по программе фундаментальных исследований Президиума РАН № 18 «Алгоритмы и математическое обеспечение для вычислительных систем сверхвысокой производительности», проект 1.6 «Разработка математических моделей, алгоритмов и программного обеспечения для прогнозирования и расчета параметров крупных и катастрофических природных пожаров на территории Российской Федерации». Работа выполнялась в 2012-2014 годах по договору с ООО «Технологии системного анализа», г. Москва.

2. Результаты работы приняты к использованию в Центре НИОКР Сибирской пожарно-спасательной академии.

3. Программные разработки, выполненные в диссертации, используются в учебном процессе Сибирского государственного технологического университета при преподавании дисциплины «Вычислительная математика».

4. Локализованная и доработанная система WFDS установлена на суперкомпьютере Сибирского Федерального Университета.

Соответствие паспорту специальности. Диссертация соответствует паспорту специальности 05.13.01 – системный анализ, управление и обработка информации (информатика, вычислительная техника, управление) по следующим пунктам:

4. Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации.

5. Разработка специального математического и программного обеспечения систем анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации.

9. Разработка проблемно-ориентированных систем управления, принятия решений и оптимизации технических, экономических, биологических, медицинских и социальных объектов.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: Всероссийской научной конференции с международным участием «Математическое и физическое моделирование опасных природных явлений и техногенных катастроф» (г. Томск, 2012); III, IV, V и VI международных научно-технических конференциях «Технологии разработки информационных систем» (г. Таганрог, 2012 - 2015); Международном конгрессе «Лесные пожары и изменение климата. Проблемы управления пожарами в природных и культурных ландшафтах Евразии» (г. Новосибирск, 2013); IX Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, посвященной 385-летию со дня основания г. Красноярска (г. Красноярск, 2013); Всероссийской научно-практической конференции «Многоядерные процессоры, параллельное программирование, ПЛИС, системы обработки сигналов» (Барнаул, 2013); VIII Всероссийском конгрессе женщин-математиков, посвященному памяти Софьи Васильевны Ковалевской. (Красноярск, 2013); Всероссийской научно-практической конференции «Молодые ученые в решении актуальных проблем науки» (Красноярск, 2013); Международной конференции Fourth Fire Behave and Fuels Conference (Санкт-Петербург, 2013); Всероссийской научно-практической конференции «Мониторинг, моделирование и прогнозирование опасных природных явлений и чрезвычайных ситуаций» (Железногорск, 2014); Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 70-летию Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН «Лесные биогеоценозы бореальной зоны: география, структура, функции, динамика» (Красноярск, 2014); Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием) «Лесной и химический комплексы - проблемы и решения» (Красноярск, 2014); Международной научно-практической конференции «Фундаментальная информатика, информационные технологии и системы управления: реалии и перспективы» (Красноярск, 2014); Международной конференция молодых ученых «Информационные технологии в науке, образовании и управлении» (Гурзуф, 2015).

Автор в 2012 – 2014 годах в качестве исполнителя принял участие в выполнении проекта 1.6 «Разработка математических моделей, алгоритмов и программного обеспечения для прогнозирования и расчета параметров крупных и катастрофических природных пожаров на территории Российской Федерации», по программе фундаментальных исследований Президиума РАН №18 «Алгоритмы и математическое обеспечение для вычислительных систем сверхвысокой производительности».

По диссертационной работе, представленной на конкурс, автору была присуждена Государственная премия Красноярского края 2013 года среди аспирантов.

В 2014 году автор прошел стажировку в Лаборатории Pacific Wildland Sciences Lab Лесной службы США (г. Сиэтл).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 работ (из них четыре по списку ВАК). Из работ, выполненных совместно, в диссертацию включены результаты, полученные автором лично.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, содержащего 164 наименования и пяти приложений. Диссертация содержит 38 рисунков. Объем диссертации составляет 134 страниц, приложений - 28 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении сформулирована тема исследования и обоснована актуальность темы диссертации, поставлена цель и указаны задачи исследования, дана краткая характеристика содержания работы, приведены сведения о её общей структуре, приведены основные научные и практические результаты проведенных исследований, показана их научная новизна и практическая значимость.

В первой главе проведен системный анализ отечественной системы пожароуправления в РФ, рассматриваются основные нормативные документы, структура, принимаемые решения.

В разделе 1.1 рассмотрены основные нормативные документы регламентирующие деятельность по пожароуправлению в РФ.

Проведен анализ задач и требований к принятию решений, предусмотренных данными документами, на основе которого составлена общая схема деятельности по пожароуправлению в виде набора IDEF0-диаграмм. Контекстная диаграмма этой системы приведена на Рисунке 1.

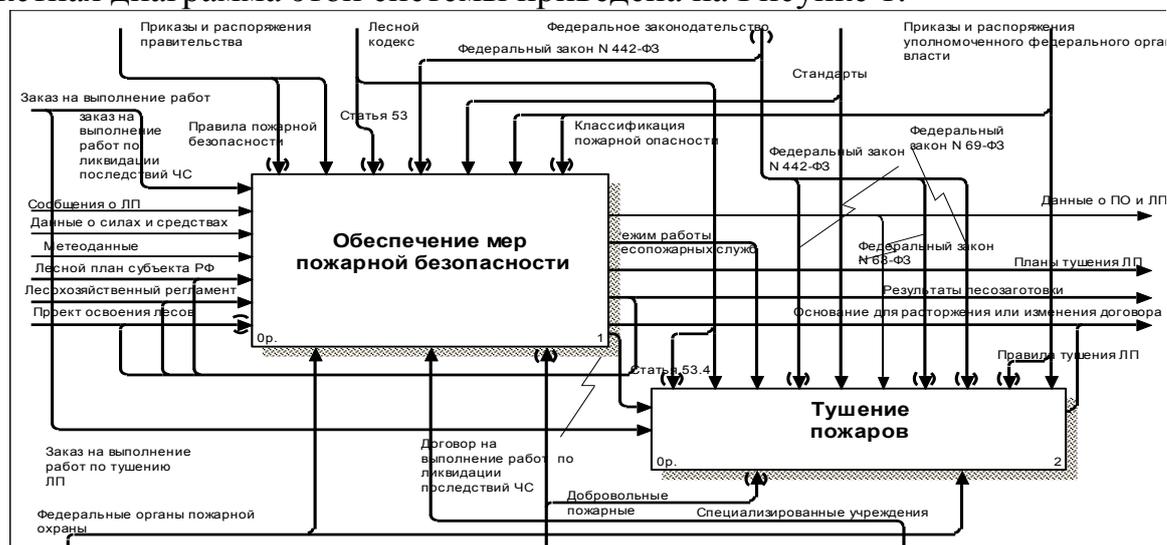


Рисунок 1 - Схема деятельности по пожароуправлению в РФ

В разделе 1.2 рассмотрены типовые задачи принятия решений при пожароуправлении. Отмечается определенная аналогия между пожароуправлением и принятием решений в военном деле. При этом при решении всех перечисленных задач качество принимаемых решений во многом определяется наличием адекватных математических моделей природных пожаров и их информационного обеспечения.

