

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

А.И. Фильков

**ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ
ВОЗНИКНОВЕНИЯ
ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ**

Томск
Издательский Дом Томского государственного университета
2014

УДК 510.6:614.87:004.94

ББК 22

Ф57

Фильков А.И.

Ф57 Физико-математическое моделирование возникновения природных пожаров. – Томск : Издательский Дом Томского государственного университета, 2014. – 276 с.

ISBN 978-5-94621-456-8

В работе рассматривается новый теоретико-экспериментальный подход к оценке вероятности возникновения природных пожаров с использованием как детерминированных методов механики сплошных многофазных сред, так и методов теории вероятностей и математической статистики. Приводятся результаты проведения экспериментальных исследований кинетики сушки горючих материалов, а также особенностей возникновения и распространения природных пожаров.

Для специалистов, научных работников, аспирантов и студентов, работающих и обучающихся в области прогнозирования и мониторинга природных катастроф.

УДК 510.6:614.87:004.94

ББК 22

Рецензенты:

В.А. Перминов, профессор кафедры экологии и безопасности жизнедеятельности Национального исследовательского Томского политехнического университета, доктор физико-математических наук;

В.С. Коморовский, старший научный сотрудник информационных технологий и компьютерного моделирования Центра НИОКР Сибирской пожарно-спасательной академии – филиала Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России, кандидат технических наук, старший лейтенант внутренней службы

Издано при частичной финансовой поддержке государственного задания в сфере научной деятельности № 1624 и стипендии Президента РФ № СП–3968.2013.1.

ISBN 978-5-94621-456-8 © Фильков А.И., 2014

© Томский государственный университет, 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ	7
ВВЕДЕНИЕ	8
ГЛАВА 1. Обзор работ, посвященных методикам прогноза возникновения и распространения природных пожаров и их особенностям	15
1.1. Методики прогноза лесной пожарной опасности	15
1.1.1. Зарубежные методики прогноза лесной пожарной опасности	15
1.1.2. Отечественные методики прогноза лесной пожарной опасности	21
1.1.3. Влияние природных и антропогенных факторов на возникновение лесных пожаров и их прогноз	29
1.2. Методики прогноза торфяной пожарной опасности	39
1.2.1. Общие сведения о торфе и классификация торфяных пожаров	39
1.2.2. Факторы, определяющие развитие пожаров на торфяных месторождениях	45
1.2.3. Вероятность воспламенения органических почв	50
1.2.4. Показатели торфяной пожарной опасности и методы их оценки	59
1.2.5. Математическое моделирование сушки слоя почвы и торфа	70
1.3. Кинетические исследования природных горючих материалов	72
1.3.1. Кинетические исследования торфа	72
1.3.2. Кинетические исследования лесных горючих материалов	82
1.4. Работы, посвященные разработке общих методов прогноза катастроф	84
1.5. Выводы	95
ГЛАВА 2. ДЕТЕРМИНИРОВАННО-ВЕРОЯТНОСТНАЯ МЕТОДИКА ПРОГНОЗА ЛЕСНОЙ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ	97

2.1. Разработка новой методики прогноза лесной пожарной опасности	97
2.2. Упрощенная математическая модель низкотемпературной сушки слоя растительных горючих материалов	104
2.3. Аналитическое решение задачи	112
2.4. Упрощенное аналитическое решение для определения времени лесопожарного созревания лесов	115
2.5. Результаты численного решения задачи и их анализ	116
2.6. Проверка методики прогноза лесной пожарной опасности путем ретроспективного анализа результатов наблюдений пожаров в Тимирязевском лесхозе	119
2.7. Выводы	125

ГЛАВА 3. ДЕТЕРМИНИРОВАННО-ВЕРОЯТНОСТНАЯ СИСТЕМА ПРОГНОЗА ТОРФЯНОЙ ПОЖАРНОЙ

ОПАСНОСТИ	126
3.1. Методика прогноза торфяной пожарной опасности	126
3.1.1. Свойства торфа и причины возгорания	126
3.1.2. Математическая модель прогноза пожаров на торфяниках	128
3.2. Математическая модель низкотемпературной сушки слоя торфа	132
3.3. Математическая модель расчета падающего солнечного излучения	143
3.4. Тестирование новой системы прогноза пожарной опасности на торфяниках с помощью ретроспективного анализа с использованием статистических данных о месте и времени пожара	147
3.5. Выводы	149

ГЛАВА 4. КИНЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ СУШКИ ПРИРОДНЫХ ГОРЮЧИХ МАТЕРИАЛОВ

4.1. Математическая постановка и метод решения ОКЗ	151
4.2. Решение обратных задач аэротермохимии для определения термокинетических постоянных сушки степных горючих материалов	155
4.2.1. Экспериментальные методики и результаты исследования процесса сушки СГМ	155
4.2.2. Результаты определения термокинетических постоянных процесса сушки СГМ	157

4.3. Кинетические исследования процессов сушки торфа	162
4.3.1. Методики проведения экспериментов и подготовки образцов	162
4.3.2. Результаты исследования процесса сушки торфа	164
4.4. Выводы	170
 ГЛАВА 5. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК И ОСОБЕННОСТЕЙ ГОРЕНИЯ ПРИРОДНЫХ ГОРЮЧИХ МАТЕРИАЛОВ	172
5.1. Проведение экспедиции в Жуковское лесничество Тимирязевского лесхоза Томской области для сбора базы данных	172
5.2. Влияние плотности и неоднородности напочвенного покрова на скорость распространения низового лесного пожара	176
5.2.1. Описание экспериментальной установки и методики проведения экспериментов	176
5.2.2. Результаты экспериментов для однородных составов	178
5.2.3. Результаты экспериментов по зажиганию неоднородных составов	180
5.3. Влияние плотности светового потока на время зажигания различных образцов древесины	182
5.3.1. Описание экспериментальной установки и методики исследований	182
5.3.2. Результаты зажигания древесины световым потоком ...	185
5.4. Исследования в натуральных условиях степных и полевых пожаров	190
5.5. Исследование в натуральных условиях образования горящих частиц	194
5.5.1. Описание участка и поведения пожара	195
5.5.2. Исследование горящих частиц	200
5.5.3. Исследование выгорания сосновой коры	204
5.6. Выводы	206
 ГЛАВА 6. ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОГНОЗА ВОЗНИКНОВЕНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ В ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ	208
6.1. Создание крупномасштабных векторных карт для прогноза возникновения и распространения пожаров	209

6.2. Состав и структура программного комплекса прогноза возникновения и распространения природных пожаров	212
6.3. Описание работы программного комплекса	214
6.3.1. Интерфейс (оболочка) для ввода исходных данных и вывода результатов математического моделирования в графическом виде	214
6.3.2. Визуализация результатов прогноза лесной, степной и торфяной пожарной опасности	216
6.3.3. Визуализация результатов прогноза распространения низового лесного пожара	222
6.4. Выводы	229
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	230
Литература	232
ПРИЛОЖЕНИЯ	251
<i>Приложение 1</i>	<i>253</i>
<i>Приложение 2</i>	<i>255</i>
<i>Приложение 3</i>	<i>269</i>
<i>Приложение 4</i>	<i>274</i>

СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ

БД – база данных
БЭК – базовый экспериментальный комплекс
ВНИИТП – Всероссийский научно-исследовательский институт торфяной промышленности
ВПМС – время-пролетный масс-спектрометр
ГИС – геоинформационные системы
ГМ – горючие материалы
ДВМ ПЛПО – детерминированно-вероятностной методики прогноза лесной пожарной опасности
ДМСТА – динамический масс-спектрометрический анализ
ДТА – дифференциальный термический анализ
ИИ – искусственный интеллект
ИОА СО РАН – Институт оптики атмосферы СО РАН
ИХКГ – Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН
КВ – коэффициент вариации
КЗ – класс засухи
КМП – комплексный метеорологический показатель
КП – комплексный показатель
КПО – класс пожарной опасности
КС – конденсированные системы
ЛГМ – лесные горючие материалы
МСС – механика сплошных сред
МСТА – масс-спектрометрический термический анализ
ОКЗ – обратная кинетическая задача
ОПГ – основной проводник горения
ПКЗ – прямая кинетическая задача
ПК ПВиРПП – программный комплекс прогноза возникновения и распространения природных пожаров
РГМ – растительные горючие материалы
СГМ – степные горючие материалы
СУБД – система управления базой данных
СЦРА – спусковой цилиндрический реакционный аппарат
ТГ – термогравиметрия
ТГА – термогравиметрический анализ
ТКП – термокинетические постоянные
ФГБУ ВНИИПО МЧС России – Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский ордена “Знак Почета” научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России
CFFDRS – Canadian Forest Fire Danger Rating System – Канадская система оценки пожарной опасности
NFDERS – National Fire Danger Rating System – Национальная система оценки пожарной опасности США

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы наблюдается увеличение количества природных пожаров, число которых по всему миру ежегодно достигает около 7 000 000. Эти пожары наносят огромный ущерб, представляют угрозу жизни и здоровью людей. Примерами таких пожаров, которые можно приравнять к чрезвычайным ситуациям, приведшим к катастрофическим последствиям и значительному материальному ущербу, могут являться лесные и торфяные пожары в Европейской части России в июле и начале августа 2010 г., в Сибири и на Дальнем Востоке России в 2012 г., в Хакасии и Забайкалье России в 2015 г., пожары в Греции (2007, 2009 гг.), Португалии (2003, 2005 гг.), Австралии (2009 г.), США (2008, 2009, 2011 и 2013 гг.). Только в США пожары за 2014 г. уничтожили около 3000 домов. Пожар 2012 г. в каньоне Валдо привел к тотальной эвакуации более 32 000 жителей Колорадо-Спрингс и уничтожению более 350 домов. Во время пожаров 2010 и 2012 гг. в России от выбросов лесных пожаров страдали целые регионы, огнем было уничтожено более 2 миллионов гектаров леса. Огнем были уничтожены частично или полностью десятки населенных пунктов, зарегистрированы несчастные случаи среди населения и пожарных подразделений. Только в Хакасии в 2015 г. в результате крупных пожаров, возникших в степных регионах, сгорели более 1 200 домов в 42 населённых пунктах, погибло 25 человек, около 5 тысяч человек остались без жилья. Причина увеличения числа природных пожаров, с одной стороны, связана с предпочтениями людей жить на лесных территориях и повышением рисков появления пожаров, с другой – в недостаточном понимании физики природных пожаров, и в частности перехода их на населенные пункты.

Анализ существующих в России и за ее пределами систем прогноза природной пожарной опасности показывает, что практически все они реализуются с использованием эмпирических либо полумэмпирических моделей, т.е. имеют под собой слабую физическую основу и, как правило, учитываются только метеоданные. Природные факторы и антропогенная нагрузка должным образом не рассматриваются.

Среди наиболее известных методик оценки пожарной опасности следует отметить канадскую, американскую, российскую и австралийскую методики.

Современная канадская система оценки пожарной опасности в лесах CFFDRS (Canadian Forest Fire Danger Rating System) создавалась с 1968 г.

Она состоит из подсистемы FWI – для оценки пожарной опасности, и подсистемы FBP – для прогноза поведения пожаров, включая оценку запаса сгорающих при пожаре растительных горючих материалов (РГМ), прогноз скорости и интенсивности пожара в типовых комплексах РГМ, а также модели развития пожаров, в том числе верховых [1]. Эта система построена на основе анализа огромного количества статистических данных, по которым были составлены таблицы зависимости пожарной опасности от различных факторов [2]. Система CFFDRS является одной из самых разработанных и широко применяющихся. Кроме Канады, ее адаптировали для своих территорий Новая Зеландия, Фиджи, Мексика, Аляска, Флорида и страны Юго-Восточной Азии.

В 1972 г. в США была разработана своя методика определения пожарной опасности на разных лесных территориях – NFDRS (National Fire Dander Rating System) [3]. Эта система была испытана с положительными результатами по всей Америке. Согласно [4] система представляет собой логическую структуру или абстрактную модель влияния различных факторов и условий на процесс возникновения и распространения пожаров.

С начала 1940-х гг. в США начал активно развиваться метод физико-математического моделирования пожаров. Создание его теоретической базы было завершено разработкой модели Роттермела [5]. Именно в эту модель вписывается современная американская классификация РГМ с разделением на четыре класса по временному лагу и с выделением топливных моделей как типовых комплексов РГМ: 20 моделей для оценки пожарной опасности в системе NFDRS и 13 моделей для прогноза поведения пожаров (система BEHAVE [6]). Очевидно, что истинные пирологические характеристики участков растительности, включаемых в одну модель, могут значительно отличаться от типовых характеристик этой модели, поэтому прогнозирование поведения конкретного пожара может быть недостаточно точным. В настоящее время в США используется система Nexus [7], которая является улучшенной версией системы BEHAVE и представляет собой набор крупноформатных таблиц, в которых оперирование входными и выходными данными (в табличном и в графическом видах) осуществляется с применением систематизированного, организованного и простого вычислительного механизма.

Надо сказать, что канадская и американская системы очень похожи в своей структуре, в подходах и принципах построения индекса пожарной опасности. Основной недостаток этих методик – невозможность их использования в других странах без огромной предварительной работы по определению множества эмпирических коэффициентов, а также отсутствие физически содержательного смысла ряда постоянных, что ограни-

чивает диапазон варьирования значений входных параметров и применения данных методик при других начальных условиях.

В основе австралийской системы оценки лесной и степной пожарной опасности широко используются индексы МакАртура [8], которые были разработаны и апробированы в Юго-Восточной Австралии. Австралийская система позволяет достаточно быстро получить оценки параметров распространения природного пожара. В настоящее время в Австралии используется Национальная система прогноза пожара NFBP (National Fire Behaviour Prediction system) [9].

В России прогнозирование пожарной опасности в лесу ограничивается оценкой пожарной опасности по условиям погоды в соответствии с комплексным показателем В.Г. Нестерова [10]. Комплексный показатель Нестерова использует данные региональных метеостанций и определяется через температуры воздуха и точки росы в 13.00 и 15.00 ч местного времени текущего дня и коэффициент учета осадков. Разработанный в 1949 г., претерпев ряд не принципиальных изменений, комплексный показатель Нестерова до сих пор используется в лесных хозяйствах, а с 2000 г. стал ГОСТом [11] при оценке пожарной опасности. В данной методике не учитываются реальные физические процессы, происходящие в слое РГМ, такие как действие ветра и солнечного излучения, тепломассоперенос в слое, процессы испарения и конденсации воды и пр. Единственная физическая величина, которая встречается в методике, – это точка росы. Другим недостатком является тот факт, что этот индекс нельзя применить на обширных малонаселенных территориях, на которых сеть метеостанций редка или отсутствует совсем. Поэтому результаты такого прогноза нуждаются в корректировке.

В качестве общего недостатка разработанных на сегодняшний день и программно реализованных систем следует отметить их неуниверсальность, т.е. невозможность использования в любой точке Земли без предварительной адаптации. Это связано в первую очередь с тем, что в данные системы заложены эмпирические данные, полученные для определенных РГМ и климатических условий, которые резко отличаются в разных частях Земли. Кроме того, большинству систем присущи неточности и ошибки, возникающие при реализации заложенных в них математических моделей, например при вводе новых данных используемая система может выдавать неадекватные результаты. Основным недостатком упомянутых выше систем являются игнорирование реальных причин возникновения природных пожаров, а именно процесса сушки слоя горючих материалов на подстилающей поверхности, а также учет антропогенной нагрузки и действия сухих гроз.

Изучению возникновения и распространения природных пожаров посвящено довольно значительное число работ. Бóльшая часть из них относится к изучению низовых лесных пожаров. Это обусловлено наличием большого количества экспериментальных данных по данной тематике. Среди отечественных работ следует отметить исследование Э.В. Конева [12] и Г.А. Дорпера [13], среди зарубежных исследований – R.C. Rothermel [5] и F.A. Albini [14]. В работе R.C. Rothermel представлено сочетание теоретического и экспериментального изучения распространения фронта низового пожара. Им получена формула для определения скорости распространения низового лесного пожара. F.A. Albini реализует для описания данного явления пошаговый подход, выделяя стадии прогрева, сушки, пиролиза и горения летучих продуктов разложения с последующим продвижением пламени по слою. Считается, что каждой стадии предписывается определенная температура. При этом игнорируется тот факт, что температура в общем случае является функцией процесса. Безразмерная скорость горения, длина пламени и глубина выгорания представлены как функции высоты слоя лесных горючих материалов (ЛГМ), его запаса, влагосодержания¹ и других параметров. С помощью элементарной теории описывается влияние скорости ветра на угол отклонения факела пламени.

Значительный вклад в математическое моделирование природных пожаров, в том числе и низовых, распространяющихся по напочвенному покрову, внес цикл работ, выполненных под научным руководством А.М. Гришина в Томском госуниверситете [15–20]. Предложенная А.М. Гришиным общая математическая модель лесных пожаров, учитывающая законы сохранения массы, импульса, энергии, а также физико-химические процессы, описывает процессы возникновения и развития горения во всех ярусах леса. Математическая модель учитывает взаимное влияние процессов в приземном слое атмосферы, пологом леса и подстилающей поверхности. Преимущество данного подхода обусловлено применением последних достижений механики сплошных сред и аэротермохимии. Идеи, заложенные при построении данной модели, успешно используются не только в нашей стране, но и за рубежом. Например, в работе D. Morvan с соавторами [21], развивая вышеуказанный подход к математическому моделированию лесных пожаров, разработаны новые двумерные (плоские) постановки и получены результаты численных расчетов по распространению низовых лесных пожаров.

¹ Влагосодержание – количество воды, отнесённое к единице массы сухой части материала.

Также следует отметить исследования, выполненные в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Всероссийский ордена «Знак Почёта» научно-исследовательский институт противопожарной обороны» МЧС России (ФГБУ ВНИИПО МЧС России). ФГБУ ВНИИПО проводит фундаментальные и прикладные научно-исследовательские, опытно-конструкторские, технологические и проектно-изыскательские работы по научно-техническому, методическому и информационному обеспечению органов управления и подразделений МЧС России по проблемам предупреждения и тушения пожаров, обеспечению пожарной безопасности объектов защиты, в том числе людей, зданий, сооружений, изделий. Особо можно выделить работы В.И. Горшкова [22], Л.П. Вогмана [23], посвященные изучению процессов самовозгорания и самовоспламенения веществ и материалов; тушению горючих веществ распылённой водой, порошковыми и аэрозольными составами, образованию взрывоопасных сред и предотвращению пожаров и взрывов в хранилищах растительных горючих материалов.

Несмотря на значительное число работ по данной тематике, проблема точного и своевременного прогноза возникновения и распространения природных пожаров, борьбы с ними до сих пор до конца не решена. Не разработана математическая модель прогноза лесных, степных и торфяных пожаров, не созданы простые и эффективные математические модели сушки РГМ, не исследовано образование горящих частиц во время лесных пожаров, не проведены исследования кинетики РГМ с учетом масштабного эффекта. Для решения поставленных задач необходимо применять математические модели возникновения и распространения природных пожаров в сочетании с использованием законов и методов механики многофазных реагирующих сред, современных методов проведения экспериментов.

Целью данной монографии является построение и исследование математических моделей прогноза природной пожарной опасности и сушки растительных горючих материалов, проведение экспериментальных исследований кинетики сушки горючих материалов, а также особенностей возникновения и распространения природных пожаров с целью их прогнозирования и контроля для снижения экономического и экологического ущерба.

В **главе 1** проведен обзор существующих методик прогноза пожарной опасности, проанализированы работы, посвященные разработке общих методов прогноза катастроф и кинетическим исследованиям растительных горючих материалов.

В главе 2 описываются детерминированно-вероятностная методика прогноза лесной пожарной опасности (ДВМ ПЛПО) и способ ее решения. В первом параграфе даются методика прогноза лесной пожарной опасности и методика определения вероятностей возникновения лесного пожара, с учетом антропогенной и природной нагрузок, через частоты событий и вероятность возникновения лесного пожара по метеоусловиям. Во втором и третьем параграфах приводятся упрощенная математическая модель низкотемпературной сушки слоя РГМ и ее точное аналитическое решение. В четвертом параграфе представлены упрощенное аналитическое решение и формула для определения времени лесопожарного созревания лесов. В пятом даны результаты численного решения задачи и их анализ. В шестом параграфе приводятся результаты проверки методики прогноза лесной пожарной опасности путем ретроспективного анализа.

Глава 3 посвящена созданию детерминированно-вероятностной системы прогноза торфяной пожарной опасности. В первом параграфе представлена методика прогноза торфяной пожарной опасности. Во втором и третьем приводятся математическая модель низкотемпературной сушки слоя торфа и математическая модель расчета падающего солнечного излучения. Описываются методики их решения, сравнение с экспериментальными данными и анализ полученных результатов. Четвертый параграф посвящен тестированию новой системы прогноза пожарной опасности на торфяниках с помощью ретроспективного анализа с использованием статистических данных о месте и времени пожара.

В главе 4 приведены кинетические исследования процессов сушки и пиролиза растительных горючих материалов. В первом параграфе излагаются математическая постановка и метод решения обратных кинетических задач. Во втором дается решение обратных задач аэротермохимии для определения термокинетических постоянных сушки степных горючих материалов (СГМ). Излагаются экспериментальные методики и результаты исследования процессов сушки СГМ и приводятся результаты определения термокинетических постоянных процессов сушки. Третий параграф посвящен кинетическим исследованиям процессов сушки и пиролиза торфа. В нем приводятся методики проведения экспериментов и подготовки образцов, результаты исследования процессов сушки и пиролиза торфа.

Глава 5 посвящена исследованию свойств природных горючих материалов и особенностям их горения. В первом параграфе представлено описание разработанной методики сбора и обработки результатов проведенной экспедиции. Во втором приводится исследование влияния плотности и неоднородности напочвенного покрова на скорость распростра-

нения низового лесного пожара. Дается описание экспериментальной установки и методики проведения экспериментов, приводятся результаты экспериментов для однородных и неоднородных составов. В третьем параграфе изучено влияние плотности светового потока на время зажигания различных образцов древесины. Приводятся описание экспериментальной установки, методики исследований и результаты зажигания древесины световым потоком. В четвертом показано исследование в натуральных условиях степных и полевых пожаров. Пятый параграф посвящен исследованию в натуральных условиях образования горящих частиц в результате лесного пожара. Приводятся результаты исследования образования горящих частиц и выгорания коры на примере соснового леса.

В главе 6 представлен программный комплекс для визуализации результатов прогноза возникновения и распространения природных пожаров в геоинформационной системе. В первом параграфе описывается создание крупномасштабных векторных карт для прогноза возникновения и распространения пожаров. Во втором показаны состав и структура геоинформационного обеспечения программного комплекса. В третьем параграфе дается описание работы программного комплекса. Приводятся интерфейс (оболочка) для ввода исходных данных и вывода результатов математического моделирования в графическом виде, а также пример визуализации результатов прогноза лесной, степной и торфяной пожарной опасности и прогноза распространения контура низового лесного пожара.

Автор выражает благодарность коллегам и сотрудникам Томского государственного университета, Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН за помощь и консультации; особая благодарность – заслуженному деятелю науки РФ, профессору Анатолию Михайловичу Гришину за его поддержку и неоценимую помощь в проведении исследований и написании данной работы. Автор благодарит Президента Российской Федерации и Министерство науки и образования РФ за финансовую поддержку его научной работы в рамках государственного задания в сфере научной деятельности № 1624 и стипендии Президента РФ № СП–3968.2013.1.

ГЛАВА 1. ОБЗОР РАБОТ, ПОСВЯЩЕННЫХ МЕТОДИКАМ ПРОГНОЗА ВОЗНИКНОВЕНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ И ИХ ОСОБЕННОСТЯМ

В данной главе представлен обзор работ существующих методик прогноза лесной, степной и торфяной пожарной опасности, проанализированы исследования, посвященные разработке общих методов прогноза катастроф и кинетическим исследованиям растительных горючих материалов.

1.1. Методики прогноза лесной пожарной опасности

1.1.1. Зарубежные методики прогноза лесной пожарной опасности

Одними из наиболее известных и развитых зарубежных методик прогноза пожарной опасности являются канадская и американская.

Канадская система прогноза пожарной опасности CFFDRS (Canadian Forest Fire Danger Rating System). Канадская система оценки пожарной опасности в лесах начала активно формироваться с 1968 г. Современная ее версия включает подсистему FWI – для оценки пожарной опасности, и подсистему FBP – для прогноза поведения пожаров, включая оценку запаса сгорающих при пожаре РГМ, прогноз скорости и интенсивности пожара в типовых комплексах РГМ, а также модели развития пожаров, в том числе верховых [1]. Эта система построена на основе анализа огромного количества статистических данных, по которым были составлены таблицы зависимости пожарной опасности от различных факторов [2].

В системе CFFDRS в качестве эталона для оценки пожарной опасности по условиям погоды (подсистема FWI) выбран трехслойный комплекс РГМ, соответствующий напочвенному покрову из зеленого перистого мха с включенным в него опадом сосновой хвои при достаточно мощном нижнем слое подстилки. В канадской системе стандартными условиями для оценки по временному лагу являются природные условия: полуденная температура 21°C, относительная влажность воздуха 45%, скорость ветра 3,3 м/с.

Следует отметить, что канадский эталонный комплекс РГМ сходен с тем, который использовался при разработке российских лесопожарных показателей засухи [10], а именно покров из зеленых мхов в сосняках на дренированных почвах, состоящий из трех слоев: 1) верхний слой мха толщиной 3–4 см (плотность слоя 20 кг/м^3 , максимальное влагосодержание $M = 430\%$); 2) нижний слой мха толщиной 2–4 см ($M = 340\%$); 3) слой подстилки толщиной 2,5–4,5 см ($M = 260\%$).

В канадской классификации РГМ делят на три большие группы: 1) почвенные РГМ (ground fuels), включая перегной, торф, корни; 2) напочвенные РГМ (surface fuels), включая опад листвы и хвои, травы, мелкие кустарники, крупный валеж; 3) кроновое горючее (crown fuels), куда входят ветки с хвоей и листвой и отмершие сучья.

В лесах Канады (как и в лесах России) в напочвенном покрове широко распространены мхи и лишайники. Но лесообразующие древесные породы имеют там достаточно узкие «экологические ниши». Эта особенность позволяет выделять по древесным породам так называемые типы горючего (fuel type) как категории участков с типовыми комплексами растительных горючих материалов. К настоящему времени выделено 16 таких «типов». Типовые комплексы РГМ представляют собой категории участков, относящихся, во-первых, к покрытой лесом площади (хвойные леса – семь типов, лиственные – один, смешанные леса – четыре типа); во-вторых, к не покрытой лесом площади (вырубки – три типа); в-третьих, к нелесной площади (луга – один тип).

Для выделенных типовых комплексов РГМ составлены уравнения по оценке скорости и интенсивности пожаров на основании анализа данных, полученных на 415 экспериментальных пожарах и 119 природных пожарах и целевых палах.

Выделенные типовые комплексы РГМ далеко не исчерпывают все разнообразие лесов и нелесных площадей Канады. Более того, выбор некоторых типов, вероятно, определялся имеющимся фактическим материалом о поведении пожаров. Поэтому использовать систему прогноза поведения пожара (FBP) можно лишь на территориях, где лесная растительность соответствует типовым комплексам РГМ.

В канадской системе FWI для расчета при оценке высыхания самого верхнего слоя (толщиной 1,2 см) у эталонного горючего учитываются: 1) температура воздуха; 2) относительная влажность воздуха на 12.00–13.00 ч; 3) продолжительность периода без дождей (косвенно); 4) ветер на высоте 10 м на открытом месте. Из факторов высыхания среднего слоя в канадском эталонном горючем ветер исключен, но добавлена сезонная

продолжительность дня. Из факторов высыхания самого нижнего слоя исключена относительная влажность воздуха.

Несомненно, что методика достаточно точно предсказывает пожарную опасность, потому что она построена на основе статистических данных о лесных пожарах за период более 20 лет. Но, к сожалению, в ней совершенно не учитывается физика возникновения лесных пожаров, а поэтому область применения этой методики ограничивается только лесами Канады и зонами с идентичным климатом, структурой лесов, населенностью территории и пр. Одним из существенных недостатков методики является отсутствие физически содержательного смысла величин, фигурирующих в методике, отсутствие размерности у величин и относительность оценки пожарной опасности. Наиболее существенным недостатком системы является то, что она характеризует пожарную опасность в целом на расчетной площади, т.е. на десятках и сотнях тысяч гектаров, но не дает информации о распределении вероятностей возникновения пожаров по охраняемой территории.

Национальная система расчета пожарной опасности США NFDRS (National Fire Danger Rating System). В 1972 г. в США была разработана своя методика определения пожарной опасности на разных лесных территориях [3]. Эта система была испытана с положительными результатами по всей Америке. Согласно [4] система представляет собой логическую структуру или абстрактную модель влияния различных факторов и условий на процесс возникновения и распространения пожаров.

В американской национальной системе оценки пожарной опасности (вначале NFDRS–72, затем NFDRS–78) все РГМ подразделяются на две крупные категории: мертвые и живые, поскольку считается, что живые растения всегда способны поддерживать свое высокое влагосодержание, в то время как влагосодержание отмерших РГМ зависит от процессов их увлажнения и высыхания под влиянием погодных условий [2].

Такое деление справедливо для основной территории США, где в лесах практически отсутствует мохово-лишайниковый покров. Лишайники и мхи (за исключением политрихума) не способны активно поддерживать свое влагосодержание. Они высыхают и увлажняются подобно мертвым РГМ. В бореальной зоне России мохово-лишайниковые покровы распространены очень широко, поэтому американское деление для нас является некорректным.

Мертвые РГМ в США разделены на четыре класса: легкое, среднее, тяжелое и очень тяжелое горячее, в зависимости от величины его «временного лага» (time lag). Временной лаг – это период времени, в течение которого происходит потеря двух третей (63%) того количества влаги,

которое может испариться при стандартных условиях воздушной среды из данного образца (слоя) РГМ, т. е. $\frac{2}{3} (M - M_{\text{равн}})$, где M – влагосодер-

жание РГМ в данный момент; $M_{\text{равн}}$ – величина равновесного влагосодержания данного РГМ для стандартных условий.

В NFDRS стандартными условиями воздушной среды являются: температура воздуха 26,5°C, относительная влажность воздуха 20%. Следует заметить, что временной лаг – величина постоянная для данного образца (слоя РГМ) и не зависит от его влагосодержания. Это объясняется тем, что скорость высыхания прямо пропорциональна разности $(M - M_{\text{равн}})$. В процессе высыхания эта разность уменьшается и, следовательно, уменьшается и скорость высыхания.

К первому классу (1-hour time lag fuel) относятся РГМ со средним временным лагом 1 ч (0–2 ч). Обычно это усохшие травянистые растения и сухие древесные частицы диаметром до 6 мм.

Ко второму классу (10-hour time lag fuel) относятся РГМ со средним временным лагом 10 ч (от 2 до 20 ч). Обычно это опавшие сучья диаметром от 6 до 25 мм.

Третий класс (100-hour time lag fuel) имеет средний временной лаг 100 ч (от 20 до 200 ч). Это валеж диаметром от 26 до 75 мм.

Четвертый класс (1 000-hour time lag fuel) имеет средний временной лаг 1 000 ч (от 200 до 2 000 ч) и соответствует валежу диаметром от 76 до 200 мм.

Необходимо заметить, что в природе стандартные условия воздушной среды наблюдаются достаточно редко. Кроме того, на условия высыхания влияет положение частиц РГМ относительно почвы. Валеж, лежащий на почве, высыхает гораздо медленнее, чем «не приземленный» валеж.

Живые РГМ в NFDRS делятся на два класса: 1) травы и травянистые растения; 2) хвоя, листва и ветки диаметром менее 6 мм в кронах деревьев. Необходимо заметить, что согласно [2] диаметр 6 мм – это верхний предел размера живых древесных материалов, которые могут сгорать при начавшемся пожаре.

Усохшие травянистые растения и вегетирующие травы обычно образуют единый слой (единую многофазную смесь), поэтому в NFDRS введен особый класс РГМ – «тонкое горючее» (fine fuel). Именно этот класс играет главную роль в американских топливных моделях.

В американской классификации из категории живых РГМ исключены все растения и их части диаметром (толщиной) более 6 мм. Это исключение некорректно, поскольку на живых древесных стволах могут активно

гореть кора (на березах, лиственницах) и засмоленные места (карры при подсочке сосны, потеки смолы на кедрах), кроме того, могут гореть изнутри дуплистые стволы.

