

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
Сибирский государственный технологический университет

На правах рукописи



Шаталов Павел Сергеевич

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

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

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель доктор
технических наук, профессор
Доррер Г.А.

Красноярск - 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 СИСТЕМА ПОЖАРОУПРАВЛЕНИЯ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ	12
1.1 Основные нормативные документы.....	13
1.1.1 Федеральное законодательство	13
1.1.2 Указы Президента РФ и постановления Правительства РФ	19
1.1.3 Стандарты, методические и прочие документы	20
1.2 Типовые задачи принятия решений при пожароуправлении	21
2 МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ	25
2.1 Классификация математических моделей природных пожаров	25
2.1.1 Аналитические модели природных пожаров	31
2.1.2 Экспериментальные модели природных пожаров	33
2.2 Математическая модель природного пожара, на основании уравнения Гамильтона-Якоби	42
2.3 Обзор программного обеспечения для компьютерного моделирования природных пожаров.....	43
2.4 Компьютерная система моделирования природных пожаров Wildland-urban interface Fire Dynamics Simulator	51
2.4.1 Подсистема WFDS-PB. Аналитическая модель природного пожара	53
2.4.2 Подсистема WFDS-LS. Экспериментальная модель природного пожара	57
2.5 Выводы по главе 2	59
3 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА	62
3.1 Создание аппроксимационной модели пожара на основе WFDS-LS	62
3.1.1 Обработка экспериментальных данных	69
3.2 Гибридная модель WFDS-LS	74
3.3 Выводы по главе 3	80
4 ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ПОЖАРОУПРАВЛЕНИИ.....	81

4.1 Понятие модели горючего	81
4.2 Использование таксационных описаний леса для оценки параметров РГМ	86
4.3 Использование космических снимков рельефа для формирования входных файлов для WFDS	91
4.4 Модель тонкого слоя	97
4.5 Выводы по главе 4	98
5 ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО ПОЖАРОУПРАВЛЕНИЮ.....	99
5.1 Влияние теплового потока на воспламенение растительных горючих материалов	99
5.2 Оценка опасности природного пожара для населенных пунктов и иных объектов инфраструктуры	101
5.3 Динамические задачи принятия решений	102
5.3.1 Прогнозирование распространения лесного пожара и оценка опасности для объектов инфраструктуры	102
5.3.2 Математическая модель процесса взаимодействия человека с природным пожаром	103
5.4 Выводы по главе 5	109
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	111
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	113
ПРИЛОЖЕНИЕ 1.....	134
ПРИЛОЖЕНИЕ 2.....	153
ПРИЛОЖЕНИЕ 3.....	155
ПРИЛОЖЕНИЕ 4.....	156
ПРИЛОЖЕНИЕ 5.....	158

ВВЕДЕНИЕ

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.

Нормативной базой для принятия решений в системе пожароуправления являются Лесной и Земельный кодексы РФ, федеральные законы, указы Президента и постановления Правительства РФ, государственные стандарты и ведомственные инструкции. 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 то же 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 быстроедействие 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 используется методы системного анализа: математическое моделирование, теория принятия решений, вычислительные эксперименты, обработка экспериментальных данных.

Научная новизна работы заключается в следующем:

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 поддержки принятия решений при пожароуправлении 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 ASTER GDEM.
4. Впервые на основе физически обоснованных моделей в 3D-пространстве предложены алгоритмы типовых сценариев 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 результаты работы были представлены на следующих конференциях:

1. Всероссийская научная конференция с международным участием «Математическое и физическое моделирование опасных природных явлений и техногенных катастроф» (г. Томск, 2012).

2. III, IV, V и VI международные научно-технические конференции «Технологии разработки информационных систем» (г. Таганрог, 2012 - 2015).

3. Международный конгресс «Лесные пожары и изменение климата. Проблемы управления пожарами в природных и культурных ландшафтах Евразии» (г. Новосибирск, 2013).

4. IX Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием, посвященная 385-летию со дня основания г. Красноярска (г. Красноярск, 2013).
5. Всероссийская научно-практическая конференция «Многоядерные процессоры, параллельное программирование, ПЛИС, системы обработки сигналов» (Барнаул, 2013).
6. VIII Всероссийский конгресс женщин-математиков, посвященный памяти Софьи Васильевны Ковалевской. (Красноярск, 2013).
7. Всероссийская научно-практическая конференция «Молодые ученые в решении актуальных проблем науки» (Красноярск, 2013).
8. Международная конференция Fourth Fire Behave and Fuels Conference (Санкт-Петербург, 2013).
9. Всероссийская научно-практическая конференция «Мониторинг, моделирование и прогнозирование опасных природных явлений и чрезвычайных ситуаций» (Железногорск, 2014).
10. Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием, посвященная 70-ти летию Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН «Лесные биогеоценозы бореальной зоны: география, структура, функции, динамика» (Красноярск, 2014).
11. Всероссийская научно-практическая конференция (с международным участием) «Лесной и химический комплексы - проблемы и решения» (Красноярск, СибГТУ, 2014).
12. Международная научно-практическая конференция «Фундаментальная информатика, информационные технологии и системы управления: реалии и перспективы» (Красноярск, СФУ, 2014).
13. Международная 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. В работах, выполненных в соавторстве с руководителем, автору принадлежит большая часть результатов.

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 страницы, приложений - 28 страниц.

1 СИСТЕМА ПОЖАРОУПРАВЛЕНИЯ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

В данной главе рассмотрены вопросы нормативно-правового и методического обеспечения тушения лесных пожаров в Российской Федерации. Приводятся основные положения федерального законодательства, указов Президента и постановлений Правительства, упомянуты основные стандарты, приведены ссылки на методическое обеспечение тушения и приказы различных ведомств.

1.1 Основные нормативные документы

1.1.1 Федеральное законодательство

Основным документом, регулирующим отношения в области использования и охраны лесов можно считать Лесной кодекс РФ (ЛК) [40]. Вводится понятие леса, лесничества, лесопарка (ЛК, ст. 5; 23). Подразделение лесов по целевому назначению регламентирует ст. 10 ЛК. Леса, расположенные на землях лесного фонда, по целевому назначению подразделяются на защитные леса, эксплуатационные леса и резервные леса (ЛК, ст. 102; 108; 109).

Кроме того, Земельный кодекс (ЗК) Российской Федерации определяет состав земель в Российской Федерации, нас интересуют: земли, отнесенные к лесному фонду, земли обороны и безопасности (ЗК, ст. 7; 101; 93) [26]. Непосредственно охрану лесов от пожаров, вредных организмов, загрязнения и прочих видов негативного воздействия регламентируют статьи главы 3 ЛК РФ (Рисунок 1.1). До 2010 года в данном законе были крайне расплывчато указаны полномочия по мониторингу, тушению лесных пожаров, проведению противопожарных мероприятий. Пожароопасный сезон 2010 года выявил острую необходимость внесения серьезных поправок в ЛК и другие нормативные акты. Такие поправки были внесены законом № 442-ФЗ [44]. ЛК РФ пополнился новыми статьями, регламентирующими и конкретизирующими меры по предупреждению и тушению лесных пожаров (Рисунок 1.2). В частности, при проведении мер по обеспечению пожарной безопасности были внесены пункты, регламентирующие патрулирование лесов, устройство пожарных водоемов, мероприятия по гидромелиорации лесных территорий, прокладку просек, противопожарных разрывов и т.д. (Рисунок 1.3). В соответствии с новой редакцией ЛК органам власти вменено в обязанность принимать мер по регулированию пребывания граждан в лесах в периоды повышенной пожарной опасности.

Раскрыто содержание авиационных работ по охране и защите лесов. Введены нормы, касающиеся проектирования лесничеств, лесопарков, проектирования эксплуатационных лесов, защитных лесов, резервных лесов, особо защитных участков лесов и таксации лесов.

Как самостоятельный вид лицензируемой деятельности в Федеральный закон "О лицензировании отдельных видов деятельности" [45] введено лицензирование деятельности по тушению лесных пожаров в лесах.

В редакции закона 442-ФЗ ЛК РФ теперь определяет, что:

«2. Тушение пожаров в лесах, расположенных на землях лесного фонда, землях обороны и безопасности, землях особо охраняемых природных территорий (лесных пожаров), осуществляется в соответствии с настоящим Кодексом, Федеральным законом от 21 декабря 1994 года N 68-ФЗ "О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера" [46] и Федеральным законом от 21 декабря 1994 года N 69-ФЗ "О пожарной безопасности" [47].

3. Тушение пожаров в лесах, расположенных на землях, не указанных в части 2 настоящей статьи, осуществляется в соответствии с Федеральным законом "О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера" и Федеральным законом "О пожарной безопасности» (ст. 10).

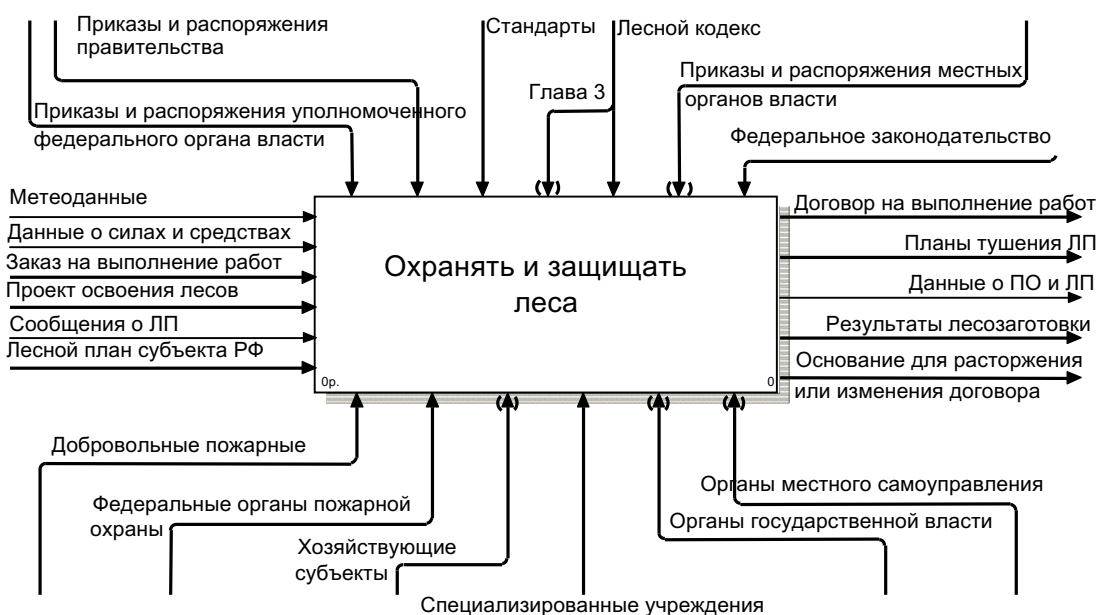


Рисунок 1.1 - Нормативное обеспечение охраны и защиты леса в соответствии с ЛЕСНЫМ КОДЕКСОМ

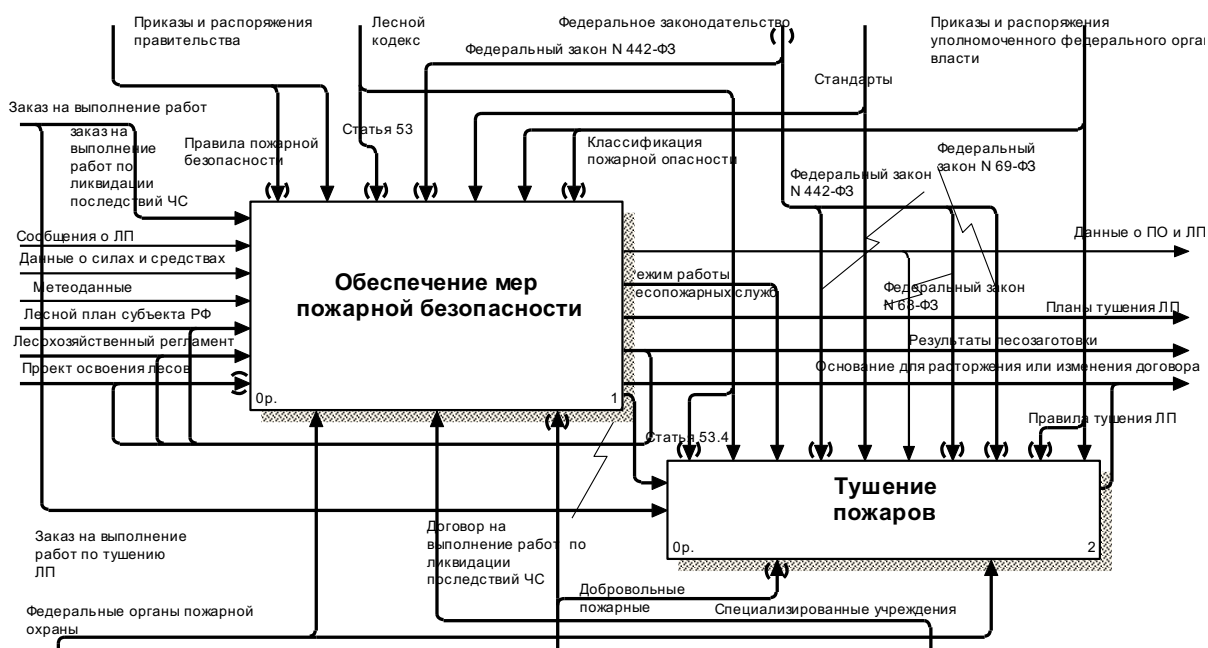


Рисунок 1.2 - Нормативное обеспечение функции охраны и защиты леса от лесных пожаров

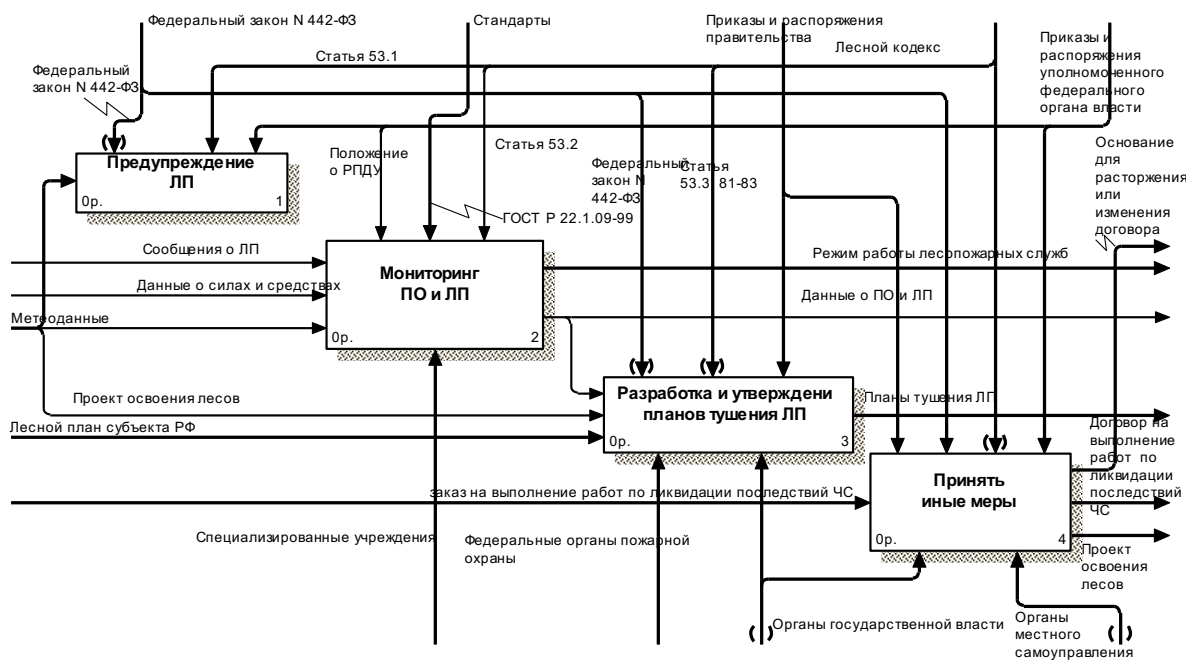


Рисунок 1.3 - Нормативное обеспечение мер пожарной безопасности

«1. Органы государственной власти в пределах своих полномочий, определенных в соответствии со статьями 81 - 83 настоящего Кодекса, разрабатывают планы тушения лесных пожаров, устанавливающие:

1) перечень и состав лесопожарных формирований, пожарной техники и оборудования, противопожарного снаряжения и инвентаря, иных средств предупреждения и тушения лесных пожаров на соответствующей территории, порядок привлечения и использования таких средств в соответствии с уровнем пожарной опасности в лесах;

2) перечень сил и средств подразделений пожарной охраны и аварийно-спасательных формирований, которые могут быть привлечены в установленном порядке к тушению лесных пожаров, и порядок привлечения таких сил и средств в соответствии с уровнем пожарной опасности в лесах;

3) мероприятия по координации работ, связанных с тушением лесных пожаров;

4) меры по созданию резерва пожарной техники и оборудования, противопожарного снаряжения и инвентаря, транспортных средств и горюче-смазочных материалов;

5) иные мероприятия.

2. В случае, если план тушения лесных пожаров предусматривает привлечение в установленном порядке сил и средств подразделений пожарной охраны и аварийно-спасательных формирований, он подлежит согласованию с соответствующими федеральными органами исполнительной власти.

3. Сводный план тушения лесных пожаров на территории субъекта Российской Федерации утверждается высшим должностным лицом субъекта Российской Федерации (руководителем высшего исполнительного органа государственной власти субъекта Российской Федерации) по согласованию с уполномоченным федеральным органом исполнительной власти.

4. Порядок разработки и утверждения плана тушения лесных пожаров и его форма, порядок разработки сводного плана тушения лесных пожаров на территории субъекта Российской Федерации устанавливаются Правительством Российской Федерации.

5. Уполномоченный федеральный орган исполнительной власти на основании планов тушения лесных пожаров разрабатывает межрегиональный план маневрирования лесопожарных формирований, пожарной техники и оборудования.» (ст. 53.3).

«1. Тушение лесного пожара включает в себя:

1) обследование лесного пожара с использованием наземных, авиационных или космических средств в целях уточнения вида и интенсивности лесного пожара, его границ, направления его движения, выявления возможных границ его распространения и локализации, источников противопожарного водоснабжения, подъездов к ним и к месту лесного пожара, а также других особенностей, определяющих тактику тушения лесного пожара;

- 2) доставку людей и средств тушения лесных пожаров к месту тушения лесного пожара и обратно;
- 3) локализацию лесного пожара;
- 4) ликвидацию лесного пожара;
- 5) наблюдение за локализованным лесным пожаром и его дотушивание;
- 6) предотвращение возобновления лесного пожара.

2. Лица, использующие леса, в случае обнаружения лесного пожара на соответствующем лесном участке немедленно обязаны сообщить об этом в специализированную диспетчерскую службу и принять все возможные меры по недопущению распространения лесного пожара.

3. Правила тушения лесных пожаров устанавливаются уполномоченным федеральным органом исполнительной власти.» (ст. 53.4) [40].

Таким образом, для каждого лесного участка (лесничества, лесопарка) должен быть разработан план тушения лесных пожаров, определяющий силы и средства для тушения пожаров и порядок их привлечения в зависимости от пожарной опасности. Для каждого региона РФ составляется сводный план тушения лесных пожаров, утверждаемый высшим должностным лицом региона, а так же планы межрегионального взаимодействия. Порядок разработки и типовые формы таких планов должны быть утверждены постановлением правительства, однако до настоящего времени (апрель 2011) указанные постановления не приняты, что, безусловно, тормозит реализацию федерального законодательства. Ознакомится с проектами этих постановлений можно на официальном сайте федерального агентства лесного хозяйства РФ [51].

Кодекс Российской Федерации об административных правонарушениях [31] устанавливает ответственность за нарушение правил пожарной безопасности в лесах и определяет должностных лиц, уполномоченных составлять протоколы об административных правонарушениях (ст. 8.32; 28.3).

Следует упомянуть также закон № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности», устанавливающий противопожарные

расстояния от границ застройки городских поселений до лесных массивов [61] и № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений», регламентирующий противопожарный разрыв или расстояние от проектируемого здания или сооружения до лесных массивов [62].

В то же время следует отметить недостаточную проработку аспектов, связанных с взаимодействием с федеральной службой пожарной охраны в части мониторинга пожарной опасности и лесных пожаров. Действующая редакция Лесного Кодекса возлагает ответственность за достоверность оперативной информации на региональные пункты диспетчерского управления и не учитывает того факта, что Федеральная служба пожарной охраны осуществляет независимый контроль всех возгораний, в том числе и в лесу. Возникающее при этом дублирование функций при отсутствии нормативных механизмов, регулирующих процессы оперативного обмена информацией между ведомствами, неизбежно ведет к информационной несогласованности и снижает эффективность совместных действий по ликвидации чрезвычайной ситуации.

1.1.2 Указы Президента РФ и постановления Правительства РФ

Среди указов президента к рассматриваемой теме имеют отношения указы №1074 «О Федеральном агентстве лесного хозяйства» и № 868 «Вопросы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий» [13, 48].

Постановление правительства № 385 «Об утверждении правил организации и осуществления авиационных работ по охране и защите лесов» регламентирует организацию авиационных работ при тушении лесных пожаров [49].

Постановление №417 «Об утверждении правил пожарной безопасности в лесах» утверждает правила пожарной безопасности в лесах [50].

Как было отмечено выше, до настоящего времени не приняты постановления, регламентирующие порядок разработки, принятия планов тушения лесных пожаров и сводных планов тушения природных пожаров.

1.1.3 Стандарты, методические и прочие документы

ГОСТ Р 22.1.09-99 Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Мониторинг и прогнозирование лесных пожаров. Общие требования [16]. Настоящий ГОСТ устанавливает контролируемые параметры пожара (п. 5.3.2), устанавливает критерии чрезвычайной лесопожарной ситуации (п. 5.3.4.):

- наличие крупных лесных пожаров (25 га охваченного пожаром лесного фонда в районах наземной охраны лесов и 200 га - в районах авиационной охраны лесов);
- количество возникающих в один день и/или одновременно действующих лесных пожаров превышает средний многолетний уровень;
- наличие лесных пожаров, вышедших из-под контроля лесной охраны;
- лесной пожар на загрязненной радионуклидами территории, не потушенный в день возникновения;
- лесной пожар на загрязненной радионуклидами территории, дающий большие дымовые выбросы.

Данный раздел особо важен при принятии решения о привлечении сил и средств министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (МЧС России), а так же при планировании привлечения этих сил и средств.

ГОСТ 17.6.1.01-83 Охрана природы. Охрана и защита лесов. Термины и определения. Настоящий стандарт устанавливает применяемые в науке, технике и производстве термины и определения понятий в области охраны и защиты лесов [17].

В части методического обеспечения тушения природных пожаров можно упомянуть достаточно многочисленные научные и учебно-методические пособия, например [24].

Непосредственные указания по развертыванию противопожарных подразделений, локализации и ликвидации лесного пожара, формы отчетности и т.п. содержатся в приказах, распоряжениях, инструкциях ведомств и организаций, относящихся к лесопожарным формированиям. Доступ к таким документам ограничен, но можно упомянуть, например, указания по обнаружению и тушению природных пожаров [63], приказ министерства природных ресурсов Российской Федерации от 6 февраля 2008 г. № 32 «Об утверждении классификации природной пожарной опасности лесов и классификации пожарной опасности в лесах по условиям погоды, а также требований к мерам пожарной безопасности в лесах в зависимости от целевого назначения лесов, показателей природной пожарной опасности лесов и показателей пожарной опасности в лесах по условиям погоды», приказ министерства природных ресурсов РФ № 181 от 16 июля 2007 г. «Об особенностях использования, охраны, защиты, воспроизводства лесов, расположенных на особо охраняемых природных территориях» и другие документы.

1.2 Типовые задачи принятия решений при пожароуправлении

Существует ряд типовых задач принятия решений, применяющихся при пожароуправлении. Примерами таких задач проектирования при пожарном лесоустройстве являются задачи оценки природных пожарных рисков, задачи проектирования противопожарных мероприятий в лесах: размещение наблюдательных вышек, пожарных водоемов, определение противопожарных разрывов в лесных массивах, оценка безопасных расстояний между лесным

массивом и объектами инфраструктуры (населенными пунктами, промышленными предприятиями и др).

Основными динамическими задачами прогнозирования и управления могут служить следующие:

- задачи прогнозирования параметров природных пожаров, их конфигурации, скорости распространения и тепловых характеристик в анизотропной и нестационарной 3D-среде растительных горючих материалов;

- задачи оценки степени угрозы и запаса времени для принятия противопожарных мер при приближении пожаров к объектам инфраструктуры;

- задачи, связанные с взаимодействием природных пожаров с противопожарными силами и средствами – локализация пожаров, их тушение и окарауливание;

- задачи по расчету путей безопасной эвакуации людей и техники из зоны действующего природного пожара.

При этом при решении всех перечисленных задач качество принимаемых решений во многом определяется наличием адекватных математических моделей природных пожаров и их информационного обеспечения.

Взаимодействие человека с лесным пожаром может преследовать различные цели - остановку фронта пожара, его ликвидацию, окружение непроходимым для огня препятствием (локализацию) или, напротив, уклонение от встречи с пожаром. Один из важнейших и наиболее трудоемких этапов - локализация очага горения. Под локализацией лесного пожара понимают процесс непрямого воздействия на горящую кромку путем окружения ее непреодолимым для огня барьером (например, путем создания лишенных горючего минерализованных полос).

На практике выбор методов и путей локализации пожара зависит от множества факторов, с трудом поддающихся формализации. Однако изучение идеализированных моделей процесса локализации оказывается полезным как при выработке нормативных документов для лесопожарных служб, так и в оперативной обстановке при борьбе с крупными лесными пожарами.

Одним: из базовых понятий, которое используется в теории локализационного управления, является понятие области достижимости динамической системы [24, 25]. С этой точки зрения теория локализационного управления может рассматриваться как одно из направлений теории динамических игр [35], где оценка достижимости играет решающую роль.

Для выработки критериев оценки и планирования деятельности лесопожарных служб полезно исследовать идеализированные случаи, допускающие математическое описание. Такие исследования были начаты в работах Ф.А. Альбини, Г.Н. Коровина, Е.Н. Горовой [83], Г.А. Доррера [25] Математические задачи, связанные с расчетом путей локализации, получили название задач локализационного управления.

В рамки теории локализационного управления укладывается и другой класс задач - об уклонении от встречи с природным пожаром. Такие задачи представляют интерес с точки зрения безопасности людей, оказавшихся в лесу во время пожара.

Помимо моделирования процессов борьбы с лесными пожарами, рассмотренная теория может быть полезна при описании динамики других природных и техногенных процессов: распространения вредителей леса, движения загрязнений и пр.

Все задачи принятия решений при пожароуправлении, перечисленные в данном разделе рассматриваются более детально в Главе 5 настоящей диссертации.

Следует отметить, что теория локализационного управления еще не получила должного развития. К настоящему времени получено решение только ряда простейших задач. Не исследована связь задач локализационного управления с близкими по смыслу задачами теории динамических игр [35]. Дальнейшего развития требуют и численные методы локализационного управления, особенно с учетом возможностей современной машинной графики. В этом отношении представляют интерес работа, выполненная О.В. Фадеенковым под руководством С.В. Ушанова [64], в которой для моделирования процесса распространения и решения задач

локализационного управления используются алгоритмы оптимизации на квадратных решетках.

1.3 Выводы по главе 1

1. Приведены основные положения определяющие деятельность по пожароуправлению в РФ: федеральные законы, указы Президента и постановления Правительства. Упомянуты основные стандарты, приведены ссылки на методическое обеспечение тушения и приказы различных ведомств. Построены IDEF0 диаграммы, описывающие модель деятельности пожароуправления в РФ. Проведен анализ документов, обозначен круг проблем, связанных с нормативным регулированием тушения природных пожаров.

2. Рассмотрены типовые задачи принятия решений при пожароуправлении.

2 МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ

В данной главе рассматриваются существующие математические модели природных пожаров, дается их классификация по уровню принимаемых ими решений. Рассматривается математическая модель природного пожара, основанная на уравнении Гамильтона-Якоби, впоследствии используемая в настоящей диссертации. Также приводится обзор существующих систем компьютерного моделирования природных пожаров.

2.1 Классификация математических моделей природных пожаров

Проблема математического моделирования природных пожаров имеет свою специфику. Она вызвана, во-первых, тесной связью процессов горения при природных пожарах со строением и состоянием лесных биогеоценозов. Во-вторых, процессы возникновения, распространения и развития природных пожаров происходят на значительных площадях, часто в течение длительного времени и зависят от большого числа факторов, зачастую трудно определяемых и подверженных случайным возмущениям. Поэтому весьма существенным является вопрос о необходимом уровне детализации при описании этого объекта. Любая модель беднее описываемого объекта, и решение вопроса о необходимой степени адекватности ее реальному объекту зависит от комплекса предъявляемых к ней требований, определяемых в свою очередь назначением и предполагаемым использованием модели.

Поэтому речь должна идти не об отдельных моделях пожаров, а об их системе [24].

Основные цели математического моделирования природных пожаров следующие.

1. Понимание процессов, происходящих при лесном пожаре.

2. Прогнозирование распространения и развития лесного пожара.
3. Управление борьбой с лесными пожарами.
4. Обучение персонала.

По признаку уровня принимаемых решений, модели природных пожаров можно разделить на три класса, соответствующие трем уровням описания объекта.

1. Основной, или фундаментальный уровень – моделирование физико-химических процессов горения различных растительных горючих материалов.
2. Второй уровень – моделирование распространения и развития пожаров на неоднородной лесной территории с прогнозом их контуров и ряда характеристик, необходимых для организации тушения, – оперативно-тактическое (диспетчерское) моделирование.
3. Третий уровень - моделирование пожаров как событий в системе охраны леса – стратегическое моделирование.

Отмеченные уровни описания пожара можно соотнести с пространственным и временным масштабами рассматриваемых процессов и с положением наблюдателя по отношению к ним.

При этом уровень А представляет собой описание пожара с точки зрения наблюдателя, находящегося на поверхности Земли в непосредственной близости к горящей кромке. Это соответствует пространственному масштабу $1-10^2$ м и интервалу времени $1-10^2$ мин.

Уровень Б – это взгляд на отдельный пожар с борта воздушного судна – самолета или вертолета. При этом пространственный и временной масштабы составляют соответственно 10^2-10^4 м и 10^2-10^3 мин.

Уровень В – взгляд на большую территорию со спутника. Упомянутые масштабы составляют 10^5-10^6 м и 10^3-10^5 мин и больше.

Объектом моделирования на **фундаментальном уровне** является горение, распространяющееся по отдельным частицам и по слою из частиц однородных горючих материалов (хвоинок или листьев одной древесной породы), а также по

слоям из разных горючих материалов, расположенных на поверхности минеральной части почвы в виде их природных комплексов со специфической структурой. Этот вид моделирования основывается на законах тепло- и массопереноса и газовой динамики. Входными параметрами являются физико-химические характеристики горючих материалов (теплотворная способность, элементарный состав, зольность, состав золы, количество летучих, плотность, поверхностно-объемное отношение, влагосодержание и др.), характеристики состояния среды, в которой протекает процесс (температура и относительная влажность воздуха, направление и профиль скорости ветра, показатели турбулентности атмосферы).

Выходными параметрами, характеризующими процесс, могут быть распределения интенсивностей тепловых и массовых потоков, полнота сгорания горючего, размеры пламени, скорость его продвижения по объекту и другие. Моделирование тепло- и массопереноса необходимо для изучения природы пожаров в лесном фонде, для поиска средств и способов тушения, а также как основа для создания моделей тактического уровня.

Объектом **тактического моделирования** является пожар в целом, его распространение и развитие, т. е. динамика пожара до начала и в процессе тушения. Модель должна представлять собой алгоритм, или совокупность алгоритмов, которые давали бы возможность прогнозировать контур и площадь, охваченную горением, рассчитывать ожидаемую длину периметра пожара, описывать тактические части кромки и отдельные их участки, резко выделяющиеся своими характеристиками. Важнейшими выходными характеристиками пожара и его отдельных участков при этом должны быть: вид пожара, скорость продвижения кромки, интенсивность горения, высота пламени, глубина кромки. При пожарах, возникающих вблизи населенных пунктов и объектов инфраструктуры, важным показателем является ожидаемое время до подхода пожара к объекту.

Развитием пожара называют его качественное изменение в процессе продвижения кромки по территории, например, переход низового пожара в верховой повальный, далее переход повального в вершинный, развитие вершинного

в пятнистый в связи с переносом горящих частиц конвекционными потоками. В этом процессе развития пожара на различных ступенях его усложнения вступают в действие все новые факторы, которые должна учитывать модель: она должна перестраиваться, отражая развитие объекта. Полную модель пожара в лесном фонде, по-видимому, целесообразно рассматривать как систему частных моделей, описывающих отдельные его компоненты (пожарное созревание лесного горючего, продвижение пламени по напочвенному покрову, по пологу, модель конвекционных потоков, модель переноса горящих частиц) и отдельные стадии его развития. Модель должна также определять условия прекращения горения.

При очень крупных пожарах на отдельных участках кромки возможно действие пожара в различных видах (смешанные и сложные пожары). Полная диспетчерская модель пожара должна описывать и прогнозировать вариации его протекания на отдельных участках.

Оперативно-тактическое моделирование, как указано, необходимо для разработки планов ликвидации пожара, и основными «потребителями» результатов расчетов по моделям являются руководители тушения, предприятий лесного хозяйства и подразделений авиационной охраны лесов. Кроме того, модели динамики природных пожаров необходимы при проектировании противопожарного устройства лесов.

Объект **стратегического моделирования** – возникновение пожаров на большой территории в течение пожароопасного сезона. Наибольшую опасность представляют вспышки пожаров, т. е. одновременное их возникновение в большом числе. Основным фактором возникновения вспышек пожаров служит ход погоды. Наиболее типичными условиями для крупной вспышки пожаров являются постепенное накопление большого числа локализованных, но не ликвидированных полностью пожаров в период продолжительного антициклона и ветреная погода в конце периода при переходе к погоде, обусловленной циклоном. Модель вспышки должна прогнозировать территорию и время прохождения надвигающегося циклона, направление и скорость ветра на отдельных участках этой территории и их

изменения во времени, распределение по территории пожаров, которые могут возобновляться, и их характеристику. Кроме того, модель в упрощенной форме должна оценивать динамику основных параметров возникающих пожаров. Этот уровень моделирования необходим для планирования мероприятий по предупреждению и ликвидации вспышек пожаров. «Потребителями» прогнозов, получаемых с помощью этих моделей, являются руководители административных органов и МЧС областного, краевого, республиканского и федерального масштабов. Такие модели с помощью имитационных алгоритмов могут использоваться для проектирования структуры и размещения противопожарных сил и средств наземной и авиационной охраны лесов, МЧС, а также для маневрирования их ресурсами. Этот уровень моделирования необходим для описания функционирования службы охраны лесов от пожаров. Требования к различным классам моделей сведены в Таблицу 2.1.