Во второй главе проведен обзор и классификация математических моделей, используемых при принятии решений в системе пожароуправления, и соответствующих программных средств.

Раздел 2.1 посвящен обзору существующих математических моделей природных пожаров. Указаны основные цели моделирования природных пожаров и приводится классификация моделей природных пожаров по уровню принимаемых решений. Дается сравнительная характеристика моделей и областей их использования. Среди математических моделей, предназначенных для принятия решений по пожароуправлению, наиболее важными и сложными являются модели, описывающие динамику природных пожаров. Условно такие модели можно разделить на аналитические и экспериментальные.

Аналитические модели детально описывают физико-химические процессы, которые протекают при горении растительного горючего (А.М. Гришин, 1984, R.R.Lynn, 1997, W.Mell, 2007, D. Morvan, 2004 и др.). Обладая высокой точностью вычислений параметров процесса горения, эти модели, к сожалению, обладают высокой вычислительной сложностью, поэтому их реализация в режиме реального времени в настоящее время невозможна даже при использовании высокопроизводительных вычислительных систем.

Экспериментальные модели основываются на упрощенных представлениях о процессе горения и использовании экспериментальных данных. К таким моделям относятся модели Г.Н. Коровина (1969), М.А. Софронова (1967), МакАртура (1973), Байрама (1959) и целый ряд других. Наиболее известной моделью этого типа является модель Р. Ротермела (1976), которая используется в ряде систем прогнозирования, в частности, в таких программных продуктах, как BehavePlus, FARSITE. Эти модели, в силу своей простоты, имеют высокую скорость расчета параметров пожаров, однако обладают, как правило, ограниченной точностью прогнозирования.

Главным способом улучшения эффективности экспериментальных моделей могло бы быть проведение большого числа полевых и/или лабораторных экспериментов. Но полевые эксперименты чрезвычайно сложны и дороги, а лабораторные эксперименты также дороги и не всегда адекватны реальному процессу. Однако существует еще один способ повышения качества моделирования – проведение ряда вычислительных экспериментов с применением точных аналитических моделей с последующей обработкой их результатов для совершенствования экспериментальных моделей. При этом все необходимые условия протекания эксперимента могут быть легко контролируемы, что невозможно при реальных экспериментах, а время вычислений не является ограничением.

При принятии решений по пожароуправлению актуальной является также проблема обеспечения математических моделей необходимыми данными о свойствах растительных горючих материалов с учетом особенностей отечественной системы лесоустройства. Это, в свою очередь, связано с использованием космической информации для получения входных данных для систем прогнозирования природных пожаров, что является самостоятельной актуальной задачей.

В разделе 2.2 рассмотрена математическая модель, имеющая важное значение, как для описания динамики пожаров, так и процессов управления

противопожарными силами и средствами. Речь идет об областях достижимости управляемых систем. Применительно к данной работе область достижимости природного пожара может рассматриваться как движущаяся волна огня, точнее, внешняя граница кромки пожара.

Контур пожара (внешняя граница фронта пожара) в каждый момент времени рассматривается как непрерывная дифференцируемая линия на плоскости $(x, y) \in D$, где D - область моделирования (карта лесной местности). Уравнение этой линии имеет вид $\varphi(x, y, t) = 0$. В каждой точке контура должно выполняться условие неразрывности $d\varphi/dt = 0$, откуда следует уравнение Гамильтона-Якоби:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + R \cdot \text{grad} \varphi = \frac{\partial \varphi}{\partial t} + R \cdot \hat{n} \cdot |\text{grad} \varphi| = 0, \quad (1)$$

где $R = [R_x, R_y]$ - вектор скорости фронта пожара, зависящий от координат и времени, $\text{grad} \varphi = \left[\frac{\partial \varphi}{\partial x}, \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right]^T$ - вектор нормали к контуру, $\hat{n} = \text{grad} \varphi / |\text{grad} \varphi|$ - единичный вектор нормали к контуру, $H = R \cdot \text{grad} \varphi$ - функция Гамильтона.

$$\text{При } t = 0, \quad \varphi(x, y, 0) = \varphi_0(x, y), \quad (2)$$

где $\varphi_0(x, y) = 0$, - уравнение контура в начальный момент.

Написанные уравнения представляют собой простейшую геометрическую модель динамики пожара. Решение задачи (1), (2) позволяет вычислять конфигурацию контура при заданных функциях скоростей и заданных начальных условиях. Динамическая область $X(X_0, t)$ внешние границы которой определяются уравнениями Гамильтона-Якоби, является областью достижимости пожара и также называется процессом распространения (Г.А. Дорпер, 2008).

С другой стороны, возможное перемещение людей или техники по лесной территории также может быть описано с помощью областей достижимости, которые задаются уравнениями Гамильтона-Якоби и могут рассматриваться как процесс распространения $Y(Y_0, t)$, который определен в той же области D и имеет с процессом $X(X_0, t)$ общую шкалу времени. Взаимодействие указанных областей достижимости играет важную роль в динамических задачах пожароуправления.

В разделе 2.3 приводится обзор существующего программного обеспечения для компьютерного моделирования природных пожаров (BehavePlus, FARSITE, FIRETEC, FIRESTAR). Сделаны выводы об ограниченной пригодности рассмотренных систем для задач пожароуправления.

В разделе 2.4 описана программная система WFDS (Wildland-urban interface Fire Dynamics Simulator), выбранная в качестве базовой для поддержки принятия решений. Система WFDS имеет открытый исходный код и свободно распространяется по лицензии MIT. Эта система состоит из подсистем, основанных на моделях двух типов: WFDS-PB - аналитическая модель природного пожара, WFDS-LS - экспериментальная модель природного пожара.

В разделе 2.4.1 описана подсистема WFDS-PB (Physics-based), которая реализует вычислительную гидродинамическую модель (CFD) теплопереноса при горении. Данная подсистема базируется на продукте FDS (Fire Dynamics Simulator), разработкой которого занимается Национальный Институт Стандартов и Технологий (NIST, США) уже 25 лет. В WFDS-PB численно решаются уравнения Навье-Стокса для низкоскоростных температурно-зависимых потоков, особое внимание уделяется распространению дыма и теплопередаче при пожаре.