В американской NFDRS классифицируются по временному лагу также и напочвенные слои РГМ. К 1-му классу (горючее с 1-часовым лагом) относится верхний слой опада, толщиной до 6 мм; ко 2-му классу (горючее с 10-часовым лагом) – слой опада (подстилки) на глубине от 6 до 25 мм; к 3-му классу (горючее с 100-часовым лагом) относится слой подстилки, расположенный на глубине от 25 до 100 мм; к 4-му классу (горючее с 1 000-часовым лагом) относятся слои подстилки, торфа, перегноя, расположенные на глубине от 100 до 300 мм.

Следует заметить, что скорость высыхания слоев опада и подстилки зависит не только от глубины их расположения, но также от режима их почвенного увлажнения. На слабодренированных участках высыхание подстилки протекает более медленно, по сравнению с высыханием на дренированных участках. Очень большое влияние на скорость высыхания оказывают сама структура и сложение слоев РГМ (рыхлая или плотная) [2]. В американской классификации РГМ вообще не фигурируют слои из мхов и лишайников, что является серьезным упущением.

В США РГМ делят с учетом не только их местоположения в биогеоценозе (как слоев), но также возможности и характера распространения по ним горения: 1) shrub – кустарники (горючие кустарники); 2) grass – травы, усохшие или с преобладанием усохших; 3) slash – порубочные остатки; 4) litter (L-layer) – опад (лесной); 5) fermentation (F-layer) – подстилка (полуразложившиеся мелкие растительные остатки); 6) humus (H-layer) – перегной, торф.

С начала 1940-х гг. в США начал активно развиваться метод физикоматематического моделирования пожаров. Создание его теоретической базы было завершено разработкой модели Роттермела [5]. Именно в эту модель вписывается современная американская классификация РГМ с разделением на четыре класса по временному лагу и с выделением топливных моделей как типовых комплексов РГМ: 20 моделей для оценки пожарной опасности в системе NFDRS и 13 моделей для прогноза поведения пожаров в системе BEHAVE [3, 24].

Картографирование РГМ в разрезе топливных моделей практически не проводится, вероятно, потому, что в системе NFDRS одной моделью характеризуются целые районы, а в BEHAVE определить номер модели для участка по имеющейся информации не представляет особой сложности, поскольку все многообразие лесов разделено всего лишь на три модели, все заросли кустарников – на четыре, а все вырубки – на три.

Очевидно, что истинные пирологические характеристики участков растительности, включаемых в одну модель, могут значительно отличаться от типовых характеристик этой модели, поэтому прогнозирование поведения конкретного пожара может быть недостаточно точным. Для устранения этого недостатка в системе ВЕНАВЕ разработаны компьютерные программы по адаптации типовых моделей к конкретным характеристикам участков, и даже предусмотрено создание новых моделей.

Система разносторонне характеризует явление на основе наиболее полного учета большинства важнейших факторов возникновения и распространения лесных пожаров. В частности, она учитывает состояние напочвенных РГМ и их восприимчивость к источникам огня. Показатель частоты возникновения пожаров указывает на вероятность пожаров на охраняемой территории в прогнозируемый период с учетом воспламенности и появления источников огня. Характеристика распространения пожара, вместе с показателем высвобождения энергии, дает представление об условиях локализации отдельных пожаров. Показатель пожарной нагрузки сигнализирует об уровне объема работ по ликвидации пожаров на всей территории, на которой дается прогноз. Применение системы возможно и за пределами США в сходных по климату и растительности условиях. К числу недостатков системы согласно [4] можно отнести слишком грубое расчленение растительности на 9 категорий. Выражение показателей пожарной опасности в безразмерных величинах воспринимается субъективно, что может повлечь за собою различные решения работников охраны лесов при сходных ситуациях. Использование безразмерных показателей излишне усложнено тем, что они построены на шкалах различной дробности (стобалльные, двенадцатибалльные, пятибалльные). При построении оценки пожарной опасности используется огромное количество таблиц и поправок, полученных на основе эмпирических данных.

Надо сказать, что канадская и американская системы очень похожи в своей структуре, в подходах и принципах построения индекса пожарной опасности. Поэтому обе они обладают схожими как достоинствами, так и недостатками. Например, не решен вопрос утренних прогнозов для наступающего дня и вопрос распределения вероятностей возникновения пожаров по охраняемой территории. Основной недостаток – невозможность использования этих методик в других странах без огромной предварительной работы по определению множества эмпирических коэффициентов, а также отсутствие физически содержательного смысла ряда постоянных, что ограничивает диапазон варьирования значений входных параметров и применения этих методик при других начальных условиях.

1.1.2. Отечественные методики прогноза лесной пожарной опасности

Критерий оценки пожарной опасности, принятый в России – индекс горимости Нестерова. В СССР вопросы, связанные с прогнозом лесной пожарной опасности, начали изучаться в предвоенные и послевоенные годы. В.Г. Нестеров первым в СССР предложил методику для оценки пожарной опасности.

Степень пожарной опасности, обусловленная пожарной зрелостью лесного участка (такое состояние, при котором процесс горения может распространяться по всему участку леса), в лесной пирологии определяется с помощью индекса горимости Нестерова (комплексного метеорологического показателя – КМП) [10]:

$$G_j = G_{j-1} \xi_j + T_j(T_j - T_{pj}). \quad (1.1)$$

Здесь G_j – комплексный метеорологический показатель пожарной опасности; T_j , T_{pj} – температуры воздуха и точки росы в 13.00–15.00 ч местного времени для текущего дня в °C; ξ – коэффициент учета осадков, который равен нулю, если сумма осадков за прошедшие сутки $f_j > 3$ мм, или 1, если $f_j < 3$ мм; индекс j соответствует текущему дню пожароопасного сезона [10]. Как показали исследования, вероятность возникновения лесного пожара и его интенсивность возрастают с увеличением комплексного показателя G_j .

Надо сказать, что показатель Нестерова имеет размерность квадрата температуры C^2 , которая не соответствует физике процесса возникновения лесных пожаров.

Разработанный В.Г. Нестеровым в 1949 г. индекс горимости, претерпев ряд не принципиальных изменений, до сих пор используется в лесных хозяйствах и с 2000 г. является ГОСТом [11] при оценке пожарной опасности. В методике Нестерова [10] не учитываются реальные физические процессы, происходящие в слое РГМ, такие как, действие ветра и солнечного излучения, тепломассоперенос в слое, процессы испарения и конденсации воды и пр. Единственная физическая величина, которая встречается в методике, – это точка росы. Поэтому результаты такого прогноза нуждаются в корректировке.

Методики, разработанные в Ленинградском научно-исследовательском институте лесного хозяйства. В работе А.И. Захарова [25] развивается лесотипологический подход к оценке и прогнозу пожарной

опасности в лесах. Экспериментально в условиях лесного стационара изучено влияние ведущих метеофакторов на динамику влажности различных РГМ. С учетом внутрисуточных колебаний влажности лесного напочвенного покрова, а также специфики фаз его увлажнения и высыхания, разработана методика расчета влажности доминирующих типов и пожарной опасности по типам леса. Изучены метеорологические, аэрологические и синоптические условия возникновения вспышек пожаров от гроз.

Утверждается, что пожарная опасность конкретного участка леса зависит от пирологических свойств, и *особенно от влажности доминирующего типа напочвенного покрова.*

В наиболее пожароопасных хвойных лесах топливом во время пожаров являются ветошь сухих трав, лишайники, подстилка из хвои и зеленые мхи. Все изученные РГМ существенно различаются по влагоемкости, скорости водопоглощения и водоотдачи. Период их увлажнения продолжается приблизительно вдвое суток, но 80% влаги поглощается в первые 30 минут.

В [25] предложена следующая зависимость увлажнения РГМ от начальной влажности и количества осадков:

$$y = A(1 - e^{-kx}) + C, \quad (1.2)$$

где y – влажность покрова после дождя, мм; x – количество осадков, мм; A – разность между влагоемкостью РГМ и исходной влажностью, мм; C – исходная влажность, мм; k – расчетный коэффициент.

Семейство кривых высыхания напочвенного покрова аппроксимируется уравнением

$$y = (C - B)e^{-kx + B}, \quad (1.3)$$

где y – влажность покрова на момент расчета, мм; x – интегральный показатель $\sum t(t - \tau)$, град²; B – равновесная влажность, мм; C – исходная влажность, мм; k – расчетный коэффициент.

На основе уравнений (1.2), (1.3) и номограмм, дифференцированно описывающих фазу увлажнения покрова осадками и фазу последождового его высыхания в зависимости от погодных условий (осадки, температура воздуха и температура точки росы), автором предлагается метод слежения за влажностью покрова и пожарной опасностью в лесу.

На основании выявленной зависимости величин нарастания показателя $t(t - \tau)$ от прогнозируемой дневной максимальной температуры воз-

духа (с учетом относительной влажности воздуха в 09.00 ч) показана возможность прогноза влажности покрова и пожарной опасности в 12.00, 15.00 и 18.00 ч текущего дня. Связь нарастания показателя $t(t - \tau)$ на указанные сроки описывается уравнением $y = kx - b$, где y – прирост $t(t - \tau)$, град²; x – температура воздуха, °C; k и b – расчетные коэффициенты.

В данной работе разработанная методика определения влажности лесных горючих материалов и на ее основе – метод оценки пожарной опасности в лесу построены на основе эмпирических формул и индекса Нестерова и не отражают реальные физические процессы, происходящие в слое РГМ. Автором игнорируются основополагающие факторы (солнечное излучение, ветер и т.д.), влияющие на сушку слоя РГМ, в связи с этим точность прогноза резко понижается.

В работе [26] предложена более совершенная система прогноза пожарной опасности, основанная в отличие от комплексного показателя Нестерова, на влагосодержании слоя РГМ. Используются следующие уравнения для скорости сушки слоя РГМ:

$$\frac{dW}{dt} = -k(W - W_p), \quad \frac{d(W - W_p)}{dt} = -k(W - W_p), \quad (1.4)$$

где t – время; k – коэффициент сушки (логарифмическая скорость высыхания); W_p – равновесное влагосодержание.

Первое из уравнений (1.4) рекомендуется использовать при постоянной суточной и сезонных температурах и влажности воздуха, а второе – в противном случае, что вызывает изменение W_p с ростом времени.

Кроме выражений (1.4), используется следующее уравнение для скорости влагонасыщения слоя РГМ при выпадении осадков:

$$\frac{dR}{dr} = k_e(R^* - R), \quad (1.5)$$

где R – текущее количество задержанной слоем РГМ воды; R^* – предельная влажность слоя; r – количество осадков, достигших слоя РГМ; k_e – постоянный коэффициент влагонасыщения.

С точки зрения физики первое уравнение (1.4) представляет собой закон сохранения влаги в слое РГМ для периода падающей скорости сушки при постоянном значении W_p . В то же время второе уравнение (1.4) не является законом сохранения массы при $W_p = W_p(t)$ и поэтому не имеет физического смысла [24]. Надо сказать, что уравнение (1.5) в качестве ар-

гумента имеет не время t , а количество осадков r , достигших слоя РГМ. Кроме того, при выводе этого уравнения не учтено, что часть поступивших в слой РГМ осадков уходит в почву. В данной методике совершенно не используются строгий математический аппарат и методы механики многофазных сред для описания физических процессов тепломассопереноса в слое РГМ и связанных с ними процессов испарения и конденсации влаги.

Методики, разработанные в Красноярском технологическом институте и институте леса им. В.Н. Сукачева. Недостатки работы [26] в значительной степени устранены в методике, предложенной в [27]. Уравнение баланса влаги в слое РГМ предложено в следующей форме:

$$\frac{dW}{dt} = q_{\text{ик}} + q_{\text{ил}} + q_c + q_{\text{ос}} + q_{\text{п}}. \quad (1.6)$$

Здесь в левой части стоит скорость изменения влагосодержания в слое; $q_{\text{ик}}$ – скорость испарения влаги за счет конвективного теплообмена с воздухом, $\text{кг}/(\text{кг} \cdot \text{с})$; $q_{\text{ил}}$ – скорость испарения влаги за счет действия излучения, $\text{кг}/(\text{кг} \cdot \text{с})$; q_c – скорость поступления влаги в слой РГМ за счет сорбции из воздуха, $\text{кг}/(\text{кг} \cdot \text{с})$; $q_{\text{ос}}$ – скорость поступления влаги с осадками, $\text{кг}/(\text{кг} \cdot \text{с})$; $q_{\text{п}}$ – скорость оттока влаги в почву, $\text{кг}/(\text{кг} \cdot \text{с})$.

К недостаткам уравнения динамики сушки слоя РГМ (1.6) относится то, что не учитывается зависимость от температуры слоя скоростей испарения влаги из слоя в результате конвективного теплообмена слоя РГМ. Поэтому использование уравнения динамики влагосодержания слоя РГМ (1.6) в форме, предложенной в [27], без уравнения теплового баланса этого слоя с окружающей средой может привести к ошибкам в прогнозе сушки (влагонасыщения) слоя РГМ, а следовательно, и в прогнозе пожарной опасности.

В работе Г.А. Ивановой [28] предлагается рассчитывать прогноз пожарной опасности на основе разработанных местных шкал. На основании статистических данных о лесных пожарах по известной методике Н.П. Курбатского графическим способом было установлено деление пожароопасного сезона на три периода: весенний, летний и осенний [28]. Затем по результатам наблюдения за скоростью пожарного созревания различных лесных участков территории Погорельского бора и левобережной лесостепной части Большемуртинского лесхоза были составлены периодные шкалы очередности пожарного созревания лесных участков.

На основании среднегодового количества дней (за 10 лет), в которые участки находились в пожароопасном состоянии, была составлена шкала природной пожароопасности участков. Учитывая опыт применения су-

ществующих шкал, они приняли равномерную шкалу по 10% пожароопасных дней на каждый класс. В результате автор получил шестиклассную шкалу.

Анализируя работу [28], можно сказать, что разработанная методика основана на критерии Нестерова, и, следовательно, имеет все ее недостатки.

Метод оценки пожарной опасности Л.И. Сверловой. Л.И. Сверлова [29] предложила метод оценки пожарной опасности в лесах по условиям погоды с учетом поясов атмосферной засушливости и сезонов года. Метод оценки состояния пожарной опасности в лесах по условиям погоды предусматривает расчет комплексного показателя (КП), по значениям которого определяется класс пожарной опасности в лесах.

Для вычисления комплексного показателя пожарной опасности в методике Л.И. Сверловой необходимы следующие данные:

- температура воздуха, точка росы (в °С), скорость ветра (в м/с) на 13.00 ч по местному времени или в ближайший к нему срок синхронных метеорологических наблюдений (15.00 ч);

- количество выпавших осадков за предыдущие сутки (в мм).

Комплексный показатель текущего дня определяется как сумма произведений коэффициента, учитывающего скорость ветра (K_v), на температуру воздуха (T_i) и разность между значением температуры воздуха и температурой точки росы (t_i).

Расчет КП начинается после последнего дождя и проводится за каждый день (n). Данные за каждый день суммируются нарастающим итогом:

$$КП = \sum_{i=1}^n K_i \times T_i \times (T_i - t_i), \quad (1.7)$$

где K_i – коэффициент, учитывающий скорость ветра; T_i – температура воздуха; t_i – температура точки росы.

Расчет комплексного показателя пожарной опасности по формуле (1.7) ведется в течение теплого периода ежедневно от схода снежного покрова весной до установления его осенью. Комплексный показатель пожарной опасности нарастает в течение бездождного, сухого периода, а также в дни, когда осадков выпадает недостаточно для ликвидации пожарной опасности в лесах. При выпадении осадков, способных снять напряженность пожарной ситуации в лесу, производится сброс комплексного показателя.

Исчезновение пожарной опасности в лесах зависит от суммарного значения комплексного показателя и от выпавших осадков за сутки. Чем больше КП, тем большее количество осадков за сутки необходимо для ликвидации пожарной опасности. Например, если КП горимости лесов составляет $2\,000^{\circ}\text{C}^2$, то накопленную сумму КП можно сбрасывать при осадках 4 мм и более, при КП равном $12\,000^{\circ}\text{C}^2$ сброс показателя можно производить при осадках 14 мм и более.

Учет осадков начинается с того дня, когда суточное их количество составит 3 мм и более. В случае если суточное количество осадков оказывается недостаточным для сбрасывания накопленной суммы КП, при этом осадки носят обложной характер и через сутки снова возобновляются, то осадки суммируются (в том числе и осадки менее 3 мм) до количества, необходимого для сбрасывания КП. Допускаются перерывы в осадках не более суток.

Оценка пожарной опасности в лесах по условиям погоды производится по таблице. Шкала классов пожарной опасности составлена на основе учета диапазона колебаний значений комплексного показателя и степени пожарной опасности в лесах. Показатель пожарной опасности может меняться от одного до нескольких тысяч градусов, а в период устойчивой и жаркой погоды его значение превышает $12\,000^{\circ}\text{C}^2$. Для характеристики степени пожарной опасности весь диапазон значений показателя КП разделен на пять классов пожарной опасности. Классы пожарной опасности изменяются от 1-го класса ($\text{КП} = 1\text{--}300^{\circ}\text{C}^2$), когда пожарная опасность является малой, до пятого ($\text{КП} > 12\,000^{\circ}\text{C}^2$), когда пожарная опасность достигает состояния «чрезвычайной».

Надо сказать, что работа Л.И. Сверловой имеет те же недостатки, что и работы [10, 28]. Отличие состоит в том, что автор добавила в формулу расчета КП коэффициент K_v , учитывающий скорость ветра, и предложила оценивать пожарную опасность с учетом поясов атмосферной засушливости. Кроме того, автор везде указывает размерность КП в $^{\circ}\text{C}$, хотя из формулы (1.7) видно, что размерность $^{\circ}\text{C}^2$. Отсутствие физического смысла комплексного показателя Л.И. Сверловой приводит к непониманию физических процессов и, как следствие, к грубым ошибкам.

Методика, разработанная на кафедре метеорологии Томского государственного университета. В работе Г.В. Горева [30] оценивалась предрасположенность территории к возникновению лесных пожаров по метеорологическим и другим факторам на примере Томской области. В рамках этой работы им предложено следующее уравнение для прогноза пожарной опасности:

$$Y = 2,87 + 0,07T - 0,06F + 0,08Q, \quad (1.8)$$

где Y – прогнозируемая пожарная опасность (суточная заблаговременность), безразмерная величина; T – максимальная температура воздуха, °C; F – минимальная влажность воздуха, %; Q – суточное количество атмосферных осадков, мм.

Видно, что предложенный способ прогноза пожарной опасности носит ограниченный характер. Несмотря на утверждение автора о том, что большое влияние на возникновение пожаров оказывает антропогенная нагрузка, в уравнении (1.8) для прогноза пожарной опасности она никак не учитывается, как и возникновение пожаров от молний. Кроме того, размерности левой и правой частей уравнения для прогноза пожарной опасности, а также отдельных членов правой части не совпадают друг с другом и поэтому не понятен физический смысл этого уравнения. Основной недостаток в том, что не учитывается сушка РГМ, которая, по данным Н.П. Курбатского [31], является одним из главных факторов, влияющих на возникновение лесных пожаров.

Методика, разработанная в Московском государственном университете леса. Для учета случайного характера возникновения и распространения лесного пожара А.С. Мухин [32] предложил оценивать пожарную опасность насаждений, используя модель Байеса [33]. Известно, что для повышения достоверности оценок необходимо использование априорных и апостериорных данных. Прогноз пожарной опасности базируется на статистике горимости лесов на предыдущие годы и экспериментальных данных, полученных на пробных площадях. Для реализации этой модели автор выдвинул две гипотезы:

$S1$ – на охраняемой территории возможно возникновение пожара;

$S2$ – на охраняемой территории пожар невозможен.

Априорные вероятности этих гипотез $P(S1)$ и $P(S2)$ определяются по отчетным данным лесопожарных подразделений за длительный период. Ежедневно в подразделения системы охраны лесов поступает текущая информация о погоде и действующих пожарах. Используя данную информацию, а также модели динамики РГМ и их влажности, определяются $P(A/S1)$ – апостериорная вероятность первой гипотезы и $P(A/S2)$ – апостериорная вероятность второй гипотезы. Тогда вероятность возникновения лесного пожара определяется по формуле

$$P(A) = \frac{P(S1)P(A/S1)}{P(S1)P(A/S1) + P(S2)P(A/S2)}. \quad (1.9)$$

Кроме этого автором предлагается модель информационно-управляющей системы контроля и охраны лесов от пожаров, учитывая локальный, региональный и глобальный характер лесных пожаров. Она имеет иерархическую структуру со следующими уровнями:

- государственный;
- региональный (уровень региональных баз авиационной охраны лесов от пожаров);
- локальный (уровень оперативных авиаотделений).

Информационно-управляющая система контроля и охраны лесов от пожаров на каждом уровне должна иметь в своем составе три подсистемы:

- информационную;
- подсистему управления силами и средствами пожаротушения;
- подразделения пожаротушений.

Информационная подсистема системы контроля и охраны лесов от пожаров на каждом уровне состоит из средств сбора, приема, хранения, обработки и передачи информации ее потребителям.

Ядром информационной подсистемы любого уровня является информационно-вычислительный центр, в состав которого могут входить, в зависимости от уровня системы контроля и охраны лесов от пожаров, вычислительные средства различной мощности. Для решения задач прогнозирования возникновения лесных пожаров и определения сил и средств пожаротушения используется информация пяти банков данных:

- банк данных по климатическим условиям;
- банк данных по источникам огня;
- банк данных по лесным пожарам;
- банк данных по РГМ;
- банк данных по людским и материальным ресурсам лесопожарных подразделений, а также прикладные программы.

Среди достоинств данной методики можно отметить то, что впервые А.С. Мухин предложил использовать вероятности для прогноза пожарной опасности и модель информационно-управляющей системы контроля и охраны лесов от пожаров.

Недостатками данной методики являются отсутствие учета антропогенных и природных факторов, метеорологических данных, а также игнорирование изменения влагосодержания слоя лесных горючих материалов в течение лесопожарного сезона.

Методика, разработанная в Томском политехническом университете. В работе [34], на основе разработанной А.М. Гришиным методологии, были предложены вероятностные критерии лесной пожарной опасности и методика определения вероятности возникновения лесных пожа-

ров. На основании анализа и обобщения полученных результатов, Н.В. Барановским предложено использовать сценарный подход для исследования типичных условий возникновения лесных пожаров. Рассмотрен сценарий по влиянию антропогенной нагрузки, который соответствовал лесопожарной обстановке в Тимирязевском лесхозе Томской области.

В работе [34] показана необходимость создания в обозримой перспективе отечественной системы прогноза лесной пожарной опасности, обладающей большей достоверностью и точностью прогнозной информации, которая потребует привлечения современных информационно-вычислительных технологий и физически-содержательных моделей и критериев.

Также Н.В. Барановским предложена концепция создания и развития отечественной системы прогноза лесной пожарной опасности с целью повышения экологической и экономической безопасности государства посредством мониторинга и управления уровнем пожарной опасности с учетом основных значимых факторов и климатических изменений.

Следует отметить, что разработанная Н.В. Барановским методика, в основе которой лежат идеи, предложенные А.М. Гришиным, используется только для прогноза лесной пожарной опасности. Автором так и не разработан комплекс или система, позволяющая прогнозировать все виды пожаров, осуществлять их мониторинг и оценивать распространение.

1.1.3. Влияние природных и антропогенных факторов на возникновение лесных пожаров и их прогноз

Возникновение лесных пожаров от молний. В лесохозяйственной литературе впервые воздействие молнии на лес описал F. Plurtmer в 1912 г. [35]. Он исследовал действие молний на деревья и почву и установил, что большинство пожаров от молний возникают при загорании гумуса под деревом.

Для возникновения лесных пожаров от молнии большое значение имеют направленность потока энергии по стволу к поверхности земли, а также длительность тепловой экспозиции. Пожары от гроз возникают в основном на сухих участках леса – сосняках лишайниковых и зеленомошно-брусничных.

Различие во времени между ударом молнии в дерево и началом его видимого горения объясняется способностью гумуса к длительному тлению, что является причиной лесных пожаров. Установлено [35], что даже сильный дождь не всегда ликвидирует загорание, возникшее от молнии.

Поэтому через некоторое время с наступлением сухой погоды может возникнуть пожар.

В работе [35] рассматривается влияние гроз на возникновение лесных пожаров и предлагается прогноз лесной пожарной опасности от молний с использованием карт-схем грозопожарных участков.

Из анализа работы [35], выполненной на территории Енисейской равнины, можно сделать следующие выводы:

1. Для данной территории характерны фронтальные и внутримассовые грозы. Они начинаются со второй половины мая и прекращаются в сентябре. Максимум гроз наблюдается в июле. Число гроз по годам варьируется значительно.

2. Преобладают внутримассовые грозы. На их долю приходится в отдельные годы до 95% всех зарегистрированных гроз. Это объясняется большим разнообразием подстилающей поверхности: различные типы леса, болота, поляны, вырубки, гари и т.д., которое способствует образованию внутримассовых грозовых облаков.

3. Фронтальные грозы, составляющие от 57 до 27% всех гроз, в 60% случаев наблюдаются в июле. При этом не на каждом атмосферном фронте отмечаются грозы.

4. В течение суток может образовываться до 50 внутримассовых гроз, а в течение часа их может наблюдаться до 15. Грозы могут возникать в любое время суток. Фронтальные грозы проявляют наибольшую активность в дневные часы.

5. Количество наземных разрядов молнии при внутримассовых грозах по годам варьируется от 2 768 до 22 147 разрядов в год. Число разрядов молнии, приходящихся на один день с грозой, составило от 106 до 763. В среднем на каждый квадратный километр за грозовой период приходится три разряда молнии, или в день с грозой на каждые 100 км² приходится по одному разряду молнии.

6. Наибольшая удельная интенсивность наземных молниевых разрядов наблюдается при грозах холодных фронтов, а наименьшая – при прохождении гроз теплых фронтов. В течение суток можно выделить два максимума грозовой активности: с 14.00 до 20.00 и с 24.00 до 04.00. Разряды молний облако – земля более чем в 50% случаев происходят в период с 23.00 до 04.00.

7. Основное количество лесных пожаров от гроз за пожароопасный сезон возникает при внутримассовых грозах (89%). Наибольшее количество загораний на один случай синоптической ситуации с грозой приходится на теплый сектор и малоградиентные поля.

8. Пожары от молнии могут возникать в любом типе насаждений. Наиболее подвержены молниевым пожарам насаждения с преобладанием светлохвойных пород. Так, на долю сосновых насаждений приходится 55% пожаров от молний, а на еловые и кедровые – 30%. Очаги горения от молнии могут находиться в стадии скрытого горения в течение 5 суток после прохождения грозы. Только 40% пожаров от молнии обнаруживается в первые сутки после грозы.

Молния, как известно, представляет собой электрический разряд в атмосфере, который может возникать между облаками, внутри облака, между облаками и землей. Имеющиеся в литературе сведения о зажигании лесных горючих материалов молнией сводятся к следующему. При ударе молнии в дерево воспламеняются находящиеся у основания ствола подстилка, сухая трава и опад. Чаще всего загорание от молнии происходит при сильном высыхании горючих материалов. Для зажигания горючих материалов молнией большое значение имеет длительность тепловой экспозиции. Энергия искрового разряда электричества может служить оценкой условий зажигания лесных горючих материалов.

В зависимости от вида горючего материала, время воспламенения и величина минимальной энергии зажигания колеблются в широких пределах [35]. Наименьшие значения этих показателей у травяной ветоши, а наибольшие – у опада хвои и мха сфагноума.

Процессы зажигания у разных видов лесных горючих материалов отличаются друг от друга. Это определяется различиями в их влагосодержании, морфологической структуре, химическом составе и т.д. Наиболее важным фактором является *влагосодержание*. Оно определяет потенциальную возможность горения лесных горючих материалов и длительность теплового импульса, необходимого для испарения влаги из образца и зажигания образовавшейся горючей смеси. Кроме того, влажные горючие материалы являются хорошим проводником электричества, что резко уменьшает количество выделяемой энергии и, соответственно, снижает вероятность их зажигания.

В работе [35] установили, что время воспламенения и величина минимальной энергии, необходимой для зажигания лесных горючих материалов, колеблется в широких пределах и зависит от его вида. Зажигание проводников горения возможно электрической дугой, напряжением не менее 15 кВ при влагосодержании их 11% и менее. Энергии молнии, выделяемой при ударе в землю, достаточно для воспламенения всех групп проводников горения. Полученные данные подтверждают предположение о том, что только длительные по времени молнии способны вызвать загорание лесных горючих материалов. При подаче напряжения больше

пробивного, электрическая дуга идет по проводникам к заземлителю независимо от их вида и влагосодержания. Проводники с большим электрическим сопротивлением создают высокую напряженность электрического поля, которая приводит к пробое проводника и образованию искр и кратковременных дуг. Подстилка имеет большее электрическое сопротивление, чем почва при одинаковой влажности, в результате чего вероятность появления искр и дуг в ней выше, что может вызывать ее загорание.

При большой силе тока молнии и высоком сопротивлении почвы, вдоль корней дерева на всей их протяженности возможно образование электрических искр. Основное значение при возникновении пожара от молнии имеют предшествующая погода и влажность лесных горючих материалов перед грозой. Установлено [35], что в 60% случаев во время грозы выпадает до 4 мм осадков. С учетом их задержки лесным пологом и напочвенной растительностью, осадки такого количества мало изменяют имеющееся влагосодержание подстилки, которая обычно первой загорается от молнии.

Особенностью возникновения и распространения лесного пожара от молнии является то, что источник огня находится внутри лесного горючего материала и длительное время может быть в стадии тления и при благоприятных условиях выходить на поверхность.

На основе проведенных исследований [35] установлено, что на возможность возникновения лесных пожаров от гроз на ограниченных лесных территориях наибольшее значение оказывают такие факторы, как:

- средняя продолжительность гроз на рассматриваемой территории;
- число месяцев в году с грозой;
- географическая широта расположения лесной территории;
- площадь рассматриваемой территории;
- лесистость территории;
- средний класс природной пожарной опасности;
- преобладающий гранулометрический состав почвы.

Для количественной оценки опасности возникновения лесных пожаров от гроз в лесхозах Красноярского края использована система баллов. Для этого приведенные выше факторы, влияющие на возникновение пожаров от гроз, оценивали в баллах. Каждая ограниченная территория по оцениваемым факторам получает промежуточные баллы, которые затем перемножаются. Максимально полученное произведение является длиной опорной оценочной шкалы редуцированных баллов. За основу построения редуцированной (основной) шкалы произвольно принимается процентное распределение по градациям – 10; 25; 50; 75; 90; т.е. после-

дующий редуцированный балл больше предыдущего на 10–25%. Это наименьшая разница в величинах, когда между ними ощущается различие. В результате была построена шестибалльная шкала.

Авторами [35] для математического описания выявленной зависимости, позволяющей численно определить возможное возникновение лесных пожаров от гроз через предложенные факторы, было получено линейное уравнение регрессии

$$Y = 5,33 + 9,39 \times 10^{-3} X, \quad (1.10)$$

где Y – возможное количество лесных пожаров от гроз; X – произведение промежуточных баллов-факторов, влияющих на возникновение лесных пожаров от гроз.

Представляет интерес количественная теория предсказания лесных пожаров, вызываемых молниями, которая была развита в США [24]. Основу этой теории составляет функциональное соотношение

$$F(\text{ЛПИМ}) = F(\text{ЛПИМ}/M) \cdot F(M), \quad (1.11)$$

где $F(M)$ – риск (вероятность) появления молнии, а $F(\text{ЛПИМ}/M)$ – вероятность возникновения лесного пожара при условии, что происходит удар молнии.

Данные для определения $F(M)$ были собраны лесной пожарной лабораторией службы леса США за 30 лет. Они содержат информацию о числе молний между тучами и землей, полученную в результате наблюдений с 30 вышек. Точность визуальных данных колеблется от 25% во время бурь с большой частотой разрядов до 50% в среднем. Величина $F(M)$ для так называемой статической модели риска определялась по формуле [24]:

$$F(M) = S + r_s, \quad (1.12)$$

где S – число дней за предшествовавшие N лет, в которые, согласно наблюдениям, имели место молнии, деленное на полное число дней в N лет; r_s – случайная неизвестная помеха. При этом учет дней проводился только для пожароопасного периода длительностью 70 дней в году.