Таблица 2.1 - Требования, предъявляемые к математическим моделям природных пожаров

Класс модели	Назначение модели	Характеристики моделей					
		Степень детализации	Пространственный масштаб, м	Временной масштаб, мин	Сложность вычислений	Универсальность	Время реакции
А	Описание физико-химических процессов горения	Описание основных параметров горения	$1 - 10^2$	$1 - 10^2$	Не играет роли	По возможности полная	Не ограничено
Б	Прогноз распространения пожаров	Определение скоростей, геометрических характеристик контура и интенсивности горения	$10^2 - 10^4$	$10^2 - 10^3$	Ограничена	Для определенного типа лесной территории	1 час

В	Использование при разработке мероприятий по маневрированию силами и средствами тушения	Определение скорости нарастания площади, ущерба и объемов работ по тушению во времени и пространстве	$10^5 - 10^6$	$10^3 - 10^5$	Ограничена	Для всей охраняемой территории	3 часа
---	--	--	---------------	---------------	------------	--------------------------------	--------

Остановимся теперь на структуре математической модели, вытекающей из рассмотрения пожара как открытой динамической системы, взаимодействующей с лесным биогеоценозом. В этой системе можно выделить ряд подсистем. При этом каждая подсистема описывается соответствующей частной математической моделью, которая является звеном общей модели рассматриваемой системы, или ее субмоделью.

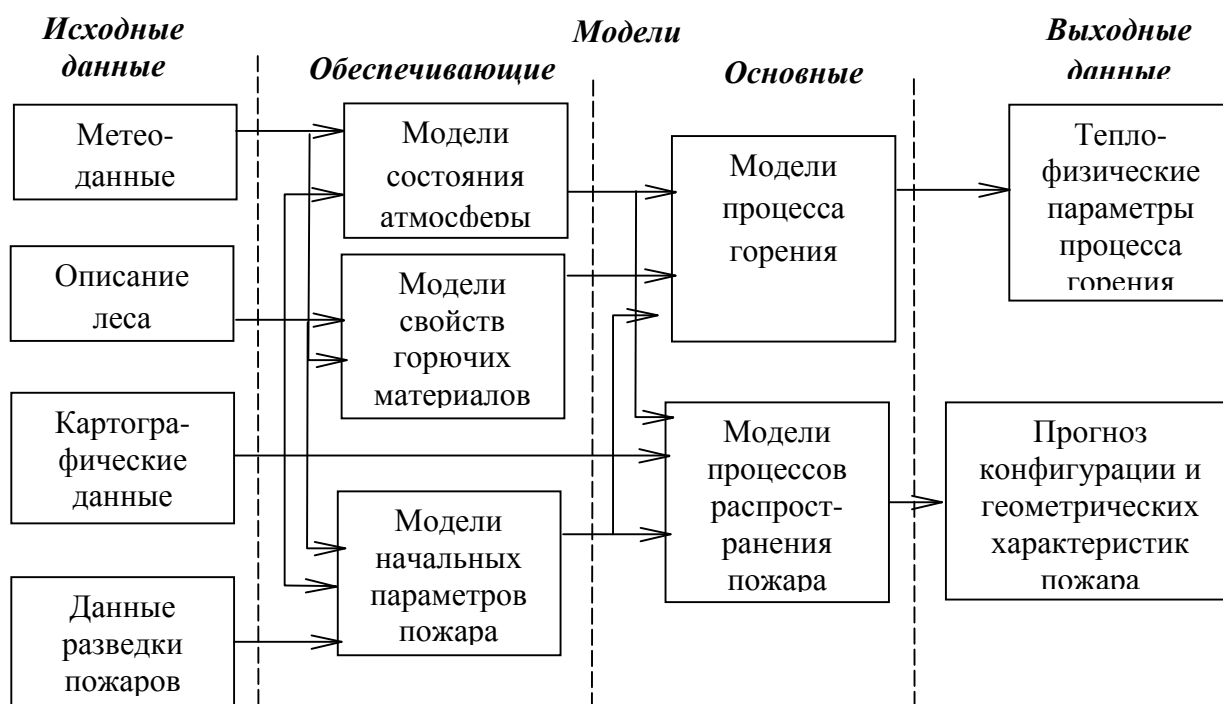


Рисунок 2.1 - Структура системы взаимосвязи частных моделей в задаче прогнозирования динамики природных пожаров

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.

2.1.1 Аналитические модели природных пожаров

Аналитические модели основаны на законах сохранения энергии, массы и импульса. Они базируются на физике горения и описывают физические механизмы составляющих пожар процессов для получения изучаемых параметров пожара, не используя при этом экспериментальные данные (все необходимые константы могут быть вычислены на основе исходной теории). Эти модели учитывают три вида передачи тепла: теплопроводность, конвекцию и радиацию. Модели этого типа мало применяются в реальных условиях, как из-за малой изученности механизмов тепло- и массопереноса при горении растительного горючего, так и из-за значительных аналитических и вычислительных трудностей.

Несмотря на сложности в применении таких моделей, их полезность заключается в следующем:

1. Аналитические модели позволяют описать и лучше понять закономерности процесса горения растительных горючих материалов в условиях открытого пространства, что имеет большое значение для изучения природы пожаров.
2. Такие модели могут служить в качестве некоторого эталона, по которому можно оценивать адекватность более простых и удобных для практического применения моделей.
3. Будучи программно реализованными, аналитические модели могут служить имитатором экспериментальных данных при создании и испытании более простых моделей.

Без сомнения, что по мере накопления знаний о процессах, протекающих при природных пожарах, значение аналитических моделей будет возрастать. Огромную роль при этом здесь играет применение современных суперкомпьютеров и высокопроизводительных кластерных систем, позволяющих преодолевать вычислительные трудности, которые раньше делали использование аналитических моделей практически невозможным.

Показательным примером аналитической модели является аэротермохимическая модель лесного пожара, предложенная А.М. Гришиным еще в 80-е годы [18, 19]. Эта модель содержит несколько десятков уравнений и граничных условий, описывающих трехмерные процессы тепло- и массообмена, фазовых и химических превращений при горении, а также движение газовых потоков, вызванное этими процессами. Долгое время эта модель не была реализована в полном виде из-за больших вычислительных сложностей, связанных с расчетом трехмерных взаимосвязанных процессов тепло- и массообмена в сочетании с химическими реакциями. Тем не менее, на основе этой модели решено множество частных задач, например двумерная модель распространения верховых пожаров (В.А. Перминов) [53], расчет теплового взаимодействия пожара с деревянными строениями (А. Фильков) [65] и ряд других.

Примером аналитического подхода к описанию природных пожаров может служить цикл работ Ю. А. Гостинцева и Л. А. Суханова по аэродинамике атмосферы при больших пожарах [15]. Авторы ограничились описанием плоского турбулентного течения в атмосфере, вызванного интенсивным точечным пожаром (т.е. пожаром, характерный размер которого меньше высоты подъема нагретых газов).

Однако в последние годы наблюдается определенный прорыв в этой области, во многом связанный с появлением сверхбыстродействующих вычислительных систем. Здесь в первую очередь следует упомянуть систему WFDS (Wildland-urban interface Fire Dynamics Simulator), которая была создана на базе программы FDS

(Fire Dynamics Simulator), предназначенной для расчета параметров пожара внутри помещений.

Система WFDS подробно рассмотрена ниже в разделе 2.4. и Приложении 1.

Из других работ следует отметить математическую модель, представленную Д. Морваном с соавторами [139], которая была использована для моделирования перехода низового лесного пожара в верховой при воспламенении средиземноморских зарослей кустарников. Постановка задачи в этой работе основана на модели А.М. Гришина в сочетании с возможностями FDS.

Также можно отметить аналитическую модель, разработанную R.R. Linn [119], в которой используются элементы теории процессов переноса в многофазных реагирующих средах и вычислительный метод частиц в ячейках. В работе дается физико-математическая модель турбулентности течений при природных пожарах. На основе этой модели были решены двумерные задачи расчета параметров низовых лесных пожаров и получены поля скоростей, температур и концентраций компонентов в вертикальной плоскости x, z и численно подтвержден известный из эксперимента эффект увеличения скорости распространения низового лесного пожара с ростом угла наклона подстилающей поверхности.

2.1.2 Экспериментальные модели природных пожаров

Экспериментальные модели можно условно разделить на две группы: экспериментально-аналитические и экспериментально-статистические. Все эти модели предназначены для вычисления скорости движения и конфигурации фронта пожара в лесных биогеоценозах под влиянием факторов погоды и инфраструктуры местности.

В экспериментально-аналитических моделях используется смешанный подход к описанию лесного пожара. Обычно авторы исходят из уравнения теплового баланса в горящей кромке, а все остальные зависимости либо игнорируются, либо

описываются простейшими моделями. С помощью этих моделей невозможно объяснить все аспекты развития пожара, поскольку в них включают некоторые параметры (константы), определяемые из эксперимента. В этих моделях используется комбинация физической теории со статистическими методами для вывода формул, описывающих поведение пожара.

Первые экспериментально-аналитические исследования природных пожаров появились в 1940-х годах. Фонс вместе с Карри, начиная еще с конца 1930-х годов, проложили путь к исследованию физики пожара. В 1946г. Фонс опубликовал математическую модель прогнозирования скорости распространения пожара [108]. Теоретической предпосылкой модели Фонса послужило представление о горении как о серии последовательных поджиганий частиц горючего, и полученное на этой основе уравнение теплового баланса. Величины входящих в модель коэффициентов определялись на основе сравнительно мелкомасштабных опытов по сжиганию в аэродинамической трубе искусственно созданных слоев из сосновых веточек и опада сосновых хвоинок. Исследования Фонса послужили предпосылкой для создания в Северной Америке двух школ, которые разрабатывали модели распространения природных пожаров, ставшие стандартами в Канаде и США. В США в качестве такого стандарта используются модели, разработанные Р. Ротермелом в 1972 году [148], а в Канаде - модели, основанные на уравнении интенсивности пожара, разработанном Байрамом в 1956 году.

Модель Байрама [95], также экспериментально-аналитическая по своему подходу, основана на измерениях, сделанных при экспериментальных пожарах в реальных лесных условиях (в сосняках). Модель определяет соотношение между длиной пламени, долей расходуемого горючего и теплотой его сгорания. Уравнение интенсивности лесного пожара, выведенное Байрамом в 1956 году, выглядит следующим образом:

$$I = HwR \quad (2.1)$$

где I - интенсивность пожара, кВт/м, H - теплота сгорания топлива, кДж/кг, w - масса горючего, потребляемого на единицу площади, кг/м², R - скорость

распространения фронта пожара, м/сек. Через 10 лет после появления этого уравнения оно получило широкое признание среди исследователей природных пожаров в Канаде. Поэтому в середине 1960-х годов было решено использовать уравнение интенсивности лесного пожара Байрама для прогнозирования параметров природных пожаров в Канаде. В результате это уравнение было включено в канадскую систему оценки пожарной опасности в лесу (CFFDRS). Недостатком модели Байрама является то, что в состав входных переменных модели входят параметры, которые могут быть измерены только в процессе горения, например, длина факела пламени. Это затрудняет использование модели для предсказания скоростей горения. Попытка избавиться от этого недостатка, предсказывая, например, длину пламени с помощью дополнительных соотношений снижают точность модели.

В 1972 г. была опубликована модель Р. Ротермела. [148], в основу которой положено уравнение сохранения энергии, вытекающее из результатов Франдсена [112, 113]. Р. Ротермел представил скорость распространения пожара в виде функции от плотности слоя горючих материалов, размера частиц растительного горючего материала, скорости горения растительного горючего.

$$R = R_0(1 + \varphi(U) + \varphi(S)) \quad (2.2)$$

Модель не использует каких-то новых теоретических положений о процессе горения, она базируется на обобщении большого экспериментального материала, пройдя ряд прямых проверок в полевых условиях [93,100,149].

В модели используются входные переменные, которые описывают типы горючего, влагосодержание горючего, уклон, возвышение, а также параметры ветра. В качестве входных переменных используются только те характеристики горючего, которые могут быть измерены заранее. Одной из самых важных входных величин является критическое влагосодержание слоя горючих материалов (влагосодержание, при котором горение становится невозможным). Эта величина вычисляется по формуле, предложенной Фосбергом [111] и Шрёдером и скорректированной Альбини [81]. Другим важным входным параметром модели является скорость ветра

на половине высоты пламени. Для пересчета скорости ветра, полученной на метеостанции, рекомендуется формула Альбини [84]. В модели была использована зависимость замедления скорости сгорания от влагосодержания, полученная Андерсоном [86] на основе обработки экспериментальных данных.

Модель Ротермела вызвала многочисленные работы по ее развитию, дополнению, алгоритмизации [84, 112, 113] и была включена в Национальную систему определения пожарной опасности США [101]. Несмотря на отдельные критические замечания [100, 118], модель Р. Ротермела следует признать одной из наиболее удачных зарубежных экспериментально-аналитических моделей, предназначенных для расчета скорости распространения огня по лесным горючим материалам при низовых пожарах.

Модель Р. Ротермела дала возможность Ван Вагнеру предположить, что увеличение скорости горения целиком обусловлено увеличением излучения пламени. Модель Ван Вагнера [157,158], являющаяся экспериментально-аналитической, основана на концепции, что радиация пламени - важнейший фактор в механизме распространения горения. Ее основные входные параметры – длина пламени, запас горючего на единице площади, интенсивность радиации, испускаемой пламенем, доля радиации, поглощаемой горючим, влажность горючего, угол наклона пламени к слою горючего. По материалам наблюдений в хвойных лесах Ван Вагнером в 1973 г. была выведена эмпирическая формула для высоты летального ожога кроны. Здесь, как и в модели Байрама, часть входных переменных не может быть измерена заранее.

Близкой по своей концепции к моделям Байрама и Ван- Вагнера является математическая модель, предложенная Н.П. Курбатским и Г.П. Телицыным [36]. Н.П. Курбатским предложено описывать форму пожара в виде фигуры, состоящей из двух полуэллипсов, имеющих общую ось.

Г.П. Телицын предлагает определять скорости нарастания периметра пожара по методике Митчела [134] для расчета объема работ по тушению лесного пожара.

Математическая модель Г. П. Телицына содержит простую формулу для оценки скорости распространения фронтальной кромки низового пожара V :

$$V = \frac{1,6 \cdot 10^4 \cdot \delta}{\rho \cdot (15+w)^2 \cdot (1-\cos \alpha)^2} \quad (2.3)$$

Из формулы следует, что скорость распространения кромки пропорциональна толщине сгорающего слоя (δ , м) и обратно пропорциональна: плотности его сгорания (ρ , кг/м²) и квадрату влагосодержания (w , %). Она также очень сильно зависит от угла наклона пламени α , град.

Изучению механизмов теплообмена при горении некоторых растительных материалов и созданию на этой основе математической модели скорости распространения огня посвящены работы Э.В. Конева и А.Л. Сухинина [32, 116].

На основе уравнений сохранения энергии и теплового баланса с учетом среднестатистических величин (расстояние между частицами, угол направленности, время зажигания и сгорания) они предложили уравнение скорости распространения горения по слоям из лишайника, сосновой хвои и травяной ветоши.

Э.В. Конев внес важный вклад в понимание механизма распространения процесса горения среди лесных горючих материалов. Однако, его модели [32] сложны в реализации, так как он рассматривает распространение огня в твердой фазе от частицы к частице. Кроме того, Э.В. Конев не рассматривает динамику газовой фазы при пожаре. Математическая модель Г. А. Доррера [25] описывает процесс распространения лесного пожара как бегущую волну в неоднородной и анизотропной среде. На основе методов гамильтоновой механики разработана геометрическая теория движения плоских фронтов природных пожаров, даны формулы для расчета контуров пожаров, их периметров и площадей, разработаны численные алгоритмы построения фронтов пожаров, как имитационного типа, так и основанные на методе подвижных сеток. Введены понятия индикатрис и фигуротрис процессов распространения. По сути, это целая сложная система моделирования процессов распространения и локализации природных пожаров, включающая ряд вспомогательных математических моделей, например, модели

пространственной структуры слоев лесного горючего, динамики его влагосодержания и т. д.

При экспериментально-статистическом подходе основой для построения модели служит набор экспериментальных данных о пожарах, проведенных в контролируемых условиях. Связь между входными параметрами процесса и выходными (скоростью распространения) ищется в виде некоторого удобного аналитического выражения таким образом, чтобы значения выходного параметра, предсказанные моделью по известным значениям входных параметров, как можно лучше (в статистическом смысле) совпадали с истинными значениями выходного параметра, определенными из экспериментов.

Особенностью экспериментально-статистических моделей является их ограниченная применимость: модели такого типа справедливы только для тех лесных условий, при которых производились эксперименты. Однако по этой же причине точность экспериментально-статистических моделей, как правило, выше, чем экспериментально-аналитических, предназначенных для широкого диапазона растительных условий, и более того, величина возможной ошибки в таких моделях обычно оговаривается заранее.

Простота экспериментально-статистических моделей, их сравнительно высокая точность делают их важным инструментом при решении многих прикладных задач охраны лесов от пожаров, в том числе в алгоритмах имитационного моделирования работы систем наземной и воздушной охраны лесов.

Одна из первых моделей экспериментально-статистического типа предложена Г. А. Амосовым [1]. Он охарактеризовал пламенное и беспламенное горение в лесу, привел данные о теплотворной способности растительных материалов, теплоте их газификации, оценил долю различных видов теплопередачи (излучения, конвекции и теплопроводности) в процессе их сгорания.

Г.Н. Коровиным была получена полиномиальная модель скорости распространения пламени на основе обработки результатов 72 огневых опытов [33]. Характерной особенностью модели Г.Н. Коровина является то, что она определяет

не только скорость движения огня в направлении ветра для ряда типичных лесных условий, но и скорости распространения в направлениях, перпендикулярных ветру и встречном к нему. Определяются также величины площади, пройденной огнем, и длин кромки пожара в зависимости от времени.

Многофакторная модель скорости низового пожара Н.П. Курбатского и Г.А. Ивановой [37] также основана на обработке экспериментального материала.

Математическая модель распространения низового пожара М. А. Софронова [57] очень простая:

$$V_x = V_0 \cdot K_w \cdot K_r \cdot K_\varphi, \quad (2.4)$$

где V_0 - базовая скорость, м/мин; K_w - коэффициент влияния ветра; K_r - коэффициент влияния относительной влажности воздуха; K_φ - коэффициент влияния уклона поверхности.

В данной модели в число важнейших динамических факторов, оказывающих непосредственное влияние на скорость распространения горения при низовых пожарах, включены не только ветер и уклон поверхности, но также и относительная влажность воздуха, которая обычно имеет значительные суточные колебания. В модели для упрощения используется принцип независимого влияния факторов.

В качестве базовой скорости принимается скорость распространения кромки низового пожара на данном участке растительности при следующих условиях: 1) отсутствие ветра (штиль); 2) отсутствие уклона (горизонтальная поверхность); 3) относительная влажность воздуха 40 %.

Относительное влияние ветра, уклона и влажности воздуха на скорость распространения горения было определено в процессе экспериментальных выжиганий и огневых опытов [57].

Из зарубежных моделей подобного типа можно отметить модель А. Линдермута и Дж. Дэвиса [118], созданную для предсказания скоростей распространения огня в зарослях вечнозеленого карликового дуба на основе 32 огневых экспериментов.

В Австралии исследования динамики пожаров связаны с необходимостью прогнозировать поведение незапланированных пожаров для успешного их тушения, а также с организацией преднамеренных пожаров. В Австралии используется индекс пожароопасности МакАртура [125]. Результаты исследования МакАртура, проведенные для восточной Австралии, были расширены на ее юго-восточную часть. Для этого были использованы специальные таблицы, разработанные Питом, для учета природных условий юго-восточной Австралии [141]. Работы МакАртура и Пита считаются пионерскими в области исследования поведения пожаров в Австралии. Были разработаны различные модификации этих работ, которые нашли отражение в пяти версиях индекса пожароопасности, а также в серии различных редакций таблиц поведения лесного пожара для западной Австралии [123-125].

Среди экспериментально-статистических моделей можно выделить еще один класс моделей оперативно-тактического типа, предназначенных для прогнозирования прироста площади природных пожаров, зафиксированных со спутников [24, 34]. Установлено, что при имеющемся уровне информационного обеспечения наиболее эффективным инструментом прогнозирования параметров крупных (свыше 200 га) природных пожаров являются нейросетевые технологии. Авторами предложены и верифицированы для ряда регионов Восточной Сибири и Дальнего Востока нейросетевые модели прогнозирования суточного прироста площади, пройденной пожаром. Показано, что, приняв ряд гипотез о динамике и конфигурации пожара, можно осуществить более глубокую обработку имеющейся информации. В частности, рассмотрены методы прогнозирования конфигурации пожара на основе информации о приросте площадей пожаров, полученной путем нейросетевой обработки данных, хранящихся в системах спутникового мониторинга лесов, и карт лесной растительности. На основе динамики прироста площади пожара можно произвести оценку момента начала борьбы с пожаром и интенсивности этой борьбы.

Следует отметить, что в силу недостаточной или неточной информация о характеристиках леса, топографии местности, локальных метеоданных модели

динамики пожаров получают сравнительно грубыми, ориентированными в основном на получение качественных оценок процесса распространения пожара в наиболее неблагоприятных случаях. Тем не менее, по отзывам специалистов, такая информация оказывается полезной при принятии решений по борьбе с пожарами.

Попытки получения более точных прогнозов динамики пожаров предпринятые, например, разработчиками системы Behave (США) [87] при максимально подробном учете доступных данных об условиях горения показали, что даже для небольших пожаров погрешности составляют порядка 30% по площади и до 50% по геометрическим размерам. Кроме того, точность прогнозирования сильно зависит от квалификации пожарного аналитика. Аналогичные результаты получены сотрудниками Института леса СО РАН [6]. Указанные погрешности, помимо прочего, обусловлены тем, что невозможно достаточно точно спрогнозировать метеоусловия в районе пожара, а они оказывают решающее влияние на его распространение. Сказанное в особенности касается прогнозов на длительный период.

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. Кроме того, возможно создание гибридных моделей – включение некоторых блоков аналитических моделей в состав экспериментальных, сохраняя

при этом достаточное быстроедействие и повышая качество экспериментальной модели.

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.

2.2 Математическая модель природного пожара, на основании уравнения Гамильтона-Якоби

В данном разделе рассматривается 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. Исследование областей достижимости играет важную роль в теории оптимального управления, а также в теории динамических игр, в частности, в задачах о встрече движений [35]. 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:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + R \cdot \text{grad} \varphi = \frac{\partial \varphi}{\partial t} + R \cdot \hat{n} \cdot |\text{grad} \varphi| = 0, \quad (2.5)$$

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

При $t = 0$,

$$\varphi(x, y, 0) = \varphi_0(x, y), \quad (2.6)$$

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

Написанные уравнения представляют собой простейшую геометрическую модель динамики пожара. Решение задачи (2.5), (2.6) 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 [24].

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.

2.3 Обзор программного обеспечения для компьютерного моделирования природных пожаров

Программное обеспечение (ПО) для моделирования динамики природных пожаров, как и математические модели, можно разбить на две большие группы. К первой группе относится ПО, использующее в качестве основного принципа расчета динамики пожара математические модели аналитического типа. Ко второй группе относятся те компьютерные программы, которые используют экспериментально-

аналитические или экспериментально-статистические математические модели природных пожаров.

Несмотря на огромное количество существующих математических моделей различных типов, практическое применение нашли лишь несколько моделей, на базе которых и было создано ПО, активно используемое как учеными, так и пожарными службами различных стран.

Наиболее известной и широко используемой математической моделью на сегодняшний день, как уже отмечалось, является модель Р. Ротермела, поэтому неудивительно, что в мире существует большое количество программных реализаций именно этой математической модели. Однако широко применяются лишь несколько программных продуктов, использующих модель Р. Ротермела как основу.

Система BEHAVE была разработана в начале 1980-х годов Лесной Службой США [87]. Система используется с 1984 года и является национальным стандартом прогнозирования низового пожара в США. В системе используется непространственная модель пожара, выходные данные которой отображаются с помощью графов, графиков и простых диаграмм. Система разрабатывалась для моделирования пожаров, а также в качестве средства обучения пожарных команд.

Система BehavePlus [88] – это усовершенствованная система BEHAVE, использующая те же математические модели. Одно из основных преимуществ этой системы состоит в том, что ее можно использовать на большинстве PC-совместимых компьютеров. В качестве входных данных в системе используются температура, относительная влажность воздуха, скорость и направление ветра, уклон местности, влагосодержание горючего и так называемый номер модели горючего.

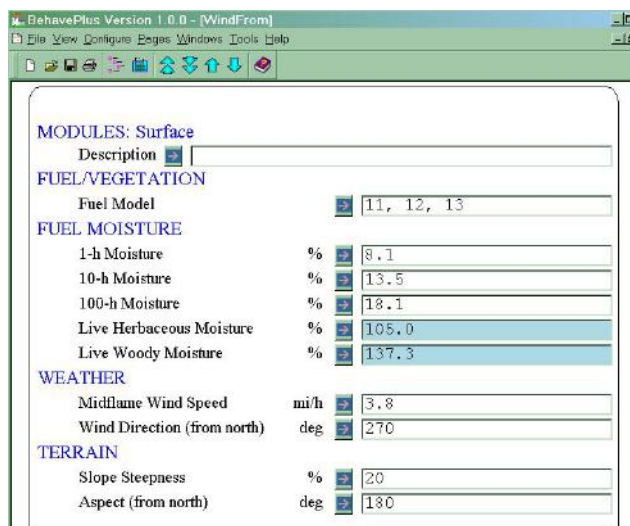


Рисунок 2.2 - Интерфейс BehavePlus

Модель горючего описывает комплекс растительных горючих материалов, используемый в модели низового пожара. В BehavePlus используется 13 различных моделей горючего, которые применимы для моделирования типа растительности в каждом конкретном случае [88]. На основе модели Р.Ротермела BehavePlus обеспечивает вычисление следующих выходных параметров: скорость распространения и интенсивность низового пожара, количество тепла на единицу площади, размер безопасной зоны, высота факела пламени, площадь и периметр пожара.

Несмотря на изобилие информации, которую представляет эта модель, существуют следующие ограничения при ее использовании:

1. Система предназначена для моделирования только низового пожара.
2. Горючее считается однородным и расположенным непрерывно, то есть неоднородности ЛГМ не принимаются во внимание.
3. Условия, при которых распространяется пожар, такие, как рельеф местности и погода, считаются постоянными. Это упрощение существенно снижает точность результатов моделирования. К примеру, скорость и направление ветра могут меняться очень быстро, влияя при этом на поведение пожара.

4. Модель не обладает средствами пространственного отображения информации. Выходные параметры представлены в различных таблицах, что существенно снижает наглядность восприятия пространственных данных пользователем.

Система FARSITE (Fire Area Simulator) содержит векторную двумерную модель распространения пожара (в отличие от одномерной модели, используемой в Behave и BehavePlus). Система предназначена для работы на Windows-платформе. FARSITE в настоящее время используется в США. Разработана эта система Марком Финней (M. Finney) в 1995 году [106]. В FARSITE, также как в системах BEHAVE и BehavePlus, используется модель Ротермела для определения локальной максимальной скорости распространения пожара из точки. Двумерная модель распространения пожара в системе FARSITE построена путем усовершенствования одномерной модели Ротермела. Для построения модели распространения пожара Финней использовал алгоритм Ричардса [146], основанный на принципе распространения эллиптических волн [86], согласно которому периметр пожара, локально распространяющегося из точки, имеет форму эллипса. В результате вычисления локальных эллипсов из множества точек на общем периметре пожара в определенный момент времени генерируется новый периметр пожара путем построения огибающей кривой линии, касательной ко всем локальным эллипсам.

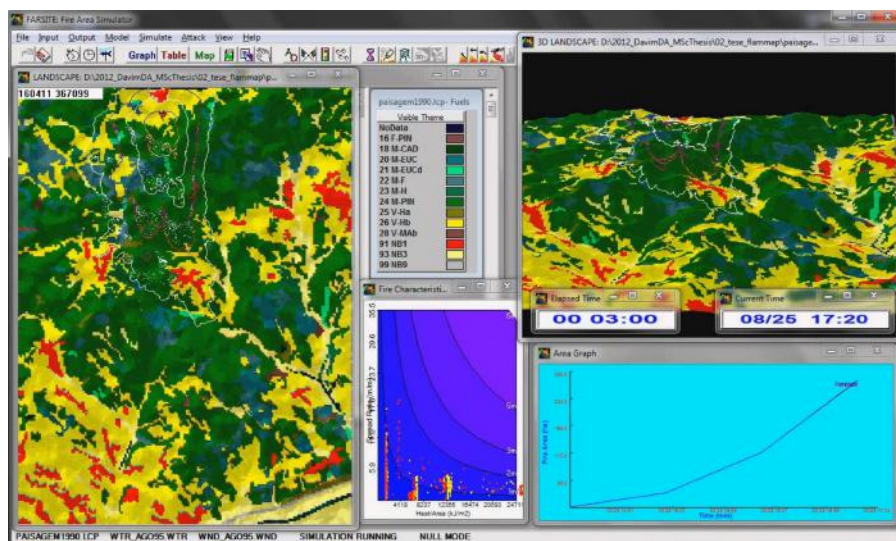


Рисунок 2.3 - Интерфейс FARSITE

Система содержит 6 входных параметров, первые пять из которых задаются в виде растровых карт [106]:

- модель горючего;
- сомкнутость полога леса;
- высота над уровнем моря;
- уклон местности;
- экспозиция;
- метеорологические условия (температура, относительная влажность, скорость и направление ветра).

Для моделирования верховых пожаров с помощью FARSITE требуются дополнительные параметры.

Выходными данными системы являются периметр и площадь пожара, измеренные через определенный пользователем интервал времени. Эти данные представлены в виде полигональных объектов на слоях ГИС. В системе вычисляются также интенсивность пожара, высота факела пламени, скорость распространения пожара, количество тепла на единицу площади, направление распространения.

Система FARSITE имеет следующие преимущества:

- возможность пространственного моделирования (выходные данные могут быть представлены в числовом виде, в виде графика или в виде изображения);
- возможность использования базы пространственных данных;
- моделирование пятнистых и верховых пожаров;
- использование принципа распространения волн Гюйгенса при моделировании движения фронта пожара;
- высокое быстродействие системы;
- возможность ежедневного учета метеорологических условий таких, как максимальная и минимальная температура, относительная влажность,

количество осадков, скорость и направление ветра (фиксируются каждый час для достижения более точных результатов моделирования).

Несмотря на множество преимуществ, система имеет несколько ограничений, основными из которых являются следующие: горючее, рельеф местности и параметры погоды считаются однородными; интерфейс системы не является дружелюбным.

Министерство природных ресурсов Канады в настоящее время оперирует двумя национальными информационными системами для управления лесными пожарами [117]: канадская информационная система по лесным пожарам Canadian Wildland Fire Information System (CWFIS) и система моделирования, мониторинга и картирования пожаров Fire M3. Обе системы включают компоненты канадской системы оценки лесной пожарной опасности (Canadian Forest Fire Danger Rating System – CFFDRS) [150] и используют элементы системы пространственного управления пожарами (Spatial Fire Management System – sFMS) [117] для получения, управления, моделирования, анализа и презентации данных. В настоящее время активно разрабатывается система Prometheus, которая фактически является аналогом FARSITE, но использующая собственные типы горючего [156].

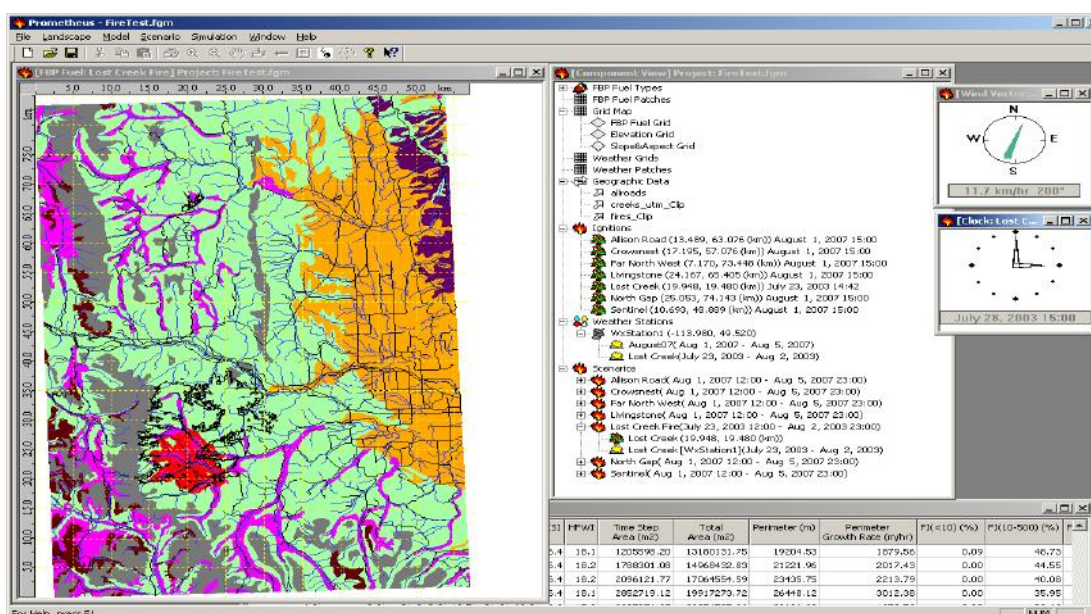


Рисунок 2.4 - Интерфейс Prometheus

Другую большую группу составляют программные системы, основывающиеся на аналитических математических моделях.

Информационная система NIGRAD-FIRETEC (далее FIRETEC) реализует трехмерную двухфазную модель лесного пожара на основании законов сохранения массы, импульса и энергии. FIRETEC предоставляет информацию о таких процессах, как горение, излучение, конвективный теплообмен и аэродинамическое сопротивление. Описание аналитической модели подробно отражено в статьях R.R. Linn [119 - 122].