Основные уравнения математической модели WFDS-PB (А.М. Гришин, 1987, W.Mell,2007):

Уравнение сохранения массы:

$$\rho \frac{\partial Y_i}{\partial t} + \rho \mathbf{u} \cdot \nabla Y_i = \nabla \cdot \{(\rho D)_{\text{LES}} \nabla Y_i\} + \dot{m}_i''' \quad (3)$$

Уравнение сохранения энергии:

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} + \rho \mathbf{u} \cdot \nabla h = \nabla \cdot (\lambda_{\text{LES}} \nabla T) + \nabla \cdot (\sum_i h_i (\rho D)_{\text{LES}} \nabla Y_i) - \nabla \cdot \dot{q}_r'' + \frac{dp_0}{dt} \quad (4)$$

Уравнение сохранения импульса:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla H - \mathbf{u} \times \boldsymbol{\omega} = \frac{1}{\rho} [(\rho - \rho_\infty) \mathbf{g} + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} - \mathbf{F}_D], \quad (5)$$

$$\nabla H = \frac{1}{2} \nabla |\mathbf{u}|^2 + \frac{1}{\rho} \nabla p_d \cong \frac{1}{2} \nabla |\mathbf{u}|^2 + \frac{1}{\rho_\infty} \nabla p_d, \quad (6)$$

$$\boldsymbol{\tau} = \mu_{\text{LES}} \left(\text{def } \mathbf{u} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I} \right). \quad (7)$$

Уравнение состояния:

$$p_0 = \mathcal{R} \rho T \sum_i Y_i / M_i = \frac{\mathcal{R} \rho T}{M}. \quad (8)$$

В формулах (3)-(8) приняты следующие обозначения:

ρ - суммарная плотность газа (кг/м³), \mathbf{u} - вектор скорости (м/с), \mathbf{g} - вектор ускорения свободного падения (м/с²), $\boldsymbol{\tau}$ - тензор вязких напряжений (кг/м·с²), $Y_i = \frac{\rho_i}{\rho}$ - массовая доля локальной смеси i , D - коэффициент диффузии (м²/с), \dot{m}_i''' - расход химической массы газа i (кг/с·м³), p_0 - термодинамическое давление (Па), \mathcal{R} - универсальная газовая постоянная $\mathcal{R} = 8,314 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{моль}}$, T - температура (°C), M_i - молекулярная масса газа i (г/моль), $M = (\sum_i Y_i / M_i)^{-1}$ - средняя молекулярная масса газовой смеси (г/моль), $h = \sum_i Y_i h_i$ - энтальпия смеси (кДж/кг), λ_{LES} - теплопроводность газовой смеси, используемая в методе крупных вихрей - LES (Вт/м), μ_{LES} - турбулентная вязкость, используемая в методе крупных вихрей - LES (кг/м·с), \dot{q}_r'' - вектор лучистого теплового потока (кВт/м²).

Система (3) – (8) дополняется необходимыми начальными и граничными условиями. Кроме того, должны быть заданы характеристики растительного горючего, топография местности и данные о погоде. Уравнения решаются численно на основе метода конечных объемов.

Отмечается, что процесс компьютерного моделирования природного пожара на основе программы WFDS-PB является очень требовательным к вычислительным ресурсам системы и может быть реализован только на высокопроизводительных кластерных системах (суперкомпьютерах).

В работе экспериментальные расчеты проводились на суперкомпьютере лаборатории Pacific Wildland Sciences Lab (США) и суперкомпьютере Сибирского Федерального Университета, на котором была локализована программа WFDS-PB.

Была проведена оценка эффективности работы параллельных алгоритмов, применяющихся в WFDS-PB путем проведения вычислительных экспериментов на различном количестве вычислительных узлов и при различных способах разбиения вычислительной области: одномерном и двумерном. Эксперименты показали, что с увеличением количества вычислительных узлов скорость вычислений растет, однако этот эффект постепенно снижается в силу закона

Амдала. Кроме того, двумерное разбиение дает некоторый выигрыш в скорости вычислений.

В разделе 2.4.2 описана вторая подсистема WFDS-LS (LevelSet), которая является экспериментальной, она позволяет быстро рассчитывать контуры пожара на основе представлений о пожаре как о движущейся волне горения.

Приводятся основные соотношения модели WFDS-LS (LevelSet) основанной на формализме локальных множеств. Эта модель основана на уравнении Гамильтона-Якоби (1) и использует для определения скорости фронта пожара правила МакАртура (1973). Эта скорость зависит от условий горения и направления нормали к контуру. Максимальная скорость распространения (в направлении ветра и/или уклона местности) вычисляется на основе данных о горючих материалах и инфраструктуре. Зависимость скорости от направления нормали определяется так называемой индикатрисой нормальной скорости (фигуротрисой). В общем виде выражение для нормальной скорости фронта пожара под влиянием ветра и уклона местности имеет вид:

$$R_n(x, y, t, S, \theta) = R_0(x, y, t, U, S)\chi(\theta - \theta_w), \quad (9)$$

где R_0 - скорость распространения пожара в направлении ветра или уклона местности, χ - индикатриса нормальной скорости, U - скорость ветра, S -уклон местности, θ - направление нормали, θ_w - направление ветра или уклона.

Построение конфигурации фронта пожара в неоднородных и нестационарных условиях в системе осуществляется на основе алгоритма локальных множеств LevelSet, который основан на численном решении уравнения Гамильтона-Якоби для неоднородной и анизотропной среды и реализует, по существу, принцип Гюйгенса, когда каждая точка фронта пожара рассматривается как источник огня с индикатрисой, определяемой свойствами горючего и параметрами внешней среды (Рисунок 3).

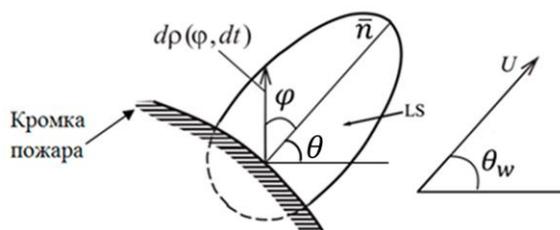


Рисунок 2 - Схема кромки пожара, где LS- локальное множество, θ - направление нормали, θ_w - направление ветра (по отношению к горизонтальной линии), U - скорость ветра, угол φ - между нормалью и текущим направлением

В разделе 2.5 сделан вывод о целесообразности использования системы WFDS-LS как достаточно эффективного средства при поддержке принятия решений по оперативному управлению борьбой с пожарами. Важной также является способность этой программы работать в одной системе совместно с WFDS-PB.

Третья глава посвящена совершенствованию экспериментальных моделей с помощью вычислительных экспериментов. В данной главе описаны вычислительные эксперименты, которые автором были проведены совместно с сотрудниками лаборатории Pacific Wildland Sciences Laboratory в г. Сиэтл, США (руководитель В. Мелл). Целью экспериментов было тестирование полученных ранее моделей, а также уточнение некоторых зависимостей в системе WFDS-LS.

В разделе 3.1 рассмотрена задача уточнения зависимости скорости распространения фронта пожара от величины уклона местности S при различных значениях скорости ветра.

Этот выбор объясняется, в частности, тем, что необходимо было протестировать зависимость, которая представлена в работе Forest Fire Danger Meter (1973) Мак Артура и использована В. Меллом (2007) в системе WFDS-LS.