Более точной является динамическая модель риска [24], в рамках которой учитывалась текущая информация о погоде. В этом случае

$$F(M) = AS + B\Phi + r'_{s}, \quad (1.13)$$

где S – безразмерное число дней с молниями, определенное выше; Φ – постоянно обновляемые данные о погоде; A и B – весовые коэффициенты, определяющие относительную значимость факторов S и Φ ; r'_s – новая случайная помеха.

В [36] утверждается, что стоимость прогноза пожарной опасности по статической модели значительно меньше, чем по динамической, так как результаты могут быть просчитаны заранее и сведены в таблицы.

Главным недостатком данных работ является то, что они учитывают только один из факторов, влияющих на возникновения пожаров, а именно молнии. Кроме того, уравнение, предложенное авторами [35], не имеет физического смысла и включает в себя в качестве одного из факторов средний класс природной пожарной опасности, который основан на показателе Нестерова.

Среди достоинств можно отметить огромную работу, сделанную авторами по исследованию влияния молний на воспламенение напочвенного покрова.

Влияние антропогенных факторов на возникновение лесных пожаров. В настоящее время работ, посвященных анализу влияния антропогенных факторов на возникновение пожаров, очень мало. Одна из них – работа Ю.А. Андреева [37].

В работе [37] содержатся результаты изучения закономерностей возникновения техногенных и природных пожаров. На основании исследований можно говорить о двух основообразующих факторах: антропогенном и природном, которые можно классифицировать на несколько составляющих (рис. 1.1).

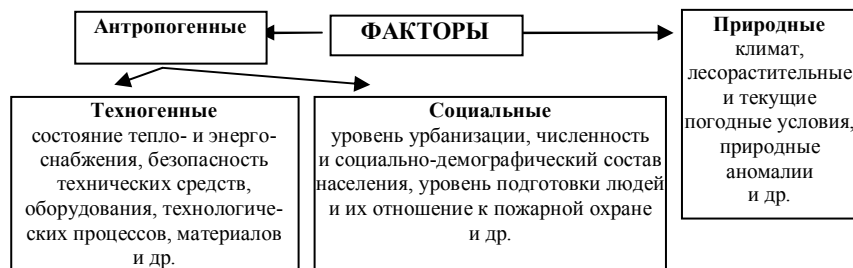


Рис. 1.1. Классификация факторов возникновения пожаров

В работе [37] для изучения зависимости частоты лесных пожаров от различных характеристик территории автор использовал множественную регрессию. Исследована зависимость средней частоты пожаров от 6 раз-

личных показателей населенности территории. При этом учитывались природная пожарная опасность и пожарная опасность по условиям погоды. Всего при выполнении анализа использовалось в различном сочетании 11 характеристик территорий.

В результате проведенных исследований установлены основные факторы влияющие на частоту лесных пожаров:

1. Напряженность пожароопасных сезонов по условиям погоды ($r = 0,90$), определяемая аддитивной функцией с учетом предложенных коэффициентов значимости классов пожарной опасности:

$$m = 0,1\sum m_I + 0,4\sum m_{II} + \sum m_{III} + 1,9\sum m_{IV} + 2\sum m_V, \quad (1.14)$$

где $\sum m$ – суммы дней с I–V классами пожарной опасности по условиям погоды за год.

2. Средняя численность жителей в населенных пунктах ($r = 0,83$).

3. Количество населенных пунктов, приходящихся на единицу площади ($r = 0,82$).

4. Коэффициент пожарной опасности территории по лесорастительным условиям ($r = 0,30$).

Частота лесных пожаров, случаев/млн га в год определяется уравнением

$$y = 0,42m + 0,01P_{cp} + 0,78V + 23,51c - 40,81, \quad (1.15)$$

где m – напряженность пожароопасного сезона по условиям погоды, дни; P_{cp} – средняя численность жителей в населенных пунктах, чел.; V – количество населенных пунктов на единицу площади, н.п./млн га; c – коэффициент пожарной опасности территории по лесорастительным условиям, доли единицы.

Таким образом, частота лесных пожаров в основном зависит от погодных условий и населенности территории. Это связано с тем, что погодные условия определяют пожарную зрелость лесных горючих материалов, а уровень населенности территории – количество источников возгорания. Большая часть пожаров (около 60%) возникает при IV и V классах пожарной опасности, когда могут *гореть и те лесные участки, которые при обычных условиях являются преградой распространению огня*. Следовательно, при соответствующих погодных условиях и наличии источников возгорания пожары могут возникать на любом лесном участке и мало зависят от уровня (класса) его природной пожарной опасности.

Изменение числа лесных пожаров с течением пожароопасного сезона связано с динамикой погодных условий, фенологическим состоянием лесной растительности. Влияние антропогенных факторов на этот процесс заключается преимущественно в изменении лесорекреационной активности населения.

Кроме того, влияние уровня освоенности территории населением на распределение лесных пожаров обнаружено в следующем:

1. С увеличением средней численности жителей в населенных пунктах доля пожаров, возникающих в выходные и праздничные дни ($M_{\text{вых}}$, %), увеличивается ($r = 0,89$):

$$M_{\text{вых}} = 14,9P_{\text{ср}} + 19,6, \quad (1.16)$$

где $P_{\text{ср}}$ – средняя численность жителей в населенных пунктах, тыс. чел.

2. Доля пожаров, возникающих вдоль дорог ($M_{\text{дор}}$, %), зависит от количества населенных пунктов, приходящихся на единицу площади ($r = 0,90$):

$$M_{\text{дор}} = 2,6V - 6,1, \quad (1.17)$$

где V – количество населенных пунктов, приходящихся на единицу площади, н.п./млн га.

3. Среднее расстояние от пожаров до ближайших населенных пунктов ($X_{\text{ср}}$, км) связано с числом последних, расположенных на исследуемой территории ($r = 0,91$):

$$X_{\text{ср}} = 49,3 - 1,8n, \quad (1.18)$$

где n – общее количество населенных пунктов, расположенных на исследуемой территории.

Выявлена зависимость частоты возникновения пожаров и от численности жителей в населенном пункте. Эта связь ощущается на расстоянии до 10–15 км от населенного пункта, после чего она не просматривается. В связи с тем, что на расстоянии до 10–15 км вокруг населенных пунктов возникает 70% пожаров и более, при изучении их распределения, кроме расстояния до населенного пункта, необходимо учитывать и численность жителей или какую-либо величину, с ней связанную.

Чаще всего виновниками пожаров становятся рабочие – по их вине возникает 36,9% лесных пожаров и 26,8% пожаров в населенных пунктах. Также много лесных пожаров возникает по вине служащих и пред-

принимателей, фермеров и колхозников. В общей сложности на эти три социальные группы приходится примерно 80% лесных пожаров.

В работе [37] делается вывод, что уровень антропогенной пожарной опасности на лесном участке, Z , ист. возгор./млн га в день, в первую очередь зависит от числа населенных пунктов, расположенных в пределах доступности (75–100 км), численности жителей в них, расстояния до этих населенных пунктов, наличия транспортных путей и их вида, и предлагается эмпирическая формула для ее определения. Коэффициенты доступности k лесных участков, расположенных около различных транспортных путей, получены через отношение частоты пожаров в этих местах к средней по всей территории.

$$Z = 10^4 \frac{k}{\pi} \sum_{i=1}^n \frac{e^{-1,3Q_i X_{i\min}} - e^{-1,3Q_i X_{i\max}}}{X_{i\max}^2 - X_{i\min}^2}, \quad (1.19)$$

где k – коэффициент доступности лесного участка; n – число населенных пунктов, расположенных в пределах доступности; Q_i – показатель пожарной опасности для леса со стороны жителей i -го населенного пункта, ист./н.п. в день; $X_{i\min}$ – расстояние от наименее ($X_{i\max}$ – наиболее) удаленной границы лесного участка до i -го населенного пункта, км.

На основе статистических данных автором получены эмпирические формулы для определения вероятного среднесуточного числа лесных пожаров в районе (случаев/сутки); вероятного числа лесных пожаров в районе за сезон (случаев/год); потенциальной среднесуточной частоты пожаров на лесном участке при различных погодных условиях и в разные дни недели (случаев/млн га в день); потенциальной частоты пожаров на лесном участке за сезон (случаев/млн га в год).

С целью автоматизации процесса прогнозирования рисков пожаров и их последствий, принятия оперативных управленческих решений автором [37] разработана информационно-аналитическая система (рис. 1.2), включающая три подсистемы: оценка рисков возникновения пожаров по техногенным, социальным и прочим причинам, травматизма и гибели людей при пожарах; регламент противопожарных работ в зависимости от прогнозируемых рисков; оценка деятельности органов пожарной охраны. Основными входными данными являются численность жителей, дата, температура воздуха, результаты деятельности органов пожарной охраны.

На основе анализа работы [37] можно сделать следующие выводы:

1. Пожары в лесах и населенных пунктах имеют общие закономерности возникновения и сезонного распределения, на формирование обстановки с пожарами как в лесах, так и в населенных пунктах основополагающее влияние оказывают антропогенные и погодно-климатические факторы.

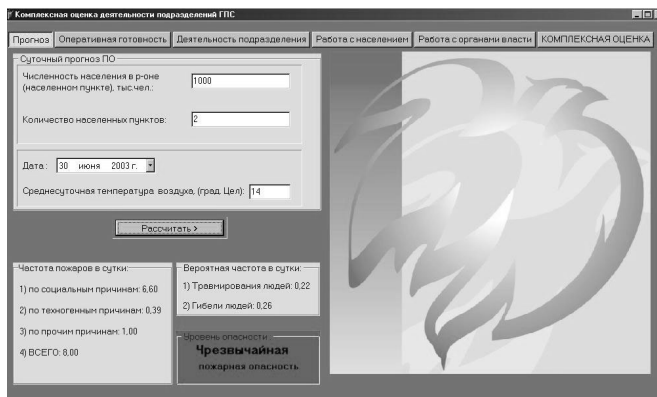


Рис. 1.2. Интерфейс информационно-аналитической системы

2. Частота пожаров, их распределение по причинам возникновения обусловлены преимущественно уровнем урбанизации территории и погодными условиями. Повышение уровня урбанизации и температуры воздуха вызывает увеличение доли пожаров по социальным причинам, а их снижение – доли пожаров по техногенным причинам. Число пожаров по прочим причинам от температуры воздуха не зависит.

3. Уровень антропогенной пожарной опасности на лесной территории определяется количеством расположенных здесь населенных пунктов и численностью жителей в них.

4. Распределение лесных пожаров зависит от освоенности территории населением, в том числе относительное число пожаров, возникающих в выходные дни, определяется средней численностью жителей в населенных пунктах, а относительное число пожаров вдоль дорог – количеством населенных пунктов, приходящихся на единицу площади; среднее расстояние от пожаров до ближайших населенных пунктов связано с общим количеством последних, расположенных на оцениваемой территории. Распределение вероятности возникновения лесных пожаров относительно населенного пункта зависит не только от расстояния до него, но и от численности жителей.

5. В большинстве случаев (71%) лесные пожары возникают от преднамеренных и непреднамеренных поджогов. Чаще всего это связано с разведением костров. Основной контингент виновников пожаров составляют представители мужского пола (94%), из них 80% – трудоспособное население, больше половины которого – рабочие и колхозники, 72,3% всех виновников пожаров проживают в сельской местности.

6. Уровень антропогенной пожарной опасности на лесном участке в первую очередь зависит от числа населенных пунктов, расположенных в пределах доступности, численности жителей в них, расстояния до этих населенных пунктов, наличия транспортных путей и их вида.

Автором проделана огромная работа и собрано большое количество статистического материала, который можно и нужно использовать при создании баз данных новых систем прогноза пожарной опасности. К сожалению, все формулы, полученные автором для прогноза лесной пожарной опасности, носят эмпирический характер и не отражают реальные физические процессы. Несмотря на то что автор критикует критерий Нестерова, вся его методика основана на классах пожарной опасности, в основе которых лежит данный критерий. Иными словами, проигнорированы известные в настоящее время реальные физические причины возникновения лесных пожаров и новые методики прогноза лесной пожарной опасности, поэтому эти результаты имеют ту же достоверность, что и формула Нестерова. Надо сказать, что различные члены в формулах, предложенных Ю.А. Андреевым, имеют разную размерность, что недопустимо с точки зрения теории подобия и размерности [19].

1.2. Методики прогноза торфяной пожарной опасности

1.2.1. Общие сведения о торфе и классификация торфяных пожаров

Торф покрывает около 3% площади суши. При этом в северном полушарии торфа больше чем в южном, заторфованность растёт при движении к северу и при этом возрастает доля верховых торфяников. Так, в Германии залежи торфа занимают 4,8% общей площади поверхности земли, в Швеции 14%, в Финляндии 30,6% [38]. В России доля занятых торфяниками земель достигает 31,8% в Томской области (Васюганские болота) и 12,5% в Вологодской. Также большое количество залежей торфа есть в центре России (особенно в Рязанской, Московской, Владимирской областях). Большие запасы торфа имеются в Индонезии, Канаде, Беларуси, Ирландии, Великобритании, ряде штатов США.

В состав органической части торфа входят пять основных элементов: С – 54–63%, Н – 5,8–6,6%, О – 34–36%, N – 1,5–2,6%, S – 0,2–0,5%. Для болота характерно отложение на поверхности почвы неполно разложившегося органического вещества, превращающегося в дальнейшем в торф. Он содержит до 50–60% углерода. Физические свойства торфа зависят от

степени разложения², дисперсности твёрдой части, оцениваемой удельной поверхностью. В естественном залегании торф содержит до 88–96% воды, имеет пористость до 96–97%. Слаборазложившийся торф в сухом состоянии имеет низкую плотность – до 0,3 кг/м³. Торф поглощает и удерживает значительные количества влаги, катионов металлов (особенно тяжёлых). Теплота сгорания (максимальная) 24 МДж/кг.

Повышенная пожарная опасность торфа обусловлена его пористой структурой, малой плотностью и наличием в составе до 40% кислорода, что позволяет развиваться процессам горения в скоплениях и залежах скрыто, практически без доступа воздуха. Размер пор изменяется от 0,1 до 30 мкм, их объем от $4 \cdot 10^{-5}$ до $7,3 \cdot 10^{-5}$ м³/кг, а удельная поверхность соответственно от $268 \cdot 10^3$ до $332 \cdot 10^3$ м²/кг. В сухом состоянии торф характеризуется плохой смачиваемостью, что усложняет ликвидацию пожаров и загораний. В ряду горючих ископаемых (по удельной теплоте сгорания) торф занимает место между древесинной и бурными углями. К показателям пожарной опасности торфа можно отнести также параметры, характеризующие его теплофизические свойства. Значение коэффициента теплопроводности торфа (λ) изменяется от 0,1 до 0,5 Вт/(м·К), практически не зависит от вида торфа и степени разложения и определяется плотностью, влажностью, газонасыщенностью, пористостью. Удельная теплоемкость сухого торфа (C_p) составляет 1,96 кДж/(кг·К). Торф со степенью разложения 30% не горит при влагосодержании равном или больше 69–72%.

Основными причинами торфяных пожаров являются: самовозгорание торфа; искры, возникающие при работе технологического оборудования и тракторов; неосторожное обращение с огнем; сухие грозы и др. Самовозгорание торфа – воспламенение торфа из-за его окисления кислородом воздуха. При этом не обязателен приток тепла извне. В процессе участвуют микроорганизмы, продукты жизнедеятельности которых накапливаются в анаэробных условиях и приводят к постепенному прогреванию массы торфа до 60–65°C. При последующем повышении температуры торф превращается в полукокс, склонный к спонтанному самовозгоранию под действием кислорода воздуха. Степень пожароопасности зависит от ботанического состава торфа и степени его разложения. К возгоранию может быть склонен также и добытый торф в процессе его хранения. Торф имеет свойство к самовозгоранию, если его влажность меньше 28–

² Под степенью разложения понимают отношение массы гумуса (разложившейся части органики) ко всей массе торфа.

30%. Значительный процент возгораний наблюдается также из-за грозовой активности, в частности «сухих гроз» (удары молний без последующего ливня). По статистическим данным, от 1 100 до 5 100 пожаров на территории охраняемого лесного фонда возникают от молний; при этом огнём оказываются охвачены от 22 до 890 тыс. га, что почти в 3 раза превышает площадь от антропогенных источников огня. Пожары от молний могут быть труднодоступными из-за их удалённости от объектов инфраструктуры.

Дальнейшее развитие пожара зависит от целого ряда факторов: сложившихся метеорологических условий; наличия необходимых запасов воды; средств пожаротушения; степени оперативности при организации тушений очагов возгораний и т.п. Процесс саморазогревания может начаться и при обычной температуре окружающей среды (10–20°C) и заканчиваться горением. Чем ниже температура горючего вещества, при которой процесс саморазогревания переходит в горение, тем оно более пожароопасно.

Поверхность торфяного месторождения в естественном состоянии всегда покрыта какой-либо растительностью. Сочетание растений, совместно обитающих на участке с более или менее однородными условиями среды, называется растительной группировкой, или фитоценозом. Количество фитоценозов, которые можно выделить в растительном покрове торфяных месторождений, сравнительно невелико. В основу классификации фитоценозов положены два признака: минеральный и водно-воздушный режимы [38].

По минеральному режиму фитоценозы разделяются на три типа: низинный, переходный и верховой. Низинный торф залегает на глубине 1,6–6,5 м и имеет степень разложения 26–31%, зольность 6–12% и влажность в естественном состоянии 86–92%, а верховой – глубину залегания 0,5–2 м, степень разложения 18–46%, зольность 2,7–4% и влажность 89–93%. Степень разложения торфа во многом определяет его пожарную опасность – торф с высокой степенью разложения имеет меньшую влажность, меньшую пористость, больший объемный вес и большую теплоемкость, нежели торф с низкой степенью разложения. По водно-воздушному режиму фитоценозы в целом и по каждому типу отдельно расчленяются на три подтипа: лесной, лесо-топяной и топяной.

Важнейшие признаки основных типов фитоценозов, влияющих на склонность к загоранию и распространению пожаров, определяются степенью увлажнения (гидрологическим режимом) и составом растительного покрова. Влажность торфяной залежи достигает 92–96%, что больше критической влажности, при которой загорается торф. Земляные пожары в виде тления возникают обычно в органических почвенных слоях в ре-

зультате перехода низовых или верховых пожаров, вызванных действием человека или молний. Из-за их тесного контакта с минеральной почвой, они могут оказывать на нее тепловое воздействие и таким образом влиять на возобновление леса.

Торфяные пожары создают опасность провала в прогоревший грунт (прогар) людей и техники. Торф медленно прогорает на всю глубину залегания, которая может достигать 6–8 и более метров. Выгоревшие места опасны проваливанием в них участков дороги, домов, машин или людей. Они также вызывают падение деревьев с подгоревшими корнями. Внешне деревья под тлеющими торфяниками выглядят целыми, но из-за тления корней деревья начинают неожиданно падать. Другим негативным последствием является смог. Удушливый смог – на 90% результат горения торфяников, а не лесов. В состав смога входят угарный газ, мелкие взвешенные частицы, бензол и другие продукты горения.

Чаше всего в 2002 г. в России лесные и торфяные пожары возникали по вине людей, оставляющих непотушенные костры или окурки в местах отдыха, вследствие игры детей с огнём, при сжигании мусора владельцами дач и садовых участков на опушках леса. В редких случаях виноваты естественные причины: удар молнии или самовозгорание торфяника.

Успех борьбы с лесными и торфяными пожарами [39] во многом зависит от их своевременного обнаружения и быстрого принятия мер по их ограничению и ликвидации. Скорость выгорания торфа в залежи меняется от 1,4 до 23 кг/(м²·ч) при ветре 1–11 м/с соответственно. Подземные (торфяные) пожары характеризуются беспламенным горением торфяного слоя почвы глубиной 0,3–1,5 м и более. При малой мощности горящего слоя (до 0,3 м) эти пожары иногда называются подстилочными-гумусовыми. В засушливые периоды второй половины лета верхний слой торфа может высыхать до относительной влажности 25–100%. При такой влажности он может загораться и поддерживать горение в нижних, менее сухих слоях. За счет выделяющегося тепла идет подсушка соседних слоев, и торф выгорает до минерального грунта или до сильно обводнённых слоев (свыше 400% влагосодержания). Скорость продвижения волны горения не превышает 7 м/сут. Торфяные пожары могут продолжаться несколько месяцев. Даже сильные дожди иногда не могут ликвидировать торфяной пожар. По мере выгорания торфа сгорает и корневая система деревьев, которые падают вершиной к центру очага горения. Слабым подземным пожаром считают пожар с глубиной прогорания не более 25 см, средним – от 25 до 50 см и сильным – более 50 см. Торфяные пожары – вид лесных пожаров, при котором горят слой торфа и корни деревьев (рис. 1.3).



Рис. 1.3. Торфяной пожар

Е.С. Артибашев [40] описал тлеющий торфяной пожар как полость в форме надутого шара, распространяющаяся вниз и в стороны (рис. 1.4).

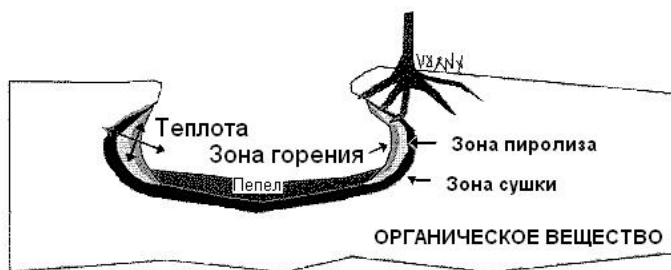


Рис. 1.4. Распространение тлеющего торфяного пожара в нижнем и боковом направлениях

Распространение горения в нижнем направлении со временем выйдет за пределы горючего материала либо натолкнется на условия, при которых горение поддерживаться не будет, и тогда останется лишь распространение в боковые стороны. Боковое распространение продолжается до тех пор, пока фронт тления не натолкнется на условия, более не поддерживающие горение.

Лесо-торфяные пожары на торфяных массивах, находящихся в естественном состоянии, начинаются, как правило, с лесного низового пожара. Под влиянием нагрева от фронта лесного низового пожара и притока

окислителя из окружающей среды высушивается, гидролизуется, а затем загорается подстилка – слой полуразложившейся листвы, хвои, травы и тонких веточек. Плотность подстилки в абсолютно сухом состоянии изменяется в пределах от 30 до 300 кг/м³, что выше, чем плотность опада. Влагосодержание подстилки тоже выше, чем у напочвенного покрова, и изменяется, как правило, в пределах от 470 до 560%. Поэтому подстилка высыхает значительно медленнее, чем надпочвенный покров, и лишь в очень сухую погоду достигает минимального значения – 14%. Если под подстилкой расположен слой торфа, то процесс заглубления горения может продолжаться и может возникнуть торфяной пожар.

Влагосодержание торфов существенно больше влагосодержания подстилки. Из наблюдений следует, что горение торфа в естественных условиях после его заглубления под слой почвы в условиях избыточного влагосодержания и недостатка кислорода происходит в режиме тления. Горение носит диффузионный характер, т.е. лимитируется поступлением окислителя. Фронт торфяного пожара неоднороден, т.е. горение носит очаговый характер. В результате горения образуются продукты полного (CO₂, H₂O и пепел), неполного окисления (CO) и пиролиза торфа – метан (CH₄) водород (H₂), сажа, дым. Пепел белого цвета, имеет рыхлую структуру и отваливается на вертикальных участках. В процессе горения торфа поверхность фронта горения, первоначально плоская, может принимать форму параболоида вращения. Так как, горение при торфяных пожарах носит подпочвенный характер, его очень трудно обнаружить. Над поверхностью почвы при пожаре на торфянике стелется синеватый дымок – угарный газ – продукт неполного горения торфа. В отличие от лесного низового пожара, процессы переноса массы, энергии и количества движения имеют существенно меньшую скорость, чем при низовых пожарах. В частности, выделение газа на торфяных пожарах принимает характер просачивания газа через поры, называемого фильтрацией, что, в конечном счете, существенно замедляет скорость поступления окислителя к фронту торфяного пожара и предопределяет малую скорость его распространения.

Таким образом, общая схема физико-химических процессов при лесных пожарах сохраняет свою силу и для пожаров на торфяниках, но, в отличие от низового и верхового лесных пожаров, роль излучения при передаче тепловой энергии из зоны горения торфяного пожара мала по сравнению с передачей энергии путем теплопроводности и фильтрации продуктов горения. Другим отличием является то, что фронт горения представляет собой поверхность, положение которой в пространстве определяется расположением торфяной залежи и приходом кислорода из приземного слоя атмосферы.

При наблюдении с воздуха границы недавно возникшего пожара плохо различимы, дым поднимается от всей площади возгорания, огня не видно. Глубина горения торфа ограничивается лишь уровнем грунтовых вод или подстилающим минеральным грунтом. Горение торфяной залежи отличается устойчивостью к выпадению осадков за счёт гидрофобности битумированных частиц торфа. При этом влага уходит в грунтовые воды мимо частиц торфа, а торф продолжает гореть вплоть до полного выгорания месторождения. Зимой 2002 г. торфяники горели и под снегом, пока не началось весеннее половодье.

1.2.2. Факторы, определяющие развитие пожаров на торфяных месторождениях

Развитие торфяных пожаров обусловлено комплексом климатических, метеорологических, топографических и ряда других факторов [31]. К их числу можно отнести продолжительность засушливого периода, интенсивность солнечной радиации, время суток, температуру воздуха, влажность, структуру и уплотненность торфяной залежи, степень разложения торфа, направление и скорость ветра, рельеф местности, наличие преград огню, уровень стояния грунтовых вод. Рассмотрим эти факторы более подробно.

Продолжительность засушливого периода оказывает существенное влияние на характер развития пожаров на торфяных месторождениях. Анализ пожаров показывает, что крупные пожары наиболее часто возникают в период с мая по сентябрь, когда устанавливается засушливая погода. При этом происходят интенсивное иссушение торфяного пласта и понижение уровня стояния грунтовых вод. Проходящие кратковременные дожди несколько увлажняют почву, но не настолько, чтобы восполнить потери при испарении влаги.

Исследования, проведенные Н.П. Курбатским [31] в Ленинградской области в течение ряда лет, показали, что торфяные пожары возникали в такие пожароопасные сезоны (май – сентябрь), когда сумма выпадающих осадков была значительно меньше средней многолетней за тот же период. Обычно крупные торфяные пожары возникают не раньше, чем на 4–5-й день устойчивого засушливого периода. В качестве примера можно привести табл. 1.1, где отражены условия возникновения трех крупных пожаров на торфопредприятиях (составлена по данным М.В. Чулюкова [41]).

Таблица 1.1

Зависимость времени возникновения пожара от метеорологических условий

Время начала пожара	Число и месяц	Метеорологические данные				
		Температура воздуха в 13.00 ч, °С	Облачность в 13.00 ч, %	Относительная влажность воздуха в 13.00 ч, %	Осадки, мм	Скорость ветра, м/с
12.30	13.07	25,4	0/0	38	0,3	10–12
	14.07	26,0	10/10	45	Нет	
12.30	15.07	25,9	4/0	37	То же	12–14
	16.07	25,6	2/0	33	– ²³ –	
	17.07	24,3	10/0	45	– ²² –	
	10.07	23,6	0/0	44	– ²³ –	
	11.07	28,7	2/0	44	– ²³ –	
	12.07	20,8	10/0	93	– ²² –	
	13.07	24,9	4/0	49	– ²³ –	
11.30	30.05	11,2	7/7	49	– ²² –	10–12
	31.05	16,7	4/3	37	– ²³ –	
	01.06	21,4	6/0	30	– ²³ –	
	02.06	25,1	0/0	29	– ²² –	
	03.06	26,4	4/0	32	– ²³ –	

Из табл. 1.1 видно, что пожарам предшествовали в течение нескольких дней благоприятные для его возникновения и последующего развития условия: высокая температура и малая влажность воздуха, отсутствие осадков и значительная скорость ветра. Наблюдения за развитием торфяных пожаров показывают, что в большинстве случаев пожары наиболее интенсивно развиваются с 10.00 до 17.00, во второй половине дня скорость распространения огня постепенно снижается, и во многих случаях в ночное время пожар практически не развивается. На практике известны случаи, когда это обстоятельство приводило руководителя тушения пожара к ошибочному мнению о мнимой локализации пожара. Однако утром пожар нередко вновь бурно развивался. Снижение скорости развития торфяных пожаров в вечерние и особенно ночные часы объясняется тем, что в это время испарения влаги из торфяной залежи в несколько раз меньше, чем днем, кроме того, ночью выпадает роса, причем наибольшее увлажнение происходит с 3.00 до 7.00, повышается относительная влажность воздуха, как правило, стихает ветер.

Интенсивное развитие пожара в утренние часы объясняется тем, что под воздействием солнечной радиации происходит усиленное испарение влаги из торфяной залежи, последняя быстро подсыхает, что значительно увеличивает ее склонность к воспламенению. Торф, который ночью про-

должительное время тлеет, утром вновь воспламеняется, и на площади, оказавшейся в сфере пожара, возникает много очагов горения. Известно, что суточное испарение почти прямо пропорционально количеству часов солнечного сияния в течение дня, причем из общего количества солнечной радиации, падающей на поверхность торфа, около 60% приходится на сушку торфа, и температура поверхности торфа при этом нередко значительно превышает температуру окружающего воздуха.

Увеличение скорости ветра в полуденные часы происходит от неравномерности нагрева земной поверхности. Ночью и особенно в ранние утренние часы ветер стихает. Однако известны случаи, когда при торфяных пожарах сильный ветер дул и ночью, способствуя тем самым бурному развитию пожара.

Существенную роль на процесс развития пожаров оказывает *влажность торфяной залежи*. Большая влажность торфяного пласта не позволяет огню проникать в глубину залежи. Поэтому пожары на торфяниках, как правило, распространяются по поверхности массива. Однако это не исключает в отдельных случаях возможности распространения огня в глубину залежи через невыкорчеванные корни или кочки и образования небольших очагов подземного пожара. Периметр пожара при этом имеет обычно хорошо выраженную кромку. Выделяющееся тепло в силу плохой теплопроводности торфа мало рассеивается в окружающую среду и идет в основном на подсушивание и разогрев прилегающих масс горючего. При обугливании торфа в зону горения выделяются смолистые вещества.

Влага выпавшего после продолжительной засухи дождя очень медленно проникает в толщу торфа. Поэтому последний горит и в очень сырую осеннюю погоду и даже под снегом, когда напочвенный покров сильно увлажняется и гореть не может. При этом торф не горит, а тлеет. По мере увеличения скрытых очагов горения местами происходит оседание торфа. Глубина прогорания зависит от влажности и плотности торфа. В первые 1,5–2 ч горения толщина горящего слоя редко превышает 2–4 см. Однако глубина сгоревшего торфа в запущенных пожарах иногда составляет 45–50 см, а в среднем на 3-и–5-е сутки пожара – 20–30 см. Выпавшие осадки смачивают торф и снижают его теплоту сгорания, при увлажнении торфа до 69–72% он уже гореть не может.

Скорость выгорания слоя торфа невелика – несколько кубометров в сутки. Подземные торфяные пожары очень устойчивы. По данным Н.П. Курбатского [31], с каждого квадратного метра торфа при выгорании слоя на глубину 50 см выделяется около 165 тыс. ккал тепла.

В торфе содержатся битумы, которые в процессе горения обугливаются, и происходят их возгонка и сосредоточение у горящей поверхности.

При охлаждении поверхности торфа водой битумы цементируют частицы угля, вследствие чего создается водонепроницаемая корка, под которой происходит тление. Это затрудняет подачу воды к очагу горения при тушении пожара.

Теплотехнические расчеты, проведенные М.А. Чулюковым [41], дают основание предположить, что поверхностные слои низинного торфа с влажностью 69% и верхового 72% в полевых условиях гореть не могут.

Для изучения влияния степени увлажненности торфяной залежи на процесс развития горения проводились исследования условий развития горения торфа на нескольких определенных глубинах [42].

При влагосодержании от 900 до 501% торф не горел, при меньшем влагосодержании торф был подвержен горению (табл. 1.2).