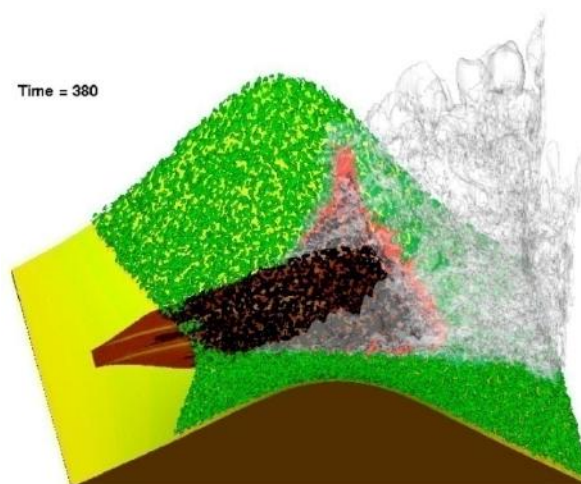


Рисунок 2.5 - Отображение данных в FIRETEC

FIRETEC основывается на методе крупных вихрей (Large Eddy Simulation - LES) [151] для турбулентности. Идея метода заключается в том, что большие масштабы турбулентности рассчитываются явно, а эффекты более мелких вихрей (т.е. меньших размера сетки) моделируются с использованием правил подсеточного замыкания [151]. Задачи моделируются при больших размерах сетки (около 2 метров) в каждом из направлений, поэтому FIRETEC используется для моделирования природных пожаров в масштабах полевых экспериментов. Большинство экспериментальных данных для аналитических моделей на сегодняшний день получены в лабораторных условиях [131], в силу больших сложностей проведения полевых экспериментов. Очевидно, что лабораторные

эксперименты гораздо менее масштабны, по сравнению с полевыми, а, соответственно, размеры вычислительной сетки для моделирования таких экспериментов должны быть менее 1 метра. Таким образом, моделирование лабораторных экспериментов представляет для FIRETEC некоторую сложность, что затрудняет верификацию используемой модели на существующих экспериментальных данных.

Система FIRESTAR, разработкой которой занимаются D. Morvan, J.L. Dupuy [104, 135, 137-139] так же реализует математическую модель пожара, основанную на физико-химических процессах горения. Данная система основывается на подходе, используемом в модели А.М. Гришина [18, 19] для представления физического взаимодействия огня в системе, образованной растительным горючим и окружающим его атмосферным течением. В настоящий момент используется и двумерная формулировка существующей модели FIRESTAR [135].

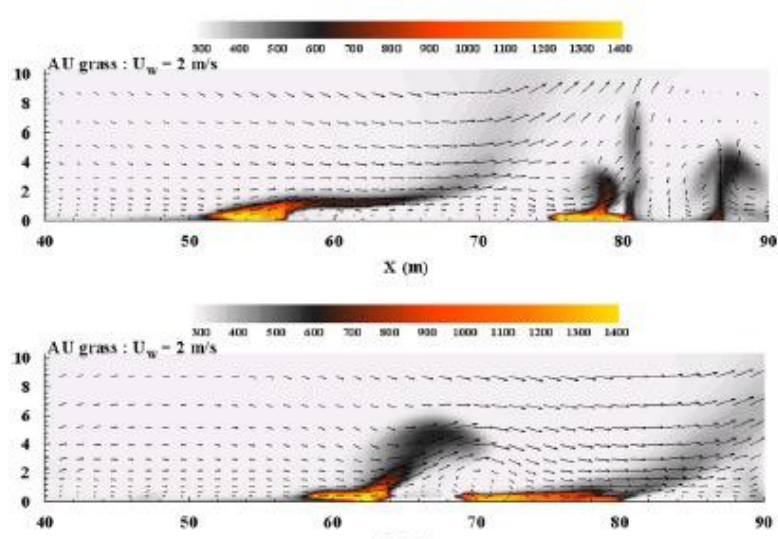


Рисунок 2.6 - Отображение данных в FIRESTAR 2D

Подводя итог, можно сказать, что ни одна из рассмотренных выше компьютерных систем моделирования в полной мере не годится для решения задач пожароуправления.

Такие системы, как Behave Plus, FARSITE, Prometheus, основанные на математической модели Ротермела, обладают низкой точностью прогноза горящей кромки пожара. Ротермел [148] при создании своей модели проводил эксперименты по горению РГМ в лабораторных условиях, после чего предположил, что поведение огня в полевых условиях будет схожим, что не всегда подтверждается на практике. Также эти системы упрощают влияния таких важных внешних факторов, как ветер (в данных системах ветер рассматривается постоянным в каждой точке, независимо от ландшафта), а так же рельеф.

Системы, основанные на аналитических моделях, такие как FIRETEC и FIRESTAR, намного точнее прогнозируют параметры природного пожара, однако имеют проблемы по быстродействию (время вычисления параметров пожара в 500-5000 раз медленнее, чем реальный процесс горения), а так же в экспериментальной базе, подтверждающей эффективную работу систем.

2.4 Компьютерная система моделирования природных пожаров Wildland-urban interface Fire Dynamics Simulator

По мнению многих специалистов, в настоящее время среди существующих систем моделирования природных пожаров наиболее перспективной является Wildland-urban interface Fire Dynamics Simulator (далее WFDS).

WFDS, в отличие от аналогов, описанных в предыдущем разделе, имеет открытый исходный код и распространяется по лицензии MIT, т.е. является свободно распространяемой. Это позволяет ученым со всего мира совместно разрабатывать и дорабатывать данную систему, наращивая эффективность и потенциал данного продукта.

WFDS является расширением FDS (Fire Dynamics Simulator), являющийся разработкой Национального Института Стандартов и Технологий, США (NIST) [126]. Разработка FDS началась в 1980-х годах, основной задачей было создание

системы, способной моделировать пожары внутри помещений, затрачивая при этом минимум вычислительных ресурсов. Система, поддерживающая самые известные операционные системы, может быть запущена как на однопроцессорной ЭВМ, так и на суперкомпьютере. Изначально математическая модель, используемая в FDS была предложена Н.Ваum и R. Rehm [89-91].

В настоящее время FDS используется огромным количеством специалистов в области пожарной безопасности по всему миру. Обзор экспериментов, направленных на валидацию FDS приводится в [126].

В WFDS было добавлена возможность использования растительного горючего, все остальные компоненты, в том числе и математическая модель, перешли из FDS. Совершенствованием системы WFDS в настоящее время занимаются W.Mell, A. Vova и др [128 - 133]. В данной системе есть возможность использования двух принципиально разных математических моделей природных пожаров:

1. WFDS-PB - аналитическая модель лесного пожара
2. WFDS -LS - экспериментально-статистическая модель лесного пожара

Обзор этих моделей приводится в пунктах 2.4.1 и 2.4.2.

Отображение выходных данных WFDS осуществляется с помощью продукта Smokeview, который также разработан в рамках проекта FDS [110].

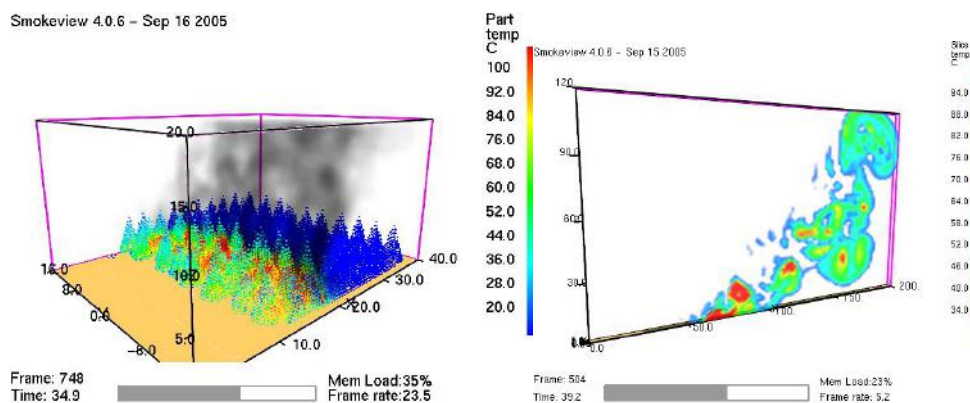


Рисунок 2.7 - Отображение данных WFDS-PB с помощью Smokeview.

WFDS позволяет проводить эксперименты как на малых размерах вычислительной сетки (1-10 см), так и моделировать масштабные полевые эксперименты, с размерами узла сетки от 1 до 20 метров. Таким образом, в WFDS возможно численное моделирование экспериментов как лабораторных так и полевых масштабов, что пока не может делать ни одна из рассмотренных ранее систем.

2.4.1 Подсистема WFDS-PB. Аналитическая модель природного пожара

WFDS-PB (Physics-based) реализует вычислительную гидродинамическую модель (CFD) тепломассопереноса при горении. В WFDS-PB численно решаются уравнения Навье-Стокса для низкоскоростных температурно-зависимых потоков, особое внимание уделяется распространению дыма и теплопередаче при пожаре. Эта система требует значительных вычислительных ресурсов.

Основные уравнения математической модели WFDS-PB [18, 129]:

Уравнение сохранения массы:

$$\rho \frac{\partial Y_i}{\partial t} + \rho \mathbf{u} \cdot \nabla Y_i = \nabla \cdot \{(\rho D)_{\text{LES}} \nabla Y_i\} + \dot{m}_i''' \quad (2.7)$$

Уравнение сохранения энергии:

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} + \rho \mathbf{u} \cdot \nabla h = \nabla \cdot (\lambda_{\text{LES}} \nabla T) + \nabla \cdot (\sum_i h_i (\rho D)_{\text{LES}} \nabla Y_i) - \nabla \cdot \dot{q}_r'' + \frac{dp_0}{dt} \quad (2.8)$$

Уравнение сохранения импульса:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla H - \mathbf{u} \times \boldsymbol{\omega} = \frac{1}{\rho} [(\rho - \rho_\infty) \mathbf{g} + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} - \mathbf{F}_D], \quad (2.9)$$

$$\nabla H = \frac{1}{2} \nabla |\mathbf{u}|^2 + \frac{1}{\rho} \nabla p_d \cong \frac{1}{2} \nabla |\mathbf{u}|^2 + \frac{1}{\rho_\infty} \nabla p_d, \quad (2.10)$$

$$\boldsymbol{\tau} = \mu_{\text{LES}} \left(\text{def } \mathbf{u} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I} \right). \quad (2.11)$$

Уравнение состояния:

$$p_0 = \mathcal{R} \rho T \sum_i Y_i / M_i = \frac{\mathcal{R} \rho T}{M}. \quad (2.12)$$

В формулах (2.7) - (2.12) приняты следующие обозначения: ρ - суммарная плотность газа (кг/м^3), \mathbf{u} - вектор скорости (м/с), \mathbf{g} - вектор ускорения свободного падения (м/с^2), $\boldsymbol{\tau}$ - тензор вязких напряжений ($\text{кг/м}\cdot\text{с}^2$), $Y_i = \frac{\rho_i}{\rho}$ - массовая доля локальной смеси i , D - коэффициент диффузии ($\text{м}^2/\text{с}$), \dot{m}_i''' - расход химической массы газа i ($\text{кг/с}\cdot\text{м}^3$), p_0 - термодинамическое давление (Па), \mathcal{R} - универсальная газовая постоянная $\mathcal{R} = 8,314 \frac{\text{Дж}}{\text{К}\cdot\text{моль}}$, T - температура ($^\circ\text{C}$), 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 ($\text{кг/м}\cdot\text{с}$), \dot{q}_r'' - вектор лучистого теплового потока (кВт/м^2).

Система из выше указанных уравнений 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 [65, 144]. Более подробная информация о математической модели WFDS-PB содержится в Приложении 1.

Процесс компьютерного моделирования лесного пожара на основе аналитической модели горения WFDS-PB является очень требовательным к вычислительным ресурсам системы. Если речь идет о моделировании пожаров на основании реальных спутниковых данных, где размеры моделируемых участков измеряются сотнями метров, то о применении вычислительных ресурсов даже самого производительного на сегодняшний день персонального компьютера не может быть и речи. Очевидным решением этой проблемы является применение высокопроизводительных кластерных систем (суперкомпьютеров).

Система WFDS поддерживает библиотеку MPI, что позволяет производить параллельные расчеты на нескольких узлах суперкомпьютера. При параллельном

моделировании в WFDS вычислительная область должна быть разбита на сетки таким образом, чтобы каждая сетка была назначена одному MPI процессу.

В работе экспериментальные расчеты проводились на двух суперкомпьютерах:

- суперкомпьютер US Forest Service в лаборатории Pacific Wildland Sciences Lab (PWSL).
- суперкомпьютер Сибирского Федерального Университета

Оба суперкомпьютера имеют одинаковые характеристики вычислительного узла:

- 16 Gb оперативной памяти и два четырехъядерных процессора Xeon Quad Core E5345@2.33 GHz.

Автором при работе с компьютером СФУ были написаны необходимые bash-скрипты для планировщика задач TORQUE, настроена среда для отображения экспериментальных данных непосредственно на самом суперкомпьютере.

В ходе исследования была проведена оценка эффективности работы параллельного алгоритма, применяющегося в WFDS. Был проведен ряд вычислительных экспериментов на различном количестве вычислительных узлов, а так же при различных способах разбиения вычислительной области: одномерном и двумерном. Эксперименты проводились на двух предоставленных суперкомпьютерах.

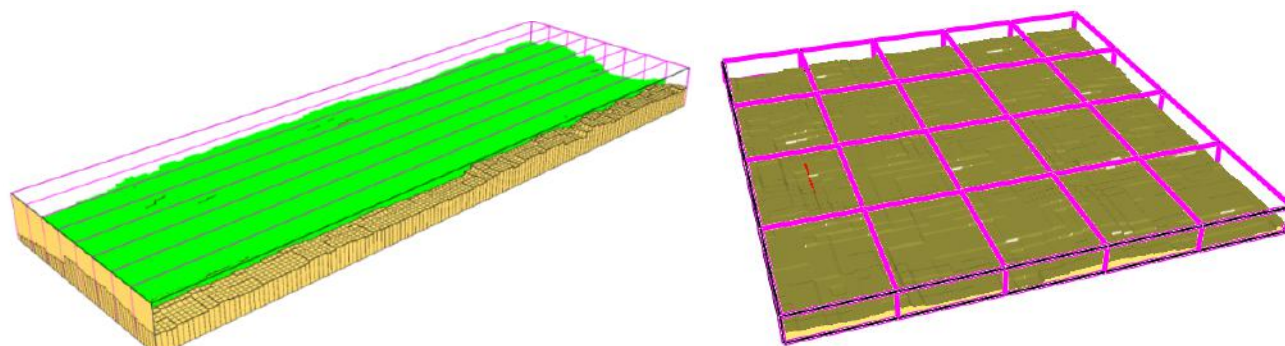


Рисунок 2.8 - Примеры одномерного и двухмерного разбиения расчетной области

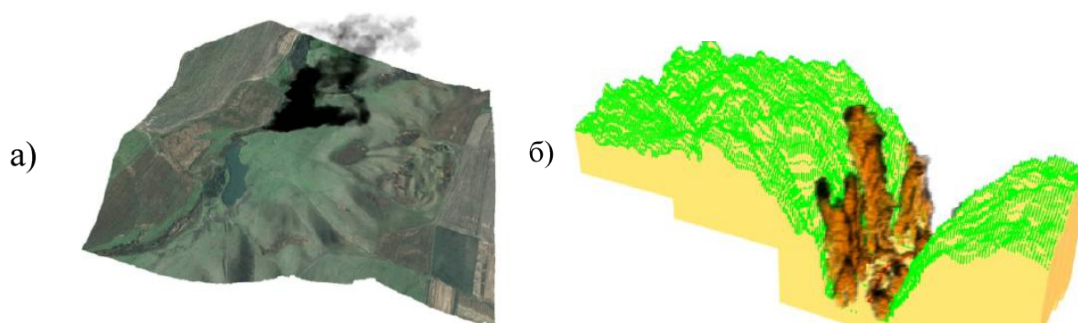


Рисунок 2.9 - Примеры моделирования природных пожаров на различных ландшафтах: а – модель пожара на произвольном ландшафте, б – модель пожара в каньоне

Таблица 2.2 - Сравнение эффективности различных методов разбиения расчетной области

Одномерное разбиение			Двумерное разбиение		
Число узлов	Время моделирования, мин	Ускорение	Число узлов	Время моделирования, мин	Ускорение
4	1489	1	4	1374	1
8	876	1,69	8	812	1,69
12	670	2,22	12	645	2,13
16	547	2,72	16	512	2,68
20	525	2,83	20	478	2,87

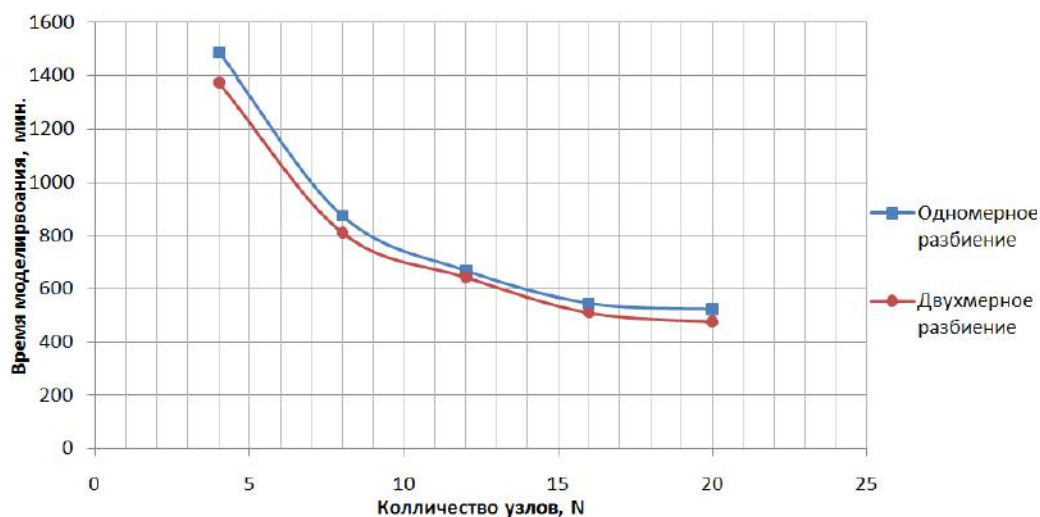


Рисунок 2.10 - Сравнение результатов при одномерном и двухмерном разбиении расчетной области

Мы видим, что двумерное разбиение дает некоторый выигрыш в скорости вычислений. В тоже время, эффект от увеличения числа узлов постепенно снижается в силу закона Амдала.

2.4.2 Подсистема WFDS-LS. Экспериментальная модель природного пожара

Подсистема WFDS-LS (Level set) основана на формализме локальных множеств. Эта модель основана на уравнении Гамильтона-Якоби (2.6) и использует для определения скорости фронта пожара правила МакАртура [125].

В данной модели скорость фронта 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:

$$R_n(x, y, t, S, \theta) = R_0(x, y, t, U, S)\chi(\theta - \theta_w), \quad (2.13)$$

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.

Алгоритм локальных множеств Level Set 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 2.11).

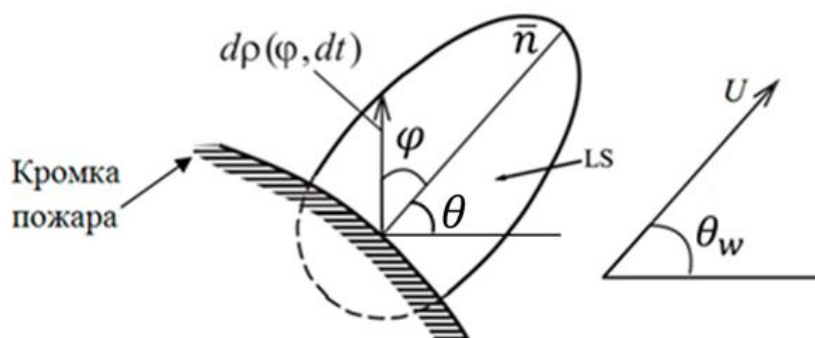


Рисунок 2.11 - Схема кромки пожара, где LS- локальное множество, θ – направление нормали, θ_w – направление ветра (по отношению к горизонтальной линии), U – скорость ветра, угол φ - между нормалью и текущим направлением

Выражения для R приведены ниже для двух областей пожара:

$0^\circ \leq \theta_w \leq 90^\circ$ - область фронта и флангов пожара

$90^\circ < \theta_w \leq 180^\circ$ - область тыла и флангов пожара

Для решения уравнения (2.6) для данной точки кромки пожара требуется выражение $R(x, y)$ - значение скорости распространения пожара по ландшафту. Значение R может быть получено несколькими путями. Например, можно использовать модель Р. Ротермела [148] или какую-либо другую математическую модель, для определения значения R в точке фронта, флангов и тыла кромки пожара, для которых $\varphi = 0$, а так же необходимо определить скорости распространения во всех других точках вдоль всей кромки пожара. FARSITE [106] использует модель Р. Ротермела для определения скорости фронта пожара, скорости флангов и тыла кромки в FARSITE определяются из предположения, что кромка пожара имеет форму эллипса, имеющего, полученные эмпирическим путем, соотношения длины к ширине [86]. Эллиптическая форма кромки пожара позволяет определить скорость распространения в любой точке кромки.

В WFDS-LS предполагается, что для плоской поверхности (т.е. имеющей уклон в 0° градусов) известны скорости распространения фронта (R_H), фланга (R_F) и тыла (R_B) кромки пожара. Используя эти значения, можно получить скорости для

остальных точек кромки (для плоской поверхности) на основании двух уравнений, в зависимости от расположения точки на кромке пожара:

$$R = R_F + (R_H - R_F) \cos \theta_w, \quad 0^\circ \leq \theta_w \leq 90^\circ \quad (2.14)$$

$$R = R_F + (R_F - R_B) \cos \theta_w, \quad 90^\circ < \theta_w \leq 180^\circ \quad (2.15)$$

Для учета эффекта уклона поверхности на скорость распространения пожара используются правила МакАртура, представленные в Forest Fire Danger Meter [125], имеющие вид:

$$R_S = C_S R, \quad (2.16)$$

где R_S - скорость пожара по наклонной поверхности. Значение C_S в уравнении (2.16) является функцией от угла наклона поверхности S и расположении точки кромки пожара, определяемой θ_w :

Для распространения огня вверх по склону:

$$C_S(0^\circ \leq \theta_w \leq 90^\circ) = \begin{cases} 1, & 0^\circ \leq S \leq 5^\circ \\ 1,33, & 5^\circ \leq S \leq 10^\circ \\ 2, & 10^\circ \leq S \leq 20^\circ \\ 4, & 20^\circ < S, \end{cases} \quad (2.17)$$

Для распространения огня вниз по склону:

$$C_S(0^\circ \leq \theta_w \leq 90^\circ) = \begin{cases} 1, & 0^\circ \leq S \leq 5^\circ \\ 0,67, & 5^\circ \leq S \leq 10^\circ \\ 1/2, & 10^\circ \leq S \leq 20^\circ \\ 1/4, & 20^\circ < S, \end{cases} \quad (2.18)$$

Численное решение уравнений содержащихся в WFDS-LS описано в [133].

2.5 Выводы по главе 2

Рассмотрев существующие математические модели природных пожаров различных типов, а так же некоторые программные реализации этих моделей можно сделать следующие выводы.

1. В результате развития методов математического моделирования и вычислительных технологий к настоящему времени созданы системы, позволяющие детально и адекватно описывать физико-химические процессы при горении леса. Одной из таких систем является WFDS-PB. Однако время моделирования лесного пожара для всех существующих информационных систем этого типа, даже при использовании высокопроизводительных кластерных вычислительных систем, в 500-5000 раз медленнее, чем реальное время распространения этого пожара, что не позволяет использовать данные системы в оперативном режиме при принятии решений по борьбе с пожарами.

2. Использование информационных систем, использующих экспериментальные модели природных пожаров (например, FARSITE, WFDS-LS) позволяют быстро моделировать распространение горящей кромки пожара за счет использования более простых, по сравнению с аналитическими, математических моделей. Однако эти модели, полученные в том числе, на основании результатов обработки экспериментальных данных, имеют более низкую точность и эффективность, а также границы применимости.

3. Для улучшения качества прогнозирования систем, базирующихся на экспериментальных моделях горения, требуются данные, полученные в результате проведения полевых и лабораторных экспериментах. Подготовка экспериментов этих двух типов является непростой задачей, тем не менее, гораздо проще проводить эксперименты в лабораторных условиях, где на процесс горения можно воздействовать множеством способов, исходя из целей эксперимента. Совершенно иная ситуация обстоит с полевыми экспериментами, где наибольшую сложность составляет предсказание быстро меняющихся параметров внешней среды, в частности, ветра, что делает полевые эксперименты сложными для контроля. Помимо этого, во взаимодействии с пожарами требуется большое количество специализированного оборудования для сбора и обработки данных, что требует значительных материальных затрат. Альтернативой полевым экспериментам может служить применение информационных систем, использующих аналитические

модели природных пожаров, путем проведения вычислительных экспериментов. Очевидно, что в таких системах можно строго задавать все условия при лесном пожаре, в том числе параметры внешней среды. Полученные результаты могут служить информационной базой для совершенствования моделей оперативного уровня.

На основе сказанного выше можно сделать 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.

Таким образом, задачи дальнейшего исследования в данной работе можно сформулировать следующим образом:

- Разработать на базе программного пакета WFDS локализованного на высокопроизводительных вычислительных системах, комплекса математических моделей, позволяющих вырабатывать более обоснованные решения по управлению пожарами.
- Привязать модели свойств растительных горючих материалов к отечественной системе лесной таксации.
- Разработать алгоритм для создания входных данных для систем поддержки принятия решений, на основании использования космических снимков лесов.
- Разработать на базе предложенных моделей алгоритмов решения ряда конкретных задач принятия решений при пожароуправлении.

3 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Вычислительные эксперименты, описываемые в данной главе были проведены автором совместно с сотрудниками лаборатории Pacific Wildland Sciences Laboratory в г. Сиэтле, США (руководитель В. Мелл). Целью экспериментов было тестирование полученных ранее моделей, а также уточнение некоторых зависимостей в системе WFDS-LS.

3.1 Создание аппроксимационной модели пожара на основе WFDS-LS

Ветер и уклон местности обычно являются основными природными факторами, которые оказывают наибольшее влияние на распространение природных пожаров [95]. Ветер влияет на пламя, наклоняя его вперед, увеличивая конвективный и радиационный перенос энергии на еще не сгоревшее горючее, что в свою очередь увеличивает скорость распространения пожара. Эффект уклона местности является схожим с эффектом ветра, потому что он сближает землю и горючее вместе с пламенем [108]. Большинство математических моделей поведения природных пожаров и информационных систем (BehavePlus, FARSITE, WFDS-LS, CFFBPS) на их основе учитывают эффект влияния ветра и уклона, во время расчета скорости распространения кромки пожара, через относительно простые формулировки. Некоторые из моделей рассматривают влияние ветра и уклона как аддитивный эффект [148], а некоторые как мультипликативный [57, 123-125]. В Канадской системе CFFBPS используются более сложные зависимости, так как там эффекту уклона соответствует эквивалентная скорость ветра, которая затем складывается с текущей скоростью ветра [158].

Таким образом, в данном разделе рассматривается 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 МакАртура Forest Fire Danger Meter [125] и использована В.Меллом [129] в системе WFDS-LS.

В качестве математической модели используется аналитическая модель, реализованная в WFDS-PB. Выводы, полученные в результате данных экспериментов позволят улучшить точность прогнозирования системы WFDS-LS, на основе результатов моделирования в WFDS-PB, тем самым приблизив точность экспериментальной модели WFDS к аналитической.

В качестве горючего использовалось растительное горючее *Themeda australis* [129], на котором было проведено множество полевых экспериментов в Австралии [129-132], для валидации системы WFDS-PB.

Вычислительный эксперимент проводился при различных значениях скорости ветра U и угла уклона S , используемые значения приведены в Таблице 3.1.

Таблица 3.1 - Диапазон параметров для эксперимента

Скорость ветра $U, (м/с)$	Угол наклона поверхности градусы ° $S,$	Начальная ширина линии огня $L, м$	Размер узла расчетной сетки, $м$
1, 5, 12	-27, -18, -14, -7, 0, 7, 14, 18, 27, 45	100	1×1×1

Так как WFDS использует прямоугольную расчетную сетку, то углы наклона были выбраны из условия соотношения сторон прямоугольных треугольников, из которых формируется ступенчатость уклона. Например, при $S = 7^\circ$, $\tan S \approx 0,125 = \frac{1}{8}$, таким образом, чтобы избежать возможных вычислительных проблем на границах

сетки использовались соотношения сторон: $\frac{1}{8}, \frac{1}{4}, \frac{1}{3}, \frac{1}{2}$. При построении графиков в качестве аргумента использовался наклон поверхности S , измеряемый в процентах, где углу $S = 45^\circ$ соответствует наклон поверхности в 100%.

Данное исследование фактически повторяет эксперименты, проводимые учеными из Los Alamos National Laboratory в системе FIRETEC [122], однако имеется ряд расхождений. Например, в FIRETEC для создания эффекта уклона использовалась плоская поверхность, с измененным гравитационным вектором, в зависимости от угла наклона. Такой способ гораздо проще реализуем, однако эксперименты, проведенные в WFDS-PB, показали, что изменение направления гравитационного вектора приводит к другим показателям скорости распространения, чем использование наклонных поверхностей.

Размер вычислительной области равен $720 \times 300 \times 500$ метров, размеры узла расчетной сетки составляли $1 \times 1 \times 1$ метр. Ширина начальной линии огня была выбрана из расчета, чтобы пожар набирал максимальную постоянную скорость как можно быстрее.

Расчеты проводились на суперкомпьютере US Forest Service в лаборатории Pacific Wildland Sciences Lab, а так же на суперкомпьютере Сибирского Федерального Университета, которые имеют очень схожие технические характеристики.

Пример наклонной поверхности для угла $S = 7^\circ$ приведен на Рисунке 3.1.

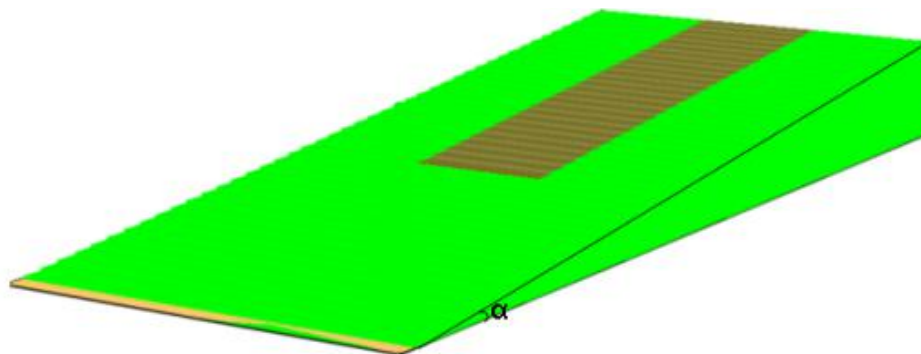


Рисунок 3.1 - Схема расчетной области для $S = 7^\circ$

Участок коричневого цвета соответствует горючему материалу, а участки зеленого цвета – негорючему. Такое разбиение сделано для формирования только головного фронта пожара, без образования флангового и тылового пожара.

В качестве горючего использовалась *Themeda australis*, высотой 0,5 метров, характеристики данного горючего приведены в Таблице 3.2.

Таблица 3.2 - Параметры растительного горючего *Themeda Australis*

Горючий материал	Плотность горючего ρ (кг/м ³)	Теплота пиролиза, h , кДж/кг	Глубина слоя, м	Удельная поверхность σ , м ⁻¹
<i>Themeda australis</i>	512	416	0,5	12240

Всего было проведено 30 экспериментов.

На Рисунке 3.2 изображены скорости распространения пожара при различных значениях угла наклона поверхности, а так же при различном значении ветра:

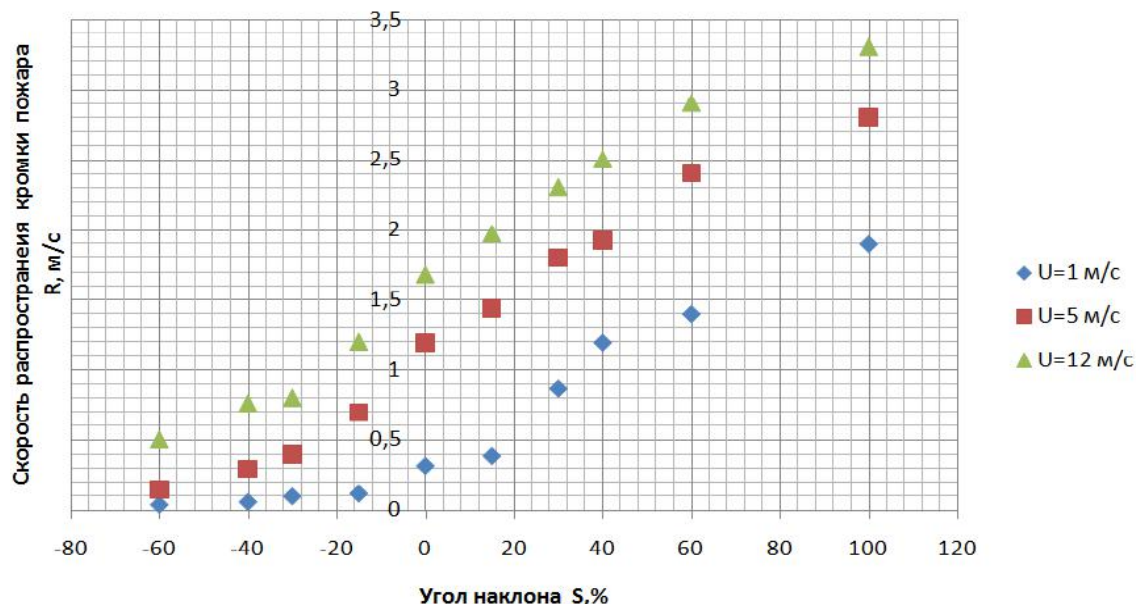


Рисунок 3.2 - Распределение скоростей распространения фронта пожара

Проанализировав результаты экспериментов, можно точно сказать, что скорость пожара всегда увеличивается при увеличении угла уклона и силы ветра.

При низкой скорости ветра ($U = 1$ м/с) скорость фронта пожара R увеличивается экспоненциально, с увеличением наклона, вплоть до угла $S = 14^\circ$ (что эквивалентно 30%), а затем увеличивается линейно, для больших значений углов. При большей силе ветра, зависимость угла S от скорости R примерно линейная.