Скорость фронта пожара может быть представлена в виде

$$R = R_S = C_S R_0, \quad (10)$$

где R_S - скорость фронта пожара по наклонной поверхности, R_0 -скорость фронта пожара по горизонтальному слою горючего. Значение C_S в формуле (10) является функцией от угла наклона поверхности S и расположении точки кромки пожара, определяемой углом φ .

Расчеты проводились в подсистеме WFDS-PB. На первом этапе было проведено 30 вычислительных экспериментов в WFDS-PB для выявления эффективности прогнозирования исходной версии WFDS-LS. Эксперименты проводились на наклонных поверхностях с различным углом наклона S и при различных скоростях ветра U .

Экспериментальные данные сравнивались с результатами, полученными при применении правил модели МакАртура. Для этого с помощью WFDS-PB были получены скорости распространения фронтов пожара R_0 на горизонтальной поверхности при значениях ветра в 1, 5 и 12 м/с, после чего к этим скоростям были применены правила, предложенные МакАртуром.

Эксперименты показали, что при небольшой скорости ветра ($U=1$ м/с) расхождения в значениях невелики, однако при больших скоростях ветра результаты, полученные моделью МакАртура, существенно отличаются от данных эксперимента в WFDS-PB.

В разделе 3.1.1 получена единая формула путем обработки полученных данных методами математической статистики.

С помощью системы WFDS-PB была проведена серия расчетов, для различных сочетаний скорости ветра и уклона местности. По результатам расчетов была получена аппроксимационная модель второго порядка:

$$R = -0.158 + 0,313 \cdot U + 0,057 \cdot S - 0,014 \cdot U^2 - 1.861 \cdot 10^{-4} \cdot S^2 + 3.518 \cdot 10^{-5} \cdot U \cdot S \quad (5)$$

Уравнение (5) позволяет судить о характере совместного влияния скорости ветра и уклона местности на скорость фронта пожара. Из формулы видно, что степень влияния снижается по мере роста величины этих параметров, кроме того, взаимодействие этих параметров незначительно. Полученные результаты не противоречат известным наблюдениям лесоводов (М.А. Софронов, 2005).

Адекватность модели оценивалась по критерию Фишера. Полученное значение $F=189,9 \gg F_{табл}$ говорит о том, что модель адекватно описывает экспериментальные данные. В работе показано, что использование полученной формулы позволило повысить качество прогнозирования динамики пожара по сравнению с исходной версией WFDS-LS.

В разделе 3.2 рассмотрен принцип создания гибридной версии WFDS-LS, использующей элементы аналитической системы WFDS-PB, на примере более точного учета скорости ветра.

В существующих компьютерных системах моделирования природных пожаров, таких как FARSITE или WFDS-LS, ветер задается только направлением

и скоростью, таким образом, поле ветра предполагается постоянным во всех точках вычислительной области по величине и направлению и не зависящим от геометрии ландшафта.

Как можно видеть из основных уравнений аналитической модели WFDS-PB на каждом временном шаге вычисляется трехмерный вектор скорости воздушного потока $\mathbf{u} = (u_x, u_y, u_z)$ в каждой точке вычислительной области. Заменяв двумерный вектор скорости ветра, постоянный по величине и направлению, используемый в модели WFDS-LS, вектором \mathbf{u} можно уточнить распределение скоростей ветра, согласно реальному ландшафту. Так как в системе WFDS одновременно реализованы две математические модели природного пожара, то возможно использовать некоторые функции WFDS-PB в WFDS-LS.

Таким образом, моделирование воздушных потоков может выполняться в WFDS-PB, а построение контура пожара с учетом влияния ветра, описываемого аналитической моделью, будет выполнять WFDS-LS.

При горении во время природного пожара огонь, влияя на атмосферу, создает турбулентные потоки, которые изменяют скорость и направление ветра и, тем самым, оказывают влияние на распространение пожара.

Для кромки пожара, который рассчитывается по модели WFDS-LS, можно задать значение теплового потока q , который будет оказывать влияние на атмосферу, создавая локальные турбулентные потоки, влияющие и на сам пожар, т.е. образуя в системе моделирования обратную связь.

В общем виде гибридный алгоритм работы для модифицированной системы WFDS-LS можно описать следующим образом.

Шаг 1. $t=0$.

Шаг 2. Модуль WFDS-LS строит контур пожара, исходя из параметров источника возгорания и текущих параметров ветра, и передает параметр в модуль WFDS-PB.

Шаг 3. Модуль WFDS-PB производит расчет параметров локальных турбулентных потоков при заданном q , в результате записывая полученные значения скоростей и векторов поля ветра в массив данных.

Шаг 4. Модуль WFDS-LS, считывая данные из массива, перестраивает кромку пожара исходя из новых значений скорости и направления ветра.

Шаг 5. $t = t + \Delta t$

Шаг 6. Если $t > t_{end}$ то конец, иначе переход на Шаг 2.

Необходимо отметить, что значение параметра q возможно задавать во входном файле WFDS-LS. Таким образом, если задать $q=0$, то тогда горящая кромка пожара не будет оказывать никакого влияние на ветер, т.е. обратная связь будет отсутствовать. Тем не менее, ветер в каждой расчетной точке уже не будет иметь одну и ту же скорость и направление, а будет меняться в зависимости от топографии местности, тем самым, изменяя форму кромки пожара. На Рисунке 4 (а)-(в) показаны контуры кромки пожара, полученные в обычной модели WFDS-LS и гибридной модели WFDS-LS для $q=0$ и $q=700$ кВт/м².