Таблица 1.2

Связь между горимостью и влагосодержанием торфа в залежи на различной глубине

Глубина залегания торфа (см) и его состояние	Влагосодержание в %									
	900–800	800–701	700–601	600–501	500–401	400–301	300–201	200–101	100–0	Итого наблюдений
От 0 до 10 горит	–	–	–	–	–	2	21	34	8	65
От 0 до 10 погас	1	1	–	1	1	–	–	–	–	4
От 10 до 20 горит	–	–	–	–	2	12	18	19	2	53
От 10 до 20 погас	1	1	2	3	1	–	–	–	–	8
От 20 до 30 горит	–	–	–	–	4	7	18	4	1	34
От 20 до 30 погас	1	1	1	4	7	6	1	–	–	21
ВСЕГО										185

Скорость распространения торфяных пожаров зависит также от *рельефа местности, уровня стояния грунтовых вод и наличия естественных и искусственных преград* огню, таких как валовые, коллекторные и магистральные каналы, озера, суходолы, выработанные карьеры. На территориях с оврагами и карьерами тяга воздуха повышается. На таких участках пожар распространяется с большой скоростью, что значительно осложняет борьбу с ним.

Скорость развития пожара на полях торфа с низкой степенью разложения значительно выше, чем на полях с высокой степенью разложения [43].

Существенное влияние на процесс развития торфяного пожара оказывает уплотненность торфяной залежи. Отмечено, что на менее уплотненных участках пожар распространяется значительно интенсивнее, чем на более уплотненных. Это объясняется тем, что разрыхленный торф имеет большую поверхность окисления.

Существенное влияние на процесс развития пожаров оказывает и рельеф местности. На возвышенностях торф высыхает настолько, что может воспламениться от малейшей искры и гореть как на поверхности, так и в глубине слоя. Очень интенсивно огонь распространяется по сухому кустарнику, траве, мху и чесу (слой растительности, произрастающий на торфяной залежи), причем при горении чеса искры переносятся на расстояние 50–100 м по ходу распространения горения.

Направление и скорость ветра во многом определяют характер развития торфяных пожаров. Анализ пожаров показывает, что форма площади пожара во многих случаях формируется в зависимости от направления ветра. Однако было бы ошибочным рассматривать процесс распространения пожара только в зависимости от скорости и направления ветра, не увязывая его с теплофизическими явлениями, происходящими на пожаре. Распространение пожара по торфянику возможно только тогда, когда от очага горения передается смежным участкам тепло, достаточное для воспламенения горячего и последующего горения. Передача тепла происходит, в основном, за счет радиации и конвекции (переброски искр) и, в значительной степени, теплопроводности. Каждая часть комплекса горячего, прилегающего к фронту огня, перед тем как загореться, предварительно проходит стадию подсушки, прогрева и термического разложения. С активизацией процесса разложения развивается горение первоначально продуктов разложения, затем твердого углеродистого остатка горячего – углей.

Пожар, возникший на небольшом участке при относительном безветрии, по мере своего развития характеризуется ускорением химической реакции горения. По мере ускорения термического разложения повышается температура в очаге горения и увеличивается давление продуктов неполного и полного сгорания. При этом нагретый воздух и продукты горения стремятся подняться вверх, а менее нагретые массы опускаются вниз. Кроме того, за счет вакуума, образующегося в приземном слое, холодные массы воздуха подсасываются к очагу горения, что способствует ускорению смесеобразования. Происходит усиленное перемешивание потоков в непосредственной близости от фронта пожара. Это возмущает более отдаленные слои воздуха, что само по себе обуславливает появление ветра. Таким образом, надо различать ветер, имеющий место до пожара, от ветра, который возникает непосредственно при пожаре и обуславливается явлениями, происходящими на пожаре [44].

По мере увеличения периметра пожара на его площади в течение длительного промежутка времени происходит значительное тепловыделение. Весьма показательным в этом отношении является беспламенное тление площади горения в ночное время, когда отсутствует дополнительный при-

ток тепла от солнечных лучей. Таким образом, ночью торфяник подсушивается и как бы подготавливается к горению, а с наступлением утра приток солнечных лучей способствует новому усилению горения по всей площади пожара [45].

Над пожаром образуются восходящие потоки нагретого воздуха и продуктов сгорания. Если площадь пожара очень велика (несколько десятков гектаров), восходящие потоки нагретого воздуха могут образовать быстро движущийся вихрь, наличие которого резко осложняет обстановку на пожаре. К вихрю постоянно поступают массы воздуха, способствующие, с одной стороны, поднятию в воздух большого количества торфяной крошки и, с другой – приданию ему вращательно-поступательного движения. Во многих случаях основное направление ветра в течение дня обычно остается неизменным.

Данные исследования ряда крупных пожаров на торфяных полях позволили авторам [44] сделать выводы:

- почти все пожары, за исключением возникших от самовозгорания фрезерного торфа в караванах, имели место в период с мая по август;
- все пожары возникали в интервале времени от 9.50 до 15.00, что объясняется наиболее интенсивным напряжением солнечной радиации в эти часы;
- почти все пожары характеризовались сильным односторонним ветром, который возник до пожара или явился следствием явлений, происходящих на пожаре.

Из всего вышесказанного ясно, что тушение торфяного пожара очень проблематично, практически невозможно. Поэтому пожар проще спрогнозировать и принять меры профилактики, чтобы избежать горения торфяников.

1.2.3. Вероятность воспламенения органических почв

В результате проведенного анализа удалось найти очень мало работ, посвященных исследованию проблемы вероятности воспламенения торфов и разработки методик их прогноза [40, 46–50].

Среди них можно отметить работу Вильяма Х. Франдсена [46], посвященную исследованию зажигательного потенциала органических почв. В рамках исследования предела воспламенения и горения в виде тления Франдсеном были проведены тестовые зажигания образцов органической почвы, собранные на участках, подверженных природным пожарам.

Предел воспламенения аппроксимирован в двух измерениях: прямой линией, вытянутой от 110% по оси влагосодержания (ордината) до 81,5% по оси неорганической составляющей (абсцисса), как показано на рис. 1.5.

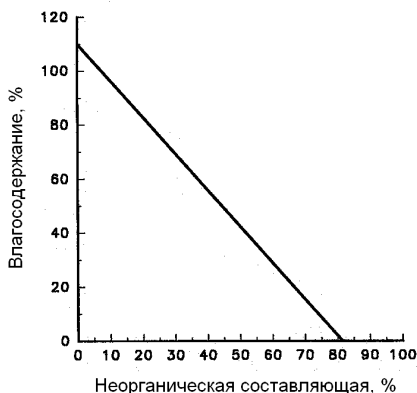


Рис. 1.5. Пределы воспламеняемости по Франдсену [46]

Линия обозначает предел воспламенения смешанного сфагноума с учетом доли влагосодержания и неорганической минеральной почвы при плотности органической массы 110 кг/м^3 . Оба процентных показателя отражают основной компонент в сухом виде. Случаи успешного воспламенения попадают в треугольник, ограниченный осями и пределом воспламенения. Франдсен ограничил свое исследование добавлением глинистого грунта и фиксированной плотностью органической массы 110 кг/м^3 . Хартфорд [47] расширил исследование, включив изменения в неорганическом материале и плотности органической массы. Увеличение плотности органической массы привело к уменьшению вероятности воспламенения, особенно при низких уровнях влагосодержания.

Предполагается, что пределы воспламенения могут быть использованы поочередно с пределами горимости. Фонс [48], наблюдал распространение пожара по поверхностным горючим материалам в виде серии последовательных зажиганий горючих частиц. Распространение тлеющего пожара происходит подобным образом, однако это более продолжительный процесс, в котором предполагаемые элементы объема среды, находящиеся впереди фронта тлеющего пожара, нагреваются до воспламенения вместо частиц. Сначала они являются эндотермическими, а в конце становятся экзотермическими, так как температура элемента объема до-

стигает уровня, достаточного для пиролиза, и становятся частью зоны горения. Переход от эндотермического к экзотермическому процессу может рассматриваться как зажигание. Если подвод тепла не достаточен для выведения влаги, но при этом доводит сухую долю вещества (как органического, так и неорганического) до температуры зажигания, тогда элемент объема не загорится, т.е. не возникнет устойчивого горения в виде тления. Чтобы гарантировать надежные результаты, при проведении лабораторных испытаний, связанных с зажиганием, должны быть обеспечены условия бокового распространения пожара. При реализации метода воспламенения должен вырабатываться тепловой поток, достаточный для зажигания одной стороны образца за ограниченный промежуток времени, и обеспечиваться фронт тления, распространяющийся в боковом направлении. Считается, что фронт, подтверждающий результаты воспламенения, установился, если зона горения может быть установлена в образце, так что будет выделяться достаточное количество теплоты, чтобы продолжилось распространение тления в образце. Понятие «подтверждающий» означает способность быстро загораться еще не горящих участков образца, расположенных перед движущейся зоной горения.

Для представительности выборки образцы были собраны на 17 участках по всем США. Для каждого участка проводилось от 25 до 30 опытов. Образцы представляли собой торфа кубической формы ($10 \times 10 \times 5$ см). Образцы заболоченного леса, болот и лесов, произрастающих на мелководье, не имеют определенной структуры и не могут быть получены в виде кубических блоков. Такие органические почвы были рыхлыми и представляли собой сыпучий материал.

Полученные плотности органической массы составляли 200 кг/м^3 для болот и 120 кг/м^3 для лесов, произрастающих на мелководье. Объем кубического образца вычислялся непосредственно перед зажиганием, исходя из размеров образца. Определялись два измерения каждого размера, затем вычислялась изменчивость объема на основе всех комбинаций этих размеров. Коэффициент вариации для индивидуальных объемов колебался в пределах от 1 до 10%.

Неорганические компоненты кубических образцов были получены из дополнительных образцов, предусмотренных для каждого испытания. После учета влагосодержания оставшийся дополнительный образец сжигался, а затем оценивалась неорганическая составляющая. Диапазон неорганических составляющих и плотностей органической массы фиксировался для каждой местности, в которой эти образцы были получены (табл. 1.3).

Таблица 1.3

**Группы образцов и их средние значения неорганической составляющей,
средней плотности органической массы и коэффициент вариации (КВ)
в соответствии с глубиной образца для каждой группы**

Идентификация образца	Среднее значение неорганической составляющей, %	КВ, %	Среднее значение плотности органической массы, кг/м ³	КВ, %	Глубина, см
Сфагнум (верхний)	12,40	20	21,8	24	0–5
Сфагнум (нижний)	56,70	22	119,0	16	10–25
Опад	18,10	30	42,7	23	0–25
Ягель / опад	26,10	30	56,3	33	0–5
Осоковый луг (верхний)	23,30	23	69,4	28	5–15
Осоковый луг (нижний)	44,90	21	91,5	22	15–25
Заросли белой ели	35,90	31	122,0	20	0–5
Торф	9,40	7,1	222,0	6,8	17–25
Перегнивший торф	34,90	15	203,0	13	12–20
Осоковый луг	35,40	7,6	183,0	13	17–25
Сосновый бор	36,50	16	190,0	19	0–5
Ельник / сосновый бор	30,70	43	116,0	27	0–5
Травянистое / осоковое болото	35,20	12	120,0	12	0–5
Лес сосны болотной	68,00	29	112,0	39	0–5
Болото с деревьями твердых пород	18,20	88	138,0	28	0–5
Заболоченный лес	2,50	5,2	210,0	2,5	10–30
Затопленный лес	50,60	0,7	200,0	–	0–15
Лес, растущий на мелководье	80,20	0,02	120,0	–	0–15

Влагосодержание образцов варьировалось в лабораторных условиях. Чтобы определить диапазон влагосодержания, связанный с пределами воспламеняемости, его поиск проводился главным образом в этих пределах, так как большая часть информации была получена из тестовых зажиганий. Важные данные о распределении вероятности содержатся в переходной области от горения до негорения. Испытания были сгруппированы в этой области. Целевые значения влагосодержания достигались путем добавления влаги к образцу или путем высушивания образца. Количество воды, которое добавлялось или удалялось, вычислялось исходя из начального веса образца и влагосодержания. После добавления или удаления воды запечатанные образцы помещались в нагретую до 50°C печь как минимум на 3 дня. Нагревание запечатанного образца способствует достижению равновесной влажности. После нагревания в печи образец выдерживался при комнатной температуре (20°C) от одного до несколь-

ких дней, а затем подвергался тестовому воспламенению. Конечное влагосодержание рассчитывалось исходя из начальной массы и влагосодержания и конечного изменения массы образца, так как это изменение могло произойти только в результате либо увеличения, либо потери воды.

Изменчивость образцов, связанная с местами их сбора, выражалась с помощью коэффициента вариации (КВ) в процентах (табл. 1.3). КВ для неорганической составляющей рыхлых образцов находится в диапазоне от 0,02 до 5,2%. Значения КВ были получены из трех случайных образцов каждого типа почвы: заболоченного леса, болота и леса, растущего на мелководье. Заболоченный лес имеет очень низкий КВ равный 2,5% для плотности органической массы. Другие два типа почвы не имеют КВ, так как объем образца был фиксированным. Значения КВ для кубических образцов лежали в интервале от 7 до 88% для неорганической составляющей, при этом большинство значений попадает в интервал 20–30%. Значения КВ для органической массы изменялись от 7 до 39%.

Тестовое зажигание. Бокс для зажигания был сконструирован таким образом, чтобы вместить доведенные до требуемого уровня влажности образцы. Внутренние размеры составляли $10 \times 10 \times 5 \text{ см}^3$. Образцы воспламенялись за счет боковой стенки размером $5 \times 10 \text{ см}^2$, что позволяло имитировать боковое распространение процесса тления. Открытый верх имел размеры $10 \times 10 \text{ см}^2$, размер самой емкости подходил для размещения образца толщиной 5 см (рис. 1.6).

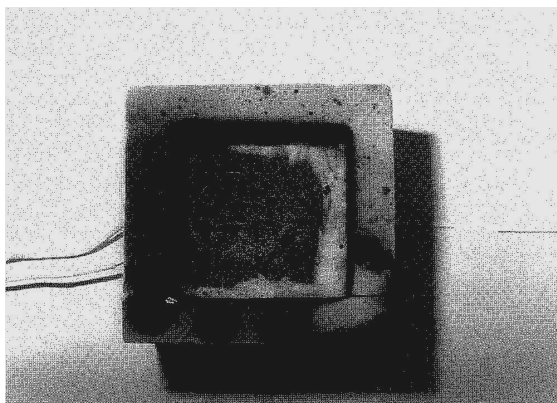


Рис. 1.6. Бокс для зажигания образцов

Зажигание считалось успешным, если образец сгорал полностью. Слой толщиной 1 см, отделяющий боковую сторону образца от зажигающей

поверхности, заполнялся сухим сфагнумом. В бокс вставлялся специальный разделитель когда проводилось испытание образца, полученного из рыхлой органической почвы болотистого леса или лесов, растущих на мелководье. Разделитель удалялся после заполнения сухим сфагнумом. Зажигание происходило на левой границе образца за счет раскаленной спирали, находившейся внутри бокса посередине между верхом и низом образца. Спираль располагалась внутри слоя сухого сфагнума. Фронт горения в результате тления двигался слева на право внутри образца.

Сухой сфагнум быстро загорался в течение заданных 3 минут под действием раскаленной до красна спирали. Сфагнум, в свою очередь, действовал как источник зажигания для образца. Если воспламенение происходило, то оно распространялось в боковом направлении, имитируя боковое распространение в пространстве.

Успешное воспламенение происходило, если возникало продолжительное горение в виде тления. Продолжительное горение означает, что имеется достаточное количество теплоты, чтобы компенсировать теплотопотери, возникающие из-за влажности и наличия неорганического материала, наряду с достаточной оставшейся теплотой, идущей на продолжение процесса тления, т.е. непрерывное повторение зажигания несгоревшего горючего материала.

Анализ. Для анализа результатов успешных и неудавшихся зажиганий конкретного горючего материала в зависимости от изменения влагосодержания, была использована логарифмическая регрессия. Характеристика горения (1 – горение, 0 – нет горения) являлась зависимой переменной, а влагосодержание, неорганическая составляющая и плотность органической массы были независимыми переменными, за исключением параметров рыхлых образцов (заболоченный лес, болотистый лес и лес на мелководье), где неорганическая составляющая оценивалась для целого контейнера, содержащего образцовый материал, а не для каждого образца в отдельности. Плотность органической массы и влагосодержание фиксировались как независимые переменные для каждого образца из заболоченного леса. Однако плотность органической массы для образцов болотистого леса и леса, растущего на мелководье, видоизменялась до фиксированного значения в боксе для зажигания, оставляя только влагосодержание независимой переменной для этих двух типов образцов.

Логарифмическая регрессия позволяла экспериментатору использовать имеющиеся параметры. С целью изучения перехода через предел воспламенения варьировалось только влагосодержание. Неорганическая составляющая и плотность являлись параметрами, присущими непосредственно образцу. Их влияние на возможность воспламенения регулиро-

валось через логарифмическую регрессионную модель. При таком подходе экспериментатор может объяснить переход от успешного зажигания до неудавшегося как вероятность. Это становится особенно актуальным, когда влагосодержание при успешных зажиганиях частично совпадает с неудавшимися зажиганиями. Согласно Франдсену, вероятность зажигания через независимые переменные выражается следующим образом:

$$P = 1 / \{1 + \exp[-(B0 + B1 \cdot MC + B2 \cdot ash + B3 \cdot rho)]\}, \quad (1.20)$$

где P – вероятность; MC – процент влагосодержания; ash – процент неорганической составляющей; rho – плотность органической массы (кг/м^3) и переменные; B – константы в вероятностном выражении. Значения B определяются с помощью логарифмического регрессионного анализа.

Результаты представлены в табулированной форме в виде коэффициентов B для вероятностного уравнения для каждой образцовой группы (табл. 1.4).

Таблица 1.4

Параметры вероятностного уравнения для каждой группы образцов

Идентификация образца	$B0$	$B1$	$B2$	$B3$
Сфагнум (верхний)	–8,8306	–0,0608	0,8095	0,2735
Сфагнум (нижний)	327,3347	–3,7655	–8,7849	2,6684
Опад	9,0970	–0,1040	0,1165	–0,0646
Ягель / опад	8,0359	–0,0393	–0,0591	–0,0340
Осоковый луг (верхний)	39,8477	–0,1800	–0,3727	–0,1874
Осоковый луг (нижний)	29,0818	–0,2059	–0,2319	–0,0420
Заросли белой ели	332,5604	–1,2220	–2,1024	–1,2619
Торф	–19,8198	–0,1169	1,0414	0,0782
Перегнивший торф	37,2276	–0,1876	–0,2833	–0,0951
Осоковый луг (Seney)	7,1813	–0,1413	–0,1253	0,0390
Сосновый бор (Seney)	45,1778	–0,3227	–0,3644	–0,0362
Ельник / сосновый бор	58,6921	–0,2737	–0,5413	–0,1246
Травянистое / осоковое болото	236,2934	–0,8423	–2,5097	–0,4902
Лес сосны болотной	32,8921	–0,1676	–0,3211	–0,0409
Болото с деревьями твердых пород	33,6907	–0,2946	–0,3002	–0,0404
Заболоченный лес	–18,4047	–0,0044	–	0,0908
Затопленный лес	13,4691	–0,2273	–	–
Лес, растущий на мелководье	–	–	–	–

Не просто получить выражение для вероятности зажигания торфа в зависимости от влагосодержания. Однако вероятность зажигания может быть выражена в отношении к влагосодержанию (рис. 1.7) для каждой

группы образцов через их набор коэффициентов B (табл. 1.4), путем фиксирования неорганической составляющей и плотности органической массы на уровне их средних значений для данной образцовой группы (табл. 1.3).

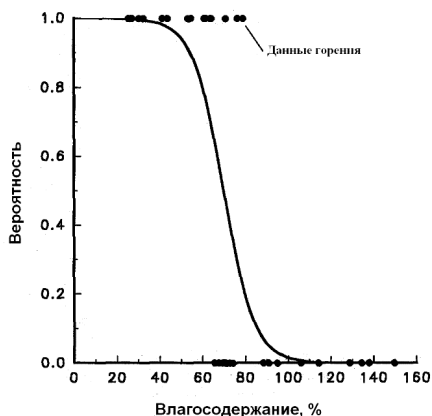


Рис. 1.7. Пример распределения вероятности загорания в сравнении с влагосодержанием (осоковый луг (верхний)) на основе логарифмического регрессионного анализа данных о горении / негорении. Индивидуальные данные об успешных загораниях изображены для сравнения. Успешные загорания изображены точками на уровне значения вероятности 1 в соответствии с уровнем влагосодержания, неудавшиеся загорания изображены на уровне значения вероятности 0

Автором получено 17 распределений вероятности [51], по одному для каждой группы образцов, за исключением образцов мелководного леса, потому как эта образцовая группа не воспламеняется даже при низком влагосодержании, после сушки в печи. Все распределения зависели от влажности, неорганической составляющей и плотности органической массы, кроме групп образцов заболоченного леса и затопленного леса.

Все группы образцов показывают обратную сигмоидальную кривую, движущуюся от высокой вероятности при низких значениях влагосодержания к низкой вероятности при высоких значениях влагосодержания, за исключением заболоченного леса. Точка опоры изначально соответствовала значению вероятности 100% и нулевому значению влагосодержания (66% для заболоченного леса). Данные загорания для заболоченного леса демонстрировали приемлемое поведение от 104 до 219% уровня влагосодержания, устойчивое горение поддерживалось от 104 до 129%. Область перекрытия неопределенности занимала диапазон от 130 до 154%, следуя

за диапазоном неустойчивого горения от 160 до 219%. Однако этот порядок нарушался другой областью перекрытия неопределенности от 224 до 300% за пределами области неустойчивого горения, уже отмеченной. Игнорируя данные для уровня влагосодержания более 219%, логарифмический регрессионный анализ группы образцов привел к вероятности загорания 100% при нулевом уровне влагосодержания.

Анализ результатов. Высокое содержание неорганической компоненты в группе образцов, полученных в заболоченных лесах (80,2%), может являться причиной для его недостаточной воспламеняемости. Доля неорганической составляющей 81,5% является пределом по Франдсену [49] для загорания сфагнома после высушивания в печи. Интересное совпадение заключается в том, что это значение близко к значению неорганической компоненты, которое означает переход от органической почвы к минеральной почве, установленное учеными почвоведом.

Устанавливая уровень вероятности 50% в качестве общей меры воспламеняемости каждой группы образцов, полученные данные могут быть изображены одновременно в рамках одного графика и сравнены с пределом загорания сфагнома, полученным Франдсеном [49]. Влагосодержание при вероятности 50% является мерой предела воспламенения в зависимости от влажности. Среднее значение неорганической компоненты образцовой группы служит мерой для предела воспламенения, связанного с неорганической долей образцов. Каждая группа образцов изображена в соответствии с их средней неорганической составляющей (абсцисса) и влагосодержанием при вероятности 50% (ордината) (рис. 1.8).

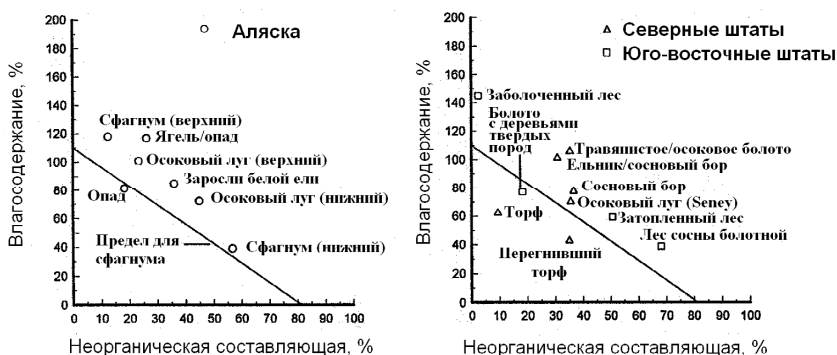


Рис. 1.8. Зависимость влагосодержания от средней неорганической составляющей для группы образцов при вероятности воспламенения 50%. Прямая линия представляет предел горения для сфагнома [49], показанный для сравнения

Почти все группы образцов лежат выше предела для сфагнома. Это говорит о том, что эти полевые образцы загорятся при более высоком уровне влажности и неорганической составляющей, чем сфагнум. Как утверждает автор, эта разница могла возникнуть за счет метода зажигания. Боковое воспламенение, осуществляемое, в основном, ниже поверхности образца, несет меньшие теплотери, чем поверхностное воспламенение, при котором возникает охлаждение поверхности. В результате при боковом зажигании большее количество тепла идет на вывод дополнительной влаги и нагрев неорганического материала, вызывая, таким образом, воспламенение при более высоких уровнях влагосодержания.

Отметим, что осоковый луг (верхний) и осоковый луг (нижний) находятся приблизительно на одном и том же расстоянии от предела для сфагнома. Однако сфагнум (нижний) ближе к пределу для сфагнома, чем сфагнум (верхний). Средние плотности органической массы для осокового луга (верхнего) и осокового луга (нижнего) очень похожи. Однако плотность органической массы сфагнома (нижнего) в шесть раз больше, чем плотность сфагнома (верхнего). Хартфорд [47] обнаружил, что увеличение плотности органической массы уменьшает вероятность воспламенения. Хотя этот аргумент может показаться убедительным для сфагнома, он не объясняет, почему опад расположен ниже предела для сфагнома, хотя он имеет плотность органической массы в два раза меньше, чем сфагнум.

В рамках исследования предела воспламенения и горения в виде тления Франдсеном были проведены тестовые зажигания образцов органической почвы, собранные на участках, подверженных природным пожарам. Результаты представлены в виде вероятностей воспламенения, рассчитанных для органических почв, расположенных на Аляске и в северных и юго-восточных штатах США. Знание доли неорганической составляющей и влагосодержания органических почв позволяет осуществлять управление с помощью определения вероятности воспламенения в виде тления. Зная вероятности воспламенения, человек, осуществляющий управление, может затем определить, где необходимо проводить заблаговременные контролируемые отжиги и предупредительные работы при благоприятных для возникновения пожара условиях, препятствующие его возникновению.

1.2.4. Показатели торфяной пожарной опасности и методы их оценки

Методы оценки пожароопасности на торфяниках основаны на учете следующих факторов или групп факторов:

- горимость абсолютно сухого вещества торфа, обусловленная его физико-химическими свойствами;
- метеорологические факторы, определяющие интенсивность процесса испарения влаги из торфа и увлажнения его;
- первоначальная влажность верхнего слоя торфяной залежи, измеряемая в начале сезона в естественных условиях или рассчитанная по соответствующим формулам;
- скорость ветра.

Эти факторы в совокупности определяют природную пожароопасность торфа, характеризующую потенциальную возможность возникновения и развития пожаров. Кроме того, необходимо учитывать вероятность появления источника огня, определяемую эксплуатационными и прочими факторами, усиливающими общую пожароопасность, связанными с организацией производства и соблюдением правил пожарной безопасности, склонностью торфа к самовозгоранию и др.

Совокупностью всех вышеперечисленных факторов определяется фактическая пожароопасность на торфяниках. Схема взаимосвязи вышеуказанных факторов при формировании пожароопасности может быть описана следующим образом [50].

При теплой солнечной погоде верхний слой торфа быстро высыхает до весьма низкой влажности. Температура поверхности торфа становится выше температуры окружающего воздуха. В ясные летние дни температура верхних слоев торфа достигает 32–34°C при температуре окружающего воздуха 27–28°C.

Чем ниже уровень грунтовых вод, тем суше и опаснее в пожарном отношении поверхность торфа. Зная уровень грунтовых вод, можно ориентировочно определить влажность верхнего слоя залежи [52]. Однако необходимо учитывать состав слоя почвы, на котором лежит торфяник, т.е. является ли он водоупорным или нет. Чем больше скорость ветра на высоте 2 м от поверхности, тем больше опасность быстрого распространения огня.

Согласно схеме формирования пожароопасности на торфяниках природная пожароопасность торфа определяется двумя основными факторами [53]: готовностью торфа к воспламенению и скоростью ветра.

Готовность торфа к воспламенению и распространению горения определяется его влажностью в момент воспламенения и физико-химическими свойствами (горимостью) абсолютно сухого вещества данного вида торфа.

Авторами [53] была проведена работа по выявлению зависимости готовности торфа к воспламенению и распространению горения. В качестве критериев готовности торфа к воспламенению и распространению горе-

ния рассматривались весовая скорость выгорания горючего вещества (Γq) и скорость распространения горения по поверхности образца (Γs).

На основе полученных данных, обработанных методами математической статистики, зависимость готовности торфа к воспламенению и распространению горения от влажности и степени разложения имеет вид

$$\Gamma = f(W, R), \quad (1.21)$$

где Γ – критерий готовности торфа к воспламенению и распространению горения (Γq или Γs), кг/ч или м²/ч; W – влажность образцов торфа, %; R – степень разложения, %.

С достаточной степенью точности зависимость (1.21) можно представить в виде линейного уравнения регрессии

$$\Gamma = \Gamma_c - a_0 W, \quad (1.22)$$

где Γ_c – критерий готовности абсолютно сухого вещества данного вида торфа к воспламенению и распространению горения; a_0 – эмпирический коэффициент. Из выражения (1.22) следует:

$$a_0 = \Gamma_c / W_0, \quad (1.23)$$

где W_0 – влажность, при которой торф не способен самостоятельно гореть, %.

Готовность торфа к воспламенению и распространению горения можно охарактеризовать коэффициентом готовности, определяемым из соотношения

$$K_z = \Gamma / \Gamma_c, \quad (1.24)$$

или, с учетом (1.22), (1.23) и (1.24):

$$K_z = 1 - W / W_0. \quad (1.25)$$

При $W = 0$ (абсолютно сухое вещество), $K_z = 1$, при $W = W_0$, $K_z = 0$ (торф не горит). При других значениях W коэффициент K_z принимает промежуточное значение между 0 и 1. По своей сущности коэффициент K_z характеризует природную пожароопасность торфа при скорости ветра $V_B = 0$.

Для фиксированных значений R значение Γ_c определяется из уравнения

$$\Gamma_c = \Gamma_{c0} + b_0 R, \quad (1.26)$$

где Γ_{c0} – критерий готовности к воспламенению и распространению горения торфа, имеющего $R = 0$; b_0 – эмпирический коэффициент.

Очевидно, что ветер играет двоякую роль: с одной стороны, он усиливает интенсивность горения, т.е. способствует сушке торфа, с другой – усиливает природную пожароопасность. Исследования, проведенные в [53], показывают, что при отсутствии движения воздуха значения Γ_v (критерий готовности торфа к воспламенению и распространению горения при произвольном значении ветра) и Γ_c незначительны, т.е. при отсутствии движения воздуха горения торфа практически нет, так как в этом случае горящие частицы торфа покрываются золой, и к очагу горения прекращается доступ кислорода.

Согласно [54] зависимость $\Gamma_v = f(V)$ имеет линейный характер:

$$\Gamma_v = \Gamma_v^0 + c_0 V, \quad (1.27)$$

где Γ_v – критерий готовности торфа к воспламенению и распространению горения при произвольном значении V ; V – скорость ветра; Γ_v^0 – Γ_v при $V = 0$; c_0 – эмпирический коэффициент.

Величина Γ_v^0 равна текущему значению Γ , определяемому из уравнения (1.22). Тогда

$$\Gamma_v = \Gamma_c - a_0 W + c_0 V. \quad (1.28)$$

В этом случае природная пожароопасность торфа может быть определена из соотношения

$$\Pi_n = \Gamma_v / \Gamma_c, \quad (1.29)$$

или, с учетом (1.28), после преобразований будем иметь

$$\Pi_n = 1 - W/W_0 - c_0 V / \Gamma_c. \quad (1.30)$$

Из анализа последнего выражения видно, что природная пожароопасность определяется в основном двумя показателями: влажностью W и скоростью ветра V . Другие входящие в выражение параметры имеют для данного вида торфа постоянные значения. Согласно [55] значение W_0 для низинного торфа не превышает 69%, а верхового – 72%, а так как Γ_v и Γ_c

постоянны, то и отношение c_0/G_c для данного вида торфа – также величина постоянная.

К сожалению, данная модель построена на основе наблюдений и, как любая эмпирическая модель, носит оценочный характер. Кроме того, авторы не учитывают вероятность появления источников огня, определяемую природными и антропогенными факторами.

Для оценки пожарной опасности на полях добычи фрезерного торфа Калининским филиалом Всесоюзного научно-исследовательского института торфяной промышленности (ВНИИТП, пос. Радченко) [38] на основе многолетних наблюдений рекомендуется формула

$$P_{\text{оп}} = P_{\text{п}} \cdot K_{\text{св}} \cdot K_{\text{п}} \cdot K_{\text{т}}, \quad (1.31)$$

где: $P_{\text{оп}}$ – показатель пожарной опасности; $P_{\text{п}}$ – показатель природной опасности торфа, зависящий от скорости ветра и влажности фрезерного торфа в слое толщиной 5–10 мм; $K_{\text{св}}$ – коэффициент, учитывающий усиление природной опасности торфа за счет его самовозгорания в течение сезона; $K_{\text{п}}$ – коэффициент, учитывающий вероятность возникновения пожара на полях добычи торфа во время сезона; $K_{\text{т}}$ – коэффициент, учитывающий усиление природной пожарной опасности из-за концентрации на полях добычи большой массы сухого торфа в течение сезона.