Как упоминалось ранее в разделе 2.4.2, в WFDS-LS необходимо вручную задать начальные скорости распространения фронта, флангов и тыла кромки пожара. Эти скорости могут быть получены с помощью любой из существующих аналитических или экспериментальных моделей природных пожаров, например, с помощью WFDS-PB или BehavePlus, использующую модель Р. Ротермела. Эффект ветра в WFDS-LS играет роль направляющей движения кромки пожара, т.е. скорость ветра не влияет на скорость распространения кромки. Эффект уклона рассчитывается исходя из правил модели МакАртура [125].

На Рисунке 3.3 (а-в) приведены графики зависимостей скорости фронта пожара от угла наклона поверхности при разных значениях ветра.

Экспериментальные данные, полученные в WFDS-PB, сравнивались с результатами, полученными при применении оригинальных правил МакАртура, содержащихся в Forest Fire Danger Meter. Для этого с помощью WFDS-PB были получены скорости распространения фронтов пожара R_0 на горизонтальной поверхности ($S = 0^\circ$) при значениях ветра в 1, 5 и 12 м/с, после чего к этим скоростям были применены правила МакАртура.

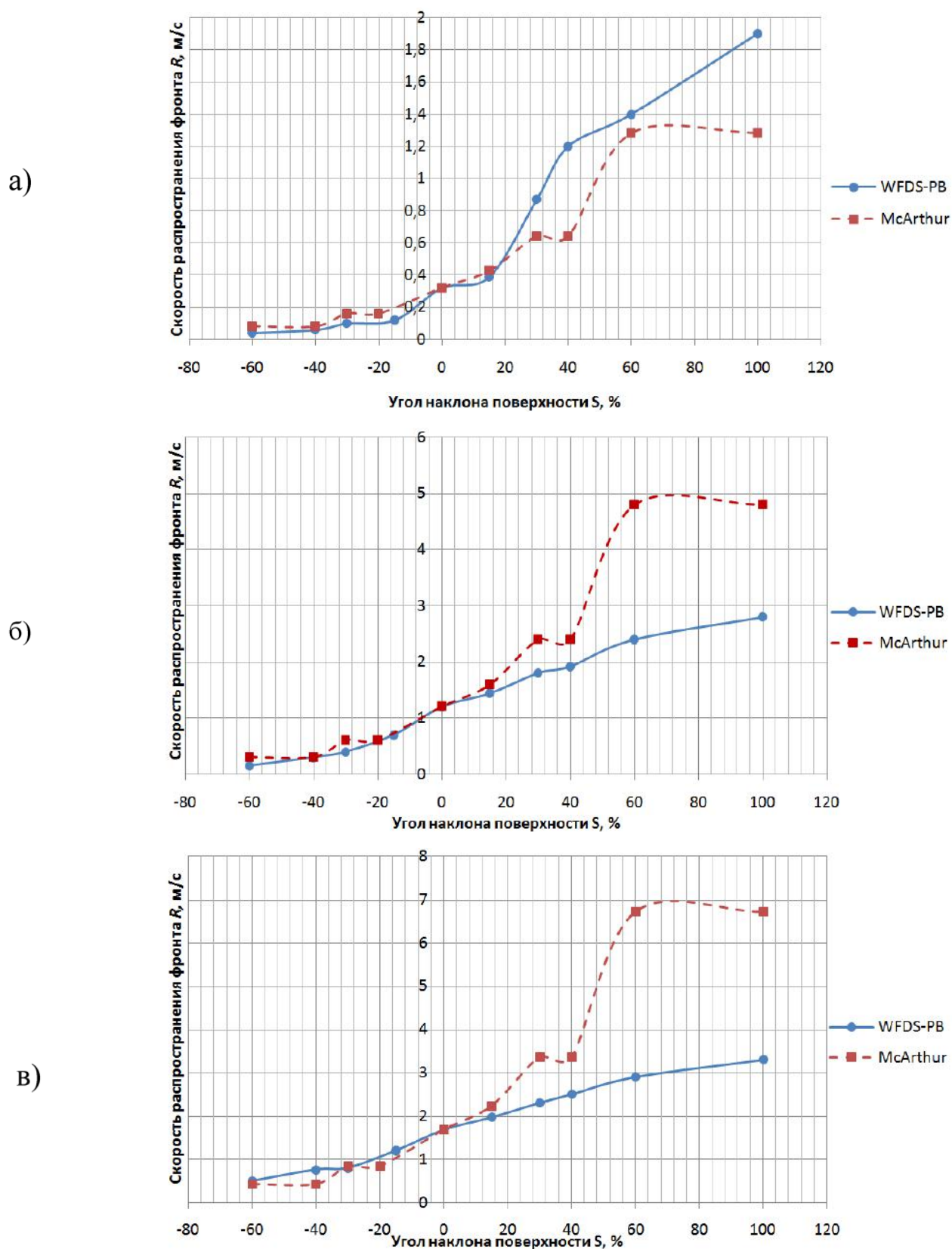


Рисунок 3.3 - Сравнение WFDS-PB и модели МакАртура при скорости ветра U : а) $U=1 \text{ м/с}$ б) $U=5 \text{ м/с}$ в) $U=12 \text{ м/с}$

Как можно видеть, 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. При отрицательных уклонах, когда огонь распространяется вместе с ветром вниз по склону, расхождения в значениях между моделью МакАртура и WFDS-PB незначительны.

Таким образом, если взять сложный ландшафт, где будет присутствовать большое количество уклонов, то очевидно, что даже при одинаковом направлении ветра, контуры пожара, спрогнозированные WFDS-LS (базирующейся на модели МакАртура) будут отличаться от контуров, полученных с помощью аналитической модели WFDS-PB.

Таким образом, чтобы приблизить точность моделирования WFDS-LS к WFDS-PB для данного типа горючего предлагается изменить коэффициенты, использованные в правилах МакАртура для каждого из положительных углов наклона поверхности, учитывая при этом и силу ветра. В итоге для *Themeda australis* были созданы новые правила, где используются модифицированные коэффициенты уклона, уже с учетом силы ветра.

$$C_S((0^\circ \leq \theta_w \leq 90^\circ) \cap (1 \leq U < 5)) = \begin{cases} 1, & 0 \leq S \leq 5^\circ \\ 1.33, & 5^\circ \leq S \leq 10^\circ \\ 3, & 10^\circ \leq S \leq 15^\circ \\ 3.6, & 15^\circ \leq S \leq 20^\circ \\ 4.3, & 20^\circ \leq S \leq 30^\circ \\ 6, & 30^\circ \leq S \end{cases} \quad (3.1)$$

$$C_S((0^\circ \leq \theta_w \leq 90^\circ) \cap (5 \leq U < 12)) = \begin{cases} 1, & 0 \leq S \leq 5^\circ \\ 1.2, & 5^\circ \leq S \leq 10^\circ \\ 1.5, & 10^\circ \leq S \leq 15^\circ \\ 1.6, & 15^\circ \leq S \leq 20^\circ \\ 2, & 20^\circ \leq S \leq 30^\circ \\ 2.4, & 30^\circ \leq S \end{cases} \quad (3.2)$$

$$C_S((0^\circ \leq \theta_w \leq 90^\circ) \cap (12 \leq U)) = \begin{cases} 1, & 0 \leq S \leq 5^\circ \\ 1.2, & 5^\circ \leq S \leq 10^\circ \\ 1.35, & 10^\circ \leq S \leq 15^\circ \\ 1.5, & 15^\circ \leq S \leq 20^\circ \\ 1.7, & 20^\circ \leq S \leq 30^\circ \\ 2, & 30^\circ \leq S \end{cases} \quad (3.3)$$

В качестве скорости распространения фронта пожара при нулевом уклоне используются данные, полученные в результате экспериментов в WFDS-PB:

$$R_0 = \begin{cases} 0.32, & 0 < U < 5 \\ 1.2, & 5 < U < 12 \\ 1.68, & 12 < U \end{cases} \quad (3.4)$$

Данные правила, полученные экспериментальным путем, как и правила МакАртура, позволяют приблизить точность прогнозирования в WFDS-LS к WFDS-PB для данного типа горючего.

3.1.1 Обработка экспериментальных данных

Формулы (3.1) - (3.4), приведенные в предыдущем разделе, являются неудобными для построения аппроксимационной модели. Поэтому результаты расчетов влияния скорости ветра U и уклона местности S на скорость распространения фронта пламени R , могут быть приведены к единой формуле путем обработки полученных данных методами математической статистики.

Будем искать выражение для скорости фронта в виде:

$$R = a_0 + a_1U + a_2S + a_3U^2 + a_4S^2 + a_5U \cdot S \quad (3.5)$$

Представим данные расчетов (3.1) – (3.4) в виде матриц:

$$X = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 2.5 & 1 & 6.25 & 2.5 \\ 1 & 1 & 7.5 & 1 & 56.25 & 7.5 \\ 1 & 1 & 12.5 & 1 & 156.25 & 12.5 \\ 1 & 1 & 17.5 & 1 & 306.25 & 17.5 \\ 1 & 1 & 25 & 1 & 625 & 25 \\ 1 & 1 & 35 & 1 & 1225 & 35 \\ 1 & 5 & 2.5 & 25 & 6.25 & 12.5 \\ 1 & 5 & 7.5 & 25 & 56.25 & 37.5 \\ 1 & 5 & 12.5 & 25 & 156.25 & 62.5 \\ 1 & 5 & 17.5 & 25 & 306.25 & 87.5 \\ 1 & 5 & 25 & 25 & 625 & 125 \\ 1 & 5 & 35 & 25 & 1225 & 175 \\ 1 & 12 & 2.5 & 144 & 6.25 & 37.5 \\ 1 & 12 & 7.5 & 144 & 56.25 & 90 \\ 1 & 12 & 12.5 & 144 & 156.25 & 150 \\ 1 & 12 & 17.5 & 144 & 306.25 & 210 \\ 1 & 12 & 25 & 144 & 625 & 300 \\ 1 & 12 & 35 & 144 & 1225 & 420 \end{bmatrix} \quad R = \begin{bmatrix} 0.32 \\ 0.425 \\ 0.96 \\ 1.15 \\ 1.38 \\ 1.92 \\ 1.2 \\ 1.44 \\ 1.8 \\ 1.92 \\ 2.4 \\ 2.88 \\ 1.68 \\ 2.02 \\ 2.27 \\ 2.52 \\ 2.86 \\ 3.36 \end{bmatrix}$$

В матрице X первый столбец соответствует свободному члену, второй столбец – скорости ветра U , а следующие – соответственно, уклону местности, квадрату скорости, квадрату уклона и произведению скорости на величину уклона. Столбец R – величина скорости фронта.

Каждая строчка в матрице X и столбце R соответствует одному эксперименту.

Представим неизвестные коэффициенты модели в виде вектора

$$A = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \end{bmatrix}$$

Тогда по методу наименьших квадратов [67] вектор A может быть вычислен по формуле

$$A = (X^T X)^{-1} X^T R = \begin{bmatrix} -0.158 \\ 0.313 \\ 0.057 \\ -0.014 \\ -1.861 \cdot 10^{-4} \\ 3.518 \cdot 10^{-5} \end{bmatrix}. \quad (3.6)$$

Адекватность модели оценивается по критерию Фишера:

$$F = \frac{S_R^2}{S_{ост}^2},$$

где S_R^2 - дисперсия R , $S_{ост}^2$ - остаточная дисперсия.

$$S_R^2 = \frac{\sum_{i=1}^{18} (R_i - \bar{R})^2}{17}, \quad \bar{R} = \frac{\sum_{i=1}^{18} R_i}{18},$$

$$S_{ост}^2 = (R - R1)^T (R - R1) / 18, \quad R1 = X \cdot A$$

где вектор $R1$ содержит значения скорости фронта, вычисленные по модели (3.5) с коэффициентами (3.6).

В результате расчетов получаем: $S_R^2 = 0.693$, $S_{ост}^2 = 3.649 \cdot 10^{-3}$,

$$F = \frac{0,693}{3.649 \cdot 10^{-3}} = 189.9. \quad (3.7)$$

Табличное значение критерия Фишера для степеней свободы $m_1 = 18 - 1 = 17$, $m_2 = 18 - 6 = 12$ $F_{tabl}(17,12) = 3.46$ при доверительной вероятности $\alpha = 0.01$. Мы видим, что $F > F_{tabl}$, следовательно, модель с параметрами (7) адекватно описывает экспериментальные данные.

Таким образом, модель изменения скорости фронта пожара под влиянием ветра и уклона местности имеет вид:

$$R = -0.158 + 0.313 \cdot U + 0.057 \cdot S - 0.014 \cdot U^2 - 1.861 \cdot 10^{-4} \cdot S^2 + 3.518 \cdot 10^{-5} \cdot U \cdot S \quad (3.8)$$

Для проверки корректности работы модели, был произведен ряд вычислительных экспериментов на различных ландшафтах, полученных на основе обработки космических снимков.

На Рисунке 3.4 изображен фрагмент ландшафта, размером 1000×1000×100 метров, на котором проводилось сравнение эффективности моделей. В качестве подложки использовалась данные о топографии местности и характере растительности с сервиса Google Maps. На Рисунке 3.5 (а) представлены контуры пожаров, полученные в аналитической модели WFDS-PB для моментов времени 100, 200 и 300 секунд соответственно, при силе ветра равной 10 м/с. Размер узла вычислительной сетки составлял 1×1×1 метр. На Рисунке 3.5 (б), (в) представлены контуры пожаров, полученные в исходной и доработанной модели WFDS-LS для моментов времени 100,200,300 секунд соответственно, сила ветра также равна 10 м/с, размер узла вычислительной сетки равен 20×20×5 метров.

Время расчета фронта пожара, который реально продолжался 500 секунд, на WFDS-PB на 25 расчетных узлах суперкомпьютера заняло около 14 часов, время вычисления на WFDS-LS на одном узле составило около 4 секунд.

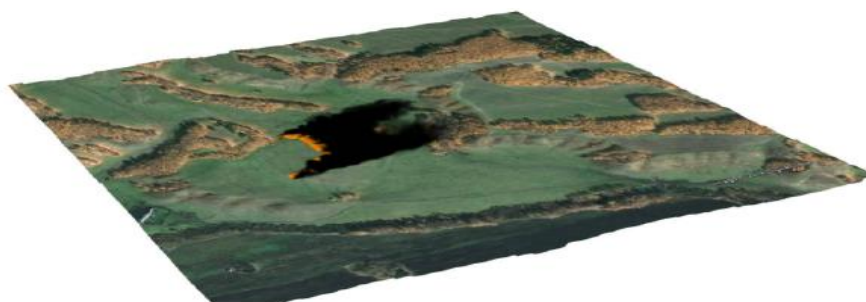


Рисунок 3.4 - Фрагмент ландшафта на котором осуществлялось моделирование растительного пожара

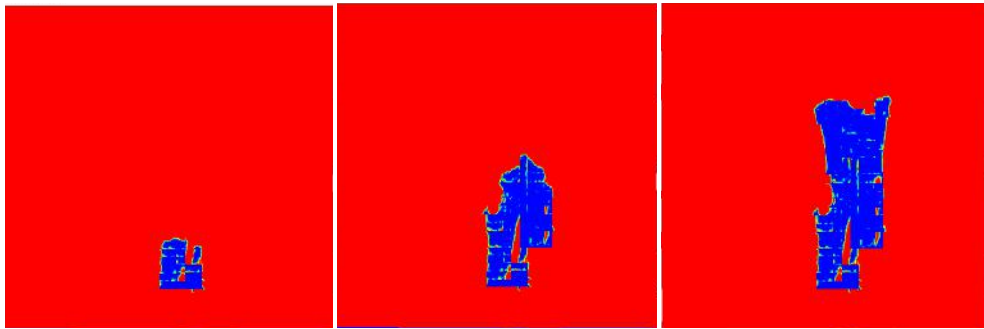


Рисунок 3.5 (а) - Моделирование в WFDS-PB



Рисунок 3.5 (б) - Моделирование в WFDS - LS

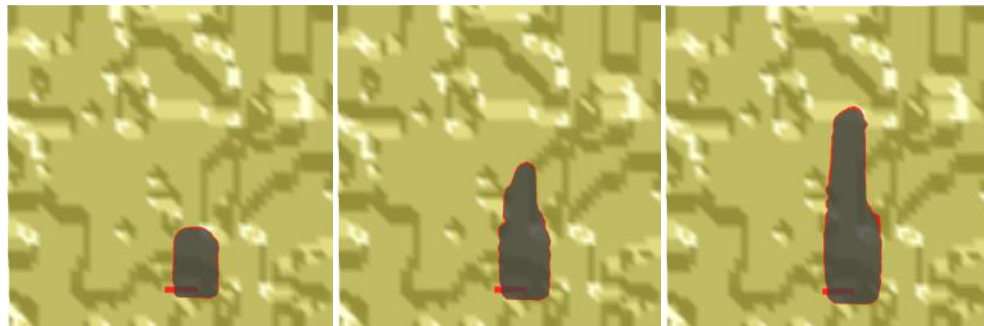


Рисунок 3.5 (в) - Моделирование в модифицированном WFDS-LS

При сравнении результатов эксперимента видно, что при использовании полученной формулы для учета эффекта уклона при определенном ветре, увеличилась точность расчета горящей кромки пожара, при сравнении с исходной версией WFDS-LS. Данное изменение влияет только на скорость распространения фронта пожара для горючего *Themeda australis*, и никак не влияет на форму кромки пожара.

Несмотря на сложный ландшафт, форма горящей кромки пожара имеет некоторую прямолинейность, в силу использования простой модели МакАртура, так

как согласно подходу, использованному в системе WFDS-LS поле ветра постоянно во всех точках ландшафта по направлению, и никак не учитывает геометрию этого ландшафта.

3.2 Гибридная модель WFDS-LS

В существующих компьютерных системах моделирования природных пожаров, таких, как FARSITE или WFDS-LS, ветер задается только направлением и скоростью, таким образом, что 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 (2.7-2.12) 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 реализовано два математических подхода к описанию параметров 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 модуль 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 [97].

Для кромки пожара, для которой $\varphi(x, y, t) = 0$, можно задать значение теплового потока q , который будет оказывать воздействие 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 q 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.

Блок-схема алгоритма изображена на Рисунке 3.6.

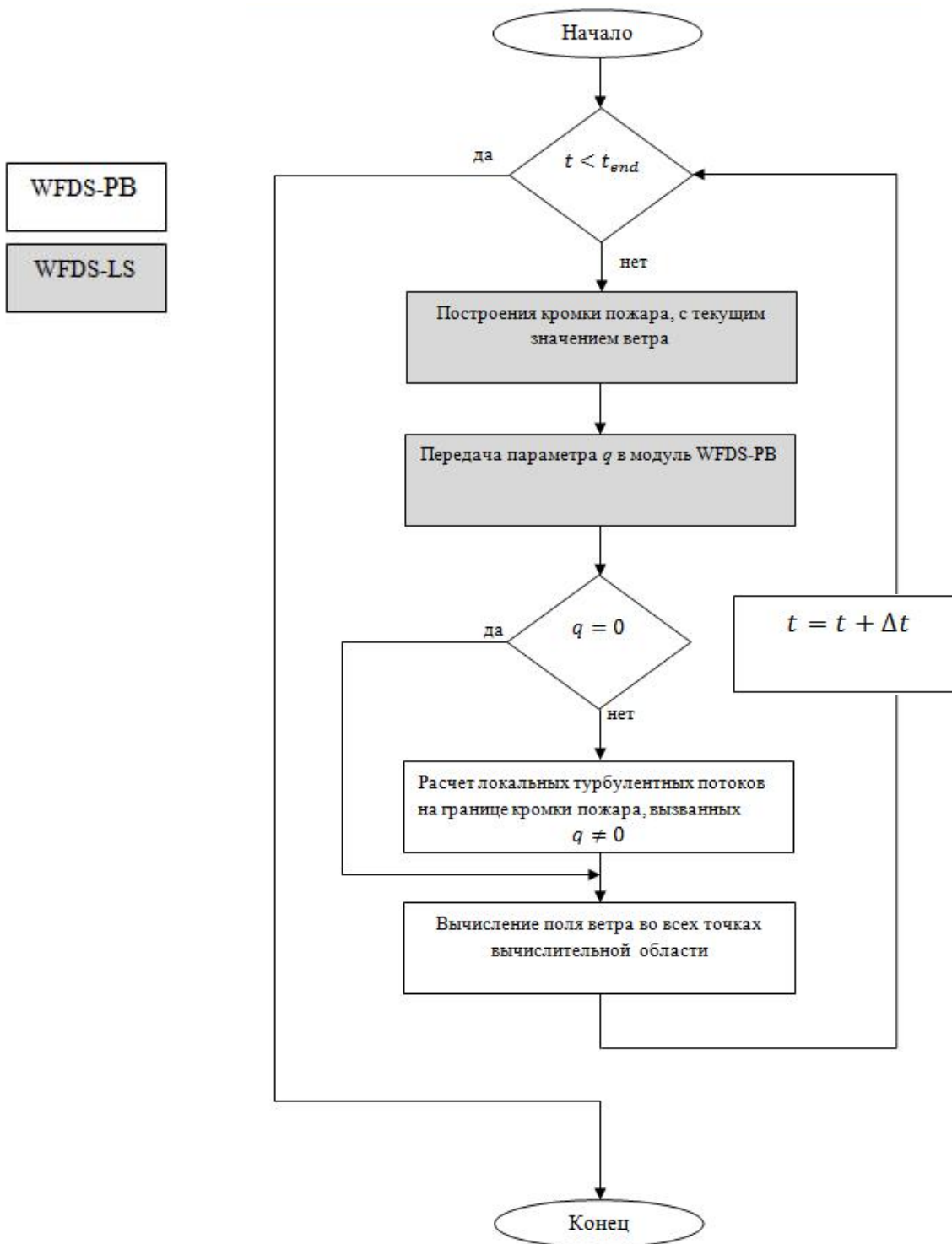
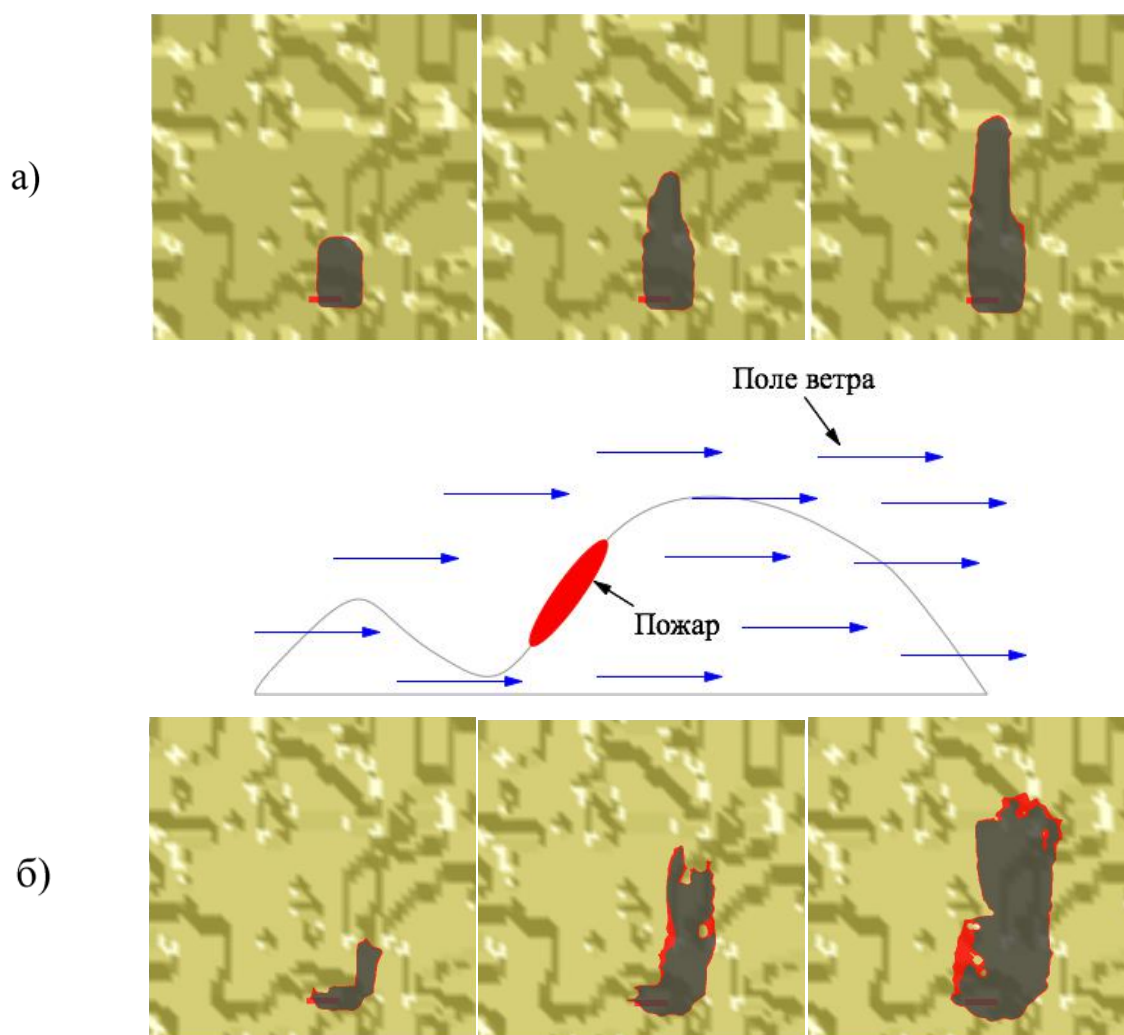


Рисунок 3.6 - Блок-схема работы алгоритма

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 точке уже не будет иметь одну и ту же скорость и направление, а будет меняться в зависимости от местности, тем самым изменяя форму кромки пожара.

Как упоминалось ранее, в WFDS-LS применяется модель МакАртура, как наиболее простая и быстрая. Эта модель не учитывает влияние профиля скорости ветра т.е. ветер представляется в виде однородного потока. На Рисунке 3.7 показаны контуры кромки пожара, полученные в обычной модели WFDS-LS и гибридной модели WFDS-LS для $q=0$ и $q=700$ кВт/м².



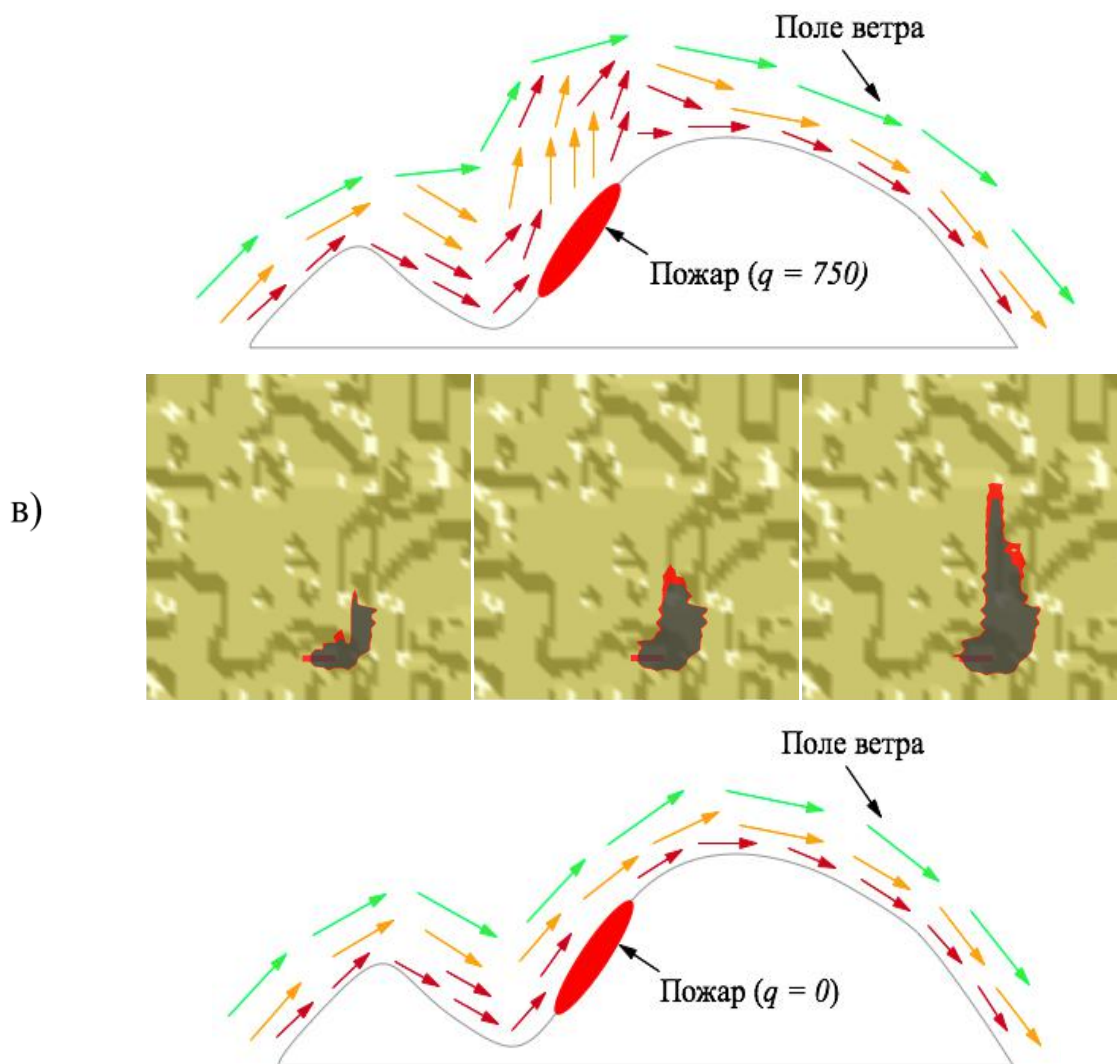


Рисунок 3.7 - Результаты моделирования пожара с помощью гибридной модели: а) – исходная система WFDS-LS, б) – гибридная модель при $q = 700 \text{ кВт/м}^2$, в) – гибридная модель при $q = 0$.

Данные получены для моментов времени 100, 200, 300 секунд соответственно, общее время пожара - 500 секунд.

Значение теплового потока $q = 700 \text{ кВт/м}^2$ для кромки пожар было получено при проведении экспериментов в WFDS-PB на *Themeda australis*.

Как можно видеть из Рисунка 3.7 (б)-(в), контур пожара в гибридной модели имеет более хаотичную форму, и больше соответствует контуру пожара, полученному в WFDS-PB. Вычисления проводились на том же примере, что и в

предыдущем пункте, размер узла вычислительной сетки составлял $20 \times 20 \times 5$ метров. Время вычисления на одном узле суперкомпьютера для каждого из подходов приведено в Таблице 3:3.

Таблица 3.3 - Сравнение различных подсистем моделирования WFDS

	WFDS-LS	Гибридная WFDS-LS		WFDS-PB
		$q = 0$	$q = 700 \text{ кВт/м}^2$	
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. Однако, при меньшем размере узла сетки, например $2 \times 2 \times 2$ метра, время вычислений существенно увеличивается. Например, если при размере ячейки $20 \times 20 \times 5$ метров время расчета на одном узле суперкомпьютера составляло 97 секунд, то при уменьшении ячейки до $2 \times 2 \times 2$ метров время расчета увеличивается до 30 минут. На сегодняшний момент поддержки библиотеки Open MPI не включена в WFDS-LS, однако работа в этом направлении уже ведется.

Подход к созданию в 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.

3.3 Выводы по главе 3

1. Результаты исследования, проведенные в разделе 3.1, наглядно показывают работу аппроксимационной методики расчета параметров природного пожара на основе проведения ряда компьютерных экспериментов в системе WFDS-PB.

2. Для использования WFDS-LS в качестве оперативной системы управления пожарными рисками, необходимо создать аналогичные модели для основных типов растительного горючего для территории Российской Федерации, которые могут быть получены предложенным в разделе 3.1. способом.

3. Разработанный прототип гибридной модели WFDS-LS при низкой вычислительной сложности показал высокую точность прогнозирования горячей кромки пожара по отношению к WFDS-PB. Данный подход является перспективным и нуждается в дальнейшем изучении и доработке.

4 ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ПОЖАРОУПРАВЛЕНИИ

При создании информационных систем для прогнозирования и оценки пожарных рисков в лесу требуется создание специализированных баз данных, содержащих характеристики растительных горючих материалов (РГМ). На важность создания практической отечественной системы пирологических характеристик леса указывалось в работах ряда авторов [3, 39, 60] и других. Ими предложен ряд классификаций РГМ, которые широко используются в научных и прикладных целях.

4.1 Понятие модели горючего

В США и Канаде принят термин «модель горючего - fuel model», по своему содержанию соответствующий понятию «комплекс горючих материалов», принятому в отечественной литературе и разработаны модели горючих материалов в виде национальных стандартов.

Модель горючего – это стилизованный набор характеристик горючего покрова, используемых в качестве входных данных для различных целей моделирования природных пожаров. Математическая модель лесного пожара, например модель Р. Ротермела, использует множество переменных, получаемых эмпирическим путем. Эти данные выступают в качестве входных параметров для уравнений модели, однако очень часто довольно трудно измерить все необходимые входные данные для модели в реальных условиях. Модель горючего как раз и определяет этот набор входных параметров для определенного набора количественных характеристик горючего, который может быть визуально идентифицирован в реальных условиях. В настоящее время существует около 60 таких моделей.

В нашей стране разработка моделей РГМ в широких масштабах не выполнялась, однако, как отмечалось многими авторами [3,36], состав компонентов, входящих в слой растительных горючих материалов, не произволен, а полностью определяется структурой лесных биогеоценозов. Это позволяет привязывать описание растительных горючих материалов к таксационным описаниям лесов, которые составлены для всего лесного фонда страны и продолжают актуализироваться.

Поэтому представляется актуальной задача по объединению данных подходов для создания баз данных о лесном горючем, необходимых для моделирования природных пожаров и прогнозирования их параметров.

В настоящей главе предлагается один из возможных методов получения таких данных, который заключается в том, что компоненты лесного горючего, определяемые совокупностью таксационных параметров лесного участка, сопоставляются с известными моделями физических свойств этих компонентов, что дает возможность получить необходимые данные для моделирования процессов горения при природных пожарах.