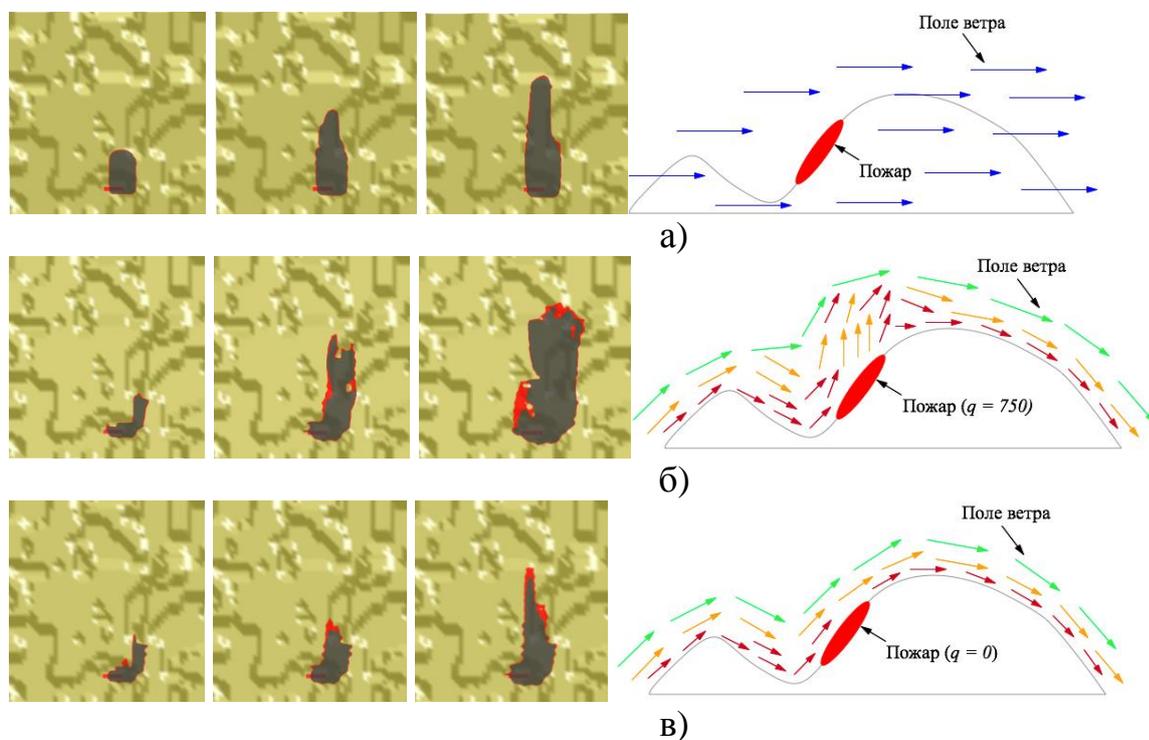


Рисунок 3 - Результаты моделирования пожара с помощью гибридной модели: а) – исходная система WFDS-LS, б) – гибридная модель при $q = 700$ кВт/м², в) – гибридная модель при $q = 0$.

Как можно видеть из Рисунков 3 (б)-(в), контур пожара в гибридной модели имеет более хаотичную форму, и больше соответствует контуру пожара, полученному в WFDS-PB. Время вычисления на одном узле суперкомпьютера для каждого из подходов приведено в Таблице 1:

Таблица 1

	WFDS-LS	Гибридная WFDS-LS		WFDS-PB
		$q = 0$	$q = 700$ кВт/м ²	
Время вычислений, сек.	4	89	97	>2 часов

В силу того, что в гибридном подходе используются элементы аналитической модели WFDS-PB, точность результатов моделирования будет зависеть, в том числе, и от размера узла вычислительной сетки.

Подход к созданию гибридной модели WFDS-LS, реализованный в данной работе, может быть применен и при создании других гибридных моделей (например, при расчете дымового шлейфа), что открывает путь для повышения эффективности прогнозирования динамики природных пожаров в системах оперативного управления борьбой с пожарами.

Четвертая глава посвящена информационному обеспечению процессов принятия решений при пожароуправлении. Проблема обеспечения систем поддержки принятия решений необходимыми данными о свойствах растительных горючих материалов и топографии местности является одной из ключевых для эффективного пожароуправления. В данной главе рассмотрены возможные подходы к оценке значений этих параметров для лесов Российской Федерации.

В разделе 4.1 приводится описание понятия "fuel model - модель горючего", как стилизованного набора характеристик горючих материалов растительного покрова, используемых в качестве входных данных при моделировании

природных в ряде стран. В нашей стране, к сожалению, не создана подобная система описания растительного горючего, однако мы обладаем большим объемом таксационных описаний лесов, которые могут использоваться при оценке характеристик горючего.

Раздел 4.2. посвящен методу создания специализированных баз данных характеристик горючего, который заключается в том, что компоненты РГМ (растительные горючие материалы), определяемые совокупностью таксационных характеристик лесного участка, сопоставляются с известными моделями физических свойств этих компонентов, что дает возможность получить необходимые данные для моделирования процессов горения при лесных пожарах. Алгоритм получения характеристик РГМ основан на методике, предложенной Л. П. Золотухиной (2005), а так же на основе работы R. Rothermel (1972).

В разделе 4.3 предложен алгоритм получения данных о ландшафте для WFDS на основе использования космических снимков рельефа. В WFDS вся информация о моделируемом задании хранится во входном файле с расширением *.fds, в том числе, информация о ландшафте. Поскольку WFDS использует вычислительную сетку, то и ландшафт задается путем заполнения конкретных вычислительных узлов сетки так называемыми твердыми препятствиями (от англ. obstacles), не имеющие никаких теплофизических характеристик, которые и формируют рельеф ландшафта (Рисунок 4).

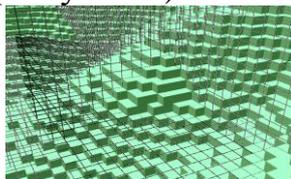


Рисунок 4 - Формирование модели рельефа с помощью заполнения узлов вычислительной сетки

Для получения сведений о рельефе необходимого участка территории используются цифровые модели высот (Digital Elevation Model - DEM). В основном эти данные представлены в растровом или векторном виде. В растровых DEM каждому растру соответствует некоторое значение высоты. Так как в WFDS используется прямоугольная вычислительная сетка, то гораздо удобнее использовать данные цифровых растровых карт высот (растры имеют форму квадрата). В работе были использованы свободно распространяемые спутниковые данные SRTM и ASTER GDEM. В результате был разработан алгоритм, позволяющий получать любые участки используемой DEM в качестве входных данных рельефа для WFDS. На Рисунке 5 приводится пример данных, полученных в результате работы алгоритма.

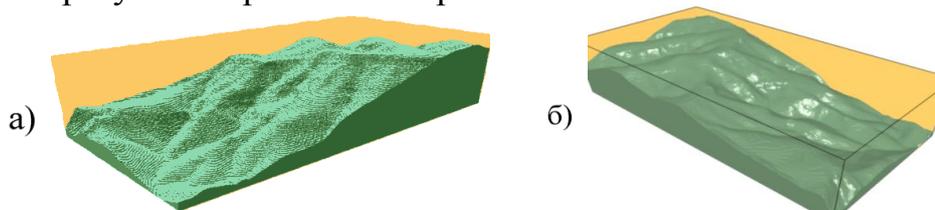


Рисунок 5 - Примеры использования алгоритма по созданию рельефа в WFDS: а) – размер растровой ячейки равен 5x5 метров, б) – размер растровой ячейки равен 2x2 метра.

В разделе 4.4 описана так называемая модель тонкого слоя или граничная модель (boundary fuel model), в которой лесной покров рассматривался как однородный слой на поверхности Земли с усредненными характеристиками горючих материалов. Эти характеристики также оценивались либо по таксационным описаниям, в частности, по преобладающей породе и запасу древесины, либо по картам лесов. Такой способ представления горючего является менее требовательным к вычислительным мощностям, что позволяет эффективнее использовать систему WFDS для оперативного моделирования лесных пожаров (Рисунок 6).