Показатели пожарной опасности, вычисленные по формуле (1.31), составляют шкалу пожарной опасности для конкретного предприятия или участка торфяного месторождения. Значения коэффициентов $K_{\text{св}}$, $K_{\text{п}}$, $K_{\text{т}}$ ежегодно уточняются на основании статистических данных о пожарах за пять предшествующих сезонов.

Величина показателей по шкале пожарной опасности разделена на пять классов (табл. 1.5).

Таблица 1.5

Классификация пожарной опасности на полях добычи торфа

Класс пожарной опасности	Величина показателей пожарной опасности, определяющих верхнюю и нижнюю границы класса		Характеристика пожарной опасности
I	0	1,457	Слабая
II	1,458	2,123	Средняя
III	2,123	3,093	Высокая
IV	3,094	4,056	Очень высокая
V	4,057	Более 4,057	Чрезвычайная

Как показано в [56], вероятность появления очагов загорания определяется функцией экспоненциального распределения

$$F(n) = 1 - e^{-\lambda n}, \quad (1.32)$$

где λ – параметр распределения.

Математическая обработка статистических данных о загораниях и пожарах за ряд лет показывает, что наименьшее число загораний и пожаров в мае, увеличивается в июне, июле и достигает максимума в августе. Поэтому пожароопасный сезон целесообразно разбить на четыре периода (май, июнь, июль и август) и определять средневзвешенное число загораний в день для каждого месяца:

$$N_3 = \frac{c_1 n_1 + c_2 n_2 + \dots + c_m n_m}{c_1 + c_2 + \dots + c_m}, \quad (1.33)$$

где $c_1, c_2, \dots, c_m$ – количество дней в месяце соответственно с $n_1, n_2, \dots, n_m$ загораниями в день.

Число загораний в день и вероятность их появления приведены в табл. 1.6.

Таблица 1.6

Число загораний в день и вероятность их появления в различные периоды сезона

Месяц	Май	Июнь	Июль	Август
Число загораний в день	1	2	3	4
Вероятность появления загораний	0,265	0,450	0,605	0,775

Приняв значение коэффициента K_n , учитывающего вероятность загораний в мае за единицу, получим значения K_n других периодов сезона.

Величину коэффициента, учитывающего наличие готовой продукции на полях добычи, можно определить по формуле [57]:

$$K_m = 1,1 + \left(\frac{1}{N_{\text{сез}}} - 0,0018 \right) N_k, \quad (1.34)$$

где $N_{\text{сез}}$ – календарная продолжительность сезона, дней; N_k – количество календарных дней с начала сезона.

Следует отметить, что данная работа имеет аналогичные недостатки, что и предыдущая.

Для определения показателя пожарной опасности требуется большой массив информации, получить которую довольно трудно. Существует упрощенная методика определения пожарной опасности на торфяных полях [41]. В соответствии с этой методикой в период устойчивой засушливой погоды опасность пожара можно определить, используя величины психрометрической разности $\Delta t^{\circ}\text{C}$ и скорости ветра V м/с в 15.00 местного (солнечного) времени.

Для этого разработана номограмма, в которой выделены зоны пожарной опасности – очень высокая, высокая, средняя и малая. Существуют зоны с двумя категориями опасности, например высокая и средняя. В зонах с двумя категориями пожарной опасности следует принимать более высокую при наличии на полях сухой фрезерной крошки.

На полях добычи фрезерного торфа самовозгорание часто происходит из-за интенсивного солнечного облучения. При таком облучении температура верхнего слоя фрезерного торфа на $15\text{--}17^{\circ}\text{C}$ выше температуры окружающей среды, в результате чего мелкие частицы торфа имеют низкое влагосодержание и высокую температуру и легко воспламеняются от самых низких источников зажигания – искр.

Имеется тесная корреляционная связь между количеством очагов самовозгорания торфа в штабелях и температурой верхнего слоя торфяной залежи, особенно с учетом осадков (коэффициент множественной корреляции 0,97).

Наиболее высокую вероятность возникновения очагов самовозгорания торфа в штабелях следует ожидать в сезоны с притоком прямой солнечной радиации на горизонтальную поверхность (в мае–июле). На основании анализа поведения 22 видов торфа в штабелях по 34 торфопредприятиям ВНИИТП разработал классификацию торфов по их склонности к самовозгоранию [44]. По этой классификации все виды торфа разделяются на три группы (категории) (табл. 1.7).

Опасная группа – группа В – характеризуется наиболее ранним появлением очагов самовозгорания – в сентябре–октябре, а в некоторых случаях и в августе. В период хранения с 1 марта до 1 марта следующего года самовозгорание наблюдается более чем у 20% всех штабелей. При уборке торфа повышенной влажности в неблагоприятные по метеорологическим условиям сезоны очаги самовозгорания появляются позже – в октябре–ноябре.

Среднеопасная группа – группа Б. Очаги самовозгорания появляются в октябре–ноябре, иногда в сентябре и даже раньше. Самовозгоранию подвергается 15–20% всех складочных единиц, хранящихся до 1 марта.

Таблица 1.7

Распределение видов торфа по группам склонности к самовозгоранию

Тип торфа	Вид торфа	Степень разложения, %	Группа по склонности к самовозгоранию
Низинный	Осоковый	До 35	В – опасная
	Шейцериевый	20	
	Сфагново-низинный	20	
	Тростниковый	20 и 31–35	
	Осоково-гипновый	До 20	
	Древесно-осоковый	24–35 и выше	
	Древесно-тростниковый	31 и выше	
	Хвощевой	21–30	
Верховой	Осоково-сфагновый	До 20	А – безопасная
	Березовый	35 и выше	
	Комплексный верховой	До 20	В – опасная
	Фускум-торф	До 20	
	Медиум-торф	До 20	
	Пушицевый	До 20	
	Шейцериевый верховой	До 20	
	Сосново-пушицевый	До 20	А – безопасная
	Сфагно-мочажинный	До 20	
Переходный	Древесно-сфагновый переходной	До 20	В – опасная
	Сфагновый переходной	До 20	Б – среднеопасная
	Шейцериевый переходной	До 20	
	Древесно-переходной	До 20	А – безопасная
	Осоково-сфагновый переходной	До 30	

Безопасная группа – группа А. Явления самовозгорания или отсутствуют совершенно, или выражены в виде единичных очагов, появляющихся не ранее марта–апреля следующего года.

Виды торфа, отсутствующие в классификации, если и встречаются, то весьма редко. В табл. 1.7 только один вид торфа отнесен к группе Б; таким образом, целесообразно принять распределение всех торфов на две группы – опасную и малоопасную.

В промышленности в настоящее время принята упрощенная классификация, по которой все виды торфа делятся на две категории – опасную и малоопасную [58].

Приведенные выше классификации торфов по их склонности к саморазогреванию основаны на статистике и времени появления очагов самовозгорания. Однако в связи с недостаточной изученностью вопроса о поведении торфа в штабелях Гипроторф предложил отказаться от классификации полей по склонности торфа к самовозгоранию по трем группам, а разделить ее на две группы. К группе опасных в пожарном отношении объектов он предложил отнести поля добычи фрезерного торфа на топли-

во, для брикетирования и подстилки, а поля добычи фрезерного торфа с влажностью 55–50% – к группе малоопасных объектов.

Необходимо отметить, что классификация ВНИИТП и Гипроторфа не учитывает зависимость саморазогревания и самовозгорания от многих факторов различной природы. Статистические методы объективно отражают поведение торфа при хранении в текущем сезоне. Однако они имеют существенные ограничения при распространении их результатов на предстоящий сезон в связи с возможным изменением свойств торфяной залежи и условий производства и хранения торфа.

Позже ВНИИТП разработал новые классификации торфа по склонности к саморазогреванию и самовозгоранию [42, 59], одна из которых [59] вошла в технологические регламенты на складирование и хранение фрезерного торфа. Согласно этой классификации исходными данными при определении категории склонности торфа к саморазогреванию являются тип торфа, степень его разложения и содержание подвижного железа $Fe_{\text{подв}}$, определяемые в образцах торфа, отобранных при ежегодной паспортизации залежи (табл. 1.8).

Таблица 1.8

Классификация торфа по склонности к самовозгоранию [42]

Категория склонности	Тип торфа	Степень разложения R , %	Содержание $Fe_{\text{подв}}$ мг/кг сухого вещества
Особоопасная	Низинный	< 35	225
	Переходный		180
	Верховой		120
Опасная	Низинный Верховой	< 35	100–225
Малоопасная	Низинный	< 35	100
	Верховой		60
	Низинный	≥ 35	–
	Верховой Переходный		– –

Категории торфа по склонности к саморазогреванию и самовозгоранию устанавливает ОТК торфопредприятия. В сезоне при достижении торфом в штабеле критических температур $t_{\text{кр}}$ (низинный – $t_{\text{кр}} > 75^\circ\text{C}$, верховой – $t_{\text{кр}} > 65^\circ\text{C}$) с учетом погодных условий возможен перевод в особоопасную, а по окончании сезона – в опасную категорию. При температуре торфа в штабеле ниже критической, торф по категории склонности соответственно может быть отнесен к малоопасной категории.

При разработке другого метода прогнозирования [42] учитывалось, что на процессы саморазогревания и самовозгорания оказывают большое влия-

яние следующие основные факторы: природно-генетические, метеорологические, технологические и температура торфа в штабеле. Решение об отнесении торфа к опасной (процесс А) или малоопасной (процесс В) категории определяется из системы неравенств:

$$\text{Порог } B < (\sum \text{ПК}_{\text{пр}} + \text{ПК}_{\text{мт}} + \text{ПК}_t) < \text{Порог } A, \quad (1.35)$$

где Порог А, Порог В – пороги, при достижении которых выносятся решение в пользу процесса А или В; $\sum \text{ПК}_{\text{пр}}$ – сумма прогностических коэффициентов, характеризующая природно-генетические свойства торфа; $\text{ПК}_{\text{мт}}$ – прогностический коэффициент, характеризующий метеорологические и технологические факторы; ПК_t – прогностический коэффициент, характеризующий температуру торфа в штабеле.

В конце сезона, учитывая все входящие в прогностическую таблицу факторы, определяют сумму всех прогностических коэффициентов и выносят решение: опасный или малоопасный по самовозгоранию торф. Если $(\sum \text{ПК}_{\text{пр}} + \text{ПК}_{\text{мт}} + \text{ПК}_t) \geq +6$, то принимают решение «опасный по самовозгоранию торф»; если $(\sum \text{ПК}_{\text{пр}} + \text{ПК}_{\text{мт}} + \text{ПК}_t) \leq -6$, «малоопасный по самовозгоранию торф»; если $-6 < (\sum \text{ПК}_{\text{пр}} + \text{ПК}_{\text{мт}} + \text{ПК}_t) < +6$, то «неопределенный ответ».

Следует отметить, что данные неравенства базируются на прогностических коэффициентах, определение которых неоднозначно, что может привести к значительным погрешностям в прогнозе.

Моделирование сложного процесса саморазогревания торфа в штабеле проведено В.М. Шпыневым [56]. В своей работе автор использует имитационное моделирование для реализации сложного динамического процесса. Цель моделирования – выявить интенсивность процесса саморазогревания торфа в штабелях в зависимости от внешних факторов для того, чтобы иметь данные о температуре в штабеле в любой момент времени. Внешними факторами в модели являются температура воздуха; солнечный тепловой поток; осадки; скорость ветра; срок хранения. Эти параметры изменяются в период добычи и хранения торфа не только по дням, но и в течение суток. На основании обработки результатов метеорологических данных по торфопредприятиям Владимирской и Московской областей были получены [56] зависимости по изменению указанных параметров с мая по ноябрь. Полученные зависимости имеют следующий вид.

Количество осадков Q , кг/м²:

$$Q = -6,1 \cdot 10^{-3} (T_4)^2 + 1,17 (T_4) + 15,8 \pm 5,36. \quad (1.36)$$

Солнечный тепловой поток R , Дж/м²:

$$R = -3,83 \cdot 10^{-3} (T4)^2 + 0,45(T4) + 47,8 \pm 0,65. \quad (1.37)$$

Температура воздуха t , °C:

$$t = -1,92 \cdot 10^{-3} (T4)^2 + 0,34(T4) + 3,34 \pm 0,54. \quad (1.38)$$

Скорость ветра V , м/с:

$$V = 0,13 \cdot 10^{-3} (T4)^2 - 2,7(T4) + 4,22 \pm 0,31. \quad (1.39)$$

Здесь $T4$ – новое время (сутки) с учетом интервала измерения температуры в штабеле.

При формулировке математической модели, на основе анализа размерностей физических величин, были получены безразмерные критерии подобия

$$\Pi_1 = \frac{CT}{t}, \quad \Pi_2 = \frac{R}{QV^2}. \quad (1.40)$$

Это позволило провести эксперименты на различных видах торфа и, используя ретроспективную информацию по саморазогреванию торфа в штабелях на нескольких торфопредприятиях, определить зависимость вида

$$C = f(R, t, Q, V, T), \quad (1.41)$$

где C – интенсивность саморазогревания в штабеле.

Переменные, входящие в состав модели, имеют следующую размерность:

$$|C| = \frac{\text{град}}{\text{час}}; \quad |R| = \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2}; \quad |V| = \text{м/с}; \quad |Q| = \frac{\text{кг}}{\text{м}^2}; \quad |T| = \text{сутки}; \quad |t| = \text{град}. \quad (1.42)$$

На основе ретроспективной информации по Мезиновскому торфопредприятию, В.М. Шпыневым была получена модель

$$C = \frac{t}{T} \left(K \frac{R}{QV^2} + b \right). \quad (1.43)$$

Были определены коэффициенты уравнения для участка № 2 торфопредприятия Мезиновское ($K = 0,14$; $b = 0,41$).

В дальнейшем эта зависимость была уточнена по результатам температурного контроля штабелей и данным метеостанции в период с 1983 по 1990 г. на торфопредприятии Бакшеевское объединения Шатурторф. Уточненная зависимость имеет вид

$$C = 0,636 \frac{t}{T} \left(\frac{R}{QV^2} \right)^{0,13}. \quad (1.44)$$

1.2.5. Математическое моделирование сушки слоя почвы и торфа

Проведенный обзор показал, что основная масса работ посвящена исследованию гидрологии почв и применению этих моделей для заболоченных территорий. Так, например, Kellner и Halldin [60] обнаружили, что транспорт и распределение влаги в болоте в основном одномерны, и предположили, что одномерная модель, разработанная для минеральных почв, могла быть приспособлена для моделирования гидрологии торфов. Kennedy и Price [61] использовали одномерную модель для исследования транспорта влаги в результате таяния снегов и связей между изменением объема торфа и гидрологией торфяных выработок. Несколько моделей, например ECOUL [62] и FLOCR 2.0 [63], использованы для исследования поведения сжатия деформируемых глин. Kennedy и Price [64] предложили использовать модель FLOCR с модификациями для исследования гидрологии выработанных торфяников, в частности усадки и течений в средах с переменной влажностью.

Модели динамики грунтовых вод используются для расчета скорости и направления движения грунтовых вод через водоносные слои (например, Modflow – трехмерная модель динамики грунтовых вод [65]). Были предприняты попытки разработать модели для заболоченных территорий на основе Modflow, для моделирования многомерных поверхностных стоков через плотную растительность и колебания уровней вод на заболоченных территориях [66]. Однако данные гидрологические характеристики были рассчитаны для больших масштабов (региональный уровень). На уровне экосистемы в последние годы существенные усилия были

направлены на развитие моделей для исследования биологических и физических процессов, управляющих динамикой углерода, воды и азота в почвах. Например, использование модели развития экосистемы – BIOME-BGC (BBGC) [67] позволяет моделировать в течение суток стоки и запасы углерода, азота и воды прежде всего в минеральных почвах; модель COUP [68], первоначально разработанная для моделирования процессов в лесных почвах, является обобщенной и дает возможность моделировать процессы тепло- и массообмена во всех типах почв, независимо от растительного покрова; модель Wetland-DNDC [69] предсказывает биогеохимию углерода и азота в лесных заболоченных территориях; Expert-N [70] – система, состоящая из модульных компонентов для расчета стока воды и тепла в почву, переноса азота и роста урожая; модель SHAW [71] позволяет рассчитывать детально динамику тепла, воды и движение раствора через растительный покров, снег и почву.

Нет принципиального различия в методах, используемых в вышеупомянутых моделях для изучения стока воды и тепла в почву. В основном, все они используют одномерную схему профиля почвы для описания баланса воды в почве и ее аккумуляции. Отличаются, главным образом, моделями, используемыми для описания свойств задержания воды в почве. Предполагается, что тепловой поток является одномерным и распространяется за счет теплопроводности, которая моделируется стандартными методами физики почвы [72]. Используя подобный подход, несколько моделей были разработаны для выяснения процессов, проходящих в торфе и вызывающих изменение уровня грунтовых вод и температуры в торфяниках [73–75]. Однако ни одна из этих моделей не объясняет изменения в свойствах влагоудержания с изменением состава торфа по глубине.

Знание профиля влагосодержания торфа крайне важно для моделирования процессов, связанных с условиями увлажнения торфяников. К сожалению, во всех рассмотренных выше моделях динамика влажности в слое торфа описывается эмпирическими формулами, вид которых определяется поставленными задачами. При этом основной целью исследователей является определение уровня грунтовых вод, а также динамики углерода и азота. Работы, посвященные моделированию процесса сушки торфяников для оценки пожарной опасности, отсутствуют.

Среди наиболее близких работ можно выделить работу [76], посвященную математическому моделированию температурно-влажностных режимов почвогрунтов. В ней рассматривались процессы тепломассопереноса в многослойной почвенной структуре, каждый слой которой моделировался четырехфазной пористой средой. Данная модель дает возможность довольно точно рассчитывать искомые характеристики в поч-

ве. Однако громоздкость математической постановки и большое время счета не позволяют ее использовать для оперативного прогноза. Таким образом, необходимо разрабатывать относительно простые и в то же время достаточно точные и физически обоснованные математические модели для прогноза динамики сушки заболоченных территорий с целью прогноза их пожарной опасности.

1.3. Кинетические исследования природных горючих материалов

1.3.1. Кинетические исследования торфа

Результаты экспериментального исследования финского торфа. Удалось найти несколько работ, посвященных определению термокинетических постоянных для различных видов торфа.

В работе [77] для исследования пиролиза финского измельченного торфа в условиях схожих с условиями в котле с псевдосжиженным слоем был выбран лабораторный спусковой цилиндрический реакционный аппарат (СЦРА), так как он и реактор с вовлеченным потоком обеспечивают высокую скорость нагрева летучих компонент до температур, близких к тем, которые достигаются в промышленных топках. Эти реакционные аппараты могут использоваться для всех типов топлив, кроме того, баланс массы и время нахождения в них, как правило, хорошо известны и могут хорошо контролироваться.

Образец торфа был раздроблен, аккуратно просеян, высушен и подвержен анализу. Плотность торфа была измерена и составила 705 кг/м^3 . Для испытаний были подготовлены образцы измельченного торфа с различными размерами частиц. Образцы с размером 100–125 микрон использовались для определения максимального образования летучих компонент торфа. Более крупные частицы размером 180–225 микрон были выбраны, чтобы собрать информацию о влиянии увеличения размера частиц на выход летучих веществ при пиролизе.

Количество летучих веществ при различных периодах выдержки в реакторе определялось в соответствии со следующей процедурой. Подготовленные образцы топлива высушивались в электрической печи при температуре 105°C в течение 24 ч. После этого один образец был помещен в топливный бункер шнекового транспортера, затем была измерена общая масса бункера. Реактор был разогрет до установленной температу-

ры, и когда частицы пролетали через нагретую часть реактора, возникал пиролиз в виде искр. При этих испытаниях скорость подачи топлива составляла 0,07–0,1 л/ч.

В течение экспериментов использовались потоки азота 0,3 л/мин и 0,7 л/мин, в то время как температура варьировалась в диапазоне 700°C и 800°C. Входящий поток азота стабилизировался при температуре 20°C, при том, что охлаждающая часть и часть металлического фильтра поддерживались при температуре 200°C.

После каждого измерения топливный бункер и частицы, собранные на металлическом фильтре, взвешивались.

Были подготовлены образцы торфа, содержащие частицы двух различных размеров, которые подавались в разогретый реактор при двух различных температурах и двух разных потоках азота. В представленных результатах частицы размером 100–125 микрон помечались как «мелкие», размером 180–225 микрон – как «крупные».

Для моделирования процесса пиролиза использовалась следующая монореакционная модель [77]:

$$\frac{\partial \rho_p}{\partial t} = -A e^{(-E/R_g T)} (\rho_p - \rho_\infty), \quad (1.45)$$

где A – предэкспоненциальный множитель, 1/с; E – энергия активации, Дж/моль; R_g – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); T – температура, К; ρ_p – плотность частицы торфа и ρ_∞ – конечная плотность частицы торфа.

Начальные и граничные условия имели вид

$$\rho_p = \rho_0, \quad 0 < r < r_0, \quad t = 0, \quad (1.46)$$

где r – радиус частицы, м.

В табл. 1.9 приведены кинетические параметры, полученные с использованием описанной выше модели.

Таблица 1.9

Вычисленные кинетические параметры для монореакционной модели

Монореакционная модель	«Мелкие»		«Крупные»	
	A , 1/с	E , Дж/моль	A , 1/с	E , Дж/моль
800°C	1,00E+5	8,28E+4	1,00E+5	8,19E+4
700°C	0,99E+5	7,55E+4	1,03E+5	7,50E+4

В табл. 1.10 представлены вычисленные периоды выдержки частиц внутри реактора.

Таблица 1.10

Вычисленные периоды выдержки для частиц измельченного торфа

Температура, °С	Размер частиц	Точки периода выдержки, с			
		1	2	3	4
800	«Мелкие»	0	0,543	0,855	1,243
800	«Крупные»	0	0,471	0,782	1,187
700	«Мелкие»	0	0,592	0,935	1,345
700	«Крупные»	0	0,505	0,845	1,280

Подбор кинетических параметров для полученных в результате измерений точек (время выдержки – массовые потери), основанный на методе наименьших квадратов, представлен на рис. 1.9.

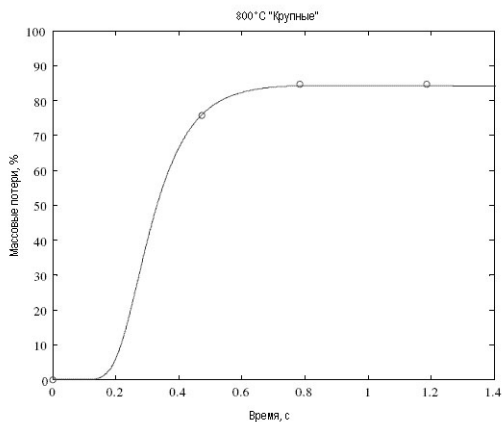


Рис. 1.9. Подобранные кинетические параметры (кривая) по измеренным точкам (кружки)

Из анализа табл. 1.9 видно, что предэкспоненциальный множитель остается практически одинаковым для обоих размеров частиц, в то время как энергия активации увеличивается на 10% при увеличении температуры. Для справки, значения $A = 1 \times 10^5$ 1/с и $E = 80$ кДж/моль использовались в [78] в качестве кинетических параметров для пиролиза в модели горения размельченного торфа при 850°С. Также интересно сравнить энергии активации, определенные в этой работе для измельченного финского торфа, со значениями, представленными в литературе для некото-

рых топлив, состоящих из биомассы. Следует отметить, что явные значения энергии активации, определенные в данной работе для финского торфа, значительно больше, чем представленные в табл. 1.11, которые изменяются от 31 до 48 кДж/моль для четырех видов биомассы при высокой скорости нагрева [79].

Таблица 1.11

Кинетические параметры для четырех топлив, состоящих из биомассы [80]

Сырье	A , 1/с	E , кДж/моль
Солома пшеницы	$1,05 \times 10^3$	31,65
Кокосовая скорлупа	$6,84 \times 10^3$	48,73
Рисовая шелуха	$1,19 \times 10^3$	39,30
Хлопковые стебли	$2,44 \times 10^3$	40,84

Результаты исследования китайского торфа. Работы [81, 82] посвящены кинетическим исследованиям китайского торфа с точки зрения термического разложения и подробному выяснению протекающих химических реакций. На рис. 1.10 показаны кривые TG (ТГ, термогравиметрический анализ) и DTG (ДТГ – скорость изменения массы) образца торфа при пиролизе в инертной среде при нагреве 7, 5, 10 и 12,5 $K \min^{-1}$. Из рис. 1.10 видно, что существуют три этапа уменьшения массы торфа при пиролизе.

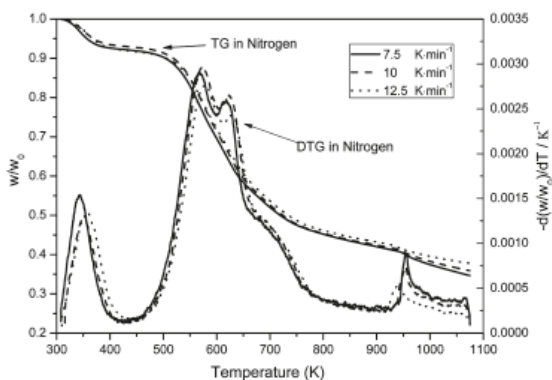


Рис. 1.10. Кривые TG и DTG пиролиза торфа в инертной среде при нагреве 7, 5, 10 и 12,5 $K \min^{-1}$

На первом этапе происходит потеря массы в промежутке температур от комнатной до 430 K, что составляет 12, 11 и 13% от общей массы по-

терянной при эксперименте при нагреве 7,5, 10 и 12,5 K/min⁻¹ соответственно. Максимальная потери массы возникает при 348 K, а максимальная нормированная скорость потери 0,0013 K⁻¹ – при нагреве 10 K мин⁻¹. Кривая ДТА (ДТА, дифференциальный термический анализ) представляет собой эндотермический процесс потери массы образца (рис. 1.11). Можно предположить, что эта стадия потери массы связана с испарения влаги [83–85]. Когда температура поднялась чуть выше, было небольшое изменение потери массы, возможно, связанное с потерей лёгких летучих веществ.

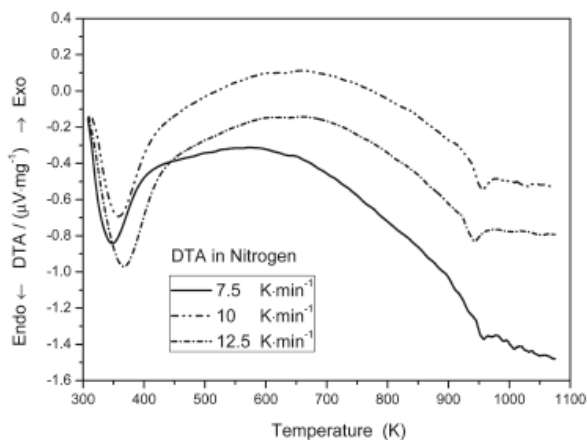


Рис. 1.11. Кривые ДТА пиролиза торфа в инертной среде при нагреве 7,5, 10 и 12,5 K мин⁻¹ [81]

Для того чтобы начать тлеть, влажный торф в первую очередь должен нагреться до температуры разложения. Стадия испарения влаги служит радиатором, поэтому препятствует разложению торфа и его тлению. Таким образом, важно изучить массу, потерянную при испарении.

На втором этапе происходит потеря массы при температурах от 430 до 800 K. На этом этапе органические вещества, находящиеся в торфе, разлагаются и улетучиваются. При повышении температуры от 438 K при нагреве 10 K мин⁻¹ скорость разложения органических веществ увеличивается и достигает локального максимума при температуре 572 K (0,0030 K⁻¹). Затем нагревание слегка уменьшается, и тогда скорость разложения веществ достигает уже локального максимума при температуре 603 K. После 770 K масса образца начинает уменьшаться медленнее – процесс разложения органических веществ завершается.

На третьем этапе процесс потери массы торфа начинается с 800 К и более ярко заметен между 900 и 1 050 К. При такой высокой температуре распад минералов торфа, отображённый на кривых DTG на рис. 1.10, достигает своего максимума потери массы около 950 К, а кривые DTA, изображённые на рис. 1.11, представляют собой небольшие эндотермические максимумы, находящиеся в соответствии с распадом характеристик некоторых минералов, таких как карбонат кальция [86–88]. Так как при типичной температуре максимум тления находится между 773 и 873 К, ниже, чем в диапазоне температур распада минералов, поэтому не обязательно учитывать кинетику минерального распада при окислении при моделировании торфа [89].

Модель пиролиза. Как говорилось выше, стадии испарения влаги и пиролиза органического материала отвечают за процесс тления торфа. Этапы испарения влаги и пиролиза могут быть смоделированы с помощью четырёхкомпонентной реакции

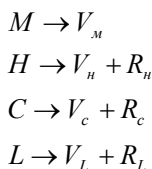


Схема 1

Таким образом, пиролиз торфа может быть исследован с помощью четырех компонентов в торфе: влажности (M), гемицеллюлозы (H), целлюлозы (C) и лигнина (L). После n -го порядка кинетической модели, каждый из этих компонентов подвергается тепловому испарению / распаду. Общий пиролиз торфа – это сочетание нескольких отдельных процессов.

Схема 1 изображает процесс пиролиза торфа, где V_i представляет собой летучие вещества или газы, а R_i – твердые остатки каждой реакции.

Чтобы описать процесс потери массы в компонентах при пиролизе торфа, необходимо решить уравнение (1.47) для каждого из этих компонентов

$$\frac{d\alpha}{dT} = \frac{A}{\beta} \exp\left(-\frac{E_i}{RT}\right) (1 - \alpha_i)^n. \quad (1.47)$$

Здесь переменной α_i является степень преобразования i -го компонента. В кривой TG анализа записываются масса образца (W) и общее преобразование (α), которые могут быть определены следующим образом:

$$\alpha = \frac{W_0 - W}{W_0 - W_\infty} \quad (1.48)$$

Здесь W_0 – начальная масса образца, а W_∞ – масса образца в конце стадии пиролиза органического материала.

Одновременное определение кинетических параметров для каждого компонента было выполнено за счет минимизации экспериментальных данных (T и $d\alpha/dT$):

$$S_{DTG} = \sum_j S_j = \sum_j \sum_k \left[\left(\frac{d\alpha}{dT} \right)^{\text{exp}} - \left(\frac{d\alpha}{dT} \right)^{\text{calc}} \right]^2, \quad (1.49)$$

где индексы «exp» и «calc» являются экспериментальными и расчетными значениями; J – число экспериментальных кривых; k – число точек данных каждой экспериментальной кривой. Минимизация S_{DTG} была проведена нелинейным алгоритмом аппроксимации Levenberg–Marquardt в термокинетической программе [90].

В качестве примера на рис. 1.12 представлены экспериментальные и расчетные кривые DTG при скорости нагрева 10 Кмин^{-1} . Видно, что эти кривые достаточно хорошо совпадают.

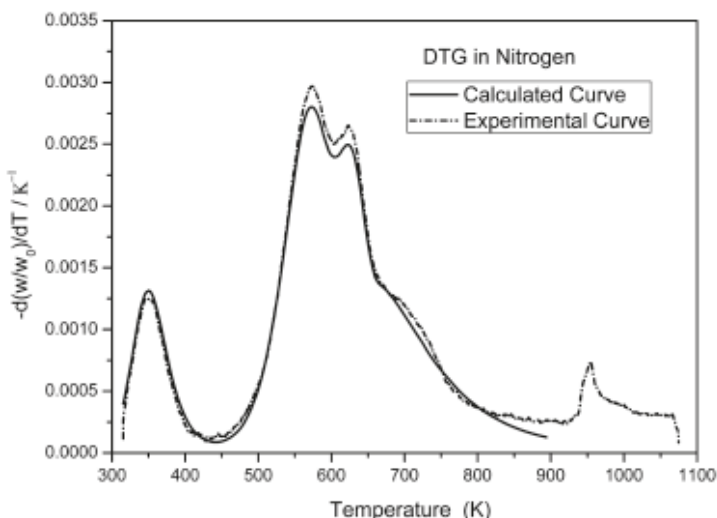


Рис. 1.12. Экспериментальные и расчётные кривые DTG пиролиза торфа в инертной среде при нагреве 10 Кмин^{-1}

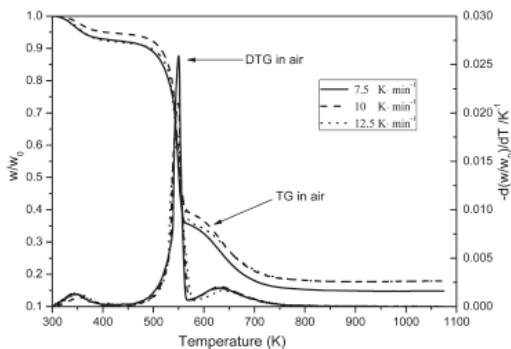


Рис. 1.13. Кривые TG и DTG окисления торфа при нагреве воздуха 7,5, 10 и 12,5 Кмин⁻¹

В табл. 1.12. приведены результаты расчетов кинетических параметров в результате сопоставления экспериментальных и расчетных данных при разном нагреве.