Рассмотрим описание свойств лесного горючего, принятое в модели [24, 148]. В общем виде лес как объект горения рассматривается в виде неоднородного структурного слоя растительных горючих материалов на поверхности Земли, представляющего собой смесь частиц горючего из двух качественных групп, причем в первой группе (мертвая растительность) может содержаться $n_1 \geq 1$ размерных классов, а во второй группе (живая растительность) всегда один размерный класс: $n_2 = 1$. Эта смесь расположена на поверхности почвы в виде одного или нескольких гомогенных пористых слоев. Как показывают исследования [112], на процесс горения оказывает влияние характер расположения частиц в слое: упорядоченный или случайный. В дальнейшем предполагается, что расположение частиц в каждом слое случайное (статистически однородное), при котором интенсивность горения обычно выше.

Каждый размерный класс горючего в элементарном объеме характеризуется следующими средними физическими показателями (далее всюду i - номер группы, $i = 1, 2$; j - номер размерного класса, $j = 1, \dots, n_i$):

ω_{vij} - объемный запас сухого горючего материала, кг/м³;

δ_{ij} - удельная поверхность материала (отношение площади поверхности частицы к его объему), 1/м;

s_{Tij} - доля минеральных веществ в горючем (отношение веса минеральных веществ к весу сухого горючего), кг/кг;

h_{ij} - теплотворная способность сухого горючего, Дж/кг;

M_{ij} - влагосодержание (отношение веса влаги к весу сухого горючего), кг/кг;

M_{xi} - критическое влагосодержание (влагосодержание погасания) - только для первой качественной группы, кг/кг;

ρ_{ij} - плотность материала частиц горючего, кг/м³;

$C_{p ij}$ - теплоемкость материала, Дж/кг град;

λ_{ij} - коэффициент теплопроводности материала, Вт/м град.

Общими характеристиками слоя горючих материалов являются:

T - температура материала, град С;

δ - глубина слоя, м;

α - угол наклона местности к горизонту.

Кроме того, могут быть вычислены следующие производные показатели.

Коэффициент заполнения слоя - доля объема, занимаемая горючим материалом в общем объеме слоя:

$$\beta = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^{n_i} \omega_{vij} / \rho_{ij}. \quad (4.1)$$

Величина $\pi_\beta = 1 - \beta$ называется пористостью слоя и для статистически однородного изотропного слоя совпадает по величине с другим важным

показателем - просветностью, которая для каждого сечения слоя представляет собой отношение площади пор к общей площади сечения π_β .

Плотность слоя:

$$\rho = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^{n_i} \omega_{vij}, \text{ кг/м}^3. \quad (4.2)$$

Показатели, характеризующие площади реагирующих поверхностей:

$$A_{ij} = \frac{\delta_{ij} \omega_{0ij}}{\rho_{ij}}, \quad A_i = \sum_{j=1}^{n_i} A_{ij}, \quad A_T = \sum_{i=1}^2 A_i, \quad (4.3)$$

- площади поверхности горючего, приходящиеся на 1 кв. метр лесной территории, для всех классов обеих качественных групп.

Отношения:

$$f_{ij} = A_{ij} / A_i, \quad f_i = A_i / A_T \quad (4.4)$$

характеризуют долю поверхности различных компонентов горючего - соответственно каждого класса в своей качественной группе и каждой группы в общей поверхности.

Как следует из общей теории тепло - и массопереноса, определяющим фактором многих гетерогенных процессов, влияющих на распространение пламени (выделение и поглощение энергии, влагообмен, пиролиз), является поверхность частиц горючего материала. Таким образом, можно считать, что роль некоторого компонента горючей смеси в общем процессе горения определяется его долей в общей площади поверхности слоя [148]

Исходя из этого положения, безразмерные параметры f_{ij} и f_i можно считать «весами» при вычислении средних для каждой качественной группы и всего слоя показателей. К ним относятся следующие параметры:

$$\delta_i = \sum_{j=1}^{n_i} f_{ij} \delta_{ij}, \quad \delta = \sum_{i=1}^2 f_i \delta_i \quad (4.5)$$

- удельная поверхность соответственно, горючего всех групп и общая;

$$\omega_{0ij} = \frac{\omega_{vij}}{1 + s_{Tij}}, \omega_{0i} = \sum_{j=1}^{n_i} f_{ij} \omega_{0ij} \quad (4.6)$$

- содержание «чистого» горючего (за вычетом минеральных веществ) для всех классов и групп, кг/м³.

Наряду с объемным запасом горючего ω_0 мы будем использовать также запас на единице площади слоя:

$$\omega_{ij} = \frac{\omega_{0ij}}{\delta}, \omega_i = \frac{\omega_{0i}}{\delta}, \text{ кг/м}^2.$$

Теплотворная способность горючего i -и группы

$$h_i = \sum_{j=1}^{n_i} f_{ij} h_{ij}, \text{ Дж/кг}; \quad (4.7)$$

влажностное содержание горючего i -й группы

$$M_i = \sum_{j=1}^{n_i} f_{ij} M_{ij}, \text{ кг/кг}. \quad (4.8)$$

Для слоев горючего, содержащего живую растительность, эквивалентное критическое влагосодержание $M_{\text{эск}}$ может быть вычислено по эмпирической формуле, предложенной в [111]:

$$M_{\text{эск}} = 2.9 \frac{1-a}{a} \left(1 - \frac{M}{M_x} \right) - 0.226 \quad (4.9)$$

Здесь a - отношение запаса живой растительности к запасу отмершей растительности с малым характерным размером ($d \leq 6$ мм); M - влагосодержание отмершей растительности входящей в смесь. Эта формула справедлива при $0,05 \leq a \leq 0,6$.

Поскольку мы рассматриваем в общем случае неоднородный в пространстве и времени слой горючего, то все перечисленные показатели являются функциями координат x, y, z и времен t .

В Приложении 2 приведены значения ряда теплофизических параметров некоторых природных горючих материалов и их комплексов, составленные на основе литературных данных.

4.2 Использование таксационных описаний леса для оценки параметров РГМ

В данном разделе рассматривается метод получения теплофизических параметров для растительного горючего исходя из таксационных описаний леса, для дальнейшего их применения в системе WFDS.

В настоящее время существуют четыре группы лесохозяйственных ГИС-ориентированных систем:

- лесоустроительные (совмещенные базы картографических и таксационных данных),
- лесохозяйственные (для планирования лесохозяйственных работ и учета текущих изменений в лесном фонде),
- управленческие (для получения аналитических карт, принятия управленческих решений),
- оперативные (для быстрого анализа и оценки экстремальных ситуаций для служб МЧС, авиалесоохраны, местных администраций – система ИСДМ - Рослесхоз).

Исторически материалы лесоустройства (таксационные описания лесов), создавались для хозяйственных нужд – удовлетворения запросов лесоводства и лесопользования. Таксационные описания содержат характеристики таксационных выделов – участков леса с однородными характеристиками – всего около 140 реквизитов. Информация о типах и запасах растительных горючих материалов в таксационных описаниях в явном виде отсутствуют. Таким образом, в настоящее время задача создания моделей РГМ в полном объеме не решена, однако многочисленными исследованиями установлен состав комплексов горючих

материалов, характерных для наиболее пожароопасных типов леса и их основные теплофизические параметры. Так, согласно работе [12], часть необходимых для пирологического описания характеристик леса рекомендуется брать прямо из таксационных описаний: тип леса, экспозиция и крутизна склона, возраст, высота и полнота древесных ярусов; захламленность, травы и кустарнички, подрост и подлесок, валежник и сухостой, хвоя и листва в пологе древостоя.

Мы воспользуемся системной разработкой данной проблемы, которая выполнена в диссертационной работе Л.П. Золотухиной [27], и зарегистрирована в Государственном фонде алгоритмов и программ [42]. Авторами предложено использовать 11 показателей из таксационного описания каждого лесного участка, обозначенных кодами (PK1,...,PK11) (Таблица 4.1), позволяющие оценивать пирологические свойства участка, осуществлять анализ и математическое моделирование, вырабатывать практические рекомендации. Необходимые для пирологического описания характеристики берутся из таксационного описания выдела (Таблица 4.2).

Таблица 4.1 - Морфологическая карта лесопирологической системы

Элемент системы	Код	Значение элемента	Код значения
Категория земель	PK1	Насаждения, Лесные культуры, Гари Редины	1101 1108-1207 1503 1401
Группа возраста	PK2	Культуры не сомкнувшиеся Культуры сомкнувшиеся Молодняки Средневозрастные, приспевающие, спелые и перестойные Не задано	M1 M2 M C -1
Напочвенный покров	PK3	Лишайниковые Мёртвопокровные Разнотравные Крупнотравные Зелёномошные Сфагновые Травяно-болотные	ЛШ МП РТ КТ ЗМ ДМСФ ТБЛ

		Не задано	-1
Экспозиция	PK4	Теневая Равнинная и когда не задана Световая	Т Р С
Преобладающая порода	PK5	Кедр Сосна Лиственница Пихта, ель Берёза, осина Нет насаждений	С Л К П Б -1
Сопутствующая порода	PK6	Нет, когда чистые насаждения Темнохвойные Светлохвойные Лиственные, включая лиственницу Нет насаждений	Н Т С Л -1
Группа полноты	PK7	0-0,2 или не задано 0,3-0,6 низкая полнота 0,7-1,0 высокая полнота	0 1 2
Характеристика подлеска	PK8	Нет или не задано Есть	Н Е
Характеристика подроста	PK9	Нет или не задано Хвойный непожароопасный Хвойный пожароопасный Лиственный	Н Х П Л
Валежник	PK10	Нет (до 20 м ³ /га), или не задан Есть (20 и более м ³ /га)	Н Е
Сухостой	PK11	Нет (до 20 м ³ /га), или не задан Есть (20 и более м ³ /га)	Н Е

После трансформации лесотаксационных данных в лесопирологические для каждого выдела определяется значение 11 базовых элементов. Эти данные представлены в электронной таблице, которая представляет лесопирологическое описание конкретного лесохозяйственного объекта в виде цифровых и буквенных кодов.

В Таблице 4.2 приводятся результаты трансформации лесотаксационных данных 13 выделов в лесопирологические данные на примере Мининского лесничества Красноярского края (всего в лесничестве имеется 3098 выделов).

Таблица 4.2 - Трансформация лесотаксационных данных

GIR	KV	SKNR	ID	PK1	PK2	PK3	PK4	PK5	PK6	PK7	PK8	PK9	PK10	PK11
4	1	11	400111	1101	С	РТ	Р	Б	Н	2	Н	Л	Н	Н
4	1	12	400112	1107	С	РТ	Р	Б	Н	1	Н	Л	Н	Н
4	1	13	400113	1107	С	РТ	Р	Б	Н	1	Н	Л	Н	Н
4	1	14	400114	1108	М2	РТ	Р	Л	Н	2	Н	Н	Н	Н
4	1	15	400115	1101	С	РТ	Р	Б	Н	2	Н	Л	Н	Н
4	1	16	400116	2102	-1	РТ	Р	-1	-1	0	Н	Н	Н	Н
4	1	17	400117	1101	С	РТ	Р	Б	Н	2	Н	Л	Н	Н
4	1	18	400118	1101	С	РТ	Р	Б	Н	1	Н	Л	Н	Н
4	1	19	400119	1108	М2	РТ	Р	Л	Н	2	Н	Н	Н	Н
4	1	20	400120	1101	С	РТ	Р	Б	Н	2	Н	Л	Н	Н
4	1	21	400121	1101	С	РТ	Р	Б	Н	2	Н	Л	Н	Н
4	1	22	400122	1101	С	РТ	Р	Б	Н	1	Н	П	Н	Н
4	1	23	400123	1101	С	РТ	Р	Б	С	1	Н	Л	Н	Н
4	1	24	400124	1101	С	РТ	Р	Б	С	1	Н	Л	Н	Н

Для выдела с идентификационным номером ID вектор состояния определяется в 11-мерном пространстве программными кодами PK1,PK2,...,PK11. Идентификационный номер ID является комбинированным и вычисляется по формуле:

$$ID = GIR*100000 + KV*100 + SKNR, \quad (4.10)$$

где GIR- номер лесничества, KV -номер квартала, SKNR - номер выдела.

Коды значения элементов PK1,...,PK11 определяются по морфологической карте (Таблица 4.1).

Рассмотрим пример описания лесного участка:

4	1	15	400115	1101	С	РТ	Р	Б	Н	2	Н	Л	Н	Н
---	---	----	--------	------	---	----	---	---	---	---	---	---	---	---

Расшифровка данного описания:

4- номер лесничества, 1 – номер квартала, 15 – номер выдела, 400115 – ID данного участка; 1101 – лесные насаждения; С – средневозрастные; РТ – разнотравные; Р – местность равнина; Б –преобладающая порода береза; Н – сопутствующих пород нет, 2 – полнота древостоя высокая, Н – подлеска – нет, Л – подрост лиственные породы, Н – валежника нет, Н – сухостоя нет.

По таблице Приложения 2 для типа РГМ – трава и нижний ярус леса получаем следующий набор параметров (Таблица 4.3).

Таблица 4.3 - Теплофизические характеристики растительного горючего

Код	Наименование горючего материала (комплекса горючих материалов)	Категория ЛГМ i	Номер размерной группы j	Теплофизические параметры						Глубина слоя δ , м
				ω_{ij} кг/м ²	δ_{ij} м ⁻¹	ρ_{ij} кг/м ³	h_{ij} КДж/кг	s_{Tij}	s_{eij}	
12	Трава и нижний ярус леса	1	1	0.45	9800	510	18500	0.05	0.01	0.3
			2	0.22	360	510	18500	0.05	0.01	
			3	0.11	100	510	18500	0.05	0.01	
		2	1	0.11	4900	510	18400	0.05	0.01	

По приведенным выше формулам (4.1-4.7) можно вычислить физические характеристики комплекса растительных горючих материалов.

Коэффициент заполнения слоя РГМ $\beta = 0,017м$;

Плотность слоя $\rho = 0,89кг/м^3$;

Площади поверхности горючего, приходящиеся на 1 кв. метр лесной территории по категориям и размерным группам:

$$A_{11} = 8,647, A_{12} = 0,155, A_{13} = 0,021, A_1 = 8,824;$$

$$A_{21} = A_2 = 0,086, A_T = 8,910;$$

Доля поверхности различных компонентов горючего по категориям и размерным группам («веса» компонентов):

$$f_{11} = 0,890, f_{12} = 0,017, f_{13} = 0,003, f_1 = 0,99; f_2 = 0,01;$$

Значения удельных поверхностей всех категорий и размерных групп горючего ($\text{м}^2/\text{м}^3$) учетом их «весов» f_{ij} :

$$\delta_1 = 9610,4, \delta_2 = 49, \delta = 9514,8;$$

Запас горючего на 1 кв.м. по категориям и группам :

$$\omega_{011} = 0,428, \omega_{012} = 0,697, \omega_{013} = 0,37, \omega_1 = 2,494, \omega_2 = 0,347;$$

Теплотворная способность горючего на 1 кв.м. по категориям:

$$h_1 = 1850 \text{дж/кг}, h_2 = 18,50 \text{дж/кг}.$$

Полученные характеристики растительных горючих материалов могут использоваться в качестве входных данных при моделировании пожара с помощью системы WFDS-PB. Вычисление влагосодержания горючих материалов с учетом погодных условий производится отдельно.

Горючее в WFDS-PB представлено в виде тонкого слоя, имеющего следующие характеристики:

ω_{ij} , $\text{кг}/\text{м}^2$ - запас горючего (VEGETATION_LOAD);

ρ_{ij} , $\text{кг}/\text{м}^3$ - плотность горючего (VEGETATION_DENSITY);

δ_{ij} , м^{-1} - поверхностная плотность (VEGETATION_SVRATIO);

δ , м - глубина слоя (VEGETATION_HEIGHT);

h_{ij} , $\text{кДж}/\text{кг}$ - теплотворная способность горючего (HEAT_OF_COMBUSTION).

4.3 Использование космических снимков рельефа для формирования входных файлов для WFDS

Система моделирования природных пожаров оперативного уровня подразумевает наличие некоторой карты, на которой отображается контур горящей

кромки пожара. Если рассмотреть такую систему, как FARSITE [106], то здесь используются ГИС-данные, изображенные на Рисунке 4.1.

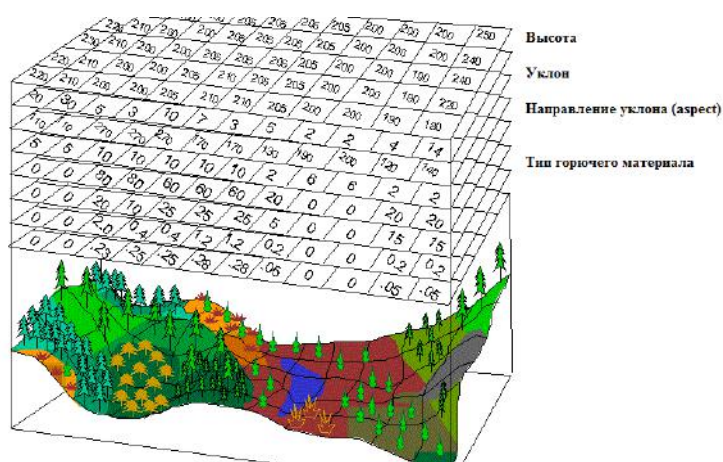


Рисунок 4.1 - Используемые данные в FARSITE

Слой горючих материалов - это растровые карты растительных горючих материалов, где каждому пикселю соответствует определенный тип горючего, согласно модели Р. Ротермела. Эти данные, включая электронные карты ландшафта высокого разрешения, получены для всей лесной территории США в рамках проекта LANDFIRE [74], и могут быть скачены с официального веб-сайта [106].

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 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 4.2).

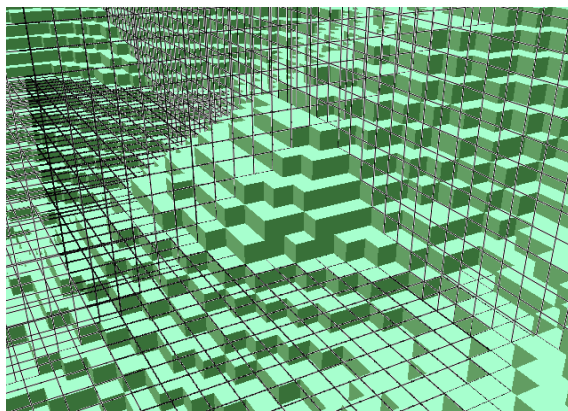


Рисунок 4.2 - Формирование модели рельефа с помощью заполнения узлов вычислительной сетки

Параметры каждого препятствия задаются в следующем виде:

`&OBST XB= XMIN, XMAX, YMIN, YMAX, ZMIN, ZMAX`

Таким образом, формирование модели рельефа полностью ложится на пользователя, и если простые задачи, как например, эксперименты с наклонными поверхностями, описанные в Главе 3, еще возможно задать вручную, то воссоздание какого-либо существующего ландшафта является практически неразрешимой задачей. В результате, возникает задача создания компьютерного алгоритма, который мог бы, используя цифровые карты рельефа, создавать на их основе входные файлы для WFDS.

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).

Среди данных DEM есть как бесплатные, находящиеся в свободном доступе в сети Интернет, так и распространяемые на коммерческой основе. Очевидно,

что разрешение свободно распространяемых снимков уступает тем, которые могут быть получены на коммерческой основе, хотя для территорий Северной Америки и Европы бесплатные снимки имеют высокое разрешение, чего нельзя сказать о территориях нашей страны. В данной работе были использованы свободно распространяемые спутниковые данные SRTM и ASTER GDEM [127].

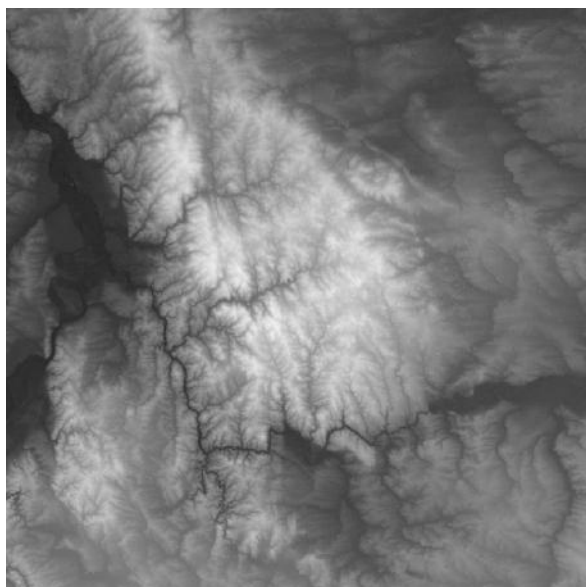


Рисунок 4.3 - Пример файла спутниковых данных рельефа

Полученные данные можно конвертировать в текстовый формат, например ASCII GRID (ESRI):

```

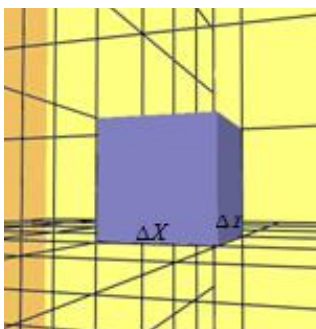
NCOLS 597
NROWS 397
XLLCORNER 699200
YLLCORNER 4346900
CELLSIZE 25
NODATA VALUE -999
281.1 281.052 281.597 279.061 276.837 274.723 273.962 274.349 2
279.791 279.654 278.096 275.386 273.544 273.435 272.016 271.454
278.752 278.717 277.352 275.046 271.416 270.071 269.303 268.763
279.292 279.315 277.816 275.887 271.113 268.864 267.456 267.324
281.491 280.852 278.133 276.529 274.379 270.283 267.954 266.963
283.265 282.003 278.1 277.236 275.744 273.419 272.1 268.392 269
283.562 286.03 281.505 278.608 275.981 274.75 273.082 271.235 2
280.745 280.063 282.1 280.865 278.04 276.26 274.268 272.208 269
277.487 279.135 279.997 276.75 278.446 277.848 275.537 273.439

```

Рисунок 4.4 - Текстовое представление данных DEM

В результате, чтобы воссоздать рельеф в WFDS на основе данных DEM, необходимо:

1. Прочитать текстовый файл , в данном случае файл формата ASCII GRID в массив.
2. Задать размеры вычислительной области WFDS:
3. На основании значения CELLSIZE задать шаг движения по сетке WFDS в координатах X, Y.



4. Двигаясь по массиву, сопоставлять координаты в ASCII GRID с координатами вычислительного домена, задавая значения для каждого элемента вычислительной сетки равное соответствующему значению высоты в ASCII GRID.

Наглядно данный алгоритм можно изобразить следующим образом (Рисунок 4.5):

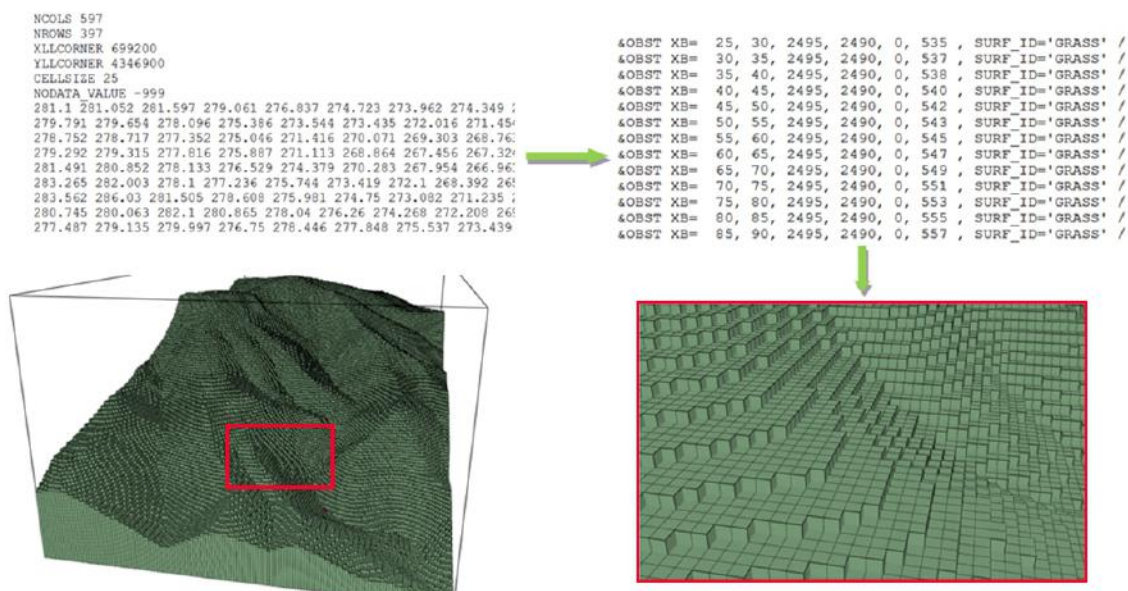


Рисунок 4.5 - Преобразование ASCII DEM в входной файл WFDS

В результате работы данного алгоритма можно легко получать любые участки DEM в качестве рельефа для WFDS. Очевидно, что чем меньше параметр

CELLSIZE, определяющий размер ячейки, тем выше будет точность данных DEM. Изображенные на Рисунке 4.6 примеры работы алгоритма были построены на основе данных ASTER высокого разрешения территории США, где параметр CELLSIZE составлял 4x4 метра. Свободно распространяемые спутниковые данные для территории Красноярского края имеют значение параметра CELLSIZE равное 30 метров, что существенно снижает детализацию, а, следовательно, увеличивает погрешность моделирования. На Рисунке 4.7 приводится пример данных для территории Красноярского края, с размером растровой ячейки в 30 метров.

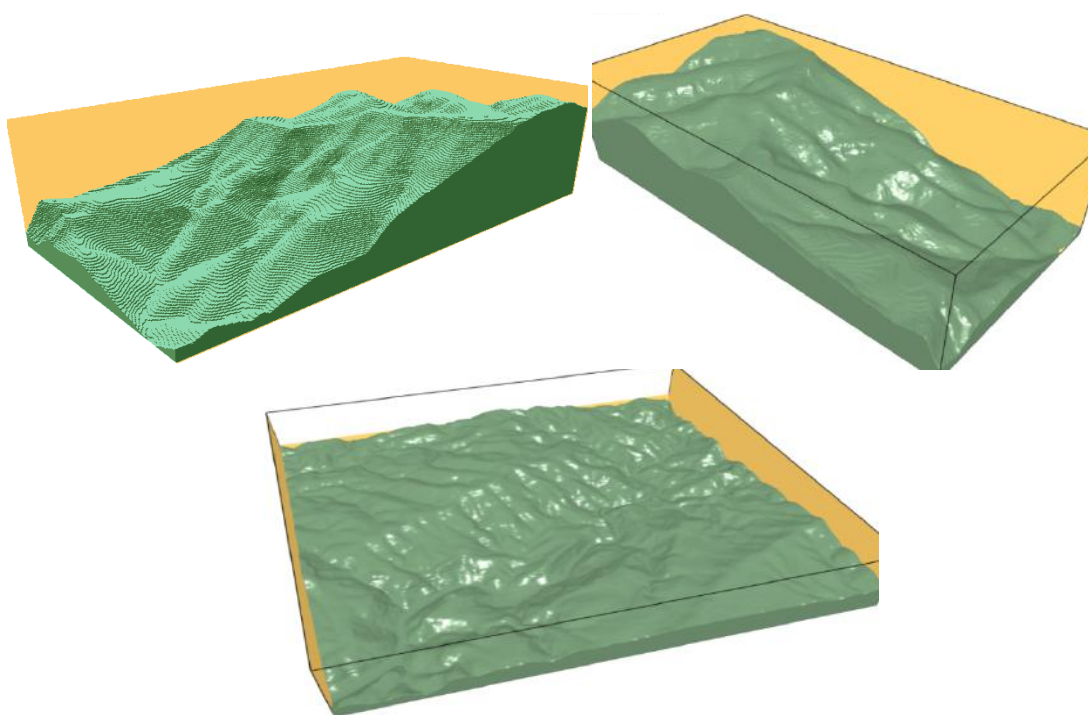


Рисунок 4.6 - Примеры использования алгоритма по созданию рельефа в WFDS

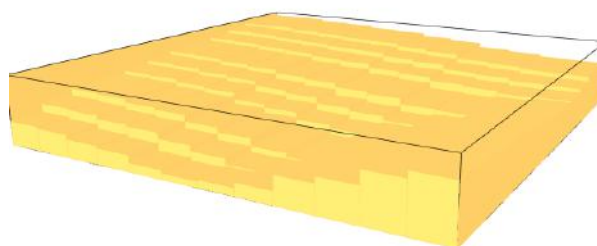


Рисунок 4.7 - Пример конвертации DEM низкого разрешения

4.4 Модель тонкого слоя

В модели тонкого слоя или граничной модели (boundary fuel model) лесной покров рассматривался как однородный слой на поверхности Земли с усредненными характеристиками горючих материалов. Эти характеристики также оцениваются либо по таксационным описаниям, в частности, по преобладающей породе и запасу древесины, либо по картам лесов.

Для описания лесного горючего автоматически подбирается сетка (отдельная от газовой фазы), вдоль нижней границы расчетной области. Пользователь должен указать физические свойства горючего и его размеры в нижней части расчетной области. Такой способ представления горючего является менее требовательным к вычислительным мощностям, что позволяет эффективнее использовать систему WFDS для оперативного моделирования природных пожаров (Рисунок 4.8).

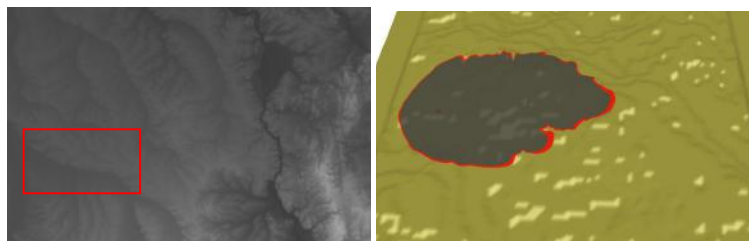


Рисунок 4.8 - Использование модели тонкого слоя горючего при моделировании природного пожара

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 растительных горючих материалов, а также объекты инфраструктуры, предварительно решив, какую из описанных выше моделей он будет использовать.

Учитывая сказанное ранее о привязке моделей пожара к спутниковым снимкам, граничная модель растительных горючих материалов, в которой лесной

массив представляется в виде однородного слоя, является в настоящее время одним из реальных способов задания свойств растительного горючего в отечественных системах прогнозирования природных пожаров, в особенности при прогнозировании крупных пожаров.

4.5 Выводы по главе 4

1. Предложена методика оценки параметров растительных горючих материалов по данным таксационного описания лесных участков, что позволило привязать систему WFDS к отечественной системе лесоустройства.

2. Создан алгоритм получения входных данных об инфраструктуре местности для системы WFDS на основе обработки космических снимков.

3. Для моделирования крупных природных пожаров предложена модель растительного горючего как тонкого слоя на поверхности Земли, характеристики которого оцениваются на основе космических снимков лесных территорий.

5 ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО ПОЖАРОУПРАВЛЕНИЮ

Данная глава посвящена основным функциональным задачам поддержки принятия решений в пожароуправлении. Эти задачи возникают в первую очередь в связи с необходимостью эффективного маневрирования силами и средствами при управлении лесопожарной ситуацией [24].

Часть рассматриваемых задач относится к проектированию противопожарного устройства лесов, другие связаны с оценкой динамики распространения пожара и взаимодействием человека с растительным пожаром. Эти задачи весьма актуальны и ранее рассматривались разными авторами [11, 24, 32, 59, 95]. Однако они, как правило, исходили из весьма упрощенных представлений о теплофизических и динамических параметрах растительных пожаров. В настоящей работе впервые решение этих задач осуществляется в 3D пространстве на основе использования физически обоснованных моделей и подробных данных о рельефе местности.

5.1 Влияние теплового потока на воспламенение растительных горючих материалов

Исследование влияния теплового потока, генерируемого движущимся фронтом пожара, на воспламенение растительных горючих материалов, отделенных от пожара негорючим разрывом является очень важной задачей, 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. Поскольку при решении указанных задач не требуется высокая скорость вычислений, задачи могут решаться с использованием аналитической модели WFDS-PB.

Сущность задачи заключается в следующем. 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. В случае превышения этой величины объект считается пожароопасным. Энергии, необходимой для зажигания объекта, может оказаться достаточно, даже если фронт пожара остановится на некотором расстоянии объекта. Результатом решения задачи является определение безопасного расстояния между объектом и границей растительного массива при различных параметрах растительных материалов и метеорологических факторах [65].

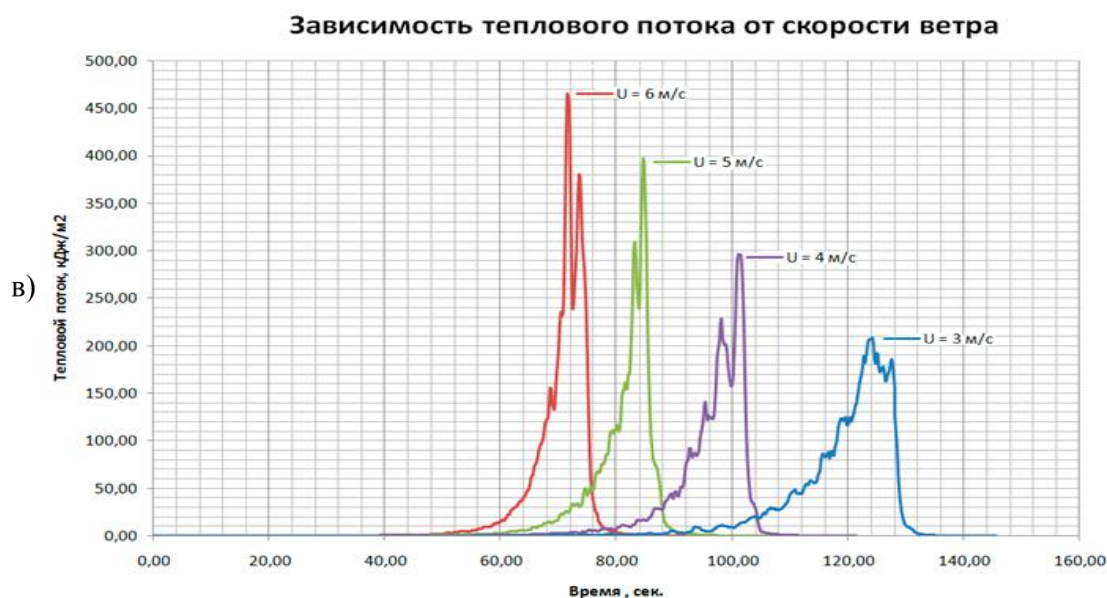
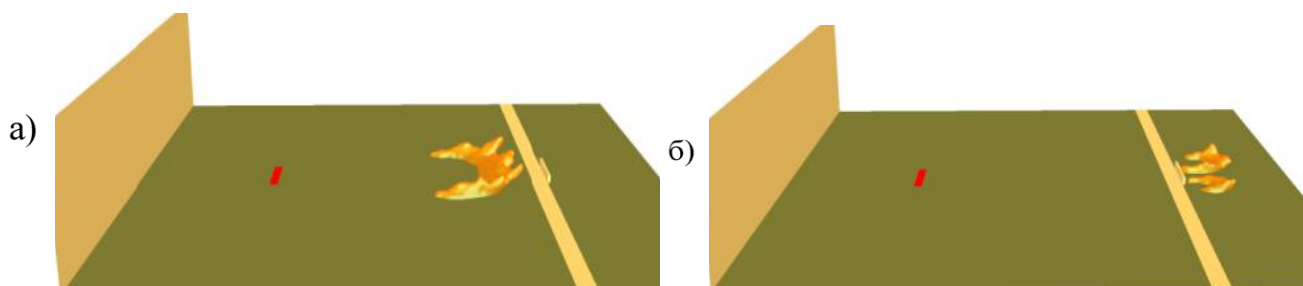


Рисунок 5.1 - Вычислительный эксперимент по преодолению пожаром противопожарного разрыва: а) – фронт пожара приближается к разрыву, б)- объект по другую сторону разрыва воспламенился, в) - вычисленные распределения теплового потока в зависимости от скорости ветра

5.2 Оценка опасности природного пожара для населенных пунктов и иных объектов инфраструктуры

Обладая данными высокого разрешения о рельефе местности, можно применять аналитическую модель WFDS-PB для моделирования пожаров вблизи объектов инфраструктуры. Это дает возможность установить, насколько опасно будет влияния лесного пожара на тот или иной населенный пункт, военную часть и т.п. На Рисунке 5.2 приводится пример такого моделирования.