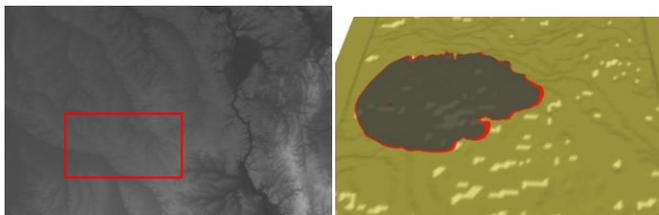


Рисунок 6 - Примеры использования модели тонкого слоя горючего при моделировании природного пожара

В результате пользователю необходимо выбрать определенный участок на DEM-слое, где будет моделироваться лесной пожар, затем на основании данных этого участка получить входной файл для WFDS, в котором необходимо разместить характеристики слоя лесных горючих материалов, а также объекты инфраструктуры, предварительно решив, какую из описанных выше моделей он будет использовать. Таким образом, модель тонкого слоя является в настоящее время одним из реальных способов задания свойств растительного горючего в отечественных системах прогнозирования лесных пожаров, в особенности при моделировании крупных пожаров.

В пятой главе рассмотрены функциональные задачи поддержки принятия решения по пожароуправлению, решаемые с помощью разработанных моделей и алгоритмов. Часть этих задач относится к проектированию противопожарного устройства лесов, другие связаны с оценкой динамики распространения пожара и взаимодействием человека с природным пожаром. В настоящей работе впервые решение этих задач осуществляется в 3D пространстве на основе использования физически обоснованных моделей и подробных данных о рельефе местности.

В разделе 5.1 исследуется влияние теплового потока, генерируемого движущимся фронтом пожара, на воспламенение растительных горючих материалов, отделенных от пожара негорючим разрывом. Эта задача важна, во-первых, для принятия решений о ширине противопожарных разрывов в лесных массивах, а, во-вторых, для определения безопасного расстояния между лесным массивом и объектом инфраструктуры. С помощью WFDS-PB вычисляется тепловой поток, исходящий от фронта растительного пожара, и накопленная энергия, воздействующая на тестируемый объект, которая сравнивается с величиной тепловой энергии, необходимой для зажигания объекта (Рисунок 7).

Раздел 5.2 посвящен оценке опасности природного пожара для населенных пунктов и иных объектов инфраструктуры с помощью аналитической модели WFDS-PB. Путем измерения теплового потока в некоторых контрольных точках, можно установить насколько пагубным будет влияние природного пожара на объект инфраструктуры.

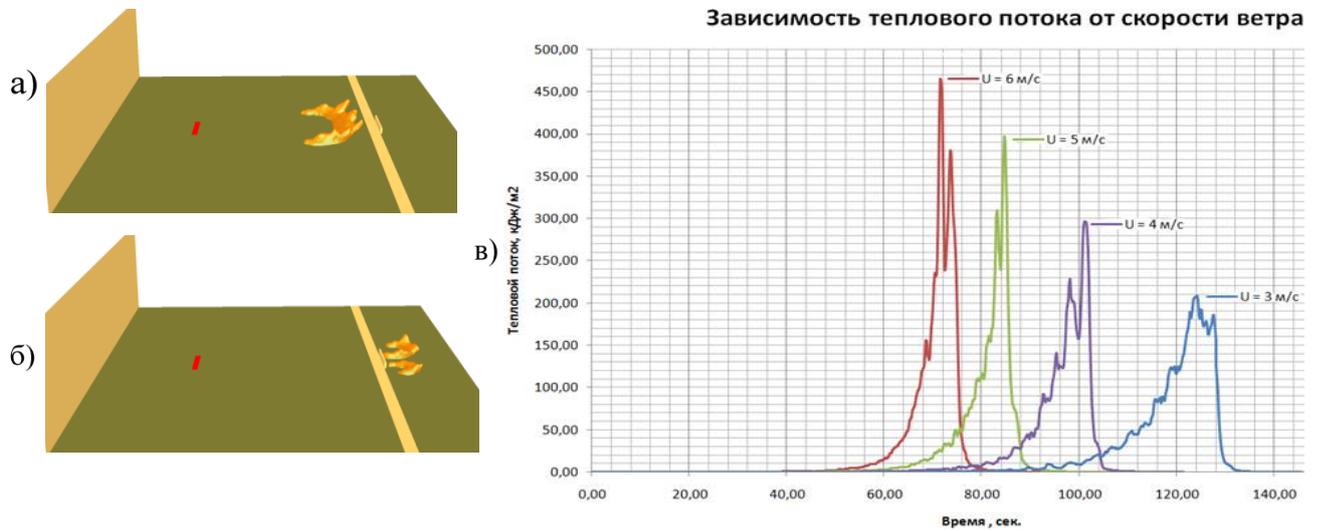


Рисунок 7 - Вычислительный эксперимент по преодолению пожаром противопожарного разрыва: а) – фронт пожара приближается к разрыву, б) - объект по другую сторону разрыва воспламенился, в) - вычисленные распределения теплового потока в зависимости от скорости ветра

Имея в наличии такой прогноз можно координировать работу пожарных команд, а также оценивать ущерб, нанесенный лесным насаждениям (Рисунок 8).

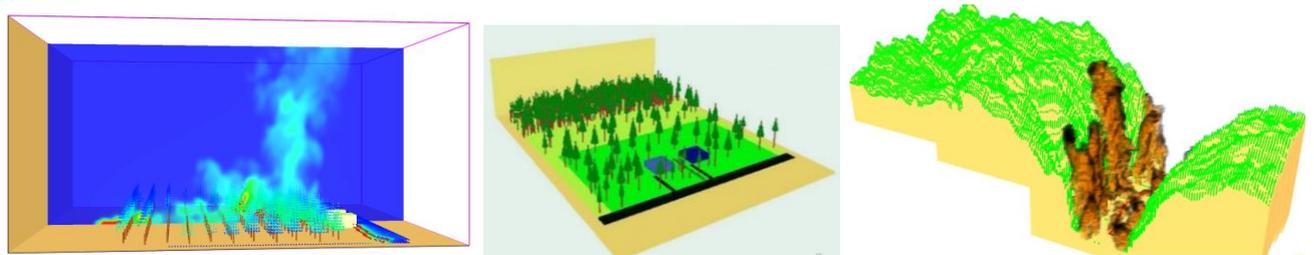


Рисунок 8 - Моделирование природного пожара вблизи объектов инфраструктуры, а так же пожара в лесном каньоне

В разделе 5.3 рассматриваются динамические задачи принятия решений.

Раздел 5.3.1 описывает прогнозирование распространения природного пожара и оценка опасности для объектов инфраструктуры. На Рисунке 9 показан прогноз динамики природного пожара вблизи населенного пункта, полученный с помощью WFDS-LS, который показывает степень опасности для этого объекта и возможный запас времени для принятия противопожарных мер или для эвакуации.