Таблица 1.12

Кинетические параметры каждой реакции по схеме 1 при пиролизе торфа

	W	H	C	L	Отклонение, %
$\ln A, \text{с}^{-1}$	7,10	6,13	7,96	2,69	2,46
$E, \text{кДж/моль}$	61,38	90,19	120,63	65,48	
n	2,18	0,96	0,85	2,31	
r	0,13	0,22	0,13	0,52	

На этапе испарения энергия активации была 61,38 кДж·моль⁻¹, что близко к значению для термической дегидратации хвоинок приморской сосны (*Pinus pinaster*) (58,23 кДж·моль⁻¹) [91]. Тем не менее порядок реакции (2.18) несколько выше, чем значение (0,5) для термической дегидратации хвоинок приморской сосны. Для стадии пиролиза органических веществ кинетические параметры трёх компонентов (гемицеллюлозы, целлюлозы и лигнина) были сопоставлены с литературными данными. Показано, что биомасса состоит из 20–30% гемицеллюлозы, 28–38% целлюлозы, 10–15% лигнина. При нагревании первой начинает разлагаться гемицеллюлоза (в диапазоне температур 220–315°C с энергией активации 80–116 кДж·моль⁻¹), следующей разлагается целлюлоза (315–400°C с энергией активации 195–286 кДж·моль⁻¹). Лигнин разлагается при энергии активации 18–65 кДж·моль⁻¹ и в диапазоне температур 160–900°C, но основная потеря массы происходит при более высокой температуре.

Исследования, выполненные в Томском государственном университете. В работе [92] экспериментальные исследования процессов сушки и пиролиза торфа были проведены в изотермических условиях при температурах 337, 363 и 403 К. Изотермические условия создавались в сушильном шкафу с помощью специального регулируемого термостата, позволяющего поддерживать температуру на заданном уровне с точностью $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Объем рабочей камеры $V = \pi r^2 H$ ($r = 0,12$ м – радиус, $H = 0,24$ м – высота) выбирался из условия постоянства относительной влажности газа в рабочей камере в процессе проведения эксперимента и был существенно больше образцов торфа. Объектом исследования являлись образцы торфа низинного типа различной плотности ρ , влагосодержания W и зольности Z . После установления заданной температуры образцы торфа помещали в сушильный шкаф и через определенные промежутки времени взвешивали на аналитических весах АДВ–200М с точностью 10^{-4} г.

По словам авторов [93], изменение массы образцов торфа с течением времени при температуре $T < 373$ К будет характеризовать процесс испарения свободной, механически и физически связанной влаги, т.е. процесс сушки торфа, а при $T > 373$ К процесс пиролиза торфа.

Термическое разложение торфа (так называемый пиролиз) – стадия, предшествующая зажиганию этого топлива. Для математического моделирования этого процесса необходима информация о термокинетических константах сушки и пиролиза торфа (предэкспоненциального множителя K_2 и аналога энергии активации E) в предположении аррениусовской зависимости скорости сушки и пиролиза от температуры T .

Согласно [92] экспериментальные данные по эффективным термокинетическим константам пиролиза торфа для одностадийной схемы реакции носят весьма противоречивый характер. Для линейного нагрева торфа (0,25–120 град/мин) энергия активации реакции пиролиза $E = 9\,292$ Дж/моль, константа скорости пиролиза $K = 35$ с $^{-1}$; в инертной среде и изотермических условиях $E = 50\,996$ Дж/моль, $K = 8,83$ с $^{-1}$; для аэрозвеси частиц в инертной среде $E = 9\,260$ Дж/моль, $K = 80$ с $^{-1}$. Такое различие в значениях термокинетических констант авторы работы [94] объясняют условностью описания процесса с помощью простейшей эффективной одностадийной кинетической схемы.

В работе [92] скорость испарения влаги и скорость образования продуктов пиролиза описываются уравнениями

$$\frac{dm_1}{dt} = -(m_1 - m_{1K})K_1, \quad \frac{dm_1}{dt} = -(m_1 - m_{21})K_2, \quad (1.50)$$

$$K_1 = K_{01} \exp\left(-\frac{L_1}{RT}\right), K_2 = K_{02} \exp\left(-\frac{L_2}{RT}\right)$$

с начальными условиями

$$m_1(0) = m_{1Н}, m_2(0) = m_{2Н} = m_{1К}. \quad (1.51)$$

Здесь m_1 и m_2 – текущие массы исходных влажных образцов и сухих продуктов пиролиза соответственно, кг; $m_{1К}$ и $m_{2К}$ – массы высушенных и прококсированных образцов торфа, кг; L_1 и L_2 – эффективная теплота испарения моля влаги и энергия активации реакции пиролиза, Дж/моль; K_{01} и K_{02} – эффективные константы скорости сушки и пиролиза для образцов торфа, с^{-1} ; $m_{1Н}$ и $m_{2Н}$ – начальные массы образцов, кг; K – коэффициент фильтрации, с; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); T – температура. Следует отметить, что из физических соображений $m_{2Н} = m_{1К}$, так как пиролиз происходит после высушивания образцов торфа.

При записи этих уравнений считалось, что парциальное давление паров воды мало по сравнению с давлением насыщенного пара, а движущей силой процесса сушки является разность $m_1 - m_{10}$, в то время как для пиролиза движущей силой процесса является $m_2 - m_{20}$.

Коллектив авторов под руководством А.М. Гришина утверждает, что при сушке торфа в нормальных условиях, когда его температура значительно меньше температуры горения, движущей силой процесса является разность между давлением насыщенного пара и парциальным давлением паров воды.

Для изотермического процесса интегрирование уравнений (1.50) с начальными условиями (1.51) дает

$$\ln(m_1 - m_{10}) = \ln(m_{1Н} - m_{10}) - K_1(T)t, \quad (1.52)$$

$$\ln(m_2 - m_{20}) = \ln(m_{2Н} - m_{20}) - K_2(T)t.$$

Эффективные константы и теплоты K_{01} , K_{02} , L_1 , L_2 определяются в [92] методом спрямления [95, 96] с использованием формул (1.52). В результате авторами были получены следующие данные (табл. 1.13).

По словам авторов, результаты, представленные в табл. 1.13 (Z – зольность; ρ – плотность, кг/м^3 ; W – влагосодержание), показывают, что на величины L_i и K_{0i} в большей степени оказывает влияние зольность образцов торфа (значения могут отличаться на порядок).

Термокинетические константы процессов сушки и пиролиза торфа

№ кри- вой	Процесс	Z	ρ , кг/м ³	W	L_1, L_2 , Дж/моль	$K_{01}, K_{02}, \text{с}^{-1}$
1	Сушка	0,07	0,64	0,05	47367	$1,425 \cdot 10^7$
2	Сушка	0,62	0,49–0,64	0,15–0,22	8642,4	$2,6 \cdot 10^6$
3	Пиролиз	0,56	0,43–0,49	0,04	6315,6	$1,9 \cdot 10^6$

Следует отметить, что в работе [97] значение L , полученное при использовании образцов торфа, предварительно высушенных и охлажденных от температуры 373 К до температуры 300 К и рассчитанное по той же формально кинетической зависимости, составляет $L = (78\text{--}100) \cdot 10^3$ Дж/моль. Однако в работе [97] не указаны зольность и плотность образцов торфа. Там же делается вывод о сильной зависимости макрокинетических параметров от глубины залегания торфа и степени метаморфизма.

1.3.2. Кинетические исследования лесных горючих материалов

Следует отметить, что кинетика ЛГМ наиболее изучена. Одними из первых работ в данной области являются работы А.М. Гришина с соавторами [98–102]. В результате исследований авторами был разработан оригинальный метод решения обратных задач и получен ряд термокинетических констант для некоторых видов ЛГМ.

Среди последних работ следует отметить работы, выполненные в Институте химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН (ИХКГ) и Нижегородском государственном техническом университете им Р.Е. Алексеева.

Лаборатория кинетики процессов горения ИХКГ СО РАН имеет богатый опыт в изучении химии процессов горения и термического разложения газовых и конденсированных систем (КС) в пламенах, нетермической плазме с помощью новых разработанных в этой лаборатории экспериментальных методов молекулярно-пучкового масс-спектрометрического зондирования пламен газовых и КС [103, 104] и масс-спектрометрического исследования кинетики термического разложения КС [105, 106]. Для изучения механизма и кинетики химических реакций в этих системах были разработаны и созданы три поколения установок зондовой масс-спектрометрии с молекулярно-пучковой системой отбора пробы на основе квадрупольных и времяпролетных масс-спектрометров. Развиваемый авторами подход к изучению кинетического механизма реакций в пламенах включает как экспериментальное измерение, так и компьютер-

ное моделирование структуры пламени и скорости его распространения на основе детального механизма реакций и с использованием современных компьютерных программ CHEMKIN и COSILAB, что позволяет путем сопоставления данных расчета и эксперимента проверять и уточнять механизм реакций. Коллектив авторов проекта имеет опыт изучения распространения низовых лесных пожаров и проводил крупномасштабные натурные испытания по тушению с помощью аэрозолей растворов солей двух типов модельных очагов пожаров – низового лесного и пожара класса «А» (горящая древесина) [107, 108]. Для исследования кинетики термического разложения КС авторами проекта разработан метод дифференциального масс-спектрометрического анализа (с использованием время-пролетного масс-спектрометра (ВПМС)), который позволяет исследовать пиролиз конденсированных горючих материалов (ГМ), в том числе лесных и степных ГМ в проточном реакторе, сопряженном с помощью системы ввода пробы, известной как молекулярное натекание или с молекулярно-пучковой системой ввода пробы [104, 108] в ионный источник ВПМС, как в неизотермических условиях (этот метод известен как масс-спектрометрический термический анализ – МСТА) со скоростями нагрева до 10–100 град/сек, близких к условиям их зажигания и горения, так и в изотермических условиях. Ранее с помощью этого метода авторы исследовали кинетику и состав продуктов пиролиза ископаемых углей и энергетических материалов. Метод МСТА с молекулярно-пучковым вводом пробы в ионный источник ВПМС является новым, он позволяет в динамических условиях получать данные о продуктах, трудных для обычного МСТА.

В своих последних работах авторы исследовали кинетику пиролиза ЛГМ сибирских лесов при существенно отличающихся темпах нагрева, а также структуру пламени при горении веточки сосны [109] и процесс пиролиза ЛГМ в инертной и окислительной средах методами термогравиметрии (ТГА) и динамического масс-спектрометрического анализа (ДМСТА) [110]. В результате обработки экспериментальных данных были получены кинетические параметры реакции термического разложения ЛГМ при быстром и медленном темпах нагрева. Методом ДМСТА определены основные стадии процесса термического разложения ЛГМ.

Следует также отметить работу С.А. Ложилова [111], выполненную в Нижегородском государственном техническом университете им Р.Е. Алексеева. Автором разработан алгоритм определения термокинетических постоянных на основе интегральных соотношений и экспериментальных термогравиметрических данных, при постоянном темпе нагрева, для случая двухстадийного процесса пиролиза. На основе интегральных соотношений разработан алгоритм решения обратной задачи химической

кинетики с учётом двухстадийного процесса пиролиза. Уточнены значения термокинетических постоянных процесса пиролиза хвой сибирской сосны.

1.4. Работы, посвященные разработке общих методов прогноза катастроф

Работы, выполненные в Томском государственном университете на кафедре физической и вычислительной механики. В последнее время на кафедре физической и вычислительной механики механико-математического факультета Томского государственного университета (ТГУ) под руководством заведующего кафедрой, доктора физико-математических наук, профессора А.М. Гришина проводятся работы по моделированию и прогнозу катастроф, результаты которых опубликованы в [18, 24, 112–124]. В книгах [18, 112] даются основные определения и понятия теории катастроф, рассматриваются общие закономерности их возникновения и развития и приводятся примеры глобальных, региональных и локальных катастроф. Обсуждаются мониторинг и физическое моделирование катастроф. Даются основные определения и понятия прогноза и математического моделирования катастроф, а также примеры применения детерминированно-вероятностных моделей прогноза некоторых катастроф.

В [112] утверждается, что бывают природные, техногенные и социально-экономико-экологические катастрофы, и дается определение природной катастрофы: «Под природной катастрофой понимается разрушительное явление, вызванное геофизическими причинами, которые не контролируются человеком (землетрясения, наводнения, извержения вулканов, лесные пожары и др.)» [112. С. 7].

В книгах [18, 112] дается определение катастрофы: «Катастрофой будем называть относительно быстрое и необратимое изменение параметров состояния окружающей среды, которое приводит к резкому ухудшению условий существования и гибели растительности, животных и людей. Термин “относительно быстрое” означает, что характерное время катастрофы t_K значительно меньше среднего времени жизни человека t_* » [112. С. 7].

Под достоверностью прогноза понимается оценка вероятности возникновения катастрофы и ее экологических последствий для заданного временного интервала. Помимо этого термина, часто используется понятие «период упреждения прогноза», под которым понимается промежуток времени между моментом публикации прогноза и моментом возникновения катастрофы. Очевидно, что чем больше период упреждения, тем

больше времени для подготовки и проведения организационных мероприятий, призванных уменьшить негативные экологические последствия катастрофы. Кроме того, часто говорят о точности прогноза. Этот термин, как правило, употребляют для оценки погрешности прогноза экологических последствий катастроф. Чем выше точность, тем меньше погрешность прогнозируемых параметров состояния среды, например полей температуры, влагосодержания, концентраций компонентов.

В настоящее время для прогноза экологических последствий катастроф широко применяется метод математического моделирования с использованием электронных вычислительных машин.

При математическом моделировании используются следующие типы математических моделей катастроф [18, 112]:

- 1) детерминированные;
- 2) вероятностные;
- 3) смешанные (детерминированно-вероятностные);
- 4) имитационные.

Детерминированные модели. Согласно [18] наиболее эффективным инструментом познания катастроф являются детерминированные математические модели.

Детерминированной математической моделью физико-химического явления называется совокупность дифференциальных, интегральных, интегро-дифференциальных, трансцендентных и алгебраических уравнений, а также соответствующих граничных и начальных условий, которые адекватно описывают движение, деформацию и разрушение тел и поля физических величин (скорость, давление, плотность, температура, концентрация) для исследуемого катастрофического явления. Иными словами, каждая детерминированная математическая модель может рассматриваться как конкретная задача математической физики – «теории математических моделей физических явлений».

Детерминированные математические модели разделяются по степени охвата причинно-следственных связей, присущих исследуемому явлению или группе физико-химических явлений, на общие, частные и оптимальные. Ценность общих моделей состоит в том, что они представляют собой своеобразный эталон точности физико-математического описания явления, на основе которого, после отбрасывания несущественных для данной задачи членов уравнений, можно получить более простые модели. Оптимальными моделями называют те из них, при использовании которых требуется меньшее количество машинного времени при сохранении необходимой точности прогнозируемых параметров состояния исследуемой задачи. Детерминированные математические модели по характеру

зависимости решения задачи от координат делятся на нульмерные (точечные), одномерные, двумерные и трехмерные.

В СССР, а затем в Российской Федерации научными работниками, преподавателями и аспирантами Томского государственного университета под руководством заслуженного деятеля науки РФ профессора А.М. Гришина в период с 1976 г. по настоящее время выполнен цикл теоретико-экспериментальных работ по созданию общих физико-математических моделей лесных, степных и торфяных пожаров.

Основной целью этих исследований была разработка общих математических моделей природных пожаров, в рамках которых можно было бы осуществлять математическое моделирование возникновения, распространения, тушения и экологических последствий лесных, степных и торфяных пожаров. Результаты этих исследований опубликованы в монографиях [15, 17, 24, 117]. В рамках этого цикла экспериментально исследовалась сушка РГМ в диапазоне температур от 323 до 373 К. В результате обработки экспериментальных данных было получено выражение для массовой скорости сушки РГМ (модифицированная формула Герца–Кнудсена). В согласии с результатами [15, 17, 24, 117] принималось, что основное влияние на процесс сушки оказывают разность давления насыщенных и парциальных паров воды, температура окружающей среды и влагосодержание РГМ. Далее, используя формально кинетический подход и понятие удельной поверхности элементов РГМ, было получено выражение для объемной массовой скорости испарения в слое РГМ [15, 17, 117]. При создании общей математической модели лесных пожаров были получены граничные условия на границе раздела «газ–слой РГМ», которые представляют собой законы сохранения массы, количества движения и энергии на границе раздела сред. Кроме того, были использованы результаты анализа влияния свободной конвекции на скорость течения, температуру и концентрации компонентов внутри пограничного слоя у нагретой поверхности [125]. Также были решены задачи теории лесных пожаров в так называемой сопряженной постановке³ [17, 117], когда учитывается взаимное влияние пограничного слоя газа и слоя РГМ друг на друга. В результате была разработана общая математическая модель лесных пожаров.

А.М. Гришиным предложено [18, 112, 113] использовать для оценки вероятности возникновения лесных пожаров элементы физико-

³ Термин «сопряженная задача тепло- и массообмена» предложен академиком АН БССР А.В. Лыковым [126].

математической теории катастроф. Несомненно, что при определении лесной пожарной опасности необходимо учитывать множество различных факторов, таких как состояние окружающей среды и атмосферы в частности, антропогенную нагрузку и сухие грозы.

Согласно [24] верховые лесные пожары начинаются с низовых пожаров, поэтому с точки зрения прогноза возникновения лесных пожаров целесообразно рассматривать задачу прогноза возникновения низовых лесных пожаров. Среди основополагающих факторов, влияющих на возникновение низовых лесных пожаров, следует выделить следующие:

- способность РГМ к воспламенению, т.е. состояние, при котором РГМ может воспламениться от внешнего источника огня;
- способность РГМ к распространению огня, т.е. состояние, при котором огонь может самопроизвольно распространяться вдоль слоя РГМ;
- наличие источников огня.

Большой интерес представляет исследование влияния первых из двух упомянутых выше факторов. Очевидно, что они напрямую связаны с влагосодержанием и сухостью РГМ. Кроме того, следует заметить, что влажность РГМ, при которой РГМ способны к воспламенению, и влажность, при которой огонь способен распространяться вдоль слоя РГМ без дополнительных источников энергии, различны, кроме того, эти значения различны для разных типов РГМ. Поэтому решение задачи о сухости РГМ занимает важнейшее место в процессе прогноза пожарной опасности.

В работах [24, 114–116] утверждается, что возникновение лесного пожара носит вероятностный характер и зависит не только от погодных условий и грозовой активности, но и от уровня антропогенной нагрузки, скорости ветра, влагосодержания растительных горючих материалов и реакционной способности этих материалов. Согласно [114, 115] существуют стационарные и динамические модели лесной пожарной опасности. Схема возникновения лесных пожаров предложена в [114, 115] и изображена на рис. 1.14.

В [18, 114, 115] даны достаточные условия невоспламенения слоя РГМ

$$W_{ij}^{(k)} > W_{*i}^{(k)}. \quad (1.53)$$

Здесь верхний индекс k соответствует основному проводнику горения (ОПГ); $W_{ij}^{(k)}$ – текущее влагосодержание k -го ОПГ на i -м выделе в j -й временной интервал; $W_{*i}^{(k)}$ – критическое влагосодержание k -го основного

проводника горения на i -м выделе, при котором ОПГ не воспламеняется и лесной пожар не возникает. Кроме того, в [18, 114, 115] предложены физическая модель возникновения лесного пожара в рассматриваемом лесхозе или лесничестве с площадью $F = \sum_{i=1}^N F_i$ и формула для вероятности

возникновения лесного пожара P_j для j -го временного интервала лесопожарного сезона на i -м участке (выделе) леса

$$P_j = \sum_{i=1}^N \left[P_{ij}(A)P_{ij}(\text{ЛП} / A) + P_{ij}(M)P_{ij}(\text{ЛП} / M) \right] P_{ij}(C). \quad (1.54)$$

Здесь $P_{ij}(A)$ и $P_{ij}(\text{ЛП}/A)$ – вероятности существования в j -й временной интервал антропогенной нагрузки, достаточной для зажигания РГМ, и возникновения пожара вследствие этой нагрузки на i -м участке с площадью F_i ; $P_{ij}(M)$ и $P_{ij}(\text{ЛП}/M)$ – вероятности появления молнии и возникновения лесного пожара от молнии на i -м участке в j -й временной интервал; $P_{ij}(C)$ – вероятность возникновения лесного пожара по условиям погоды; N – число участков (выделов) для рассматриваемого лесничества или лесхоза.

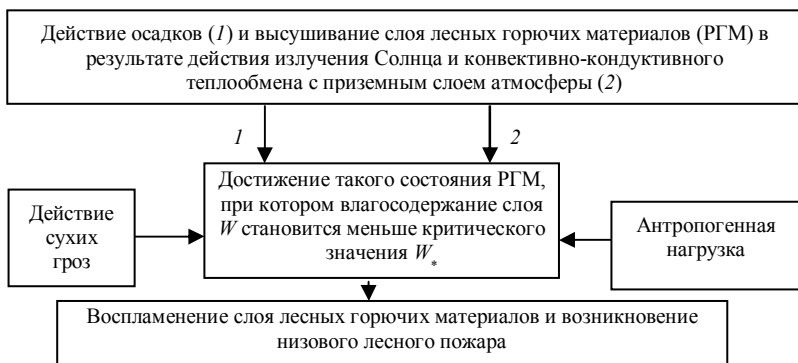


Рис. 1.14. Схема возникновения лесного пожара [99, 100]

При выводе формулы (1.54) было сделано допущение о том, что лесопожарное созревание на каждом выделе контролируемой лесной территории проходит независимо друг от друга и определяется только параметрами, характеризующими данный выдел.

Недостаток работ [18, 114, 115] заключается в том, что отсутствуют формулы для определения вероятностей антропогенной и природной нагрузок и $P_{ij}(C)$.

В работах Л.Ю. Катаевой [121] и Е.Л. Лободы [122] рассматривались задачи о сушке и зажигании слоя РГМ в различных постановках. В работе Л.Ю. Катаевой доказано, что горимость лесов однозначно связана с влагосодержанием растительных горючих материалов. Автором установлено, что физически содержательную постановку задачи о сушке слоя РГМ наиболее эффективно осуществлять на основе общей математической модели лесных пожаров А.М. Гришина [117]. В работе Е.Л. Лободы установлено, что упрощенная математическая модель сушки слоя РГМ качественно верно отражает влияния метеорологических факторов и что тип почвы влияет на скорость сушки слоя РГМ. Недостатки работ [121, 122] в том, что авторы не учитывали парциальное давление паров воды в слое РГМ. В результате так и не была создана новая геоинформационная методика прогноза лесной пожарной опасности.

Вероятностные модели. При использовании вероятностных моделей основная задача исследователя состоит в установлении связи между условиями S и событием A . Если при каждом осуществлении условий S наступает событие A , то необходимо использовать детерминированные математические модели, которые применяются в теоретической механике и механике многофазных сплошных сред.

В том случае, если при реализации условий S событие A имеет вероятность $P(A/S)$, равную P , то необходимо использовать теорию вероятностей. В этой теории одним из основных понятий является частота событий A . Согласно [33] «...частотой события A в данной серии из n испытаний (т.е. из n повторных осуществлений условий S) называется отношение $h = m/n$ числа m тех испытаний, в которых событие A наступило, к общему их числу n ». Каждое испытание завершается либо благоприятным (событие A наступило), либо неблагоприятным исходом (событие A не наступило). Под вероятностью P понимают предел h при $n \rightarrow \infty$. Очевидно, что величины вероятности изменяются в пределах $0 < P < 1$.

Таким образом, зная частоту события, можно определить приближенное значение для величины P . Чем больше n , тем точнее величина h аппроксимирует значение вероятности. Для определения h используют ретроспективный анализ событий A при условиях S . Например, определяя h для конкретного типа аварий на основе многолетнего анализа этого типа катастроф за конкретный период времени на конкретном заводе в про-

шлом, удастся найти величину h для подобных аварий на этом же предприятии в будущем.

Смешанные (детерминированно-вероятностные) модели. Наиболее плодотворно исследование различных проблем естествознания, в том числе и задач теории катастроф, с помощью смешанных математических моделей. Очевидно, что перед тем, как исследовать последствия экологической или техногенной катастрофы с использованием детерминированной математической модели, целесообразно оценить вероятность реализации физической модели, положенной в основу математической модели. Известно, что существует много версий той или иной катастрофы. Как правило, в настоящее время проводят математическое моделирование катастрофы по различным детерминированным математическим моделям и в конечном счете отбирают ту из них, которая наиболее точно предсказывает экологические последствия катастрофы.

Если же рассматриваются задачи о моделировании глобальных или региональных катастроф, например возникновения лесных пожаров, то вероятностный анализ этих проблем должен предшествовать использованию детерминированных математических моделей. Детерминированные модели должны позволять оценивать последствия катастроф в режиме, опережающем реальное время возникновения и развития катастроф. Иными словами, результаты математического моделирования должны быть получены в режиме, опережающем время возникновения и развития катастроф.

Представляет интерес получение формул для определения вероятностей некоторых катастроф с помощью детерминированно-вероятностной методики, предложенной в [18, 112–114]. Сущность этой методики заключается в том, что вначале создается упрощенная физическая модель явления – совокупность причинно-следственных связей, объясняющих суть явления и последовательность событий в нем, а затем применяются теоремы вероятностей.

Имитационные модели. Имитационные модели развиты в кибернетике – науке «об управлении, связи и переработке информации» [127]. Согласно [127] эти модели являются простым переложением на машинный язык математических описаний моделируемых систем. Иными словами, эти модели не вскрывают механизма описываемых явлений, а имитируют данные явления. Поэтому область определения этих моделей ограничена и не может выходить за рамки результатов наблюдений.

Универсальный алгоритм моделирования катастроф и экспертные системы. В работах [18, 112] предложен новый универсальный алгоритм исследования катастроф. Предусматриваются два возможных пути достижения конечных результатов.

Первый из них предполагает такой режим работы вычислительной системы, при котором выполняется следующее условие:

$$t_* \gg t_m, \quad (1.55)$$

где t_* – характерное время катастрофы (время выделения разрушительной энергии); t_m – машинное время, необходимое для получения численного решения задачи.

В этом случае вычисление полей параметров состояния окружающей среды в различные моменты времени (поле давления, плотности температуры, концентраций компонентов и др.) с использованием математической модели катастрофы и супер-ЭВМ с большой памятью и быстродействием происходит быстрее, чем изменение параметров состояния в реальной среде.

Согласно [128] режим работы ЭВМ, при котором обработка данных о процессах, происходящих во внешней среде, в том же темпе, что и сами процессы, называются режимом реального времени.

Таким образом, для реализации первой версии универсального алгоритма необходимо, чтобы темп численного определения параметров состояния среды $1/t_m$ был выше, чем скорость изменения параметров состояния среды $1/t_*$ [18].

В случае прямого компьютерного моделирования должна быть использована детерминированная физически содержательная математическая модель высокого уровня [18], которая должна адекватным образом описывать развитие исследуемой катастрофы во времени и пространстве. С использованием математической модели явления, построенной на основе законов природы, и современных ЭВМ при выполнении условия (1.55) удастся получить поле всех параметров состояния (давления, плотности, температуры, концентраций компонентов и др.) в различные моменты времени.

Результаты математического моделирования необходимо сравнить с соответствующими экспериментальными данными, и если наблюдаются неприемлемые расхождения между ними, то следует заново осуществить все этапы 1, 2, 3, 3.1, 4.1, 5.1 математического моделирования (рис. 1.15).

Перед тем как создавать сложную математическую модель, необходимо оценить вероятность возникновения конкретной исследуемой катастрофы. Если установлено, что она мала (меньше чем 10^{-6} – вероятности глобальной столкновительной катастрофы), то не имеет смысла создавать сложную математическую модель и осуществлять компьютерное моделирование, так как решение этой задачи неактуально.

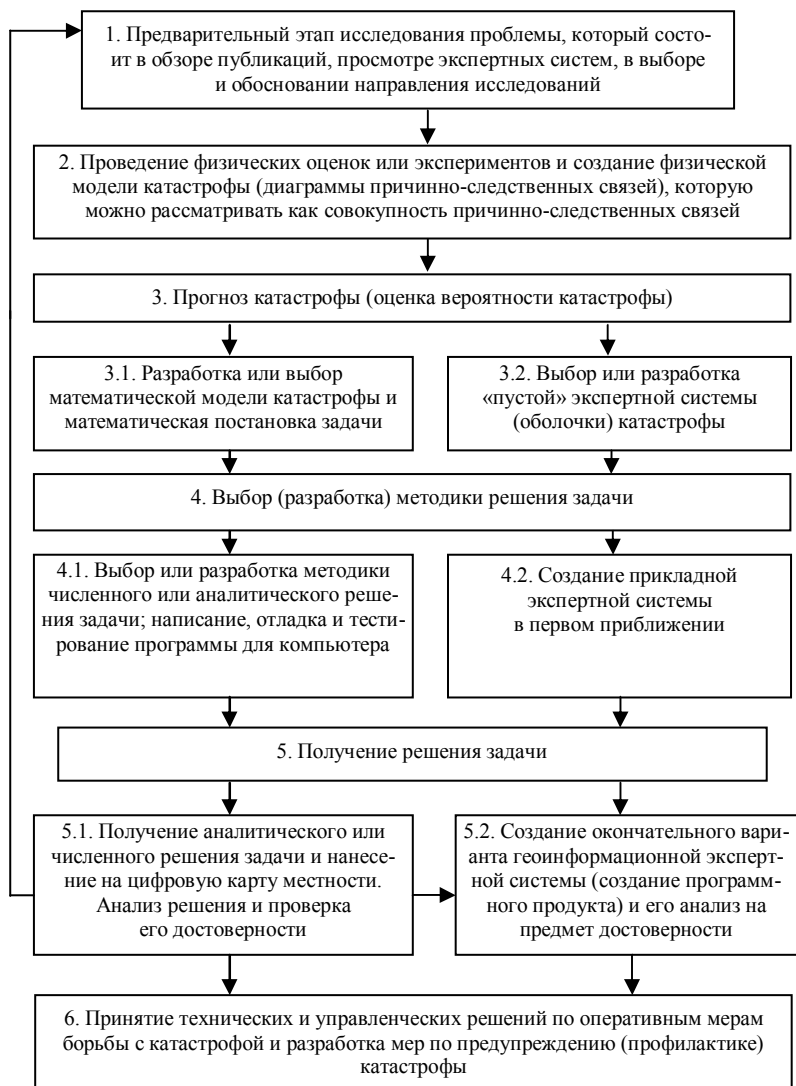


Рис. 1.15. Универсальный алгоритм прогноза и моделирования катастроф [18]

В случае, если условие (1.55) не выполняется, целесообразно использовать второй путь исследования (см. этапы 3.2, 4.2, 5.2), который основан на

построении соответствующей прикладной экспертной системы. В этом случае на основе технологии создания экспертных систем устанавливается взаимосвязь между входными данными (начальными условиями) и выходными данными – экологическими последствиями катастроф.

Промежуточные состояния реальной сплошной среды в рамках такого подхода получить невозможно, так как при создании прикладной экспертной системы используются инженерные формулы, связывающие только начальные и конечные значения параметров состояния среды. Точность прогноза экологических исследований зависит от точности инженерных формул и различных справочных данных и от степени близости канонических постановок задач, использованных при получении упомянутых выше инженерных данных к постановке реальной задачи. Иными словами, как правило, при создании прикладных экспертных систем не решают большие задачи математической физики. Это позволяет получать данные о последствиях катастрофы в режиме, опережающем реальное время развития этого события, но точность прогноза значительно ниже, чем при использовании первого пути математического моделирования катастроф. Надо сказать, что целесообразно, используя первое направление, получать заранее с заданной точностью инженерные формулы, которые в дальнейшем можно использовать при создании прикладных экспертных систем (см. стрелку от блока 5.1 к блоку 5.2 на рис. 1.15).