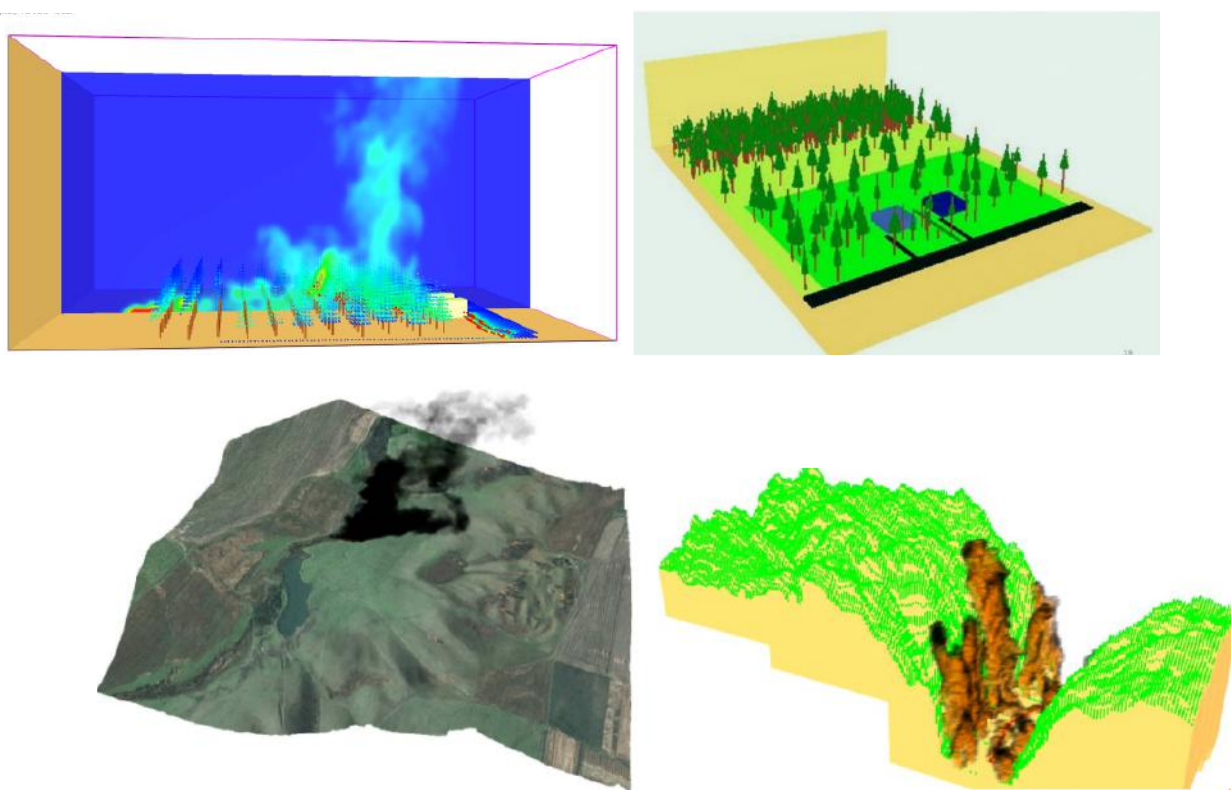


Рисунок 5.2 - Моделирование лесного пожара вблизи объектов инфраструктуры, а так же пожара в лесном каньоне

С помощью измерения теплового потока в некоторых контрольных точках, можно установить насколько пагубным будет влияние природного пожара на объект инфраструктуры. Имея в наличии такой прогноз можно гораздо точнее координировать работу пожарных команд, а также оценивать ущерб, нанесенный лесным насаждениям

5.3 Динамические задачи принятия решений

5.3.1 Прогнозирование распространения лесного пожара и оценка опасности для объектов инфраструктуры

В качестве примера взят участок лесной территории Красноярского края размером 1000x1000x100 метров. На Рисунке 5.3 приведен пример построения прогнозных контуров лесного пожара, полученный с помощью программы WFDS-LS.



Рисунок 5.3 - Прогнозирование контуров лесного пожара

На Рисунке 5.4 показан прогноз динамики лесного пожара вблизи пос. Манино, который показывает степень опасности для этого объекта и возможный запас времени для принятия противопожарных мер или для эвакуации. Размер вычислительной области 200x200x100 метров.



Рисунок 5.4 - Прогноз границ пожара вблизи населенного пункта

5.3.2 Математическая модель процесса взаимодействия человека с природным пожаром

Процесс распространения природного пожара представляет собой динамическую область на плоскости $G(t)$, граница которой $\partial G(t)$ удовлетворяет уравнению:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \text{grad}Sv(x, t, p) = 0$$

при начальном условии $S(x, 0) = S_0(x) = 0$

Здесь $v(x, t, p)$ - вектор скорости движения точек границы $\partial G(t)$, определяемым индикатрисой $V(x, t, \alpha)$; угол $\alpha = \arg p$ определяет направление движения.

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. На практике локализация осуществляется путем создания так называемых минерализованных полос или противопожарных барьеров. Ширина таких полос и высота барьеров предполагаются достаточными, чтобы процесс горения через них не перешёл.

Рассмотрим движение команды, которая проводит локализацию процесса распространения, т.е. окружение его непреодолимым препятствием.

Пусть в начальный момент $t = t_0$ команда находится в некоторой точке $C_0 \in D$ (Рисунок 5.4). Из этой точки команда может двигаться в разных направлениях, вообще говоря, с различной скоростью $u(x, t, q)$, где q — вектор, определяющий направление движения, $\arg q \in [0, 2\pi]$. Таким образом, семейство векторов $u(x, t, q)$ представляет собой индикатрису скорости движения.

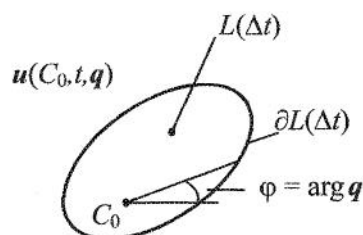


Рисунок 5.5 - Определения понятия локального множества распространения

Через некоторый промежуток времени Δt команда, выбрав определенное направление движения q' , пройдет путь $\Delta \lambda$ и достигнет точки

$$x(t_0 + \Delta t) = C_0 + u(C_0, t_0, q')\Delta t.$$

Геометрическое место концов таких путей при $\arg q \in [0, 2\pi]$ образует границу $\partial L(\Delta t)$, при этом часть области D , лежащая внутри границы, обозначается $L(\Delta t)$ (Рисунок 5.5). Из каждой точки границы команда может двигаться, выбрав новое направление. Нетрудно видеть, что приведенные рассуждения описывают процесс расширения области $L(t)$ и движения границы $\partial L(t)$ на основе модели волнового фронта. Таким образом, можно говорить о процессе локализации $L(C_0, t)$, где C_0 - начальная точка. В отличие от процесса распространения природного пожара $G(G_0, t)$ при процессе локализации $L(C_0, t)$ реализуется только одна траектория движения, когда как в $G(G_0, t)$ реализуются одновременно все траектории. Реализованная траектория процесса $L(C_0, t)$, выходящая из точки C_0 , называется локализационной траекторией и обозначается $\lambda(C_0, t)$.

Процессы $G(G_0, t)$ и $L(C_0, t)$, определены в одной и той же области D и имеют общую шкалу времени. Они развиваются независимо друг от друга 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 индикатрисы скоростей:

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

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

Пример локализации природного пожара одной пожарной командой изображен на Рисунке 5.6.

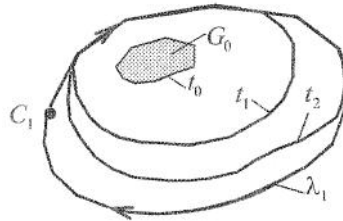


Рисунок 5.6 - Схема локализации с одним центром

Рассмотрим постановку задачи локализации пожара несколькими пожарными командами. Введем понятие схемы локализации.

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 $X(X_0, t)$. 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 .

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

Кортеж Λ называется схемой локализации.

Алгоритм построения путей локализации заключается в следующем. Для каждой команды строится область достижимости и определяются изохроны (линии равного времени достижимости обоими процессами) по отношению к процессу распространения пожара. Затем проводятся кратчайшие линии от точки C_k^0 до точки C_k^F , $k = 1, \dots, n$, направление которых задано знаком ориентации β_k .

На Рисунке 5.7 показано решение задачи локализации пожара в районе пос. Малиновка 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 этом рисунке также виден запас времени до контакта с пожаром и самые опасные для команд точки. Области достижимости для пожарных команд строились средствами WFDS-LS. Скорость перемещения команды изменялась в зависимости от типа растительного горючего, по которому движется команда (например, в лесу скорость движения ниже) и рельефа местности. Размер вычислительной области 600x400x100 метров.

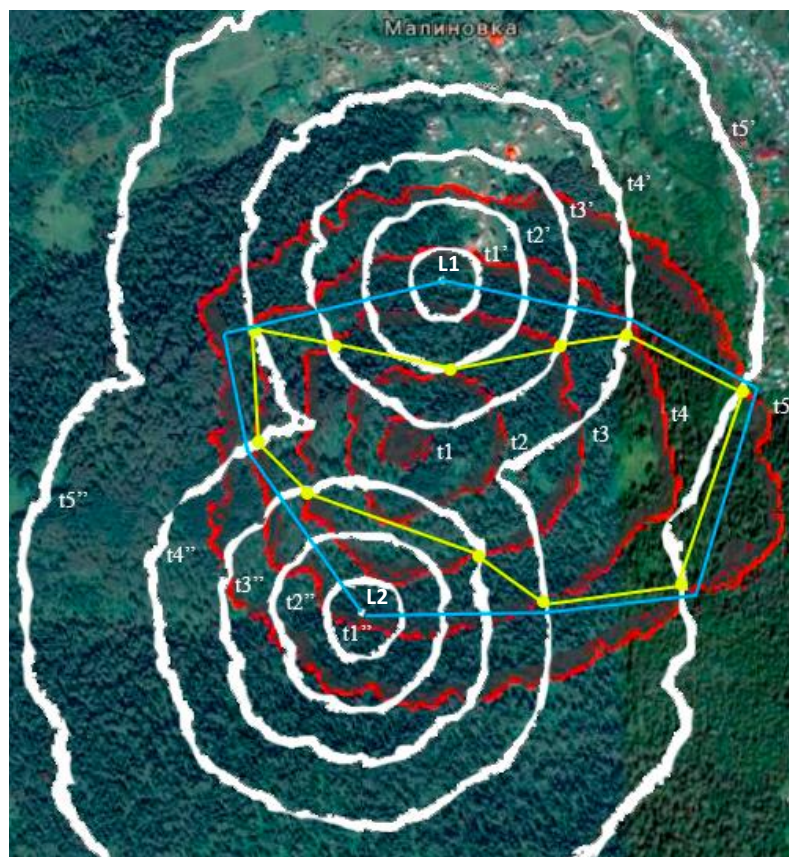


Рисунок 5.7 - Решение задачи локализационного управления

5.3.3 Постановка и алгоритмы решения задач об уклонении от встречи с лесным пожаром

Описание процесса взаимодействия человека и лесного пожара необходимо как при математическом моделировании процессов борьбы с пожаром, так и в задачах, имеющих, противоположную целевую установку - уклонение от встречи с пожаром.

В данном разделе рассматривается задача подобного типа, основанные на использовании математического аппарата процессов распространения - геометрической модели пожара и областей достижимости единиц противопожарных сил,двигающихся по лесной территории. Рассмотренные ниже постановки

напоминают классические задачи теории динамических игр [35], однако методы их решения ближе к механике сплошных сред.

Как и ранее, рассмотрим взаимодействие двух процессов распространения, определенных в области D , которая является моделью (картой) некоторой лесной территории:

- процесса $X(t, \tau_{0X}, X_0)$ моделирующего распространение пожара;
- процесса $Y(t, \tau_{0Y}, Y_0)$ моделирующего область достижимости противопожарных сил.

Каждый из процессов задается полем (картой) скоростей и индикатрис: соответственно $v(x, y)$ и $u(x, y)$, $(x, y) \in D$ и начальными условиями: X_0 - начальная конфигурация пожара в момент времени $t = \tau_{0X}$; Y_0 - начальная область дислокации противопожарных сил в момент времени $t = \tau_{0Y}$. Моменты τ_{0X} и τ_{0Y} назовем стартовыми соответственно для процессов X и Y . Эти процессы развиваются, не взаимодействуя между собой, в отличие от задач локализационного управления. При этом как начальные множества X_0 и Y_0 , так и целевое множество Y_k могут быть многосвязным. Поскольку процессы $X(t)$ и $Y(t)$ определены, то известны в функции Беллмана, дающие времена достижения ими любой точки из $D - T_X(\eta)$ и $T_Y(\eta)$, $\eta \in D$.

Тогда $T_X(\eta) = \tau_{0X}$ при $\eta \in X_0$ и $T_Y(\eta) = \tau_{0Y}$ при $\eta \in Y_0$. Кроме того, для процесса Y задана конечная (целевая) область Y_k .

Задача персонала при эвакуации - попасть из исходной области Y_0 в безопасную область эвакуации Y_F , нигде не встретившись с пожаром, т.е. с процессом $X(X_0, t)$.

Для решения этой задачи в области D строятся линии равного времени достижимости обоими процессами (изохроны процессов $X(X_0, t)$ и $Y(Y_0, t)$). Тогда путь эвакуации персонала выбирается таким образом, чтобы он лежал по одну сторону от изохроны в области, не занятой пожаром, и при этом соединял области Y_0 и Y_F .

Пример решения данной задачи в районе пос. Красный Яр приводится на Рисунке 5.8. На этом рисунке изохрона обозначена белой линией, а путь эвакуации – голубой линией. Из рисунка видно, что наибольшая опасность для персонала приходится на момент t_2 , когда расстояние до пожара минимально. Размер вычислительной области 300x300x100 метров.

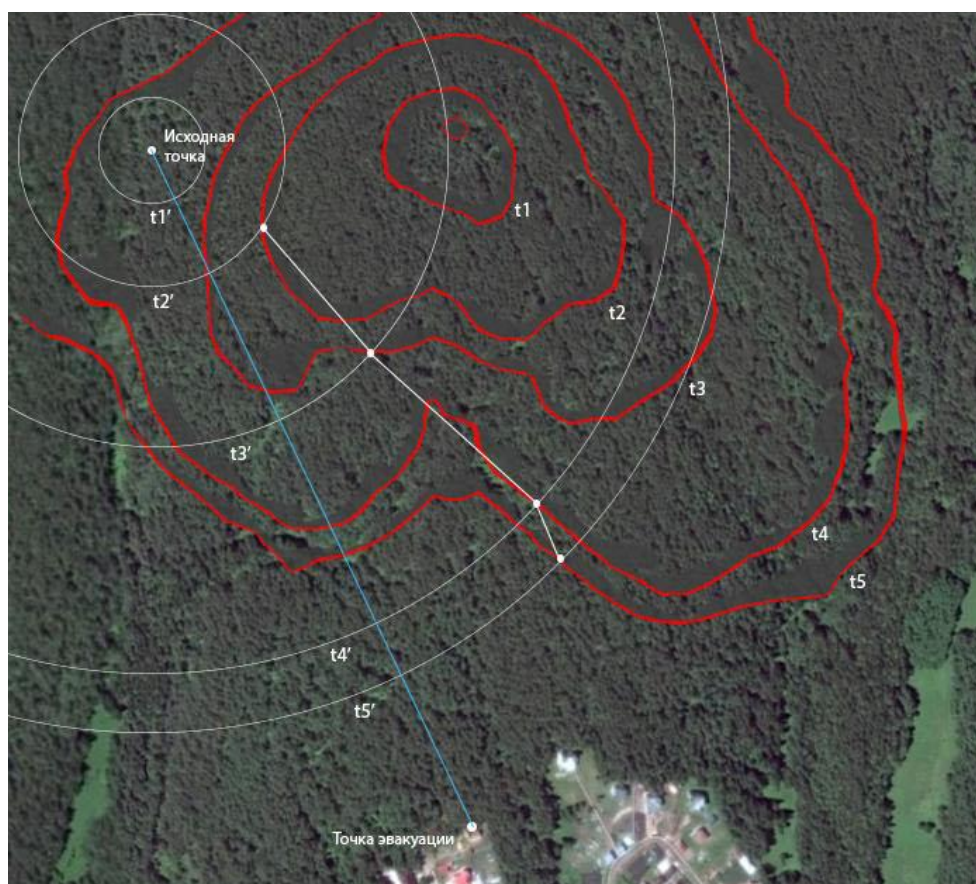


Рисунок 5.8 - Пример решения задачи об эвакуации из зоны пожара.

5.4 Выводы по главе 5

1. Вычисляя значение теплового потока используя WFDS-PB можно с высокой точностью определять ширину противопожарных разрывов, эффективно рассчитывать пожарные риски, и тем самым заранее проводить необходимые противопожарные мероприятия

2. За счет вычисления большого набора параметров горения (наиболее важным из которых является тепловой поток) WFDS-PB может эффективно использоваться для предотвращения возгорания объектов инфраструктуры путем своевременного проведения противопожарных мероприятий, или даже эвакуации людей из населенных пунктов.

3. Применение уточненной (в настоящей работе) системы WFDS-LS позволяет эффективно решать ряд задач пожароуправления:

- расчет запаса времени для принятия противопожарных мер при угрозе объектам инфраструктуры;
- расчет путей безопасной эвакуации людей и техники из зоны действующего природного пожара.
- расчет путей локализации природных пожаров силами пожарных команд.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе получены следующие результаты.

1. Проведен анализ пожароуправления как сложной природно-административной системы. Впервые 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 3D-моделей решен ряд задач по поддержке принятия управленческих решений в пожароуправлении:

- расчет ширины противопожарных разрывов;
- оценка теплового воздействия природного пожара на объекты инфраструктуры;
- расчет запаса времени при приближении пожара к объектам инфраструктуры;
- построение путей локализации пожара противопожарными командами;
- построение путей уклонения от встречи с пожаром.

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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Амосов, Г. А. Некоторые закономерности развития лесных низовых пожаров. / Г. А. Амосов // Возникновение лесных пожаров. – 1964.-С. 152-171.
2. Антонов, А. В. Системный анализ. Учебник для вузов / А. В. Антонов. - М.: Высш. шк., 2004. - 454 с.
3. Арцыбашев, Г. С. Основные задачи лесной пирологии / Г. С. Арцыбашев //Горение и пожары в лесу. – Красноярск, 1984. – С. 5-7
4. Барановский, Н. В. Ландшафтное распараллеливание и прогноз лесной пожарной опасности / Н.В. Барановский // Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ'2007): труды Международной научной конференции (Челябинск, 29 января - 2 февраля 2007 г.). - Челябинск: Изд-во ЮУрГУ.- 2007. - Т.1. - С. 227-236.
5. Барский, А. Б. Параллельные информационные технологии. / А. Б. Барский. - БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. - 504 с.
6. Валендик, Э. Н. Идентификация скоростей распространения лесных пожаров по их инфракрасным снимкам / Э. Н. Валендик, Г. А. Доррер, Н. А. Калнина, А. И. Сухинин, Б. А. Хрептов // Исследование Земли из космоса. - 1982. - №5. - С. 46-53.
7. Воеводин, В. В. Вычислительная математика и структура алгоритмов. / В. В. Воеводин. - М.:Изд-во МГУ, 2006. - 112 с.
8. Воеводин, В. В. Математические модели и методы в параллельных процессах. /В.В. Воеводин. - М.: Наука, 1986. - 296 с.
9. Воеводин, В. В. Параллельные вычисления. / В. В. Воеводин, Вл. В. Воеводин. - СПб.: БХВ-Петербург, 2002.-608 с.

10. Воеводин, Вл. В. Вычислительное дело и кластерные системы. / Вл. В. Воеводин, С. А. Жуматий.-М.: Изд-во МГУ, 2007. - 150 с.

11. Волокитина, А. В. Российская система прогноза поведения природных пожаров: разработка и перспективы внедрения. / А. В. Волокитина, М. А. Софронов // Сопряженные задачи механики реагирующих сред, информатики и экологии: Материалы Международной конференции. - Томск: Томский государственный университет.- 2007.- С. 36-54.

12. Волокитина, А.В. Автоматизированное составление пирологических описаний по материалам лесоустройства / А. В. Волокитина, Т.М. Тартаковская, Э.Г. Шевчук, О.И. Левкина // Лесные пожары и борьба с ними: сб. науч. тр/ ВНИЛМ– Москва.- 1988.– С. 44-55

13. Вопросы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий: указ Президента РФ от 11.07.2004 № 868 // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2004 г. – № 28. – Ст. 2882.

14. Гергель, В.П. Теория и практика параллельных вычислений. / В.П. Гергель. - Изд-во БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. - 424 с.

15. Гостинцев, Ю.А. Конвективная колонка над линейным пожаром в однородной изотермической атмосфере. / Ю.А. Гостинцев, Л.А. Суханов.// Физика горения и взрыва. - 1977. - №5. - С. 675-685.

16. ГОСТ Р22.1.09-99. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Мониторинг и прогнозирование лесных пожаров. Общие требования. – Введ. 25.05.99. – М. : Изд-во стандартов, 1999. – 18 с.

17. ГОСТ 17.6.1.01-83. Охрана природы. Охрана и защита лесов. Термины и определения. – Введ. 01.01.85. – М. : Изд-во стандартов, 1983. – 5 с.

18. Гришин, А. М. Математические модели лесных пожаров. / А. М. Гришин. - Томск: Изд-во ТГУ, 1981. - 278 с.
19. Гришин, А. М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. / А. М. Гришин. - Новосибирск: Наука, 1992. - 408 с.
20. Гришин А. М. О математическом моделировании природных пожаров и катастроф. // Вестник томского государственного университета: Математика и механика. - Томск: Томский государственный университет. - 2008. - №2(3). - С. 105-114.
21. Гришин, А. М. Применение параллельных вычислений при прогнозе лесной пожарной опасности на территории нижегородской области. / А. М. Гришин, Л. Ю. Катаева, Д. Ю. Николаенко // Сопряженные задачи механики реагирующих сред, информатики и экологии: Материалы Международной конференции.- Томск: Томский государственный университет. - 2007. - С. 52-54.
22. Гришин А. М. Физика лесных пожаров. / А. М. Гришин Томск: Изд-во Томского ун-та, 1994. - 207 с.
23. Данеев, А. В. Программный комплекс «РЕДИМ» для исследования динамики развития лесного пожара. / А. В. Данеев, Т. В. Удилов, Д. Ю. Шарпинский // Математическое моделирование опасных природных явлений и катастроф. Материалы 7-й международной конференции. - Томск: Томский государственный университет.- 2008.- С. 45-46.
24. Доррер, Г. А. Динамика лесных пожаров. / Г. А. Доррер. - Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. - 404 с.
25. Доррер, Г. А. Математические модели динамики лесных пожаров. / Г. А. Доррер. - М: Лесн. пром-сть, 1979. - 161 с.

26. Земельный кодекс Российской Федерации: федеральный закон РФ от 25.10.2001 № 136-ФЗ // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2001 г. – № 44. – Ст. 4147

27. Золотухина Л.П. Система оценки и снижения природной пожарной опасности южно-таежных лесов Восточной Сибири: дис. ... канд. тех. наук: 05.13.01 /Золотухина Любовь Прокопьевна. – Красноярск,2007. – 125 с.

28. Иордан, В. И. Параллельная сеточная реализация решения уравнения теплопроводности с экзотермическим источником тепловыделения для исследования режимов горения в пористой среде. / В. И. Иоран, К. Ю. Радионов, А. А. Соловьев // Избр. материалы Шестой школы- семинара «Распределенные и кластерные вычисления». - Красноярск: ИВМ СО РАН. - 2006. - С. 36-52.

29. Каменщиков, Л. П. Моделирование поверхностных волн в водоемах методом конечных элементов на вычислительном кластере. / Л. П. Каменщиков, Е. Д. Кареева, В. В. Шайдуров // Избр. материалы Четвертой школы-семинара «Распределенные и кластерные вычисления». - Красноярск: ИВМ СО РАН.- 2005.- С. 114-125.

30. Каменщиков, Л. П. Моделирование гравитационных волн в Мировом океане методом конечных элементов с распараллеливанием. / Л. П. Каменщиков, Е. Д. Кареева, С. Ф. Пятаев, В. В. Шайдуров // Избр. материалы Шестой школы-семинара «Распределенные и кластерные вычисления».- Красноярск: ИВМ СО РАН.- 2006. - С. 52-64.

31. Кодекс Российской Федерации об административных правонарушениях: федеральный закон РФ от 30.12.2001 № 195-ФЗ // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2002 г. – № 1. – Ст.1

32. Конев, Э. В. Физические основы горения растительных материалов / Э. В. Конев. - Новосибирск: Наука, 1977. - 239 с.

33. Коровин, Г. Н. Методика расчета некоторых параметров низовых лесных пожаров. / Г. Н. Коровин // Сборник научно-исследоват. работ по лесному хозяйству / Труды ЛенНИИЛХ. Вып. XII - Л., 1969. - С. 244-262.

34. Коморовский, В.С. Контроль и прогнозирование параметров крупных лесных пожаров как динамических процессов на поверхности Земли: дис. ... канд. техн. наук: 05.11.13 / Коморовский Витольд Станиславович. - Красноярск, 2011. - 154 с.

35. Красовский, Н.Н. Игровые задачи о встрече движений / Н.Н. Красовский. - М.: Наука, 1970. - 420 с.

36. Курбатский, И. П. Современная теория распространения лесных низовых пожаров. / И. П. Курбатский, Г. П. Телицын // Современные исследования типологии и пирологии леса. – Архангельск.- 1976. - С. 90-96.

37. Курбатский, Н. П. Статистическая многофакторная модель кромки низового лесного пожара. / И. П. Курбатский, Г. А. Иванова // Моделирование в охране лесов от пожаров. - Красноярск: ИЛиД СО АН СССР.- 1979. - С. 17-32.

38. Курбатский, Н.П. Расчет распределения источников пожаров в лесу / Н.П. Курбатский, Г.А. Доррер, Б.И. Дорогов // Лесное хозяйство - 1978. - № 7. - С. 76-78

39. Курбатский, Н. П. Техника и тактика тушения лесных пожаров / Н. П. Курбатский.– М.: Гослестехиздат, 1962. – 154 с.

40. Лесной кодекс Российской Федерации: федеральный закон РФ от 04.12.2006 № 200-ФЗ // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2006 г. – № 50. – Ст. 5278

41. Мальбахов, В. М. Численная модель распространения дымового шлейфа при лесных пожарах с параметрическим учетом процессов горения / М.

Мальбахов, В. А. Шлычков, А. А. Лежнин, О. А. Дубровская // География и природные ресурсы. – 2004.- Спец. выпуск.- С. 170-174.

42. Михалев, Ю.А. Программа трансформации таксационных данных в лесопирологические./Ю.А. Михалев, Л.П. Золотухина, Г.А. Доррер //Свидетельство о регистрации программы № 2007611665

43. Овчинников, Ф. М. Моделирование распространения и тушения лесных пожаров. / Ф. М. Овчинников, А. П. Латынцев //Охрана лесов от пожаров, лесовосстановление и лесопользование. Сб. науч.ст. ФГУ “ВНИИПОМлесхоз”. - Красноярск: ИПЦ КГТУ.- 2003. - С. 138-150

44. О внесении изменений в Лесной кодекс Российской Федерации и отдельные законодательные акты Российской Федерации: федеральный закон РФ от 29.12.2010 № 442-ФЗ // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2011 г. – № 1. – Ст. 54

45. О лицензировании отдельных видов деятельности: федеральный закон РФ от 08.08.2001 № 128-ФЗ // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2001 г. – № 33. – Ст. 3430

46. О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера: федеральный закон РФ от 21.12.1994 № 68-ФЗ // Собрание законодательства Российской Федерации. – 1994 г. – № 35. – Ст. 3648

47. О пожарной безопасности: федеральный закон РФ от 21.12.1994 № 69-ФЗ // Собрание законодательства Российской Федерации. – 1994 г. – № 35. – Ст. 3649

48. О Федеральном агентстве лесного хозяйства: указ Президента РФ от 27.08.2010 № 1074 // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2010 г. – № 35. – Ст. 4533.

49. Об утверждении правил организации и осуществления авиационных работ по охране и защите лесов: постановление Правительства РФ от 19.06.2007 № 385 // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2007 г. – № 26. – Ст. 3189.

50. Об утверждении правил пожарной безопасности в лесах» утверждает правила пожарной безопасности в лесах: постановление Правительства РФ от 19.06.2007 № 385 // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2007 г. – № 26. – Ст. 3189.

51. Проекты документов [Электронный ресурс] // Официальный сайт федерального агентства лесного хозяйства РФ. М., 2011. – Режим доступа: <http://www.rosleshoz.gov.ru/docs/projects>

52. Перминов, В. А. Численная методика решения задачи о возникновении верхового лесного пожара. / В. А. Перминов // Математическое моделирование опасных природных явлений и катастроф. Материалы 7-й международной конференции. - Томск:Томский государственный университет.- 2008.- С. 86-87.

53. Перминов, В.А. Математическое моделирование возникновения верховых и массовых лесных пожаров: дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.02.05 / Перминов Валерий Афанасьевич.- Томск.,2011. – 279 с.

54. Применение информационной системы дистанционного мониторинга «ИСДМ-Рослесхоз» для определения пожарной опасности в лесах Российской Федерации: Учебное пособие - г. Пушкино (МО), ФГУ «Авиалесоохрана».- 2007 год. - 82 с.

55. Профилактика и тушение лесных пожаров: Сб. науч. тр. / Редкол.: Б. П. Яковлев (отв. ред.); Федер. служба лесн. хоз-ва: Всерос. научно-исслед. ин-т противопож. охраны лесов и механизации лесн хоз-ва. - Красноярск: ВНИИПОМлесхоз. - 1998. - 252 с.

56. Самарский, А. А. Теория разностных схем. / А. А. Самарский. - М.: Наука. - 1988.-616 с.
57. Софронов, М.А. Лесные пожары в горах Южной Сибири / М.А. Софронов. - М.: Наука. - 1967. - 150 с.
58. Софронов, М.А. Распределение по площади запасов мха, опада и подстилки / М.А. Софронов, Н.М, Баранов // Моделирование в охране лесов от пожаров / Труды ИЛиД СО АН СССР. – Красноярск.- 1979. - С. 99-107.
59. Софронов, М.А. Пожароуправление: Учеб. пособие для студентов специальности 260400 всех форм обучения / М. А. Софронов, А. В. Волокитина, Т. М. Софронова; Сиб. гос. технол. ун-т. - Красноярск: СибГТУ. Ч. 1: Горение и пожарная опасность в лесах. - 2005. - 144 с.
60. Софронов, М.А. Пирологическая характеристика растительности в верхней части бассейна р. Турухан / М.А. Софронов // Лесные пожары и борьба с ними : сб. науч. тр.– М.: ВНИИЛМ, 1988.– С. 106-117.
61. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности: федеральный закон РФ от 22.07.2008 № 123-ФЗ // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2008 г. – № 30. – Ст. 3579
62. Технический регламент о безопасности зданий и сооружений: федеральный закон РФ от 30.12.2009 № 384-ФЗ // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2010 г. – № 1. – Ст. 5.
63. Указания по обнаружению и тушению лесных пожаров : Утв. 30.06.95., пр. №100. – М. : Федеральное агентство лесного хозяйства. – 54 с.
64. Фадеенков, О.В. Оптимальная маршрутизация при управлении борьбой с лесными пожарами: автореф. дисс. ... канд. тех. наук / О.В. Фадеенков / СибГТУ. - Красноярск, 2006. - 21 с.

65. Фильков, А. И. О влиянии плотности и неоднородности состава РЕМ на скорость распространения пожара. / А. И. Фильков, Т. Е. Сладкова, И. А. Горина // Математическое моделирование опасных природных явлений и катастроф. Материалы 7-й международной конференции. - Томск: Томский государственный университет.- 2008. -С. 112-113.

66. Фуряев В. В. Роль пожаров в процессе лесообразования / В.В. Фуряев. - Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1996. - 253 с.

67. Численные методы, параллельные вычисления и информационные технологии: Сборник научных трудов / Под ред. Вл. В. Воеводина и Е. Е. Тыртышников. - М.: Издательство Московского Университета. -2008. -320 с.

68. 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

69. 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.

70. 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

71. 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

72. 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.

73. 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.

74. 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

75. 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.

76. 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.

77. 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.

78. 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.

79. 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.

80. 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

81. 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.