Рисунок 9 - Прогноз границ пожара вблизи населенного пункта

В разделе 5.3.2 рассматривается математическая модель процесса взаимодействия человека с природным пожаром. Растительный пожар, как объект

с распределенными параметрами управляется также с помощью распределенных в пространстве воздействий. Одним из видов такого воздействия является процесс локализации. Локализацией растительного пожара называется окружение его непроходимым для огня препятствием. Траекторию локализации обозначим $\lambda(C_0, t)$. На практике локализация осуществляется путем создания так называемых минерализованных полос или противопожарных барьеров, размеры которых предполагаются достаточными, чтобы процесс горения через них не перешёл.

При моделировании рассматриваются два динамических множества: процесс распространения пожара $G(G_0, t)$, и процесс локализации $L(C_0, t)$, определяемый областью достижимости пожарных команд. Эти процессы определены в одной и той же области пространства D и имеют общую шкалу времени. При $t = 0$ эти множества равны соответственно G_0 и C_0 , $G_0 \cap C_0 = \emptyset$. Процессы развиваются независимо друг от друга со скоростями соответственно $v(x, t, p)$ и $u(x, t, q)$ до тех пор, пока не соприкоснутся. После этого развитие процессов $G(G_0, t)$ и $L(C_0, t)$ происходит при взаимном влиянии, которое заключается в запрете на проникновение одного процесса на территорию, занятую другим. Для этого достаточно наложить ограничения на скорости процесса горения и локализации:

$$\tilde{v}(x, t, p) = \begin{cases} v(x, t, p), & \text{если } x \notin L(t) \\ 0, & \text{если } x \in L(t) \end{cases}, \quad \tilde{u}(x, t, q) = \begin{cases} u(x, t, q), & \text{если } x \notin G(t) \\ 0, & \text{если } x \in G(t) \end{cases}$$

Рассмотрим постановку задачи локализации пожара несколькими пожарными командами (Г.А. Доррер, 2008).

Пусть имеется n команд и задано множество центров $C^0 = \{C_k^0\}$, $C_k^0 \in D$, $k = 1, \dots, n$, из которых одновременно стартует n локализационных траекторий $\lambda_k = \lambda(C_k^0, t)$. Каждая из траекторий должна финишировать в заданной точке C_k^F . Эти точки образуют множество $C^F = \{C_k^F\}$, $C_k^F \in D$, $k = 1, \dots, n$.

Для каждой локализационной траектории необходимо указать ориентацию относительно процесса распространения пожара $X(X_0, t)$. Если траектория λ_k огибает $X(X_0, t)$ по часовой стрелке, то будем считать, что ориентация $\beta_k = +1$, при движении λ_k против по часовой стрелки относительно $X(X_0, t)$ ориентация $\beta_k = -1$. Множество ориентаций обозначим $B = \{\beta_k\}$, $k = 1, \dots, n$. Кроме того, должна быть задана скорость прокладки локализационных линий всеми командами v_i , $i = 1, \dots, n$, что может быть представлено в виде вектора $V = [v_1, \dots, v_n]$.

Итак, состав сил, участвующих в локализации, определяется числом команд n , тройкой множеств и вектором V . Кортеж Λ называется схемой локализации.

$$\Lambda = \{n, C^0, C^F, B, V\}$$

Алгоритм построения путей локализации заключается в следующем. Для каждой команды строится область достижимости (белые линии на Рисунке 10(а)) и определяются изохроны (линии равного времени достижимости обоими процессами) по отношению к процессу распространения пожара. Задача считается разрешимой, если возможно построение всех n траекторий, которые проходят от начальной до конечной точки, не попадая в запретную область.

На Рисунке 10 (а) показано решение задачи локализации пожара четырьмя командами, которые охватывают пожар с фронта и тыла, попарно стартуя из одной точки (L1, L2). Изохроны обозначены линиями желтого цвета, а

локализационные линии – синим цветом, скорость прокладки полос для всех команд одинакова. На рисунке также виден запас времени до контакта с пожаром и самые опасные для команд точки. Области достижимости для пожарных команд строились средствами WFDS-LS.

В разделе 5.3.3 дается постановка и решение задачи об уклонении персонала от встречи с природным пожаром. Задача персонала при эвакуации - попасть из исходной области в безопасную область, нигде не встретившись с пожаром. Для решения этой задачи на карте также строятся изохроны процессов распространения пожара и области достижимости персонала. Задача о безопасной эвакуации персонала считается разрешимой, если существует траектория, лежащая по одну сторону от изохроны в области, не занятой пожаром, и при этом соединяющая исходную область и область эвакуации. Пример решения данной задачи приводится на Рисунке 10(б). На этом рисунке изохрона обозначена белой линией, а кратчайший путь эвакуации – голубой линией. Из рисунка видно, что наибольшая опасность для персонала приходится на момент t_2 , когда расстояние до пожара минимально.

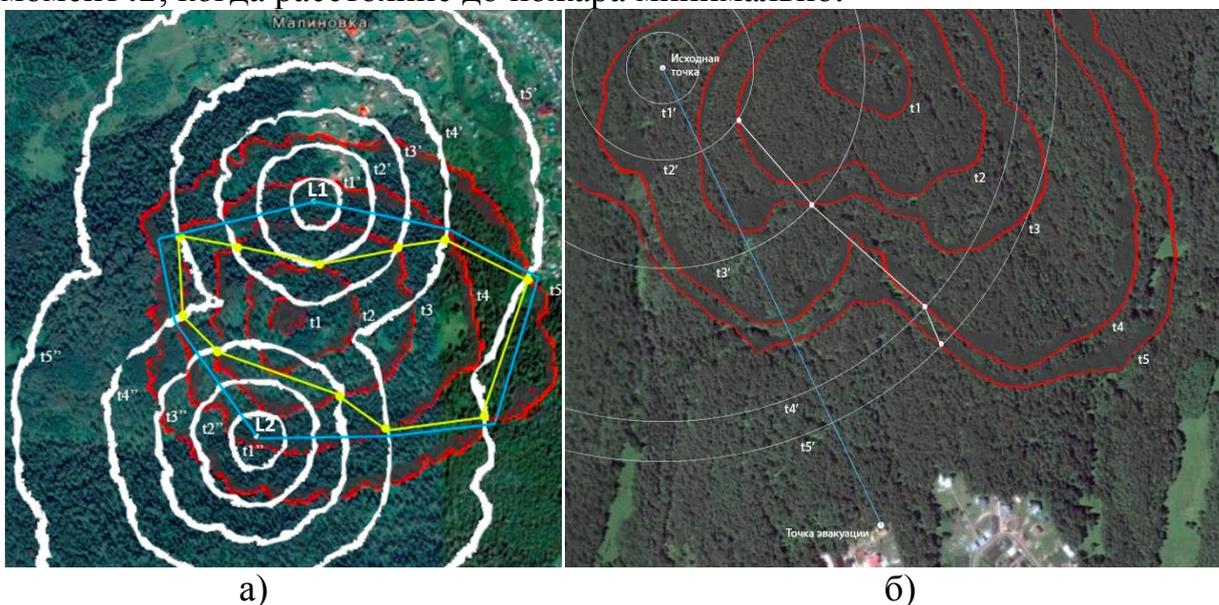


Рисунок 10 (а) - пример решения задачи локализационного управления, (б)- пример решения задачи об эвакуации из зоны пожара.