Таким образом, если прямое компьютерное моделирование катастрофы на основе численного решения большой задачи математической физики оказывается невозможным, то в соответствии с универсальным алгоритмом (рис. 1.15) после оценки вероятности катастрофы необходимо попытаться создать геоинформационную экспертную систему для поддержки принятия управленческих решений по оперативным мерам борьбы и предупреждению негативных последствий катастрофы.

Представляется очевидной необходимость использования теоретических и экспериментальных методов механики сплошных сред для создания экспертных систем по природным и техногенным катастрофам.

Очевидно, что экспертные системы по катастрофам целесообразно создавать с участием специалистов по механике сплошных реагирующих сред, имеющих опыт математического и физического моделирования катастроф.

В [18] автор делает вывод, что создание экспертных систем для прогноза и моделирования катастроф, построенных как с использованием понятий и методов механики сплошных сред (МСС), так и понятий и методов искусственного интеллекта (ИИ), является более перспективным направлением. Пример такого подхода показан на рис. 1.15 (см. второе

направление на этом рисунке). Для построения экспертных систем целесообразно использовать приближенные аналитические решения, полученные на основе строгой физико-математической постановки задачи, методы теории подобия и размерностей, экспериментальные данные, полученные в лабораторных условиях, математическое моделирование и результаты анализа последствий реальных катастроф, т.е. все методы исследования, применяемые в механике сплошных сред.

Основная цель подобных гибридных экспертных систем заключается в том, чтобы по известным начальным данным оценить вероятность возникновения катастрофы и ее негативные последствия за время $t_M \ll t_*$.

Соединение методов МСС с новыми методами ИИ даст возможность прогнозировать последствия природных и техногенных катастроф в режиме, опережающем реальное время выделения разрушительной энергии.

В результате анализа работ [18, 24, 112–122] можно сделать следующие выводы:

1. Для создания физико-математических моделей необходимо использовать данные наблюдений за реальными катастрофическими явлениями, а также результаты лабораторных экспериментов, полученные с использованием теории подобия и размерности. Данные наблюдений требуются также для определения частоты реализации катастроф, что необходимо для вычисления их вероятностей.

2. Наряду с детерминированными математическими моделями, для адекватного описания различных катастроф необходимо использовать вероятностные, имитационные и детерминированно-вероятностные модели.

3. Наиболее эффективным методом прогноза и исследования катастроф является метод математического моделирования. Для реализации этого метода целесообразно использовать универсальный алгоритм прогноза и моделирования катастроф [112].

4. Для прогноза различных катастроф целесообразно использовать методы теории вероятностей и физическую модель процесса (дерево процесса), а окончательный результат, в том числе и прогноз лесной пожарной опасности, представлять в виде вероятностного критерия безопасности, который принят в атомной промышленности.

Таким образом, в работах [18, 24, 112–122] предлагается универсальный алгоритм прогноза и моделирования катастроф и примеры его реализации. На основе этого алгоритма в данной работе была создана методика прогноза лесной и торфяной пожарной опасности.

1.5. Выводы

По результатам проведенного обзора можно сделать следующие основные выводы:

1. Физико-математическое моделирование природных пожаров является крайне важным инструментом при прогнозировании динамики пожаров, определении параметров их развития и предупреждения катастрофических последствий этого явления.

2. На сегодняшний день отсутствует полноценная база данных теплофизических и термокинетических постоянных РГМ, не изучено полностью влияние масштаба эксперимента (лабораторный и натурный масштаб) на измеряемые характеристики, отсутствуют данные по зажиганию РГМ горящими частицами.

3. Существующие в настоящее время методики прогноза лесной пожарной опасности не учитывают основные факторы, влияющие на возникновение лесных пожаров, их прогноз носит скорее качественный характер, отсутствуют методики прогноза торфяной пожарной опасности. Причины возникновения природных пожаров носят вероятностный характер и поэтому целесообразно разрабатывать детерминированно-вероятностные модели для прогноза природной пожарной опасности.

4. В настоящее время отсутствуют простые, с вычислительной точки зрения, модели оценки и мониторинга влагосодержания напочвенного покрова (лесной подстилки, торфа). Поэтому необходимо разработать простые математические модели сушки РГМ для прогноза влагосодержания в слое с целью мониторинга возникновения и развития природных пожаров.

5. Основной целью физико-математического моделирования является создание программных вычислительных систем и комплексов, позволяющих прогнозировать поведение природных пожаров и оценивать уровень опасности в режиме реального времени.

6. Детерминированно-вероятностные модели прогноза природной пожарной опасности должны быть неотделимой частью геоинформационной системы прогноза пожарной опасности и поэтому для этого целесообразно использовать программные продукты ArcView, ArcGis.

Целью данной работы является создание экспертной геоинформационной системы прогноза возникновения и распространения природных пожаров на основе решения следующих задач:

– разработки детерминированно-вероятностных моделей прогноза природной (лесной, степной и торфяной) пожарной опасности с учетом

метеорологических факторов, действия молний и антропогенной нагрузки;

- разработки упрощенных математических моделей сушки РГМ;
- проверки моделей прогноза пожарной опасности на основе ретроспективного анализа известных данных о возникновении пожаров;
- определения критических параметров возникновения и распространения природных пожаров;
- проведения экспериментальных исследований сушки и зажигания РГМ;
- определения термокинетических постоянных в результате решения обратных задач математической физики;
- проведение экспериментальных исследований по зажиганию РГМ горящими частицами;
- разработки программного комплекса в геоинформационной системе, позволяющего осуществлять визуализацию результатов численного моделирования возникновения и распространения природных пожаров в режиме реального времени с учетом характеристик местности.

ГЛАВА 2. ДЕТЕРМИНИРОВАННО-ВЕРОЯТНОСТНАЯ МЕТОДИКА ПРОГНОЗА ЛЕСНОЙ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ

2.1. Разработка новой методики прогноза лесной пожарной опасности

Используя теорию вероятностей и физические соображения, в работах [18, 112, 114, 115, 117] были получены следующие формулы для оценки вероятности возникновения лесного пожара на лесной территории, где имеется N выделов⁴

$$P_j = \sum_{i=1}^N \left[P_{ij}(A)P_{ij}(\text{ЛП} / A) + P_{ij}(M)P_{ij}(\text{ЛП} / M) \right] P_{ij}(C), \quad (2.1)$$

$$P_{ij}(C) = \begin{cases} 0, & W_{ij} > W_{*i} \\ \frac{F_i}{F} \exp \left[\left(\Delta W_{ij} \right)^2 \right], \Delta W_{ij} = \frac{W_{ij} - W_{*i}}{W_{*i}}, & 0 \leq W_{ij} \leq W_{*i} \end{cases}. \quad (2.2)$$

Здесь P_j – вероятность возникновения лесного пожара на контролируемой лесной территории в j -й момент времени; F – площадь лесной территории конкретного лесхоза, района или области; F_i – площадь лесной территории (выдела), покрытой лесом i -го типа; N – общее число выделов на площади F ; $P_{ij}(A)$ – вероятность антропогенной нагрузки, достаточной для зажигания ЛГМ; $P_{ij}(\text{ЛП}/A)$ – вероятность возникновения пожара вследствие антропогенной нагрузки на площади F_i ; $P_{ij}(M)$ – вероятность возникновения сухих гроз на площади F_i ; $P_{ij}(\text{ЛП}/M)$ – вероятность возникновения лесного пожара от молнии при условии, что сухие грозы могут иметь место на площади F_i ; $P_{ij}(C)$ – вероятность возникновения лесного пожара по условиям погоды; W_{ij} и

⁴ Выдел – достаточно однотипный лесной участок, являющийся частью квартала. Квартал – часть леса, ограниченная на местности просеками или другими натурными границами.

W_{i*} – текущее и критическое значение влагосодержания ЛГМ в j -й момент времени на i -м участке территории; если $W_{ij} > W_{i*}$, то низовой лесной пожар не возникает.

Таким образом, модель (2.1)–(2.2) является детерминировано-вероятностной, так как значения W_{ij} определяются с помощью системы дифференциальных уравнений, описывающих сушку ЛГМ [19, 129].

Однако данная модель имела ряд недостатков.

Модель возникновения лесного пожара. Следует отметить, что антропогенные причины возникновения лесных пожаров многообразны: брошенные на землю непогашенные окурки A_1 ; тлеющие после выстрела из охотничьего ружья пыжи A_2 ; непогашенные костры A_3 ; искры из выхлопных труб автотранспорта A_4 ; взрывы нефте-, газопроводов A_5 ; техногенные пожары на буровых установках A_6 ; падение летательных аппаратов A_7 ; преднамеренные поджоги леса с целью последующей продажи горелого леса A_8 ; преднамеренные поджоги леса для нанесения ущерба объектам, расположенным в лесу A_9 ; пожары, вызванные сфокусированными лучами Солнца на осколках битого стекла A_{10} . Кроме них существуют природные причины – действие молний на лесные горючие материалы при сухих грозах A_{11} , а также самовоспламенение лесных горючих материалов A_{12} .

Поэтому представляет интерес создание уточненной математической модели прогноза лесной пожарной опасности [130].

Основными характеристиками предлагаемой модели являются:

1. Отрезок времени t , в рамках которого изучается явление зажигания лесных горючих материалов, называют лесопожарным периодом. Обычно это весна, лето и иногда осень текущего года.

2. Выдел, под которым понимают i -й участок леса с конкретными типами и запасами лесных горючих материалов.

3. Общее число всех видов лесной пожарной опасности на рассматриваемом i -м выделе леса $N_i^{(t)}$ для заданного времени t равно

$$N_i(t) = \sum_{n=1}^{12} N_{in}(t), \text{ где } N_{in} - \text{число опасностей } A_n \text{ } n\text{-го вида на том же}$$

выделе леса ($n = 1$ соответствует зажиганию лесных горючих материалов A_1 от окурков; $n = 2$ – от тлеющих пыжей после выстрелов из охот-

ничьих ружей; $n = 3$ – от непогашенных костров; $n = 4$ – от искр из выхлопных труб автотранспорта; $n = 5$ от взрыва нефте- и газопроводов при перекачке нефти и газа; $n = 6$ – от техногенного пожара на буровых установках; $n = 7$ – от падения летательных аппаратов; $n = 8$ – от преднамеренных поджогов лесов для последующей продажи горелого леса; $n = 9$ – от преднамеренных поджогов лесов с целью нанесения ущерба объектам, расположенным в лесу; $n = 10$ – от действия лучей Солнца, сфокусированных осколками битого стекла; $n = 11$ – от действия молний при сухих грозах; $n = 12$ – от самовоспламенения лесных горючих материалов).

Вероятность возникновения лесного пожара от каждого вида опасности определяется по формуле

$$P_{in}(A_n, t) = \frac{N_{in}(t)}{N_i(t)}. \quad (2.3)$$

Из анализа (2.3) следует, что $P_{in}(A_n, t) < 1$ по определению, а вероятность всех лесных пожаров на i -м выделе равна

$$\sum_{n=1}^{12} P_{in}(A_n, t) = \sum_{n=1}^{12} \frac{N_{in}(t)}{N_i(t)} = 1, \quad (2.4)$$

где 12 – полное число опасностей возникновения лесных пожаров.

Наряду с независимыми друг от друга причинами возникновения лесных пожаров необходимо учитывать тот факт, что сырые лесные горючие материалы, влагосодержание которых больше критического, не горят. Кроме того, лесной пожар не возникает, если на i -м выделе нет ЛГМ. Поэтому необходимо ввести величину вероятности того, что влагосодержание растительного горючего материала меньше критического [131, 132]:

$$P_i(C, t) = \begin{cases} 0 & \text{при } W_{it} > W_{i*} \text{ или при } m_i = 0 \\ \frac{F_i}{F} \left(1 - \frac{W_{it}}{W_{i*}} \right)^k, & \text{при } 0 \leq W_{it} \leq W_{i*} \end{cases}. \quad (2.5)$$

Здесь W_{it} – влагосодержание на i -м выделе в момент времени t максимального по массовой концентрации ЛГМ; W_{i*} – критическое влагосодержание на i -м выделе максимального по массовой концентрации ЛГМ;

m_i – масса ЛГМ на i -м выделе; значение $P_i(C, t) = 0$ соответствует случаю, когда на i -й площади лесной территории нет ЛГМ (поверхность дорог, рек, озер и водонасыщенных болот), т.е. $m_i = 0$, или на слой ЛГМ выпало более 3 мм осадков, в результате чего $W_{it} > W_{*i}$; k – эмпирический показатель степени, характеризующий количественное изменение пожарной опасности; $F = \sum_{i=1}^N F_i$ – общая площадь той территории, для которой определяется лесная пожарная опасность (лесничество, лесхоз, район, область или государство); F_i – площадь i -го выдела; N – общее число выделов на прогнозируемой территории.

Легко видеть, что по определению величина $P_i(C, t) < 1$.

Величина влагосодержания W_{ij} и определяется с помощью математической модели сушки лесных горючих материалов, предложенной ниже, W_{i*} – на основе экспериментальных данных.

Явление загорания носит многофакторный вероятностный характер. На основании физической модели возникновения природных пожаров (рис. 2.1) с учетом (2.3)–(2.5) и теоремы умножения вероятностей [133] получаем следующее выражение для возникновения лесных пожаров на i -м выделе в момент времени t [134, 135]:

$$P_i(t) = \sum_{n=1}^{12} P_i(A_n, t) P(\text{ЛП} / A_n, t) P_i(C, t). \quad (2.6)$$

Здесь $P_i(A_n, t)$ – вероятность существования конкретной n -й антропогенной и природной нагрузки в момент времени t , достаточной для загорания лесных горючих материалов; $P(\text{ЛП} / A_n, t)$ – вероятность возникновения пожара вследствие действия антропогенной и природной нагрузки n -го типов в тот же момент времени t .

Формула (2.6) представляет собой формулу вероятности загорания $P_i(t)$ с учетом всех поражающих факторов, в том числе и сухих гроз для i -го выдела. Величина $P_i(A_n, t) < 1$, так как представляет собой произведения вероятностей, которые меньше 1.

Все причины возникновения лесных пожаров можно разбить на антропогенные и природные.



Рис. 2.1. Схема возникновения природного пожара [18]

К антропогенным причинам относятся все виды лесной пожарной опасности, обусловленные деятельностью человека. Эти виды опасностей соответствуют $P_i(A_n, t)$ при $n = 1 - 10$, а природная пожарная опасность возникает в результате действия сухих гроз и самовоспламенения природных горючих материалов при $n = 11, 12$ [112]. Для упрощения вероятностной модели целесообразно ввести вероятность общей антропогенной нагрузки в любой момент времени на i -м выделе в виде $P_i(A, t)$, а также вероятность общей природной пожарной опасности в виде $P_i(B, t)$.

В результате вместо (2.6) для одного i -го выдела получим более простую формулу для вероятности возникновения пожара

$$P_i(t) = [P_i(A, t)P_i(\text{ЛП}/A, t) + P_i(B, t)P_i(\text{ЛП}/B, t)]P_i(C, t). \quad (2.7)$$

Обычно лесная пожарная опасность в России оценивается в мае–сентябре для конкретных значений времени суток t . Введем обозначения $P_i(t) = P_{ij}$, $P_i(A, t) = P_{ij}(A)$, $P_i(B, t) = P_{ij}(B)$, $P_i(\text{ЛП}/A, t) = P_{ij}(\text{ЛП}/A)$, $P_i(\text{ЛП}/B, t) = P_{ij}(\text{ЛП}/B)$, $P_i(C, t) = P_{ij}(C)$. Тогда формулу (2.7) можно переписать в виде

$$P_{ij} = [P_{ij}(A)P_{ij}(\text{ЛП}/A) + P_{ij}(B)P_{ij}(\text{ЛП}/B)]P_{ij}(C). \quad (2.8)$$

Формула (2.8) совпадает по физическому смыслу с выражением, предложенным в работах [18, 112, 114, 115].

Величины $P_{ij}(A)$, $P_{ij}(\text{ЛП}/A)$, $P_{ij}(M)$, $P_{ij}(\text{ЛП}/B)$ можно найти, используя известное определение вероятности события через соответствующие частоты (статистическая модель риска [24]). В этом случае индекс j можно опустить.

$$P_i(A) \approx \frac{N_{Ai}}{N_{\text{ПСи}}}, \quad P_i(\text{ЛП} / A) \approx \frac{N_{\text{ЛПи}}}{N_{\text{КПи}}}, \quad (2.9)$$

$$P_i(B) \approx \frac{N_{Mi}}{N_{\text{ПСи}}}, \quad P_i(\text{ЛП} / B) \approx \frac{N_{\text{ЛПи}}}{N_{\text{КПи}}}. \quad (2.10)$$

Здесь N_{Ai} и $N_{\text{ЛПи}}$ – количество дней пожароопасных сезонов для i -го выдела, когда имеется антропогенная нагрузка, достаточная для зажигания РГМ, и количество пожаров вследствие этой нагрузки, включая и умышленные поджоги за некоторый период времени; $N_{\text{КПи}}$ – общее количество пожаров для i -го выдела за некоторый период времени; N_{Mi} и $N_{\text{ПСи}}$ – число дней для i -го выдела, когда имели место молнии (при сухих грозах), и общее число дней пожароопасных сезонов для i -го выдела за некоторый период времени; $N_{\text{ЛПи}}$ – количество пожаров от молний при сухих грозах за некоторый период времени.

Об осреднении вероятностей возникновения природных пожаров. Среднее значение вероятности за определенный промежуток времени

$$\bar{P}_i = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_0}^{t_*} P_i(t) dt, \quad (2.11)$$

где $\Delta t = t_* - t_0$, t_* – конечное время наблюдения, t_0 – начальное время наблюдения.

В пожароопасный период целесообразно использовать среднечасовую вероятность возникновения пожара

$$\bar{P}_{ij} = \frac{1}{t_{j+1} - t_j} \int_{t_j}^{t_{j+1}} P_i(t) dt. \quad (2.12)$$

С учетом (2.7) и (2.12) для j -го интервала времени для лесной территории, состоящей из N выделов, получаем более общую формулу, чем (2.1):

$$\bar{P}_j = \sum_{i=1}^N \left[\bar{P}_{ij}(A) \bar{P}_{ij}(ЛП / A) + \right] \bar{P}_{ij}(B) \bar{P}_{ij}(ЛП / B) \bar{P}_{ij}(C). \quad (2.13)$$

Таким образом, формула (2.13) обобщает ранее полученную в работах [18, 112, 114, 115] формулу (2.1).

Следует отметить, что формулы (2.1), (2.2), (2.9)–(2.11) можно использовать и для прогноза степной пожарной опасности [19].

В работе [114] обсуждается вопрос о прогнозе лесной пожарной опасности. Считается, что для каждого индивидуального участка леса должен быть установлен свой основной проводник горения. Утверждается, что: «главная трудность и сложность в определении основного проводника горения заключается в огромном разнообразии образующихся смесей из растительных горючих материалов (РГМ); эта смесь может иметь признаки двух, трех и даже четырех ОПГ». Кроме того, при определении типов ОПГ необходимо учесть их сезонную динамику. Следуя [115], вначале выбираем пять ОПГ для рассматриваемого участка леса: опад хвои, мох, лишайник, опад листвы и травяную ветошь.

Известно [2, 24, 37, 117, 122], что на вероятность возникновения лесного пожара влияние оказывают не только антропогенная, природная нагрузка и метеоусловия, но и рельеф местности, относительное количество лучистой энергии под пологом леса, поглощаемое горючим материалом ($Q_{отн}$), зависящее от высоты Солнца, время и день недели, на которые дается прогноз. В настоящей работе эти факторы не учитываются в связи со значительным усложнением модели и отсутствием необходимых данных.

В связи с тем, что статистические данные по N_{Ai} в лесхозах отсутствуют, воспользуемся данными работы Ю.А. Андреева, Г.Ф. Ларченко [136] для определения показателя пожароопасной посещаемости лесов вблизи населенного пункта $P_i(A)$ (табл. 2.1), где m – расстояние до населенного пункта в метрах.

Таблица 2.1

Значения $P_i(A)$ в зависимости от расстояния m до населенного пункта

$m, м$	50	100	250	500	750	1000
$P_i(A)$	0,096	0,097	0,098	0,099	0,101	0,102
$m, м$	2 000	3 000	4 000	5 000	7 500	10 000
$P_i(A)$	0,108	0,114	0,120	0,125	0,143	0,160

Из-за того, что в математической модели сушки РГМ [137] используется объемная доля свободной и связанной воды k -го основного проводника

горения $\varphi_2^{(k)}$ вместо влагосодержания $W_{ij}^{(k)}$, необходимо воспользоваться формулами перехода от влагосодержания к объемным долям [117]:

$$\varphi_1^{(k)} = \frac{\rho_c^{(k)}}{\rho_1^{(k)}}, \quad \varphi_2^{(k)} = \frac{\rho_c^{(k)} W_{ij}^{(k)}}{\rho_2}, \quad k = 1, 2, 3, 4, 5. \quad (2.14)$$

Здесь $\varphi_1^{(k)}$ – объемная доля сухого органического вещества k -го ОПГ, $\rho_c^{(k)}$ – плотность слоя в абсолютно сухом состоянии k -го ОПГ; $\rho_1^{(k)}$, ρ_2 – плотность k -го ОПГ и воды соответственно; $\varphi_2^{(k)}$ – объемная доля свободной и связанной воды k -го ОПГ.

Базой данных для этой модели должны служить данные о составе РГМ в напочвенном покрове и о термокинетических постоянных, характеризующих динамику сушки каждого из РГМ.

Зная текущее значение $\varphi_2^{(k)}$ и критическое влагосодержание $W_{*ij}^{(k)}$, можно определить $W_{ij}^{(k)}$ и в результате вероятность возникновения лесного пожара для прогнозируемого промежутка времени.

2.2. Упрощенная математическая модель низкотемпературной сушки слоя растительных горючих материалов

Постановка задачи. С точки зрения физики задача о сушке слоя РГМ ставится следующим образом: известны тип растительности и проводники горения в слое РГМ, известны запас РГМ, его высота и влагосодержание, известны метеоусловия, требуется определить изменение объемной доли воды в РГМ в разные моменты времени. Наиболее полная и поэтому наиболее точная математическая модель сушки РГМ дана в [116]. В рамках нее учитываются сопряженный тепло- и массообмен между слоем РГМ и приземным слоем атмосферы с учетом излучения Солнца и испарения воды в свободном и связанном с РГМ состоянии по закону Герца–Кнудсена, а также перенос излучения в самом слое в рамках диффузионного приближения. Недостатком этой постановки является обилие эмпирических констант и функций и большое количество нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных. В работе [122] автор

проанализировал различные постановки задач и пришел к выводу, что упрощенная математическая модель дает приемлемую точность для утренних прогнозов. В результате используем данную постановку задачи со следующими допущениями [137]:

1) конвективный теплообмен между слоем РГМ и приземным слоем атмосферы удовлетворительно описывается с помощью граничных условий третьего рода с использованием известных коэффициентов конвективного теплообмена [138];

2) давление P , температура T и плотность ρ газовой фазы в слое РГМ совпадают с соответствующими метеорологическими данными (P_e , T_e и ρ_e) для данного момента времени и данной местности;

3) излучение в слое РГМ подчиняется закону Бугера–Ламберта [118];

4) испарение связанной воды и капелек воды, прилипших к элементам РГМ, описывается одним и тем же законом Герца–Кнудсена.

Кроме того, будем использовать допущение о том, что на каждом выделе имеется относительно однородный по своим механическим и физическим свойствам напочвенный покров (опад хвои – 1, мох – 2, лишайник – 3, опад листвы – 4, травяная ветошь – 5). В этом случае на каждом i -м участке можно считать, что имеет место только один главный основной проводник горения. Запишем уравнения для определения влагосодержания слоя горючих материалов с учетом того, что зольность $\zeta \ll 1$, в виде

$$W_{ij} = \sum_{k=1}^n C_i^{(k)} W_{ij}^{(k)}, \quad W_{i*} = \sum_{k=1}^n C_i^{(k)} W_{i*}^{(k)}, \quad (2.15)$$

где $C_i^{(k)} = \frac{m_i^{(k)}}{\sum_{k=1}^n m_i^{(k)}}$ – массовая концентрация k -го ОПГ на i -м выделе, $m_i^{(k)}$ –

запас k -го ОПГ на i -м выделе в абсолютно сухом состоянии.

Очевидно, что под главным проводником горения напочвенного покрова следует понимать тот ОПГ, для которого массовая концентрация $C_i^{(k)}$ значительно больше массовых концентраций других ОПГ.

При конкретном прогнозе лесной пожарной опасности такая постановка задачи позволяет установить однозначное соответствие между конкретным выделом и типом основного природного горючего в напочвенном покрове, что дает возможность упростить математическую постановку задачи.

Основная система уравнений. Известно, что в среднем в одном лесхозе имеет место порядка 30 000 выделов. Поэтому даже если исполь-

зовать упрощенную систему уравнений для описания сушки слоя РГМ [129, 139], то будет необходимо решать 30 000 систем двух нелинейных уравнений в частных производных, что неприемлемо для практиков из-за сложности решения подобной задачи и огромных затрат машинного времени. Поэтому сделаем дополнительно следующие допущения:

1. Метеорологические данные и начальные влагосодержания типичных ОПГ на территории лесхоза одинаковы для всех типичных выделов.

2. Напочвенный покров всех типичных выделов лесхоза можно разбить на пять типов: опад хвои, мох, лишайник, опад листвы, травяная ветошь.

3. Для каждого типичного выдела температура и объемная доля воды в ОПГ описываются одной системой уравнений.

В результате для математического описания сушки главного ОПГ имеем следующую систему уравнений

$$\sum_{r=1}^2 \rho_r^{(k)} \varphi_r^{(k)} C_r^{(k)} \frac{\partial T_s^{(k)}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_s^{(k)} \frac{\partial T_s^{(k)}}{\partial z} \right) + \frac{\partial q_{RZ}^{(k)}}{\partial z} -$$

$$- q_2^{(k)} \frac{k_{02}^{(k)} \rho_2 \varphi_2^{(k)}}{P_{02} \sqrt{T_s^{(k)}}} \left[P_{02} \exp \left(- \frac{E^{(k)}}{RT_s^{(k)}} \right) - P_{2e} \right] - \alpha_v^{(k)} (T_s^{(k)} - T_e), \quad (2.16)$$

$$\rho_1^{(k)} \frac{\partial \varphi_1^{(k)}}{\partial t} = 0, \quad (2.17)$$

$$\frac{\partial \varphi_2^{(k)}}{\partial t} = - \frac{k_{02}^{(k)} s^{(k)} \varphi_2^{(k)}}{P_{02} \sqrt{T_s^{(k)}}} \left[P_{02} \exp \left(- \frac{E^{(k)}}{RT_s^{(k)}} \right) - P_{2e} \right], \quad P_{2*} > P_{2e}, \quad (2.18)$$

$$q_{Rz}^{(k)} = q_{Rw} (1 - \varphi_{sw}^{(k)}) \exp [k_1 \rho_1^{(k)} (z - h)],$$

$$q_{Rw} = (1 - A) q_R(h) \cos \alpha - \varepsilon_s \sigma T_{sw}^{(k)4} + J_w \cos \alpha,$$

которую необходимо решать с учетом следующих начальных и граничных условий:

$$T_s^{(k)} \Big|_{t=0} = T_0, \quad \varphi_2^{(k)} \Big|_{t=0} = \varphi_{2H}^{(k)}, \quad (2.19)$$

$$-\lambda_s^{(k)} \frac{\partial T_s^{(k)}}{\partial z} \Big|_{z=h} = \alpha_e (T_e - \partial T_{sw}^{(k)}) - q_2^{(k)} R_{2w} + \varphi_{sw}^{(k)} q_{RW}, \quad (2.20)$$

$$\lambda_s^{(k)} \frac{\partial T_s^{(k)}}{\partial z} \Big|_{z=0} = \alpha_0 (T_{s0}^{(k)} - T_0) + q_{RW} (1 - \varphi_{sw}^{(k)}) \exp(-k_1 \rho_1^{(k)} h). \quad (2.21)$$

Здесь z – размерная координата, отсчитываемая от поверхности почвы, перпендикулярно подстилающей поверхности; верхний индекс k соответствует главному ОПГ на i -м выделе; t – время; $T_s^{(k)}$ – температура конденсированной фазы; T_e – температура окружающей среды; $\lambda_s^{(k)}$ – коэффициент теплопроводности конденсированной фазы в слое РГМ; α_e и α_0 – коэффициенты теплообмена на верхней и нижней границах слоя соответственно; T_0 – температура почвы; $\alpha_v^{(k)} = \alpha_s^{(k)} s^{(k)}$ – коэффициент объемного конвективного теплообмена; $s^{(k)}$ – удельная поверхность включений; $\alpha_s^{(k)} = \lambda Nu / d_s$ – коэффициент теплообмена между газовым потоком и элементом РГМ [117]; λ – коэффициент теплопроводности газовой фазы; Nu – число Нуссельта; d_s – диаметр элемента РГМ; $\rho_r^{(k)}$, $C_{pr}^{(k)}$, $\varphi_r^{(k)}$ – плотности, теплоемкости и объемные доли сухого органического вещества ($r = 1$), свободной и связанной с сухим органическим веществом воды ($r = 2$); $E^{(k)}$ – энергия активации, характеризующая испарение связанной воды; R – универсальная газовая постоянная; $\varphi_{sw}^{(k)}$ – объемная доля конденсированной фазы на верхней границе слоя РГМ; q_{Rw} и $q_{Rz}^{(k)}$ – плотности потока результирующего излучения, на границе раздела сред и потока излучения, проникающего в слой РГМ; R_{2w} – скорость реакции испарения воды; $q_2^{(k)}$ – теплота испарения единицы массы воды; A – альbedo слоя РГМ; $q_R(h)$ – плотность потока излучения Солнца на верхней границе слоя РГМ; P_{2e} – парциальное давление паров воды, $P_{2*} = P_{02} \exp\left(-\frac{E^{(k)}}{RT_s^{(k)}}\right)$ – давление насыщенных паров, α – угол между горизонтальной плоскостью и подстилающей поверхностью; ε_s – коэффициент черноты слоя; σ – постоянная Стефана –

Больцмана; J_w – плотность потока длинноволнового излучения на верхней границе слоя РГМ; $k_1=0,4$ – коэффициент затухания излучения в слое РГМ; индекс w приписывается параметрам состояния при $z=h$; $k_{02}^{(k)} = AP_{02}S_0\sqrt{M}/\sqrt{2\pi R}$ – постоянная величина; A , P_{02} – постоянные множители, определяемые экспериментально; S_0 – поверхность эффективного элемента РГМ; M – молекулярная масса воды.

Вынесем давление насыщенных паров за скобки, распишем объемную теплоемкость конденсированной фазы и в результате получим:

$$\begin{aligned} & \left(\rho_1^{(k)} \varphi_{1H}^{(k)} C_{p1}^{(k)} + \rho_2 \varphi_2^{(k)} C_{p2} \right) \frac{\partial T_s^{(k)}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\lambda_1^{(k)} \varphi_{1H}^{(k)} + \lambda_2 C_{p1}^{(k)} \right) \frac{\partial T_s^{(k)}}{\partial z} \right] + \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left[q_{Rw} \left(1 - \varphi_{sw}^{(k)} \right) \exp \left[k_1 \rho_1^{(k)} (z - h) \right] \right] - \end{aligned} \quad (2.22)$$

$$- q_2^{(k)} \frac{k_{01}^{(k)} s^{(k)} \rho_2 \varphi_2^{(k)}}{\sqrt{T_s^{(k)}}} \left[1 - \frac{P_{2e}}{P_{02}} \exp \left(\frac{E^{(k)}}{RT_s^{(k)}} \right) \right] \exp \left(\frac{E^{(k)}}{RT_s^{(k)}} \right) - \alpha_v^{(k)} \left(T_s^{(k)} - T_e \right),$$

$$\varphi_1^{(k)} = \varphi_{1H}^{(k)}(z), \quad (2.23)$$

$$\frac{\partial \varphi_2^{(k)}}{\partial t} = - \frac{\varphi_2^{(k)} k_{02}^{(k)} s^{(k)}}{\sqrt{T_s^{(k)}}} \left[1 - \frac{P_{2e}}{P_{02}} \exp \left(\frac{E^{(k)}}{RT_s^{(k)}} \right) \right] \exp \left(- \frac{E^{(k)}}{RT_s^{(k)}} \right). \quad (2.24)$$

Член в левой части (2.22) характеризует изменение тепловой энергии в слое РГМ в единице объема за единицу времени. Первый и второй член в правой части (2.22) отвечают за приток тепла за счет теплопроводности и солнечного излучения. Третий член характеризует влияние влажности воздуха на сушку слоя РГМ, четвертый – теплообмен между k -фазой и газовой фазой в слое РГМ. Член в квадратных скобках правой части уравнения (2.24) характеризует влияние влажности воздуха на баланс влаги в слое РГМ. Оставшиеся параметры в правой части характеризуют скорость сушки РГМ.