82. Albini, F.A model for fire spread in wildland fuels by radiation / F.A. Albini // Combustion Science and Technology. – 1985. - Vol. 42. - P 229-258.

83. Albini, F.A. Wildland fire spread by radiation - a model including fuel cooling by natural convection / F.A. Albini // *Combustion Science and Technology*. - 1986. - Vol. 45. - P. 101 - 113.
84. Albini, F.A. Mathematical analysis of forest fire suppression / F.A. Albini, G.N. Korovin, E.N. Gorovaya. - USDA Forest Service Research Paper INT-207, 1978. - 19 p.
85. Albini, F.A. Computer-based models of wildland fire behavior: a users manual/ F.A. Albini. - USDA Forest Service, Ogden, 1976. - 68 p.
86. Alexander, M. E. 2006. Models for predicting crown fire behavior - a review. / M. E. Alexander // *V Short Course on Fire Behaviour*, Figueira da Foz, Portugal. Association for the Development of Industrial Aerodynamics, Forest Fire Research Centre, Coimbra, Portugal. - 2006. - P. 173-225.
87. Anderson, D. G. Modeling the spread of grass fires / D.G. Anderson, E.A. Catchpole, N.J. de Mestrem T. Parkes // *Journal of Australian Mathematical Society (series B)*.- 1982. - Vol.23. - P.451-466
88. Andrews, P.L. BEHAVE: Fire behavior prediction and modeling system - BURN subsystem part 1 / P.L. Andrews // USDA Forest Service Gen. Techn. Rep. INT-194. – Ogden. – 1986. - 126 p.
89. Andrews, P. BehavePlus fire modeling system, version 2.0: User's Guide / P.L. Andrews, C.D. Bevins, R.C. Seli // USDA Forest Service Gen. Techn. Rep. RMRS-GTR-106WWW. – Ogden. – 2003. - 107 p.
90. Baum, H. A radiative transport model for large-eddy fire simulations / H.R. Baum, W.E. Mell // *Combustion Theory Modelling*. – 1998. – Vol. 2. – P. 405-422.
91. Baum, H. The equations of motion for thermally driven, buoyant flows / H.R. Baum, R.G. Rehm // *Journal of Research of the NBS*. -1978. - Vol. 83. - P.297-308.

92. Baum, H. Fire-driven flows in enclosures / H.R. Baum, K.B. McGrattan, R.G. Rehm // *Journal Computational Physics*. – 1994. - Vol. 2. - P. 110-145.
93. Bilger, R. W. Turbulent reacting flows, in turbulent flows with nonpremixed reactants /R.W. Bilger // *Turbulent reacting flows*. - 1980. - Vol. 44. - P. 65-113.
94. Brown, J.R. Estimating fuel weights of grasses, forests, and small woody plants / J.R. Brown, M.A. Morsden - USDA Forest Service Research Notes INT-210, Ogden, 1976. – 11 p.
95. Byram, G.M. The modeling of fire whirlwinds. / G. M. Byram, R. E. Martin // *Forest Science*. – 1970. - Vol. 16, № 4. - P. 386-398.
96. Byram, G.M. Forest fire behavior. / G.M. Byram // *Forest Fire: Control and Use*.- New York . -1959. - P. 113-126.
97. Clark, T. L. Description of coupled atmosphere-fire model. / T. L. Clark, J. Coen, Latham // *International Journal of Wildland Fire*. - 2004. – Vol. 13. - P. 49-63.
98. Coen, J. Simulation of the Big Elk Fire using coupled atmosphere-fire modeling. / J. Coen // *International Journal of Wildland Fire*. – 2005. – Vol. 14. - P. 49-59.
99. Cruz, M. G. Prediction the ignition of crown fuels above a spreading surface fire. Part I: model idealization. / M. G. Cruz, B. W. Butler, M. E. Alexander and others // *International Journal of Wildland Fire*. – 2006. – Vol. 15. - P. 47-60.
100. Cruz, M. G. Prediction the ignition of crown fuels above a spreading surface fire. Part I: model evaluation. / M. G. Cruz, B. W. Butler, M. E. Alexander // *International Journal of Wildland Fire*. – 2006. – Vol. 15. - P. 62-72.
101. Davis, J.R. Prediction rate of fire spread (ROS) in Arizona oak chaparral: field work book / J.R. Davis, J.N. Dieterich. - USDA Forest Service Gen. Techn. Rep. RM-24, Fort Collins, 1976. - 8p.

102. Deeming, J.E. The national fire-danger rating system / J.E. Deeming, R.E. Burgan, J.D. Cohen. - USDA Forest Service Gen. Techn. Rep. INT-39, Ogden, 1977. - 65 p.

103. De Mestre, N.J. Uniform propagation of a planar fire front without wind / N.J. De Mestre, E.A. Catchpole, D.H. Anderson, R.C. Rothermel // Combustion Science and Technology. – 1989. – Vol. 65. – P.231 – 244.

104. Drouet, J.-Ch. Les feux de forets en region mediterraneenne. Theorie de la propagation et moyens de lutte efficaces / J.- Ch. Drouet // Mediterranee. - 1973. - Vol. 12, № 1. - P. 29-53.

105. Dupuy, J-L. Numerical study of a crown fire spreading toward a fuel break using a multiphase physical model. / J.-L. Dupuy, D. Morvan // International Journal of Wildland Fire. – 2005. - Vol. 14. - P. 141-151.

106. Fillippi, J. B. A discrete event front tracking simulator of a physical fire spread model. / J. B. Fillippi, J. H. Balbi, F. Moradini // The conjugate problems of mechanics, computer science and ecology: Preceeding of the International conference. - Tomsk: Tomsk state university. - 2007. - P. 225-231.

107. Finney, M.A. FARSITE: Fire are simulator model, development and evaluation / M.A. Finney. - USDA Forest Service, Res. Paper RMRS-RP-4. Ogden, 1998 - 47p

108. Fire Danger. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.state.nj.us/dep/parksandforests/fire/index.html>

109. Fons, W. L. Analysis of fire spread in light forest fuels. / W. L. Fons // Journal of Agricultural Resources. - 1946. - Vol. 72, № 3. - P. 93-121.

110. Forestry Canada Fire Danger Group. Development and Structure of the Canadian Forest Fire Behavior Prediction System. Forestry Canada, Ottawa, Ontario. Information Report ST-X-3. - 1992. - 62 p.

111. Forney, G.P. Smokeview (Version 6) - A Tool for Vizualizing Fire Dynamics simulations Data. Volume 1: User's Guide / G.P. Forney // NIST Special Publication 1017 -1, 2010. - 69 p.

112. Fosberg, M.A. Global change: effects on forest ecosystems and wildfire severity / M.A. Fosberg, J.G. Goldammer, D.Rind, C.Price // Fire in the tropical biota. Ecosystem processes and global challenges. (J.G. Goldmamer, ed). Ecological Sturies 84, Springer-Verlag. Berlin.-1990.-P.463-486.

113. Frandsen, W.H. Rothermel's fire spread model programmed for the Hewlett-Packard 9820 / W.H. Frandsen.- USDA Forest Service Gen. Techn. Rep. INT-9, Ogden, 1973. - 14 p.

114. Frandsen, W.H. Using the Effective Heating Numbers as a weighting factor in Rothermel's fire spread model / W.H. Frandsen. - USDA Forest Service Gen. Techn. Rep. INT-10, Ogden, 1973. - 8 p.

115. Gottlieb, S. Strong Stability-Preserving High-order Time Discretization Methods / S. Gottlieb, C.W. Shu, E. Tadmor// SIAM Review. - 2001. - Vol. 43, № 1. - P. 89-112.

116. Hough, W.Q. Caloric value of some forest fuels of the southern United States / W.Q. Hough - USDA Forest Service Research Note SE-120. – 6 p.

117. Konev, E.V. The analysis of flame spread through forest fuel / E. V. Konev, A.I. Sukhinin // Combustion and Flame. - 1977. - Vol. 28, №3. - P. 217-233.

118. Lee, B. Information systems in support of wildland fire management decidion making in Canada / B.S. Lee, M.E. Alexander, B.C. Hawkes, T.J. Lynham, B.J. Stocks, P. Englefield. // Computers and Electronics in Agriculture. 2002. Vol. 37. N 1-2. P. 185 – 198.

119. Lindermuth, W. Predicting fire spread in Arizona's Oak Chaparral / W. Lindermuth, J.R. Davis. - USDA Forest Service Research Paper RM-101, Fort Collins, 1973. - 11 p.
120. Linn R.R. A transport model for prediction of wildfire behavior: PhD dissertation, Los Alamos National Laboratory. – 1997. – 390 p.
121. Linn, R.R. Modeling interaction between fire and atmosphere in discrete element fuel beds / R. R. Linn, J. Winterkamp, J. J. Colman // International Journal of Wildland Fire. – 2005. – Vol. 14. - P. 37-48.
122. Linn, R.R. Studying wildfire behavior using FIRETEC / R. R. Linn, J. Reisner, J. J. Colman, J. Winterkamp // International Journal of Wildland Fire. – 2002. – Vol. 11. - P. 233-246.
123. Linn, R.R. Coupled slope and wind effects on fire spread with influences of fire size: a numerical study using FIRETEC / R.R. Linn, J.-L. Dupuy, F. Pimont // International Journal of Wildland Fire. – 2012. – Vol. 21. – P. 828-842.
124. McArthur, A. Fire behavior in eucalypt forest / A.G. McArthur // Commonwealth of Australian Forest and Timber Bureau, Leaflet Number 107, Canberra, Australian Capital Territory, 1967. - 25p.
125. McArthur, A. Weather and grassland fire behavior / A.G. McArthur // Leaflet 100. Forestry and Timber Bureau. Commonwealth of Australia. -1966. - 43 p.
126. McArthur, A. Forest Fire Danger Meter MkV / A.G. McArthur // Technical report, CSIRO Australia, Division of Forestry, Bushfire Research Unit, 1973. - 39 p.
127. McGrattan, K.B. Fire Dynamics Simulator (Version 6): User's Guide / K.B. McGrattan, R. McDermott, S. Hostikka, J.E. Floyd. - NIST Special Publication 1019, 2013. - 262 p.

128. McNamara D. Deriving Data Inputs for the Wildland Fire Dynamics Simulator [Электронный ресурс] / D. McNamara, J. Trook, J. Hu, F. Roberts. –2009.–Режим доступа: http://gis.cdatribe-nsn.gov/projects/FinalNISTPaper_Master.pdf

129. Mell, W. Flame spread along free edges of thermally thin samples in microgravity [Электронный ресурс]/ W. Mell, S.L. Olson, T. Kashiwagi.-2000. – Режим доступа: <http://fire.nist.gov/bfrlpubs/fire01/PDF/f01014.pdf>

130. Mell, W. A physics-based approach to modeling grassland fires / W. Mell, M. A. Jenkins, J. Gould, Ph. Cheney // International Journal of Wildland Fire. – 2007. – Vol. 16. - P. 1- 22.

131. Mell, W. Numerical simulation and experiments of burning Douglas fir trees / W. Mell, A. Maranghides, R. J. McDermott, S. L. Manzello // International Journal Combustion and Flame. – 2009. - Vol. 156. - P. 2023-2041.

132. Mell, W. Computer modeling of wildland-urban interface fires / W. Mell, D. McNamara, A. Maranghides, R.J. McDermott, G.P. Forney, C. Hoffman, M. Ginder // Fire & Materials 12th International Conference, San-Francisco, CA. – 2011. - P. 23-35

133. Mell, W. Wildland fire behavior modeling: perspectives, new approaches and applications / W. Mell, R.J. McDermott, G. P. Forney // Proceedings of 3rd Fire Behavior and Fuels Conference, ,Spokane, Washington, USA. – 2010. – P. 45-62/

134. Mell, W. Models for fire spread in the wildland-urban interface. Technical Report JFSP Project Number 07-1-5-08 [Электронный ресурс] / W. Mell, A. Bova, G. Forney, R. Rehm, R. McDermott. - 2012. – Режим доступа: http://www.firescience.gov/projects/07-1-5-08/project/07-1-5-08-final_report.pdf.

135. Mitchell Z.M. Rule of thumb determining rate of spread / Z.M. Mitchell // Fire Control Notes. - 1937. - Vol. 6. - P.395-396.

136. Morvan, D. Modeling of one dimensional fire spread in pine needles with opposing air flow / D. Morvan, M. Larini // *Combustion Science and Technology*. – 2001. – Vol. 164. – P.37-64.

137. Morvan, D. Interaction between head fire and backfire in grasslands / D. Morvan, S. Meradji, W. Mell // *Fire Safety Journal*. – 2013.- Vol. 58.- P. 195-203.

138. Morvan, D. Physical modeling of fire spread in grasslands / D. Morvan, S. Meradji, G. Accary// *Fire Safety Journal*. – 2009. - Vol. 44. - P. 50-61.

139. Morvan, D. Numerical simulation of the interaction between two fire fronts in grassland and shrubland / D.Morvan, C. Hoffman, F. Rego, W. Mell // *Fire Safety Journal*. – 2011. - Vol. 46. - P. 469-479

140. Morvan, D Modeling the propagation of a wildfire through a Mediterranean shrub using a multiphase formulation / D. Morvan, J.L. Dupuy. // *International Journal Combustion and Flame*. – 2004.- Vol. 138.- P. 199-210.

141. National Geophysical Data Center. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.ngdc.noaa.gov/ngdc.html>

142. Peet, G.B. A fire danger rating and controlled burning guide for the northern jarrah (euc. Marginata Sm) forest, of Western Australia //For Dept. WA, Bull, 74. - 1965. - 37 p.

143. Plume rise model for Forest Fire Using ArcGIS Modeling Tool. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.crrw.utexas.edu/gis/gishydro03/Classroom/trmproj/Nopmongcol/Plume_rise_model_for_Forest_Fire.mht

144. Porterie, B. Firespread through fuel beds: modeling of wind-aided fires and induced hydrodynamics / B. Porterie, D. Morvan, J.C. Loraud, M.Larini // *Phys. Fluids*. – 2000. - Vol. 12. - P. 1762-1782.

145. Raithby, G.D. A finite volume method for predicting radiant heat transfer in enclosures with participating media / G.D. Raithby, E.H. Chui // Journal of Heat Transfer. – 1990. – Vol.112. – P.415-423.

146. Rehm, R. Fire-Front Propagation Using the Level Set Method. Technical Report NIST Technical Note 1611 [Электронный ресурс] / R. Rehm, R. McDermott. - 2009. – Режим доступа: <http://fire.nist.gov/bfrlpubs/fire09/art023.html>.

147. Richards, G. D. The mathematical modeling and computer simulations of wildland fire perimeter grown over a 3-dimensional surface. / G. D. Richards // International Journal of Wildland Fire. - 1999. - Vol. 9. - P.213-221.

148. Rosner, D. Transport Processes in Chemically Reacting Flow Systems / D.E. Rosner // Dover Publications, Inc., Mineola, NewYork. - 2000. - 18 p.

149. Rothermel, R.C. A mathematical model for fire spread predictions in wildland fuels. / R. C. Rothermel. - USDA Forest Service Research Paper INT-115, Ogden, 1972, - 40 p.

150. Rothermel, R.C. How to predict the spread and intensity of forest and range fires / R. C. Rothermel. - USDA Forest Service Research Gen. Techn. Rep. Int-143. Ogden, 1983, - 111 p.

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

152. Smagorinsky, J. General Circulation experiments with Primitive Equations I. The Basic Experiment / J. Smagorinsky // Monthly Weather Review. – 1963. - Vol. 91. - P.99-164.

153. Stocks, B. Canadian Forest Fire Danger Rating System / B.J. Stocks, M.E. Alexander, R.S. McAlpine et al. – Canadian Forestry service, 1987. – 500 p.

154. Susott, R. Characterization of the thermal properties of forest fuels by combustible gas analysis / R.A. Susott // *Forest Science*. – 1982. - Vol.2. - P.404-420.
155. Sun, R. An evaluation of fire-plume properties simulated with the Fire Dynamics Simulator (FDS) and the Clark coupled wildfire model.// R. Sun, M.J. Jenkins, S.K. Krueger, W.E. Mell, J.J. Charney // *Canadian Journal of Forest Research*. – 2006. - Vol. 36. - P. 2894 -2908.
156. Toro, E. Reimann Solvers and Numerical Methods for Fluid Dynamics: A Practical Introduction. Second Edition // E.F. Toro // Springer.- 1999. - 645 p.
157. Tymstra, C. Development and structure of Prometheus: the Canadian wildland fire growth simulation model. Information Report NOR-X-417 [Электронный ресурс] / .C. Tymstra R.W. Bryc, B.M. Wotton, S.W. Taylor, O.B. Armitage. - 2010. – Режим доступа: <http://www.firegrowthmodel.ca/documentation.html>.
158. Van Wagner, C.E. Effect of slope on fires spreading downhill. / C. E. Van Wagner // *Canadian Journal of Forest Research*. – 1988. – Vol. 18. - P. 818-820.
159. Van Wagner, C.E. Conditions for the start and spread of crown fire / C.E. Van Wagner // *Canadian Journal of Forest Research*. – 1977. - Vol. 7, №1.- P. 23-34.
160. Van Wagner, C.E. Development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System/ C.E. Van Wagner. - Forestry Technical Report 35, Canadian Forestry Service, Ottawa, Ontario, 1987. - 37p.
161. Viegas D. X. On the existence of a steady state regime for slope and wind driven fires / D. X. Viegas // *International Journal of Wildland Fire*. – 2004. – Vol. 13. - P. 101-117.
162. Viegas D. X. Parametric study of eruptive fire behavior model / D. X. Viegas // *International Journal of Wildland Fire*. - 2006. – Vol. 15. - P. 169-177.

163. Weber, R. O. Toward a Comprehensive Wildfire Spread Model / R. O. Weber // International Journal of Wildland Fire. – 1991. – Vol. 1(4). - P. 245-248.

164. Yuen, R., A Three-dimensional Mathematical Model For The Pyrolysis Of Wet Wood /. R. Yuen, R. Casey, G. De Vahl Davis, E. Leonardi, G.H. Yeoh, V. Chandrasekaran, S.J. Grubits // Fire Safety Science. - 1997. - Vol. 5. - P. 189-200.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

В данном приложении приводится детальное описание математической модели, применяемой в WFDS-PB, написанное на основе статьи [129].

WFDS-PB способна моделировать распространение огня среди растительного горючего и инфраструктурных объектов. В отличие от FIRETEC, в WFDS в основных уравнениях используется малое число Маха [90], поэтому в WFDS нет возможности моделирования распространения звуковых волн. Это приближение, успешно примененное к большому числу проблем динамики огня и горения в целом, а также использование быстрого прямого решателя для давления, приводят к увеличению скорости расчетов в 10-100 раз, в отличие от многих других методов. Газовая и твердая фаза рассчитываются отдельно на различных сетках. Модель горения основывается на подходе смешения фракций, согласно которому горючее и кислород реагируют мгновенно во временных рамках турбулентного реактивного течения [92]. Предполагается, что твердое горючее является термически тонким. Радиационный и конвективный теплообмен в слое горючего непосредственно моделируется аналогично подходу, использованного Albin, [81] и D.Morvan и Dupuy [139]. В качестве модели пиролиза используется модель, разработанная D.Morvan, Dupuy [139]. Перенос теплового излучения в газовой фазе рассчитывается методом конечных объемов [133]. Для переноса излучения в слое горючих материалов используется реверсивное приближение [128]. Детальный обзор аналитической модели приводится ниже.

Моделирование газовой фазы

Основные уравнения при малых числах Маха внутри горящего потока основаны на уравнениях, выведенных в работе R Rehm и H. Baum [90]. Здесь предполагается, что изменения давления в результате пожара или действия потока

под воздействием подъемной силы, составляют незначительную долю давления окружающей среды (т.е. давления при отсутствии пожара). Полученные уравнения широко известны как приближенное представление для малых чисел Маха. Используется явное пошаговое интегрирование Рунге-Кутты 2-го порядка по времени и пространственное дифференцирование второго порядка линейной сетки. Дополнительная информация относительно численного подхода и граничных условий представлена в работе [126]. Предполагается, что газовая фаза является идеальным газом, а диффузия происходит в соответствии с законом Фика. Уравнение сохранения общей массы:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + u \cdot \nabla \rho = -\rho \nabla \cdot u \quad (1)$$

В данном уравнении используется дивергенция скорости $\nabla \cdot u$. Определение $\nabla \cdot u$ рассмотрено ниже.

Уравнение сохранения импульса:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \nabla H - u \times \omega = \frac{1}{\rho} [(\rho - \rho_\infty)g + \nabla \cdot \tau - F_D], \quad (2)$$

$$\nabla H = \frac{1}{2} \nabla |u|^2 + \frac{1}{\rho} \nabla p_d \cong \frac{1}{2} \nabla |u|^2 + \frac{1}{\rho_\infty} \nabla p_d, \quad (3)$$

$$\tau = \mu_{LES} \left(\text{def } u - \frac{2}{3} (\nabla \cdot u) I \right), \quad (4)$$

где используется векторное тождество $(u \cdot \nabla)u = (1/2)\nabla |u|^2 - u \times \omega$ и $\text{def } u = 0,5 (\nabla u + (\nabla u)^T)$ — тензор или скорость деформации. В уравнении (3) (26) величина $(1/\rho - 1/\rho_\infty)\nabla p_d$ считается незначительной. Следовательно, с физической точки зрения бароклиный крутящий момент незначительно влияет на возникновение завихрения по отношению к подъемной силе. Исходя из этого предположения, постоянный коэффициент дифференциального уравнения в частных производных для давления определяется дивергенцией уравнения импульса (уравнение (2)). Данное уравнение давления в частных производных вычисляется с помощью прямого решателя точными и высокоэффективными вычислительными методами. Затем бароклиный крутящий момент аппроксимируется, при расчетах используется значение давления предыдущего временного шага [126].

Влияние травяной горючей подстилки на движение воздуха окружающей среды аппроксимируется членом F_D в уравнении (2), описывающим тягу воздуха. Данный компонент тяги присутствует только в первой ячейке сетке газовой фазы над нижней границей и определяется системой:

$$F_D = \begin{cases} C_D \frac{3}{8} \beta_s \sigma_s \rho |u|u [1 - 0,9 m_{s,\text{pyr}}^f(t)], & 0 \leq m_{s,\text{pyr}}^f \leq 1, \\ C_D \frac{3}{8} \beta_s \sigma_s \rho |u|u [0,1], & m_{s,\text{pyr}}^f = 1 \end{cases} \quad (5)$$

где $C_D \equiv 1$ аппроксимирует тепло, выделяемое цилиндрической частицей травы, β_s — коэффициент концентрации твердого горючего, σ_s — поверхностно-объемное отношение частиц твердого горючего.

Формула:

$$m_{s,\text{pyr}}^f(t) = \frac{\int_0^t \dot{m}_{s,\text{pyr}}''(t') dt'}{m_s''(0)(1 - \chi_{\text{char}})} \quad (6)$$

где $\dot{m}_{s,\text{pyr}}''$ — скорость возникновения горючего газа в результате пиролиза твердой растительности, m_s'' нагрузка собственной массы (масса на единицу площади) твердой травяной горючей подстилки, χ_{char} доля золы в твердом горючем.

Уравнение (6) вычисляет количество твердого горючего, подвергнутого пиролизу. В работе [143] для вычисления переменных уравнения (5), не заключенных в квадратные скобки, используются выражения подобные уравнению (6). Член в квадратных скобках аппроксимирует уменьшение тяги воздушного потока по мере сгорания травы. Для данной плотности газа и поля скорости тяга, создаваемая травяной подстилкой, уменьшается к концу горения до 10% от первоначального значения. Далее более детально будут рассматриваться параметры растительного горючего, входящие в уравнение (5).

Нами рассмотрена простая модель тяги воздуха, создаваемой при горении подстилки. Данный подход является более точным по сравнению с традиционным метеорологическим методом пограничного слоя, в котором горючее рассматривается как поверхность с нулевой глубиной и постоянным трением, определяемым коэффициентом шероховатости и скоростью ветра. Простота и прямая связь с обычно измеряемыми свойствами горючего, используемыми в

модели горючего и учет расхода горючего являются преимуществами данного подхода.

Расчетные сетки, используемые для моделирования крупных пожаров, являются слишком грубыми для учета физики процесса молекулярного переноса. В этом случае для увеличения точности необходима аппроксимация процессов более мелкого масштаба с использованием в качестве параметров значений, полученных на предыдущем этапе. Одним из таких методов является так называемый метод моделирования крупных вихрей (Large Eddy Simulation- LES), вариант которого рассмотрен ниже. В работе [151] используется модель динамической вязкости тензора напряжения вязкости:

$$\mu_{LES} = \rho(C\Delta)^2 \left(2(\text{def } u) \cdot (\text{def } u) - \frac{2}{3}(\nabla \cdot u)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

где C – эмпирическая константа (константа Смагоринского), Δ – длина стороны ячейки клетки различного порядка, член деформации относится к диссипативной функции (величине, при которой кинетическая энергия превращается в тепловую энергию). Теплопроводность и диффузия материалов определяются турбулентной вязкостью μ_{LES} :

$$\lambda_{LES} = \frac{\mu_{LES} c_p N_2}{Pr} \quad \text{и} \quad (\rho D)_{LES} = \frac{\mu_{LES}}{Sc} \quad (8)$$

где Pr – число Прандтля, Sc – число Шмидта, являются константами.

Значения C , Pr и Sc определены при численном моделировании и лабораторных экспериментах: $C = 0.2, Pr = Sc = 0.5$ [126].

Рассмотрим другие балансовые уравнения.

Уравнение сохранения массы:

$$\rho \frac{\partial Y_i}{\partial t} + \rho u \cdot \nabla Y_i = \nabla \cdot \{(\rho D)_{LES} \nabla Y_i\} + \dot{m}_i''' \quad (9)$$

Уравнение состояния:

$$p_0 = \mathcal{R} \rho T \sum_i Y_i / M_i = \mathcal{R} \rho T / M \quad (10)$$

Уравнение сохранения энергии:

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} + \rho u \cdot \nabla h = \nabla \cdot (\lambda_{\text{LES}} \nabla T) +$$

$$+ \nabla \cdot (\sum_i h_i (\rho D)_{\text{LES}} \nabla Y_i) - \nabla \cdot \dot{q}_r'' + \frac{dp_0}{dt} \quad (11)$$

Следует отметить тот факт, что моделирование в WFDS-PB осуществляется в негерметизированном пространстве и, следовательно, $dp_0/dt = 0$. Высвобождение энергии в ходе химических реакций здесь выражено не явно, но представлено переменной h [147], где:

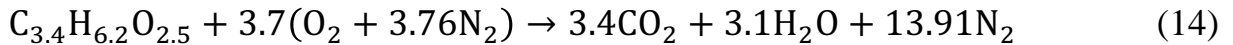
$$h(x, t) = \sum_i Y_i(x, t) h_i(T) \quad \text{и} \quad h_i(T) = h_i^o + \int_{T^o}^T c_{p,i}(T') dT' \quad (12)$$

являются соответственно энтальпией смеси и отдельного i -го элемента. Используется единственная зависимость температуры энтальпии идеальных газов. Заметим, что $c_p = \sum_i Y_i dh_i/dT$ - удельная теплоемкость смеси.

Молярная температура горения для данной химической реакции при постоянном давлении определяется формулой:

$$\Delta \bar{h}_c = - \sum_i \nu_i \bar{h}_i(T) = - \sum_i \nu_i h_i(T) M_i \quad (13)$$

Упрощенное стехиометрическое уравнение:



применяется для моделирования химической реакции воздуха и горючих газов, образованных при пиролизе древесины. Скорость расхода массы элементов (кроме N_2 , химически неактивного) может быть вычислена для каждого из элементов. Таким образом, скорость расхода массы топлива равна:

$$\dot{m}_i''' = r_i \dot{m}_F''', \quad r_i = \frac{(\nu M)_i}{(\nu M)_F}, \quad \nu_F = -1, \quad \nu_{O_2} = -3.7, \quad \nu_{CO_2} = 3.4, \quad \nu_{H_2O} = 3.1 \quad (15)$$

При использовании данного выражения высвобождение энергии в процессе горения на единицу объема может быть представлено как теплота горения:

$$\dot{Q}_c''' = - \sum_i h_i \dot{m}_i''' = - \frac{\dot{m}_F'''}{(\nu M)_F} \sum_i \nu_i h_i M_i = \frac{\dot{m}_F'''}{(\nu M)_F} \Delta \bar{h}_c = - \dot{m}_F''' \Delta h_c \quad (16)$$

где $\Delta h_c = \Delta \bar{h}_c / M_F$ теплота горения по отношению к массе, и $\nu_F \equiv -1$

Вычисление дивергенции скорости

В уравнении сохранения общей массы (1) используется дивергенция скорости. Общее выражение для дивергенции скорости можно получить при помощи субстанциональной производной (производной Лагранжа) уравнения состояния:

$$\dot{\rho}_0 = \frac{\mathcal{R}T}{M} \frac{D\rho}{Dt} + \frac{\mathcal{R}\rho}{M} \frac{DT}{Dt} + \mathcal{R}\rho T \sum_i \frac{1}{M_i} \frac{DY_i}{Dt} \quad (17)$$

и используя уравнения (1), (9), DT/Dt из Dh/Dt , где h получено из уравнений (12) и (11):

$$\begin{aligned} \nabla \cdot u = & \frac{1}{\rho c_p T} \left(\nabla \cdot (\lambda_{\text{LES}} \nabla T) + \sum_i (\rho D)_{\text{LES}} Y_i \cdot \nabla h_i - \nabla \cdot \dot{q}_r'' \right) \\ & + \frac{1}{\rho} \sum_i \frac{M}{M_i} \nabla \cdot \{ (\rho D)_{\text{LES}} \nabla Y_i \} + \frac{1}{\rho} \sum_i \left(\frac{M}{M_i} - \frac{h_i}{c_p T} \right) \dot{m}_i''' \end{aligned} \quad (18)$$

Подобное выражение для расчета ограничения дивергенции было использовано при моделировании взаимодействия вихревого пламени без учета теплового излучения. Уравнение (18) может быть упрощено допущением, что отношение удельной теплоемкости γ для i -го элемента уравнения равно значению для двухатомных газов или:

$$\gamma_i = \frac{\bar{c}_{p,i}}{\bar{c}_{v,i}} = \frac{c_{p,i}}{c_{v,i}} = \gamma = 7/5 \quad \Rightarrow \quad \bar{c}_{p,i} = \bar{c}_p, \bar{c}_{v,i} = \bar{c}_v = \text{const} \quad (19)$$

Обоснованием данного упрощения является то, что азот является доминирующим газом в газовых смесях. Подтверждением того, что удельная молярная теплоемкость является константой, следует из соотношения $\bar{c}_{p,i} - \bar{c}_{v,i} = \mathcal{R}$. Следовательно, значение дивергенции равно

$$\begin{aligned} \nabla \cdot u = & \frac{1}{\rho c_p T} \left(\nabla \cdot (\lambda_{\text{LES}} \nabla T) + \sum_i c_{p,i} \nabla \cdot \{ T (\rho D)_{\text{LES}} \nabla Y_i \} - \nabla \cdot \dot{q}_r'' \right) + \\ & + \frac{1}{\rho} \sum_i \left(\frac{M}{M_i} - \frac{h_i}{c_p T} \right) \dot{m}_i''' \end{aligned} \quad (20)$$

где отношение

$$c_{p,i} = \frac{R}{M_i} \frac{\gamma}{\gamma-1} = const, \quad c_p = \sum_i Y_i c_{p,i} = \frac{R}{M} \frac{\gamma}{\gamma-1} \Rightarrow \frac{M}{M_i} = \frac{c_{p,i}}{c_p} \quad (21)$$

используется для объединения условий диффузии в уравнении (18). Следует отметить, что удельная теплота не зависит от температуры, но зависит от молекулярной массы газа.

Условия расхода массы для каждого члена выражения для дивергенции, исходя из уравнений (15) и (16), имеют вид:

$$\frac{1}{\rho} \sum_i \left(\frac{M}{M_i} - \frac{h_i}{c_p T} \right) \dot{m}_i''' = \frac{1}{\rho} \left(\frac{M \sum_i \nu_i}{\nu_F M_F} - \frac{\Delta h_c}{c_p T} \right) \dot{m}_F''' = \frac{M \sum_i \nu_i}{\rho \nu_F M_F} \dot{m}_F''' + \frac{1}{\rho c_p T} \dot{Q}_c''' \quad (22)$$

где \dot{Q}_c''' — высвобождение химической энергии на единицу объема (уравнение (16)). Порядок анализа значения показывает, что первое условие с правой стороны можно не учитывать для сложных углеводородных горючих газов и не включать в численную реализацию WFDS-PB. Чтобы определить высвобождение химической энергии в единицу объема (уравнение (16)) необходимо смоделировать процесс горения. С помощью этой модели можно рассчитать расход массы топлива, что рассматривается далее.

Модель горения, основанная на стехиометрическом балансе

Сложность и большое количество расчетов в моделях химической динамики не позволяют использовать их в нужных масштабах. В качестве аналогов этих моделей обычно используются модели языка пламени и быстрая химия [92]. В данных моделях время прохождения химической реакции принимается значительно меньшим, чем время смешивания (т.е. «смешанное сгорело»). Фракция смеси Z равна:

$$Z \equiv \frac{r_{O_2} Y_F - (Y_{O_2} - Y_{O_2}^\infty)}{r_{O_2} Y_F^\infty + Y_{O_2}^\infty}, \quad 0 \leq Z \leq 1 \quad (23)$$

где зависимость Y_F и Y_{O_2} от Z рассчитывается из условия для языка пламени - $Y_F Y_{O_2} = 0$. Здесь, Y_F^∞ относительная доля массы горючего в потоке реакции,

$Y_{O_2}^\infty$ доля массы кислорода в окружающей атмосфере, а r_{O_2} определено в уравнении (15). Если горючее и кислород в стехиометрических пропорциях, то $r_{O_2} Y_F = Y_{O_2}$ и каждый из них полностью расходуется в химической реакции, где:

$$Z = Z_{st} = Y_{O_2}^\infty / (r_{O_2} Y_F^\infty + Y_{O_2}^\infty) \quad (24)$$

расположение языка пламени или зоны горения.