В приложениях к диссертации приводятся следующие материалы: описание основных уравнений системы WFDS-PB, таблица характеристик растительных горючих материалов, документы об использовании результатов диссертации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе получены следующие результаты.

1. Проведен анализ пожароуправления как сложной природно-административной системы. Разработана модель деятельности по пожароуправлению в РФ в виде IDEF0 диаграмм, проведена классификация принимаемых решений.

2. Разработан метод повышения точности моделей динамики природных пожаров оперативного назначения на основе обработки результатов компьютерного моделирования в системе WFDS-PB, локализованной на высокопроизводительных вычислительных системах.

3. Впервые предложена методика создания гибридных моделей процесса распространения растительного пожара, объединяющая возможности аналитических (WFDS-PB) и экспериментальных (WFDS-LS) систем и позволяющая повысить достоверность процесса моделирования при сохранении приемлемого быстродействия (в 10-20 раз быстрее реального времени).

4. Произведена привязка моделей лесного горючего и топографии местности к системе отечественного лесоустройства и космическим снимкам лесов.

5. На основе физически обоснованных моделей в трехмерном пространстве решен ряд задач по поддержке принятия управленческих решений в пожароуправлении.

Дальнейшее развитие рассмотренного в работе направления связано, на наш взгляд, с уточнением постановок задач моделирования и принятия решений, созданием баз данных характеристик растительных горючих материалов и проведением процесса прогнозирования действующих пожаров в режиме реального времени, в том числе, на базе мобильных средств. Актуальным представляется также получение и использование оперативной информации о пожарах с беспилотных летательных аппаратов. Также необходимо отметить, что используя компьютерные модели, полученные по разработанной гибридной методике, возможно создать новый класс компьютерных систем моделирования природных пожаров на основе мобильных устройств под управлением наиболее популярных мобильных операционных систем (Android, iOS, Windows Phone).

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Шаталов, П.С. Параллельные алгоритмы моделирования процессов распространения лесных пожаров / П.С. Шаталов, Г.А. Доррер // Хвойные бореальной зоны. – Красноярск.- 2012.- XXX, №5-6. - С.107-110

2. Шаталов, П.С. Параллельные алгоритмы моделирования процессов распространения лесных пожаров на основе математических моделей различных типов / П.С. Шаталов, М.С. Вдовенко, Г.А. Доррер // Вычислительные технологии.- Новосибирск.- 2013. - Том18, №1. - С.3-14.

3. Шаталов, П.С. О моделировании лесных пожаров с помощью информационной системы оперативного уровня WFDS / П.С. Шаталов, Г.А. Доррер // Информатизация и связь. - Таганрог. - 2013. -Том 2. - С.52-55.

4. Шаталов, П.С. Повышение точности информационных систем оперативного моделирования лесных пожаров на основе экспериментов, выполняемых на сверхпроизводительных вычислительных системах / П.С. Шаталов, Г.А. Доррер // Информатизация и связь. - Таганрог. - 2014. -Том 2. - С 19-22.

Публикации в других изданиях:

5. Шаталов, П.С. О численном моделировании пожаров в лесу и на объектах инфраструктуры / П.С. Шаталов, Г.А. Доррер // Математическое и физическое моделирование опасных природных явлений и техногенных катастроф: Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием. - Томск Изд-во Том. ун-та.- 2012. - С. 31-32.

6. Шаталов, П.С. Параллельные алгоритмы моделирования процессов распространения лесных пожаров в системах оперативного управления пожарными рисками. / П.С. Шаталов, Г.А. Доррер // Технологии разработки информационных систем: Материалы III международной научно-технической конференции. - Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ.- 2012. - С.136-138

7. Шаталов, П.С. Использование системы WFDS в задачах моделирования чрезвычайных ситуаций / П.С. Шаталов, Г.А. Доррер // Технологии разработки информационных систем ТРИС-2013: материалы конференции. Том 2. - Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2013. - С.37-40.

8. Шаталов, П.С. Использование параллельных вычислений при компьютерном моделировании лесных пожаров / П.С. Шаталов, Г.А. Доррер // Многоядерные процессоры, параллельное программирование, ПЛИС, системы обработки сигналов: сб. ст. - Барнаул. - 2013. - С. 132-138.

9. Шаталов П.С. О создании информационной базы для систем моделирования и прогнозирования лесных пожаров / П.С. Шаталов, Г.А. Доррер // Международный конгресс «Лесные пожары и изменение климата. Проблемы управления пожарами в природных и культурных ландшафтах Евразии», тезисы докладов. – Новосибирск.- 2013.-С. 80-81

10. Шаталов П.С. Использование системы WFDS в задачах моделирования чрезвычайных ситуаций / П.С. Шаталов // Международный конгресс «Лесные пожары и изменение климата. Проблемы управления пожарами в природных и культурных ландшафтах Евразии», тезисы докладов. – Новосибирск. - 2013:- С. 134-135.

11. Шаталов, П.С. Гибридный подход к созданию компьютерных моделей лесных пожаров на базе высокопроизводительных вычислительных систем/ П.С. Шаталов, Г.А. Доррер // Лесные биогеоценозы бореальной зоны: география, структура, функции, динамики: материалы Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 70-летию создания Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН. - Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2014. - С.197 - 200.

12. Шаталов, П.С. Использование кластерных вычислительных систем и данных космического мониторинга для моделирования лесных пожаров / П.С. Шаталов, Г.А. Доррер // Вестник Московского университета им. С.Ю. Витте.- 2014.-№1(4).- С.289-295

13. Шаталов, П.С. Поддержка принятия решений при управлении природными пожарами / П.С. Шаталов, Г.А. Доррер // Международная научно-практическая конференция «Фундаментальная информатика, информационные технологии и системы управления: реалии и перспективы». - Красноярск: Изд-во СФУ, 2014. - С. 139 – 149

14. Шаталов, П.С. Моделирование природных пожаров и способы борьбы с ними / П.С. Шаталов, Г.А. Доррер // Информационные технологии в науке, образовании и управлении: труды международной конференции IT + S&E`15 (Гурзуф, 22 мая–01 июня 2015 г) / под. ред. проф. Е.Л. Глориозова. М.: ИНИТ, 2015. Весенняя сессия. С. 295-307.

15. Shatalov, P.S. Parallel computation of forest fire and its interaction with infrastructure objects / P.S. Shatalov, G.A. Dorrer // Fourth Fire Behave and Fuels Conference, conference abstracts.- St. Petersburg. - 2013. - P. 3.