Химическая реакция в данной модели горения происходит только как результат смешивания топлива и кислорода в стехиометрических пропорциях и не зависит от температуры. В реальности химические реакции зависят от температуры. Однако, используемые здесь вычислительные сетки слишком неточны ($\mathcal{O}(1 \text{ m})$), чтобы рассчитать зону горения ($\mathcal{O}(1 \text{ mm})$). Таким образом, при моделировании стихийных пожаров, тепло, высвобождаемое в процессе горения помещается в объемы вычислительной клетки, которые намного больше, чем объемы, фактически встречающиеся в зонах горения. По этой причине невозможно рассчитать температуру пламени и использовать напрямую модели реакции типа Аррениуса, в которых требуется разрешенное температурное поле. Альтернатива представлена ниже.

Объединяя уравнение сохранения Y_F и Y_{O_2} , согласно уравнениям (23) и (15), получаем уравнение сохранения Z :

$$\frac{\partial \rho Z}{\partial t} + u \cdot \nabla(\rho Z) = -\rho Z \nabla \cdot u + \nabla \cdot \{(\rho D)_{LES} \nabla Z\} \quad (25)$$

Зависимость Y_{CO_2} и Y_{H_2O} от Z может быть рассчитана при помощи уравнения (15) и учета нулевых граничных условий (при $Z = 0,1$).

Величина дивергенции:

$$\nabla \cdot u = \frac{1}{\rho c_p T} (\nabla \cdot (\lambda_{LES} \nabla T) + \sum_i Y_i' c_{p,i} \nabla \cdot \{T \rho D \nabla Z\} - \nabla \cdot \dot{q}_r'' + \dot{Q}_c'''), \quad (26)$$

где для определения \dot{Q}_c''' используется уравнение (16). В контексте модели горения доли смеси, условие расхода массы топлива:

$$\dot{m}_F''' = Y_F' \nabla \cdot (\rho D \nabla Z) - \nabla \cdot (Y_F' \rho D \nabla Z) = -Y_F'' \rho D |\nabla Z|^2 \quad (27)$$

Трудность численной реализации данного выражения заключается в том, что производная $Y'_F = dY_F/dZ$ имеет разрывы. Вместо этого выражения используется выражение для расхода массы на единицу площади языка пламени, которое можно получить с помощью линейного интеграла для факела пламени. Например, для кислорода:

$$\dot{m}''_{O_2} = -Y'_{O_2} \Big|_{Z \leq Z_{st}} (\rho D |\nabla Z|) \Big|_{Z=Z_{st}} = \frac{(vM)_{O_2}}{(vM)_F} \dot{m}''_F, \quad (28)$$

что означает, исходя из уравнения (16), локальное высвобождение химического тепла на единицу площади факела пламени равно:

$$\dot{Q}''_c = -\Delta h_c \frac{(vM)_F}{(vM)_{O_2}} Y'_0 \Big|_{Z \leq Z_{st}} (\rho D |\nabla Z|) \Big|_{Z=Z_{st}} \quad (29)$$

Это выражение используется, чтобы определить \dot{Q}'''_c в точках, соответствующих языку пламени. Значение теплоты сгорания на один килограмм газообразного топлива равно $\Delta h_c = 15600$ КДж/кг. Данное значение является характерным для ряда трав, изученных в работах [115,153].

Значение уравнения (29) для факела пламени соответствует суммарному теплу, высвобождающемуся в ходе полного сгорания горючего газа, возникшего в ходе пиролиза (т.е. поднимающегося с горючей подстилки) [126]. Это очень важное ограничение обеспечивает то, что конвективное и излучающее тепло, переносимое к растительному топливу и к окружающим, насыщенным сажей газам, последовательно связывается с пиролизом твердого топлива. Предположение о полном сгорании горючих газов верно, только если в объеме, окружающем пожар, имеется достаточное количество кислорода. Для факела пламени в неограниченных пространствах данное предположение является адекватным. Подобные рассуждения требуются для анализа процесса излучения, что рассмотрено ниже.

Перенос теплового излучения

Уравнение переноса излучения (УПИ) для абсорбирующего-эмитирующего нерассеянного газа имеет вид:

$$\hat{s} \cdot \nabla I_\lambda(x, \hat{s}) = k_\lambda(x) [I_{b,\lambda}(x) - I_\lambda(x, \hat{s})]. \quad (30)$$

Зависимость интенсивности, I , от длины волны излучения λ , вызвано спектральной зависимостью коэффициента абсорбции k_λ . Однако пламя при горении растительных материалов содержит много частиц сажи. Поскольку спектр излучения сажи непрерывен, предполагается, что газ ведет себя как спектрально независимая или «серая» среда. Это приводит к значительному упрощению расчетов. Спектральная зависимость, таким образом, включается в единый коэффициент абсорбции, k_λ , и условие эмиссии соответствует интенсивностью излучения черного тела:

$$I_b(x) = \sigma T^4(x) / \pi \quad (31)$$

Перед началом моделирования рассчитывают таблицу, содержащую значения k как функцию количества смеси и температуры данной смеси вовлеченных видов газа (H_2O, CO_2) и частиц сажи. Модель динамики количества сажи не используется. Вместо этого, создавшаяся в отдельной точке масса сажи рассматривается как фракция χ_s , массы горючего газа, сжигаемого в процессе горения. В WFDS-PB используется $\chi_s = 0.002$. Значения χ_s для пихты *Douglas Pine* колеблются от диапазона от менее, чем 0.01 до 0.025, в зависимости от условий воспламенения.

Интегрирование спектрально независимой формы уравнения (30) для всех пространственных углов дает уравнение сохранения энергии излучения,

$$\nabla \cdot \dot{q}_r''(x) = k(x) [4\pi I_b(x) - U(x)], \quad (32)$$

где U интегральная интенсивность излучения. Это уравнение подтверждает, что общая энергия излучения, потерянная в единице объема за единицу времени, является разницей между выделенной и поглощенной энергией излучения. Дивергенция потока излучения в уравнении (32) требуется для уравнения энергии

(11) и для вычисления дивергенции скорости, которое используется в процедуре численного решения уравнения (26).

Как было указано выше, пространственное разрешение при моделировании лесных пожаров крупных масштабов в WFDS, недостаточно для определения области горения. В результате локальные температуры газов в узлах вычислительной сетки в области пламени значительно ниже, чем фактические температуры пламени. Это требует специальной обработки элемента эмиссии излучения kI_b в области пламени, поскольку он зависит от четвертой степени локальной температуры. В областях, где температура ниже и пространственные градиенты не настолько ниже предсказанных, числовые значения температур более реалистичны. По этой причине, модель эмиссии равна:

$$kI_b = \begin{cases} \frac{k\sigma T^4}{\pi}, & \text{за пределами области пламени,} \\ \chi_r \dot{Q}_c''', & \text{в пределах области пламени} \end{cases} \quad (33)$$

где χ_r - количество высвобождения химического тепла на единицу объема, которое излучается в объем, окружающий область пламени. Заметим, что часть этого излучения поглотится окружающей сажой. В результате, для всего пожара количество высвобожденного при реакции горения тепла, излученного в область за пределами языка дыма, будет меньше значения в расчетной точке. При горении углеводородов локальное значение $\chi_r \cong 0.30$ до 0.35 , тогда как глобальное значение меньше 0.1 . Для древесной растительности $\chi_r \cong 0.20$ до 0.40 . Для моделирования используется значение $\chi_r \cong 0.35$.

В ранней реализации данной модели использовалась формула аппроксимации P1 для уравнения переноса излучения [89]. Аппроксимация P1 была также использована в работах [143] на первых этапах двумерной модели огня, распространяющегося по подстилке сосновых иголок, а так же А.М. Гришиным [18]. Аппроксимация P1 является точной, только в случае, если коэффициент поглощения газов достаточно высок. Однако эта аппроксимация в общем случае не приемлема, поскольку перенос излучения через оптически тонкий слой воздуха к растительному

горючему составляет значительную часть теплового потока к растительности перед фронтом огня. По этой причине в нашей модели используется метод конечного объема, основанный на методе исследования [144] для определения излучения «серого» газа (уравнение (30)). Это занимает примерно 20% процессорного времени вычислений. Пространственная дискретизация УПИ аналогична применяемой в других уравнениях баланса газовой фазы. Детали реализации этого подхода, включая граничные условия для открытых и неподвижных границ, представлены в работе [126].

Набор уравнений баланса в газовой фазы, применяемых при моделировании, состоит из уравнения баланса суммарной массы (1), импульса силы (2), фракции смеси (25), дивергенции скорости (26). Уравнение состояния (10) используется для расчета температурного поля. Кроме того, уравнение поля давления, получаемое взятием дивергенции уравнения импульса силы, решается при помощи прямых вычислений.

Подход к моделированию твердого горючего

Сгорание растительного горючего, подвергнувшегося воздействию достаточно высокотемпературного потока тепла, является сложным процессом, состоящим из двух этапов: испарения влаги и пиролиза твердого вещества. В процессе пиролиза при химическом распаде происходит образование золы и летучих веществ, которые преобразуются из твердого топлива в окружающий газ. Описанные выше процессы эндотермические. Экзотермический процесс окисления золы происходит в случае, если на достаточно горячей поверхности золы имеется кислород. Если воспламеняемые летучие вещества пиролиза смешиваются с достаточным количеством кислорода окружающей среды при достаточно высокой температуре, происходит возгорание. Как упоминалось в предыдущем разделе, используемая здесь модель горения допускает, что возгорание происходит, когда газ и кислород смешиваются в стехиометрической пропорции, независимо от температуры газа.

В настоящее время разработано множество моделей переноса тепла и массы и динамики химического распада древесины, подвергшейся воздействию интенсивного теплового потока. Большинство этих моделей рассматривают одномерные массивы древесины при аппроксимации анизотропии древесного материала, содержания влаги, структуры древесины, термодинамики, переноса массы и химической динамики пиролиза и окисления золы. Позднее использовались трехмерные модели, например, в работе [163]. Также разработаны многочисленные термически тонкие модели пиролиза целлюлозы и последующего распространения пламени [128, 143].

Во всех приведенных выше моделях либо задавался внешний тепловой поток, либо пламя моделировалось на достаточно детальной вычислительной сетке и точно определялась структура/температура пламени. В подходе моделирования, описываемого здесь, предполагается, что травяная горючая подстилка состоит из равномерно распределенных, нерассеянных, идеально абсорбирующих, термически тонких частиц горючего плотностью ρ_s и с соотношением площади поверхности к объему σ_s . Предположение о термически тонком горючем обычно используется в моделях пожара с использованием тонкого горючего дикой природы (травы и листья кустарника и деревьев) [148]. Заметим, что излучающая способность, равная 0.9, характерна для дикорастущей растительности. Таким образом, предположение о том, что элемент лесного горючего является отличным абсорбером теплового излучения, является адекватным. Объемная плотность горючей подстилки ρ_{sb} , доля объема горючей подстилки, занятого частицами топлива или коэффициент уплотнения $\beta = \rho_{sb}/\rho_s$. Уравнение выделения тепла твердым горючим в растительной подстилке с этими свойствами согласно работе [139] имеет вид:

$$\beta_s \rho_s c_{p,s} \frac{\partial}{\partial t} T_s(x, y, z, t) = -\nabla \cdot q''_{sr} - \nabla \cdot \dot{q}''_{sc} - \dot{Q}'''_{s,vap} - \dot{Q}'''_{s,kin} \quad (34)$$

где $\nabla \cdot q''_{sr}$ и $\nabla \cdot \dot{q}''_{sc}$ — дивергенции теплового излучения (спектрально интегрированного) и потока проводимого тепла на компонентах твердого горючего в пределах объема горючей подстилки соответственно; $\dot{Q}'''_{s,vap}$ — эндотермический

эффект испарения влаги; $\dot{Q}_{s,kin}'''$ - поступление тепла (эндотермического и экзотермического), связанного с термической деградацией твердого тела (например, пиролизом, окислением золы); $c_{p,s}$ - удельная теплота частицы топлива, которая может содержать влагу. Это уравнение без учета $\dot{Q}_{s,kin}'''$ также использовалось в работах Albinì [81,82].

Излучающий тепловой поток также можно найти, решая уравнение переноса излучаемого тепла (30) (либо его аппроксимацию, что произведено ниже) в горючей подстилке. Для этого нужно вычислить коэффициент абсорбции, k_s объема горючей подстилки, который может быть соотнесен с полевыми измерениями среднего соотношения площади поверхности к объему и коэффициентом уплотнения частиц топлива:

$$k_s = \frac{1}{4} \beta_s \sigma_s = \frac{1}{4} \frac{w_s \sigma_s}{\rho_s h_s} \quad (35)$$

где w_s – запас горючего подстилки; h_s – глубина слоя подстилки.

Это выражение для коэффициента абсорбции использовалось в других моделях распространения огня [81,82,102, 135, 139] и экспериментально подтверждено для растительных видов горючего

Член общего кондуктивного теплового потока в уравнении (34) аппроксимирован объемно-усредненной суммой локального поверхностного потока отдельных частиц горючего. Для объема V , содержащего N_p частиц горючих материалов:

$$\nabla \cdot \dot{q}_{sc}'' \cong \frac{\sum_{i=1}^N \int \dot{q}_{sc,p}'' \cdot \hat{n} dS_{p,i}}{V} \cong \frac{\dot{q}_{sc,p}'' N_p S_p}{V} = \frac{N_p S_p}{N_p V_p} \frac{N_p V_p}{V} \dot{q}_{sc,p}'' = \sigma_s \beta_s \dot{q}_{sc,p}'' \quad (36)$$

где S_p — площадь поверхности; V_p — объем; $\dot{q}_{sc,p}''$ — общий поверхностный кондуктивный тепловой поток, связанный с частицей горючего.

В модели кондуктивный тепловой поток считается однородным по всей поверхности частицы горючего, что соответствует предположению о том, что частица термически тонкая и окружена газом с постоянной температурой T_g .

В работе [82] для прогноза переноса тепла в двумерных растительных горючих подстилках использовались модели уравнений (34), (35) и (36), чтобы получить стабильные скорости распространения огня ($\dot{Q}_{s,kin}''' \equiv 0$). Эти уравнения наряду с моделью теплового излучения (используемые для определения $\dot{Q}_{s,kin}'''$) также использовались в двухмерной модели в исследовании [139] и более ранних работах этих ученых. В работе [139] основное уравнение для твердого горючего и газовой фазы вычисляется на одной и той же вычислительной сетке с размером ячейки 10 мм в зоне пиролиза. В настоящей работе, поскольку ячейка газовой фазы равна порядка 1 метра, собственная вычислительная регулярная сетка создана для горючей подстилки. С помощью этой сетки решается уравнение (34). Взаимодействие теплового потока и потока массы газовой и растительной вычислительных сеток происходит на границе газа/растительности $(x_{\Gamma}, y_{\Gamma}, 0)$ в координатах газовой фазы. Предполагается, что температура твердого горючего в растительной подстилке зависит только от вертикальной координаты, $T_s(x_s, y_s, z_s, t) = T_s(x_{\Gamma}, y_{\Gamma}, z_s, t)$ ниже каждой клетки вычислительной сетки вдоль границы газ/растительность. Разрешение сетки, используемой для растительности $\Delta z_s \leq (3k_s)^{-1}$, основано на оптической глубине горючей подстилки k_s^{-1} . Изначально количество слоев горючей подстилки определяется по формуле $N_L = h_s \Delta z_s^{-1}$. Предполагается, что горючая подстилка сгорает сверху вниз, и количество слоев со временем уменьшается. Следует отметить, что в ходе полевых исследований выявлен тот факт, что горение сверху вниз более характерно для верховых пожаров, которые распространяются с в направлении ветра окружающей среды, в отличие от пожаров, который распространяются или против ветра (встречный пожар) или поперек ветра (боковой пожар). Стоит так же отметить, что по данным исследований Н.П. Курбатского при верховых пожарах эти процессы происходят наоборот: низовой пожар поджигает кроны деревьев, что особенно характерно в сосновых молодняках.

По мере того, как горючее выгорает, член в квадратных скобках уравнения (5) уменьшается по величине (т.е. уменьшается влияние сопротивления).

Предполагается, что излучение в пределах горючей подстилки спектрально независимо и проходит только в двух направлениях: вниз или вверх. Обычно это называется передне-обратной (прогрессивно-реверсивной) моделью переноса излучения [128]. Поток излучения по направлению к горючей подстилке усиливается нисходящим потоком излучения пламени, возникающем над горючей подстилкой ($\dot{q}_{sr,i}''^-$), и потоком излучения локальной самоэмиссии (интегралы в уравнении (37) ниже). Исходя из этих предположений, общий поток излучения на безразмерном расстоянии $\eta_s = k_s z_s$ с верха горючей подстилки:

$$\begin{aligned} \dot{q}_{sr}''(\eta_s) &= \dot{q}_r''^+ + \dot{q}_r''^- = \\ &= \dot{q}_{sr,i}''^+ \exp(-[\eta_s, h - \eta_s]) + \sigma \int_{\eta_s}^{\eta_{s,h}} T_s^4 \exp(-[\eta'_s - \eta_s]) d\eta'_s \\ &\quad - \dot{q}_{sr,i}''^- \exp(-\eta_s) - \sigma \int_0^{\eta_s} T_s^4 \exp(-[\eta'_s - \eta_s]) d\eta'_s \end{aligned} \quad (37)$$

где $\eta_{s,h} = k_s h_s$. Предполагается, что поток излучения на нижней границе горючей подстилки равен нулю (это определяет $\dot{q}_{sr,i}''^+$). Аналогичное предположение было использовано в работе [82] для огня, распространяющегося через поверхностные слои горючего там, где нижней границей является почва. При вычислении переноса излучения в газовой фазе получим $\dot{q}_{sr,i}''^-$.

С упомянутыми выше допущениями при интегрировании уравнения (34) в контрольном объеме $dx_\Gamma dy_\Gamma dz_\Gamma$, с центром в точке $z_{s,n}$, n -я ячейка в вычислительной сетке твердого горючего равна:

$$\begin{aligned} \left[m_s'' c_{p,s} \frac{\partial T_s}{\partial t} \right]_n &= -[\dot{q}_{sr}''(\eta_s^+) \cdot \hat{n}^+ + \dot{q}_{sr}''(\eta_s^-) \cdot \hat{n}^-]_n - [\sigma_s \beta_s \dot{q}_{sc,p}'' + \dot{Q}_{s,vap}'' + \\ &\quad + \dot{Q}_{s,kin}'']_n \Delta z_s = [\dot{q}_{s,net}'']_n - [\dot{Q}_{s,vap}'' + \dot{Q}_{s,kin}'']_n \Delta z_s \end{aligned} \quad (38)$$

где

$$\begin{aligned} [\dot{q}_{s,net}'']_n &= -\dot{q}_{sr}''(\eta_{s,n}^+) \cdot \hat{n}^+ - \dot{q}_{sr}''(\eta_{s,n}^-) \cdot \hat{n}^- - \sigma_s \beta_s \dot{q}_{sc,p}'' \Delta z_s = \\ &= \dot{q}_{sr,net,n}'' + \dot{q}_{sc,net,n}'' \end{aligned} \quad (39)$$

и является потоком излучения, воздействующим на общую массу твердого горючего; $\eta_{s,n}^-$ и $\eta_{s,n}^+$ являются местами нахождения верхней и нижней горизонтальных поверхностей, соответственно n -ой клетки сетки; а \hat{n}^+, \hat{n}^- - являются наружными нормальными векторами этих поверхностей. Остальные величины являются центрированными. Правая часть уравнения (38) является скоростью, при которой тепловая энергия сохраняется в контрольном объеме, а поглотители тепла и источники, связанные с испарением и тепловой деструкцией считаются постоянными по всему объему ячейки. Как правило, масса твердого топлива на единицу площади в ячейке сетки n , $[m_s'']_n$ равна сумме массы сухого топлива растительности и влаги $m_s'' = m_{s,v}'' + m_{s,m}''$. Изначально, $[m_{s,v}''(t=0)]_n = w_s \Delta z_s / h_s$ и $[m_{s,m}''(t=0)]_n = M [m_{s,v}''(t=0)]_n$, где M - влагосодержание. M равно отношению массы исходного количества влаги в частице горючего к массе частицы в сухом виде. Удельная теплоемкость частицы горючего определяется количеством влаги и массой растительности [143]:

$$c_{p,s} = \frac{m_{s,v}'' c_{p,v} + m_{s,m}'' c_{p,m}}{m_s''} \quad (40)$$

Кондуктивный поверхностный тепловой поток к частице горючего $\dot{q}_{sc,p}''$ в уравнении (39) вычисляется с использованием конвективного коэффициента переноса тепла h_c вертикального цилиндра и равен:

$$\dot{q}_{sc,p}'' = h_c (T_s - T_g), \quad h_c = 1.42 (|T_s - T_g| / \Delta z_s)^{1/4} \quad (41)$$

где T_g — температура на дне ячейки решетки газовой фазы, граничащей с горючей подстилкой;

Δz_s — длина цилиндра в n -м слое горючего.

Решение уравнения теплового баланса (38) горючей подстилки решается, исходя из двух этапов эндотермического процесса разложения (испарение воды с последующим пиролизом твердого горючего материала). На этом этапе окисление золы в модели не учитывается и $\dot{Q}_{s,kin}''' = \dot{Q}_{s,pyr}'''$. В данном слое природное горючее

высыхает и подвергается пиролизу, до тех пор, пока оставшаяся твердая масса не будет равной $\chi_{\text{char}} w_s / N_L$, где χ_{char} — относительное количество золы твердого горючего, N_L — начальное количество уровней модели горючего. Массовая доля золы χ_{char} определялась на основе расчетов травяного горючего в работе [153].

Модель испарения влаги аналогична другим моделям [81 102, 139]. Температура горючей растительной подстилки определяется из уравнения (38). Как только T_s достигает температуры кипения — T_b , предполагается, что для высыхания нужно все имеющееся в наличии тепло, чтобы $T_s = T_b$ пока вся влага не испарится. Учитывая эти условия, модель высыхания горючего имеет вид:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{s,\text{vap}}''' &= \frac{\dot{m}_{s,m}'' \Delta h_{\text{vap}}}{\Delta z_s}, \\ \dot{m}_{s,m}'' &= \begin{cases} 0, & T_s < T_b, \\ \frac{\dot{q}_{s,\text{net}}''}{\Delta h_{\text{vap}}}, & T_s = T_b, \dot{m}_{s,m}'' > 0, \dot{q}_{s,\text{net}}'' > 0 \end{cases} \\ \dot{Q}_{s,\text{pyr}}''' &= 0 \end{aligned} \quad (42)$$

После того, как вся влага испарилась, температура горючей подстилки может меняться в соответствии с уравнением (38), где $\dot{m}_{s,m}'' = 0$. T_s продолжает расти вместе с ростом суммарного теплового потока, постепенно достигая значения $T_s = T_{\text{pyr}}$, при котором начинается пиролиз и $\dot{Q}_{s,\text{pyr}}''' \neq 0$.

В моделях [81] и [102] учитывается поток исходящего теплового излучения, что позволяет определять установившуюся скорость пожара на основе разности времени ($T_{\text{pyr}} - T_s$). Однако в нашем случае компьютерное моделирование касается зависимость от времени теплового потока, основанного на поведении моделируемого огня, который влияет на пиролиз твердого горючего и определяет $\dot{m}_{s,\text{pyr}}''$, скорость, при которой возникает горючий газ. Методы физического компьютерного моделирования [143] распространения огня растительных видов горючего, в которых с высокой точностью рассчитывается пламя газовой фазы, используют температурно-зависимую кинетику Аррениуса для расчета пиролиза и окисления золы. Позднее в работе [139] было обнаружено, что точность простого расчета

скорости потери массы при температурно-зависимом пиролизе была такой же, как и при расчетах, использующих более сложное выражение Аррениуса. Примененная в данной работе модель теплового разложения твердого горючего использует температурно-зависимую скорость потери массы, представленную в работе [139]. Эта модель пиролиза была основана на термогравиметрическом анализе ряда видов растительности [129]. Поскольку окисление золы не моделируется, тление или догорание углей в траве после прохождения фронта огня не вычисляется. Таким образом, модель пиролиза разложения [139] имеет вид:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{s,\text{vap}}''' &= 0, \\ \dot{Q}_{s,\text{pyr}}''' &= \frac{\dot{m}_{s,\text{pyr}}'' \Delta h_{\text{pyr}}}{\Delta z_s} \\ \dot{m}_{s,\text{pyr}}'' &= \begin{cases} 0, & T_s < 127 \text{ C}, \\ \frac{\dot{q}_{s,\text{net}}''}{\Delta h_{\text{pyr}}} \frac{T_s - 127}{100}, & 127 \text{ C} \leq T_s \leq 227 \text{ C}, \dot{q}_{s,\text{net}}'' > 0, \dot{m}_s'' > \chi_{\text{char}} w_s \end{cases} \quad (43) \end{aligned}$$

Согласно [139] тепловое излучение пиролиза Δh_{pyr} равно $\Delta h_{\text{pyr}} = 416$ кДж/кг. Когда потеря массы в n -й ячейки твердой фазы такова, что $\dot{m}_{s,n}'' = \chi_{\text{char}} w_s / N_L = \dot{m}_{\text{char},n}'''$, то принимается, что горючее в этом слое сгорело и удаляется из модели твердого горючего.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Код	Наименование горючего материала (комплекса горючих материалов)	Кате- гория ЛГМ <i>i</i>	Номер раз- мерной группы <i>j</i>	Теплофизические параметры						Глубина слоя δ , м
				ω_{ij} кг/м ²	δ_{ij} м ⁻¹	ρ_{ij} кг/м ³	h_{ij} КДж/кг	s_{Tij}	s_{eij}	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
01	Лишайник	1	1	0,7	3000	300	17900	0,025	0,02	0,12
02	Зеленый мох	1	1	0,5	3500	300	19400	0,036	0,03	0,1
03	Опад хвои сосны	1	1	0,3	6000	510	21500	0,05	0,01	0,06
04	Ветошь вейника	1	1	0,6	2000	240	17700	0,05	0,01	0,5
05	Опад листьев	1	1	0,6	8500	510	19845	0,01	0,005	0,05
06	Опад сучьев и веточек диаметром до 7мм	1	1	0,2	200	510	18500	0,05	0,01	0,05
07	Сучья и валежник диаметром 8- 20мм	1	1	0,4	100	510	18500	0,1	0,01	0,3
08	Зеленые травы, листья подлеска	2	1	0,15	4500	510	17700	0,05	0,01	0,3
09	Опад и нижний ярус в сосняке голубичном 7С2Л1Б +0Сб 100 лет	1	1	0,57	4000	400	20100	0,03	0,02	0,3
			2	1,00	6000	510	18400	0,05	0,01	
			3	0,22	100	510	18400	0,05	0,01	
			4	1,7	50	510	18400	0,05	0,01	
		2	1	0,18	4900	510	18400	0,05	0,01	
10	Опад и нижний ярус в сосняке брусничнике 7С2Л1Б, 100 лет	1	1	0,9	4000	400	20100	0,03	0,02	0,3
			2	1,95	6000	510	18400	0,05	0,01	
			3	0,7	100	510	18400	0,05	0,01	
			4	3,7	50	510	18400	0,05	0,01	
		2	1	0,21	4900	510	18400	0,05	0,01	
11	Опад и нижний ярус в сосновом молодняке по гари С,Л,0	1	1	0,85	4000	400	20100	0,03	0,02	0,7
			2	0,8	6000	510	18400	0,05	0,01	
			3	0,4	2000	240	17700	0,05	0,01	
			4	4,4	50	510	18400	0,05	0,01	
		2	1	0,38	4900	510	18400	0,05	0,01	
12	Трава и нижний ярус леса	1	1	0,45	9800	510	18500	0,05	0,01	0,3
			2	0,22	360	510	18500	0,05	0,01	
			3	0,11	100	510	18500	0,05	0,01	
		2	1	0,11	4900	510	18400	0,05	0,01	
13	Опад и нижний ярус в лиственном	1	1	0,67	6500	510	18500	0,05	0,01	0,3
			2	0,45	360	510	18500	0,05	0,01	
			3	0,12	100	510	18500	0,05	0,01	

	лесу	2	1	0,45	4900	510	18400	0,05	0,01	
14	Опад в сосняке	1	1	0,33	6500	510	21500	0,05	0,01	0,12
			2	0,22	360	510	18500	0,05	0,01	
			3	0,5	100	510	18500	0,05	0,01	
15	Порубочные остатки	1	1	0,9	4900	510	18500	0,05	0,01	0,7
			2	3,1	360	510	18500	0,05	0,01	
			3	3,7	100	510	18500	0,05	0,01	
			4	4,0	50	510	18500	0,05	0,01	

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

УТВЕРЖДАЮ
 Первый проректор
 – проректор по научной работе
 ФБГОУ ВО
 «Сибирский государственный технологический университет»
 д.т.н. проф. Субоч Г.А.
 2015 г.



АКТ


**о внедрении результатов диссертационной работы
 П.С. Шаталова на тему: «Система поддержки принятия решений
 по управлению природными пожарами с использованием
 высокопроизводительных вычислительных систем и данных
 космического мониторинга» по специальности 05.13.01 – Системный
 анализ, управление и обработка информации в образовательный
 процесс ФБГОУ ВО «Сибирский государственный технологический
 университет»**

Комиссия в составе:

Декана факультета автоматизации и информационных технологий
 к.т.н проф. Иваниловой,
 Заведующего кафедрой системотехники д.т.н. профессора
 Доррера Г.А.,
 Заведующей кафедрой информационных технологий к.т.н. доц.
 Гриценко Е.М.

настоящим документом подтверждает, что результаты диссертационной работы П.С. Шаталова на тему: «Система поддержки принятия решений по управлению природными пожарами с использованием высокопроизводительных вычислительных систем и данных космического мониторинга» используются в Сибирском государственном технологическом университете при преподавании дисциплины «Вычислительная математика» студентам направления подготовки бакалавров 09.04.01 Информатика и вычислительная техника, 09.04.02 Информационные системы и технологии, 09.04.04 Программная инженерия.

Члены комиссии:

 к.т.н. проф. Т.Н. Иванилова
 _____ д.т.н. проф. Г.А. Доррер
 _____ к.т.н. доц. Е.М. Гриценко

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

УТВЕРЖДАЮ
ВрИД начальника
ФГБОУ ВО Сибирская
пожарно-спасательная
академия ГПС МЧС России
полковник внутренней службы



А.А. Мельник

« 31 » 08 2015 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы П.С. Шаталова на тему: «Система поддержки принятия решений по управлению природными пожарами с использованием высокопроизводительных вычислительных систем и данных космического мониторинга» по специальности 05.13.01 - Системный анализ, управление и обработка информации

в образовательный процесс ФГБОУ ВО Сибирской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России.

Комиссия в составе:

заместителя начальника ФГБОУ ВО Сибирской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России по учебной работе, кандидата технических наук, Елфимовой Марины Владимировны;

начальника отдела информационного обеспечения населения и технологий информационной поддержки РСЧС и пожарной безопасности ФГБОУ ВО Сибирской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России, кандидата технических наук Васильева Сергея Александровича;

начальника отдела планирования, организации и координации научно-исследовательской деятельности ФГБОУ ВО Сибирской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России, кандидата технических наук Батуро Алексея Николаевича;

начальника кафедры тактики и аварийно-спасательных работ ФГБОУ ВО Сибирской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России кандидата педагогических наук, Домаева Евгения Владимировича;

настоящим подтверждает, что результаты диссертационной работы Шаталова Павла Сергеевича «Система поддержки принятия решений по управлению природными пожарами с использованием высокопроизводительных вычислительных систем и данных космического мониторинга» внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО Сибирской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России, при изучении обучающимися факультета инженеров пожарной безопасности, дисциплины «Пожарная тактика» – использовано программное обеспечение для оперативного прогнозирования динамики природных пожаров в учебных целях.

Члены комиссии:



кандидат технических наук,
М.В. Елфимова



кандидат технических наук,
С.А. Васильев



кандидат технических наук,
А.Н. Батуро



кандидат педагогических наук,
Е.В. Домаев

« _____ » _____ 2015 г.

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

1

ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
«ТЕХНОЛОГИИ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА»

Утверждаю:
Генеральный директор

Л.И.Парадовская



УДК 551.509.68

Отчет по теме

«Разработка математических моделей, алгоритмов и программного обеспечения для прогнозирования и расчета параметров крупных и катастрофических природных пожаров на территории Российской Федерации»,

выполненной в рамках проекта 1.6 по программе фундаментальных исследований Президиума РАН № 18
«Алгоритмы и математическое обеспечение для вычислительных систем сверхвысокой производительности»

Москва, 2014

Список исполнителей

д.т.н., профессор, зав. кафедрой системотехники
СибГТУ

Г.А. Доррер

к.т.н., с.н.с. НИОКР Сибирского института пожарной
безопасности – филиала Санкт-Петербургского
университета ГПС МЧС России

В. С. Коморовский

аспирант кафедры системотехники СибГТУ

П.С. Шаталов

аспирант кафедры системотехники СибГТУ

С.А. Яровой

аспирант кафедры системотехники СибГТУ

И.А. Буслов

Реферат

Отчет 36 стр. Состоит из введения, четырех разделов и заключения. Список литературы содержит 13 источников, 4 табл., 27 рис.

Ключевые слова: лесные пожары, высокопроизводительные вычислительные системы, гибридные математические модели, характеристики растительного горючего, обучающая программа-тренажер.

Цель работы: оказание информационных услуг по созданию эффективных технологий, методов и алгоритмов распределенного моделирования динамических параметров крупных и катастрофических природных пожаров в рамках 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»

Работа ведется с 2012 года.

В 2014 году в соответствии с техническим заданием были получены следующие результаты.

1. Разработан метод построения моделей динамики лесных пожаров оперативного назначения на основе обработки результатов компьютерного моделирования в системе WFDS с использованием кластерных вычислительных систем, что позволяет повысить точность моделирования и сократить вычислительную сложность.
2. Впервые путем численного моделирования с помощью системы WFDS исследовано 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 Вильям Мелл (W. Mell).
3. Создана гибридная модель WFDS-LS, учитывающая эффект турбулентности локальных воздушных потоков перед фронтом пожара при тепловыделении на горящей кромке пожара, позволяющая повысить точность экспериментальных моделей при сохранении их достаточного быстрого действия.
4. Предложена методика оценки параметров лесных горючих материалов по данным таксационного описания лесных участков, что позволило привязать систему WFDS к отечественной системе лесоустройства.

4

5. Для моделирования крупных природных пожаров предложена модель растительного горючего как тонкого слоя на поверхности Земли, характеристики которого оцениваются на основе космических снимков лесных территорий.
6. Создан алгоритм получения входных данных об инфраструктуре местности для системы WFDS на основе обработки космических снимков.
7. Разработан имитационно-тренажерный комплекс «Тайга-3», предназначенный для обучения персонала природоохранных и противопожарных служб.