Приведение к безразмерному виду основной системы уравнений.

Приведем систему уравнений (2.22), (2.24) к безразмерному виду. С учетом того, что $T_* = T_0$ в начальный момент времени, $t = \tau t_*$, $z = h\zeta$,

$$\theta_s^{(k)} = \frac{(T_s^{(k)} - T_*)E^{(k)}}{RT_*^{(k)}}, \quad \theta_e^k = \frac{(T_e - T_*)E^{(k)}}{RT_*^{(k)}}, \quad \theta_0^{(k)} = \frac{(T_0 - T_*)E^{(k)}}{RT_*^{(k)}}, \quad \text{получим}$$

$$\begin{aligned}
(1+a^{(k)}\varphi_2^{(k)})\frac{\partial\theta_s^{(k)}}{\partial\tau} &= \frac{1}{(\delta^{(k)})^2}\frac{\partial}{\partial\zeta}\left[1+\pi_\lambda^{(k)}\varphi_2^{(k)}\frac{\partial\theta_s^{(k)}}{\partial\zeta}\right]+ \\
&+ [L^{(k)}-G^{(k)}(1+\beta^{(k)}\theta_s^{(k)})^4](1+\varphi_{sw}^{(k)}\exp[\bar{k}_1^{(k)}(\zeta-1)]- \\
&- \frac{\varphi_2^{(k)}}{\sqrt{1+\beta^{(k)}\theta_s^{(k)}}}\left[1-\pi_e^{(k)}\exp\left(-\frac{\theta_s^{(k)}}{1+\beta^{(k)}\theta_s^{(k)}}\right)\right]\exp\frac{\theta_s^{(k)}}{1+\beta^{(k)}\theta_s^{(k)}}-\bar{\alpha}_v^{(k)}(\theta_s^{(k)}-\theta_e^{(k)}), \quad (2.25)
\end{aligned}$$

$$\frac{\partial\varphi_2^{(k)}}{\partial\tau} = -\frac{\gamma^{(k)}\varphi_2^{(k)}}{\sqrt{1+\beta^{(k)}\theta_s^{(k)}}}\left[1-\pi_e^{(k)}\exp\left(-\frac{\theta_s^{(k)}}{1+\beta^{(k)}\theta_s^{(k)}}\right)\right]\exp\frac{\theta_s^{(k)}}{1+\beta^{(k)}\theta_s^{(k)}}. \quad (2.26)$$

Эту систему необходимо решать с учетом следующих начальных и граничных условий:

$$\theta_s^{(k)}\Big|_{\tau=0} = 0, \quad \varphi_2^{(k)}\Big|_{\tau=0} = \varphi_{2H}^{(k)}, \quad (2.27)$$

$$-\left(1+\pi_\lambda^{(k)}\varphi_{2w}^{(k)}\right)\frac{\partial\theta_s^{(k)}}{\partial\zeta}\Bigg|_{\zeta=1} = Bi^{(k)}(\theta_{sw}^{(k)}-\theta_e^{(k)})+ \quad (2.28)$$

$$+ \frac{b^{(k)}\varphi_{2w}^{(k)}\left[1-\pi_{ew}^{(k)}\exp\left(-\frac{\theta_{sw}^{(k)}}{1+\beta^{(k)}\theta_{sw}^{(k)}}\right)\right]}{\sqrt{1+\beta^{(k)}\theta_{sw}^{(k)}}}\exp\left(\frac{\theta_{sw}^{(k)}}{1+\beta^{(k)}\theta_{sw}^{(k)}}\right)-(\varphi_{IH}^{(k)}+\varphi_{2w}^{(k)})\left[c^{(k)}-d^{(k)}(1+\beta^{(k)}\theta_{sw}^{(k)})^4\right],$$

$$\left(1+\pi_\lambda^{(k)}\varphi_{20}^{(k)}\right)\frac{\partial\theta_s^{(k)}}{\partial\zeta}\Bigg|_{\zeta=0} = Bi_0^{(k)}(\theta_{s0}^{(k)}-\theta_0^{(k)})+(1-\varphi_{IH}^{(k)}-\varphi_{20}^{(k)})\left[c_0^{(k)}-d_0^{(k)}(1+\beta^{(k)}\theta_s^{(k)})^4\right], \quad (2.29)$$

$$c_0^{(k)} = c^{(k)}\exp(-\bar{k}_1^{(k)}), d_0^{(k)} = d^{(k)}\exp(-\bar{k}_1^{(k)}). \quad (2.30)$$

Здесь и выше $\theta_s^{(k)}$, $\theta_e^{(k)}$, $\theta_0^{(k)}$, – безразмерные температуры слоя РГМ, окружающей среды и почвы; T_* – температура почвы в начальный момент; $a^{(k)} = \frac{\rho_2 C_{p2}}{\rho_1^{(k)} \varphi_{1H}^{(k)} C_{p1}^{(k)}}$ – безразмерная величина, которая характеризует объемную теплоемкость воды; $\zeta = z/h$ – безразмерная координата; $\beta^{(k)} = RT_*/E^{(k)}$ – безразмерная начальная температура слоя; h – высота слоя РГМ; $\pi_\lambda^{(k)} = \lambda_2/\lambda_1^{(k)} \varphi_{1H}^{(k)}$ – относительный коэффициент теплопроводности

воды; $\tau = t/t_*$ – безразмерное время; t_* – характерное время;
 $c^{(k)} = \frac{E^{(k)} h [(1-A)q_R(h) + J_w] \cos \alpha}{\lambda_1^{(k)} \varphi_{1H}^{(k)} R T_*^2}$ – безразмерная величина, которая харак-
 теризует приток лучистой энергии, $d^{(k)} = \frac{\varepsilon_s \sigma T_*^2 h E^{(k)}}{\lambda_1^{(k)} \varphi_{1H}^{(k)} R}$ – безразмерная вели-
 чина, которая характеризует коэффициент черноты слоя;
 $b^{(k)} = \frac{E^{(k)} q_2^{(k)} \rho_2 k_{02}^{(k)} h}{\lambda_1^{(k)} \varphi_{1H}^{(k)} R T_*^2 \sqrt{T_*}} \exp\left(-\frac{E^{(k)}}{R T_*}\right)$ – безразмерная величина, которая харак-
 теризует тепловой эффект испарения воды; $\pi_e^{(k)} = \frac{P_{2e}}{P_{02}} \exp\left(\frac{E^{(k)}}{R T_*}\right)$ – безраз-
 мерная функция (относительная влажность воздуха); $Bi_0^{(k)} = \frac{\alpha_0 h}{\lambda_1^{(k)} \varphi_{1H}^{(k)}} -$
 критерий Био, характеризующий интенсивность конвективного теплооб-
 мена слоя РГМ и почвы; $c_0^{(k)}$, $d_0^{(k)}$ – безразмерные величины, которые ха-
 рактеризуют приток лучистой энергии и коэффициент черноты слоя; где
 $\varphi_{2H}^{(k)}$ – начальное значение объемной доли воды k -го ОПГ;
 $t_*^{(k)} = \frac{\rho_1^{(k)} \varphi_{1H}^{(k)} \sqrt{T_*} C_{p1}^{(k)} R T_*^2}{q_2^{(k)} E^{(k)} \rho_2 k_{02}^{(k)} s^{(k)}} \exp\left(-\frac{E^{(k)}}{R T_*}\right)$ – характерное время;
 $L^{(k)} = \frac{k_1 \rho_1^{(k)} \sqrt{T_*} \exp(E^{(k)} / R T_*)}{q_2^{(k)} \rho_2 k_{02}^{(k)}} [(1-A)q_R(h) + J_w] \cos \alpha$ – безразмерная вели-
 чина, характеризующая приток лучистой энергии;
 $G^{(k)} = \frac{k_1 \rho_1^{(k)} \sqrt{T_*} \exp(E^{(k)} / R T_*) \varepsilon \sigma T_*^4}{q_2^{(k)} \rho_2 k_{02}^{(k)}}$ – безразмерная величина, характеризу-
 ющая коэффициент черноты слоя; $k_{02}^{(k)} = k_{02}^{(k)} s^{(k)}$;
 $(\delta^{(k)})^2 = \frac{q_2^{(k)} E^{(k)} \rho_2 k_{02}^{(k)} h^2}{\lambda_1^{(k)} \varphi_{1H}^{(k)} \sqrt{T_*} R T_*^2} \exp\left(-\frac{E^{(k)}}{R T_*}\right)$ – безразмерный критерий (аналог
 критерия Д.А. Франк-Каменецкого [140]); $\overline{\alpha_v^{(k)}} = \frac{\alpha_v^{(k)} R T_*^2 \sqrt{T_*}}{q_2^{(k)} E^{(k)} \rho_2 k_{02}^{(k)}} \exp\left(\frac{E^{(k)}}{R T_*}\right)$,
 $\overline{k_1^{(k)}} = k_1 \rho_1^{(k)} h$ – безразмерные значения объемного коэффициента теплообме-
 на и коэффициента затухания излучения; $\lambda_1^{(k)} \varphi_{1H}^{(k)}$ – теплопроводность сухо-

го органического вещества; $\lambda_2^{(k)} \varphi_2^{(k)}$ – теплопроводность свободной и связанной с сухим органическим веществом воды; $\gamma^{(k)} = \frac{\rho_1^{(k)} \varphi_{\text{IH}}^{(k)} C_{p1}^{(k)} R T_*^2}{q_2^{(k)} E^{(k)} \rho_2}$ – без-

размерный критерий подобия, характеризующий скорость сушки РГМ.

Упрощенная система дифференциальных уравнений и начальных условий. В работе [118] доказано, что температура газовой и конденсированной фаз мало отличается друг от друга. Тогда, используя метод осреднения по высоте слоя РГМ [139] и простой метод приближенного вычисления интегралов с учетом граничных условий (2.28) и (2.29), имеем следующие уравнения для определения средней безразмерной температуры k -фазы в слое РГМ и средней объемной доли свободной и связанной воды в этом слое [141]:

$$(1 + d^{(k)} \bar{\varphi}_2^{(k)}) \frac{d \bar{\theta}_s^{(k)}}{d \tau} = \frac{1}{(\delta^{(k)})^2} \left\{ (\varphi_{\text{IH}}^{(k)} + \bar{\varphi}_2^{(k)}) \left[c^{(k)} - d^{(k)} (1 + \beta^{(k)} \bar{\theta}_s^{(k)})^4 - (1 - \varphi_{\text{IH}}^{(k)} - \bar{\varphi}_2^{(k)}) \left[c_0^{(k)} - d_0^{(k)} (1 + \beta^{(k)} \bar{\theta}_s^{(k)})^4 \right] - \right. \right. \quad (2.31)$$

$$\left. - B l^{(k)} (\bar{\theta}_s^{(k)} - \theta_e^{(k)}) - B_0^{(k)} (\bar{\theta}_s^{(k)} - \theta_0^{(k)}) - \frac{b^{(k)} \bar{\varphi}_2^{(k)} \exp \left[\frac{\bar{\theta}_s^{(k)}}{1 + \beta^{(k)} \bar{\theta}_s^{(k)}} \right]}{\sqrt{1 + \beta^{(k)} \bar{\theta}_s^{(k)}}} \left[1 - \pi_e^{(k)} \exp \left(- \frac{\bar{\theta}_s^{(k)}}{1 + \beta^{(k)} \bar{\theta}_s^{(k)}} \right) \right] \right\} +$$

$$+ \frac{\left[L^{(k)} - G^{(k)} (1 + \beta^{(k)} \bar{\theta}_s^{(k)})^4 \right]}{\bar{k}_1^{(k)}} (1 - \varphi_{\text{IH}}^{(k)} - \bar{\varphi}_2^{(k)}) (1 - e^{-\bar{k}_1^{(k)}}) - \frac{\bar{\varphi}_2^{(k)}}{\sqrt{1 + \beta^{(k)} \bar{\theta}_s^{(k)}}} \left[1 - \pi_e^{(k)} \exp \left(- \frac{\bar{\theta}_s^{(k)}}{1 + \beta^{(k)} \bar{\theta}_s^{(k)}} \right) \right] \exp \left(\frac{\bar{\theta}_s^{(k)}}{1 + \beta^{(k)} \bar{\theta}_s^{(k)}} \right) -$$

$$- \bar{\alpha}_v^{(k)} (\bar{\theta}_s^{(k)} - \theta_e^{(k)}),$$

$$\frac{d \bar{\varphi}_2^{(k)}}{d \tau} = - \frac{\gamma^{(k)} \bar{\varphi}_2^{(k)}}{\sqrt{1 + \beta^{(k)} \bar{\theta}_s^{(k)}}} \left[1 - \pi_e^{(k)} \exp \left(- \frac{\bar{\theta}_s^{(k)}}{1 + \beta^{(k)} \bar{\theta}_s^{(k)}} \right) \right] \exp \frac{\bar{\theta}_s^{(k)}}{1 + \beta^{(k)} \bar{\theta}_s^{(k)}}. \quad (2.32)$$

Уравнение (2.31) представляет собой баланс энергии в k -фазе слоя РГМ, а уравнение (2.32) характеризует баланс влаги в слое РГМ, где черта сверху обозначает осреднение по высоте слоя РГМ. Эти уравнения необходимо решать с использованием следующих начальных условий:

$$\bar{\theta}_s^{(k)}(0) = 0, \quad \bar{\varphi}_2^{(k)}(0) = \varphi_{2u}^{(k)}, \quad (2.33)$$

Для численного решения системы уравнений (2.31), (2.32) с начальными условиями (2.33) был применен метод Рунге – Кутты 4-го порядка точности [142].

Численные значения параметров задачи. При численном расчете использовались следующие значения размерных и безразмерных величин для опада хвой сосны [24, 117]: плотность сухого органического вещества РГМ $\rho_1^1 = 500 \text{ кг/м}^3$; плотность воды в жидко-капельном состоянии $\rho_2 = 1000 \text{ кг/м}^3$; температура почвы в начальный момент $T_* = 292,8 \text{ К}$;

температура воздуха в начальный момент $T_e = 295$ К; коэффициент теплопроводности РГМ $\lambda_1^1 = 0,102$ Вт/мК; коэффициент теплопроводности воды $\lambda_2 = 0,588$ Вт/мК; тепловой эффект испарения воды $q_2^1 = 2\,250$ Дж/кг; универсальная газовая постоянная $R = 8,3144$ Дж/мольК; предэкспоненциальный множитель $k_{02}^{\otimes} = 2,33 \times 10^5$ К^{1/2}/с; величина теплоты испарения моля связанной воды $E^1/R = 5\,956$ К; коэффициент объемного теплообмена $\alpha_v^1 = 3652,47$ Дж/м³сК; коэффициент черноты РГМ $\varepsilon_s = 0,7$; коэффициент отраженной радиации (Альбедо) $A = 0,12$; постоянная Стефана $\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$ Вт/м²К⁴; величина плотности потока длинноволнового излучения $J_w = 70$ Вт/м²; высота слоя РГМ $h = 0,1$ м; скорость ветра на высоте 1 м $V_e = 0,695$ м/с; начальное значение сухого органического вещества $\phi_{\text{ин}}^1 = 0,06$; теплоемкость сухого РГМ $C_{p1}^1 = 1\,397$ Дж/кгК; теплоемкость воды $C_{p2} = 4\,180$ Дж/кгК; величина давления в окружающей среде $P_e = 101\,325$ Па; температура почвы $T_0 = 292,8$ К; величина угла между подстилающей поверхностью и горизонтальной плоскостью 0° ; коэффициент теплообмена слоя РГМ с приземным слоем атмосферы $\alpha_e = 18,262$ Дж/м²сК; коэффициент конвективного теплообмена со слоем почвы $\alpha_0 = 16,984$ Дж/м²сК; величина плотности потока падающего солнечного излучения $q_r(h) = 140$ Дж/м²с; коэффициент затухания излучения в слое РГМ $\bar{k}_1^1 = 5,1$ м²/кг; величина, характеризующая испарение связанной воды $E^1 = 4,952 \times 10^4$ Дж/моль; отношение характерного парциального давления паров воды к характерному равновесному давлению паров воды $\pi_e^1 = 0,74$; чтобы масштаб времени был один и тот же: в качестве характерной температуры T^* выбирается максимальная температура для первого дня пожароопасного сезона.

2.3. Аналитическое решение задачи

При построении прикладной экспертной системы устанавливается взаимосвязь между входными данными (начальными условиями) и выходными данными – экологическими последствиями катастроф [18, 112, 115]. Промежуточные состояния реальной сплошной среды в рамках такого подхода получить невозможно, так как при создании прикладной экспертной системы используются инженерные формулы, связывающие только начальные и конечные значения параметров состояния среды. Точность прогноза эколо-

гических исследований зависит от точности инженерных формул и различных справочных данных и от степени близости канонических постановок задач, использованных при получении упомянутых выше инженерных данных к постановке реальной задачи. Иными словами, как правило, при создании прикладных экспертных систем не решают большие задачи математической физики. Это позволяет получать данные о последствиях катастрофы в режиме, опережающем реальное время развития этого события, но точность прогноза значительно ниже. Поэтому для построения экспертных систем целесообразно использовать приближенные аналитические решения, полученные на основе строгой физико-математической постановки задачи [143].

Новую систему прогноза лесной пожарной опасности рекомендуется использовать для получения оперативного прогноза, дневного прогноза (по утренним данным), краткосрочного прогноза (на неделю), сезонного прогноза (на месяц) [144]. Известно [122], что существующая в России система метеостанций дает сведения о метеорологических данных каждые шесть часов. Поэтому для оперативного прогноза по новой системе прогноза лесной пожарной опасности следует принять шесть часов [129]. Обозначим любой временный отрезок, на который дается прогноз, буквой n .

Будем считать, что каждому i -му выделу соответствует только один главный ОПГ, тогда в уравнениях (2.31)–(2.33) можно верхний индекс k не учитывать. Опустим для простоты в уравнениях (2.31), (2.32) черту над искомыми функциями и раскладываем эти уравнения в ряд Тейлора до второго члена в окрестности точек $\theta_{sn}, \varphi_{2n}$

$$\frac{d\theta_s}{d\tau} = f_1(\theta_{sn}, \varphi_{2n}) + \left. \frac{\partial f_1}{\partial \theta_s} \right|_{\substack{\theta_s = \theta_{sn} \\ \varphi_2 = \varphi_{2n}}} (\theta_s - \theta_{sn}) + \left. \frac{\partial f_1}{\partial \varphi_2} \right|_{\substack{\theta_s = \theta_{sn} \\ \varphi_2 = \varphi_{2n}}} (\varphi_2 - \varphi_{2n}), \quad (2.34)$$

$$\frac{d\varphi_2}{d\tau} = f_2(\theta_{sn}, \varphi_{2n}) + \left. \frac{\partial f_2}{\partial \theta_s} \right|_{\substack{\theta_s = \theta_{sn} \\ \varphi_2 = \varphi_{2n}}} (\theta_s - \theta_{sn}) + \left. \frac{\partial f_2}{\partial \varphi_2} \right|_{\substack{\theta_s = \theta_{sn} \\ \varphi_2 = \varphi_{2n}}} (\varphi_2 - \varphi_{2n}),$$

где

$$\begin{aligned} f_1 = & \left[\frac{1}{\delta_n^2} \{ (\varphi_{1n} + \varphi_2) [c_n - d_n (1 + \beta_n \theta_s)^4] - (1 - \varphi_{1n} - \varphi_2) [c_{0n} - d_{0n} (1 + \beta_n \theta_s)^4] - \right. \\ & - Bi(\theta_s - \theta_{en}) - Bi_0(\theta_s - \theta_{0n}) - \frac{\varphi_2 (b_n + \delta_n^2)}{\sqrt{1 + \beta_n \theta_s}} [\exp[\theta_s / (1 + \beta_n \theta_s)] - \pi_{en}] \} + \\ & \left. + \frac{(1 - \varphi_{1n} - \varphi_2) [L_n - G_n (1 + \beta_n \theta_s)^4]}{k_1} (1 - e^{-\bar{k}_1}) - \bar{\alpha}_{vn} (\theta_s - \theta_{en}) \right] / (1 + a\varphi_2). \end{aligned}$$

Величины c_{0n} , d_{0n} , $\exp(-\overline{k_1})$ не превышают 10^{-6} , поэтому их можно отбросить в силу малости. Введем обозначения

$$A_n = Bi\theta_{en} + Bi_0\theta_{0n} + \delta_n^2 \overline{\alpha_{vn}} \theta_{en}, \quad \overline{L_n} = L_n \delta_n^2 / \overline{k_1}, \quad \overline{G_n} = G_n \delta_n^2 / \overline{k_1}, \quad \Gamma_n = \delta_n^2 + b_n.$$

Получаем

$$\begin{aligned} f_1 = & [(\varphi_{1n} + \varphi_2)][c_n - d_n(1 + \beta_n \theta_s)^4] - (Bi + Bi_0)\theta_s - \\ & - \frac{\varphi_2 \Gamma_n}{\sqrt{1 + \beta_n \theta_s}} [\exp[\theta_s / (1 + \beta_n \theta_s)] - \pi_{en}] + \\ & + (1 - \varphi_{1n} - \varphi_2)[\overline{L_n} + \overline{G_n} (1 + \beta_n \theta_s)^4] - \delta_n^2 \overline{\alpha_{vn}} \theta_s + A_n] / (1 + a\varphi_2), \end{aligned} \quad (2.35)$$

$$f_2 = - \frac{\gamma_n \varphi_2}{\sqrt{1 + \beta_n \theta_s}} [\exp[\theta_s / (1 + \beta_n \theta_s)] - \pi_{en}]. \quad (2.36)$$

Интегрируя (2.34) по времени, получаем уравнения для определения объемной доли свободной и связанной воды и температуры слоя РГМ в функции от безразмерного времени τ на любой прогнозируемый промежуток времени:

$$\varphi_2 = \exp(c_n^2 \tau) \{M_n - R_n [\exp(c_n^2 \tau) - 1] + D[\exp(\tau(s_n^{(1)} - c_n^{(2)})) - 1] + Y[\exp(\tau(s_n^{(1)} - c_n^{(2)})) - 1]_n\}, \quad (2.37)$$

$$\theta_s = (\theta_{sn} - k_n - h_n) \exp[s_n^{(1)}(\tau - \tau_n)] + h_n \exp[s_n^{(1)}(\tau - \tau_n)] + k_n. \quad (2.38)$$

Здесь

$$R_n = \frac{f_n^{(2)} + b_n^{(2)} k_n}{c_n^{(2)}}, \quad D_n = \frac{b_n^{(2)} + (\theta_{sn} - k_n - h_n) \exp(-s_n^{(2)} \tau_n)}{s_n^{(1)} - c_n^{(2)}}, \quad Y_n = \frac{b_n^{(2)} h_n \exp(-s_n^{(2)} \tau_n)}{s_n^{(2)} - c_n^{(2)}},$$

$$h_n = [f_n^{(1)} + b_n^{(1)} \theta_{sn} + c_n^{(1)} \varphi_{2n} - s_n^{(1)} (\theta_{sn} - k_n)] / (s_n^{(2)} + s_n^{(1)}), \quad k_n = \frac{f_n^{(2)} c_n^{(1)} - f_n^{(1)} c_n^{(2)}}{c_n^{(2)} b_n^{(1)} - c_n^{(1)} b_n^{(2)}},$$

$$a_n^{(1)} - b_n^{(1)} \theta_{sn} - c_n^{(1)} \varphi_{2n} = f_n^{(1)}, \quad a_n^{(2)} - b_n^{(2)} \theta_{sn} - c_n^{(2)} \varphi_{2n} = f_n^{(2)},$$

$$s_n^{(1)}, s_n^{(2)} = \frac{b_n^{(1)} + c_n^{(2)} \pm \sqrt{(b_n^{(1)} - c_n^{(2)})^2 + 4b_n^{(2)}c_n^{(1)}}}{2}, \quad f_1(\theta_{sn}, \varphi_{2n}) = a_n^{(1)}, \quad \left. \frac{\partial f_1}{\partial \theta_s} \right|_{\substack{\theta_s = \theta_{sn} \\ \varphi_2 = \varphi_{2n}}} = b_n^{(1)},$$

$$\left. \frac{\partial f_1}{\partial \varphi_2} \right|_{\substack{\theta_s = \theta_{sn} \\ \varphi_2 = \varphi_{2n}}} = c_n^{(1)}, \quad f_2(\theta_{sn}, \varphi_{2n}) = a_n^{(2)}, \quad \left. \frac{\partial f_2}{\partial \theta_s} \right|_{\substack{\theta_s = \theta_{sn} \\ \varphi_2 = \varphi_{2n}}} = b_n^{(2)}, \quad \left. \frac{\partial f_2}{\partial \varphi_2} \right|_{\substack{\theta_s = \theta_{sn} \\ \varphi_2 = \varphi_{2n}}} = c_n^{(2)},$$

$$M_n = \varphi_{2n} \exp(-c_n^{(2)} \tau_n) + \frac{f_n^{(2)} + b_n^{(2)} k_n}{c_n^{(2)}} (\exp(-c_n^{(2)} \tau_n) - 1) - \frac{b_n^{(2)} (\theta_{sn} - k_n - h_n) \exp(-s_n^{(2)} \tau_n)}{s_n^{(1)} c_n^{(2)}} (\exp[s_n^{(1)} - c_n^{(2)}] - 1) - \frac{b_n^{(2)} h_n \exp(-s_n^{(2)} \tau_n)}{s_n^{(2)} - c_n^{(2)}} (\exp(\tau_n [s_n^{(2)} - c_n^{(2)}]) - 1).$$

Таким образом, по формуле (2.37) можно получить значение объемной доли свободной и связанной воды в функции от безразмерного времени τ на любой прогнозируемый промежуток времени.

Тогда вероятность возникновения пожара по географическим и метеорологическим причинам в момент τ_n определяется по формуле (2.1). Следовательно, удастся определить вероятность возникновения пожара в любой момент времени, если известны метеорологические данные, запас РГМ и тип растительности.

2.4. Упрощенное аналитическое решение для определения времени лесопожарного созревания лесов

Получим упрощенное аналитическое решение задачи, для этого сделаем допущение о том, что на каждом временном интервале температура слоя РГМ совпадает с температурой окружающей среды, т.е. $\theta_s^{(k)} = \theta_e^{(k)}$. Тогда в качестве характерной температуры будем выбирать температуру воздуха в начале каждого n -го временного интервала. В результате на $n+1$ временном интервале уравнение (2.32) примет вид

$$\frac{d\varphi_2}{d\tau} = -\gamma_n (1 - \pi_{en}), \quad \varphi|_{\tau=\tau_n} = \varphi_{2n}. \quad (2.39)$$

Интегрируя выражение (2.39), получаем

$$\varphi_2 = \varphi_{2n} \exp[-\gamma_n (1 - \pi_{en})(\tau - \tau_n)]. \quad (2.40)$$

В результате удается получить простое аналитическое решение (2.40) для определения объемной доли свободной и связанной воды для каждого n -го временного интервала.

Определим безразмерное времени лесопожарного созревания лесов, в качестве которого принимается время достижения такого состояния, при котором типичный лесной горючий материал достигает критического влагосодержания.

Из формулы (2.40) получаем выражение для определения времени лесопожарного созревания лесов

$$\tau_* = \tau_n + \frac{1}{\gamma_n(1 - \pi_{en})} \ln \frac{\varphi_{2n}}{\varphi_{2*}}. \quad (2.41)$$

2.5. Результаты численного решения задачи и их анализ

Для проверки правильности полученного решения был проведен математический эксперимент для исследования влияния изменения шага на получаемый результат при решении системы (2.31)–(2.33) (табл. 2.2). Исследования проводились для сушки хвой сосны при следующих параметрах окружающей среды [117, 122] на высоте 1 м: скорость ветра $V_e = 2$ м/с; температура окружающей среды $T_e = 298$ К; относительная влажность воздуха $\pi_e = 0,54$; плотность потока падающего солнечного излучения $q_R(h) = 140$ Дж/м²с; величина плотности потока длинноволнового излучения $J_w = 90$ Вт/м².

Таблица 2.2

Значения φ_2 , T_s в зависимости от шага счета

Шаг	Время, ч	T_s , К	φ_2
0,01	2,8816	294,8231	$0,6110 \times 10^{-3}$
0,008	2,8816	297,8974	$0,6111 \times 10^{-3}$
0,001	2,8816	297,8974	$0,6114 \times 10^{-3}$
0,0008	2,8816	297,8974	$0,6114 \times 10^{-3}$
0,0001	2,8816	297,8974	$0,6114 \times 10^{-3}$
0,00008	2,8816	297,8974	$0,6114 \times 10^{-3}$

Из анализа табл. 2.2 следует, что приближенное численное решение сходится с уменьшением шага интегрирования, а в качестве эталонного решения можно взять результаты расчетов при шаге 0,001.

На рис. 2.2 приведено сравнение эталонного и точного аналитического решения с расчетными и экспериментальными данными работы [122].

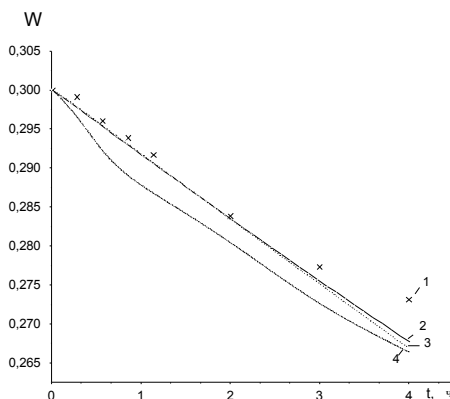


Рис. 2.2. Изменение влагосодержания W во времени для следующих решений:
 1 – эксперимент [122]; 2 – эталонное решение методом Рунге–Кутты;
 3 – точное аналитическое решение; 4 – численное решение [122]

Анализ кривых на рис. 2.2 показывает, что значение влагосодержания, полученное на основе точного аналитического решения, убывает быстрее, чем эталонное значение, найденное по методу Рунге–Кутты за 4-часовой интервал. Получили хорошее согласование численного и точного аналитического решения с экспериментом для 4-часового интервала.

В табл. 2.3 представлены численные сравнения точного аналитического решения и упрощенного аналитического решения (2.40) с эталонным решением для различных моментов времени.

Анализ табл. 2.3 показывает, что величина объемной доли свободной и связанной воды, полученная на основе точного аналитического решения, убывает быстрее, чем по эталонному и упрощенному аналитическому решениям. Иными словами, линеаризованная система уравнений позволяет получать завышенные при прочих равных условиях значения вероятности лесной пожарной опасности (рис. 2.2). Из табл. 2.3 видно, что чем больше время счета, тем больше относительная погрешность изменения объемной доли воды при точном аналитическом решении. Анализ данных табл. 2.3 показывает хорошее согласование точного аналитиче-

ского решения и упрощенного аналитического решения с эталоном для прогноза до недели. Видно, что точное аналитическое решение лучше использовать для краткосрочных прогнозов, в то время как упрощенное – для долгосрочных (больше недели). Также можно использовать для прогноза лесной пожарной опасности упрощенное аналитическое решение для тех случаев, когда нет сведений о температуре слоя РГМ и известна только температура воздуха в атмосфере.

Таблица 2.3

Значения φ_2 в зависимости от времени счета

Время прогноза	Эталонное решение	Точное аналитическое решение	Упрощенное аналитическое решение	Точное аналитическое решение	Упрощенное аналитическое решение
	Значение объемной доли свободной и связанной воды, φ_2			Относительная погрешность, $\delta\varphi_2$, %	
3 часа	$6,11 \times 10^{-4}$	$6,11 \times 10^{-4}$	$6,12 \times 10^{-4}$	0,00	0,05
9 часов	$6,01 \times 10^{-4}$	$6,01 \times 10^{-4}$	$6,02 \times 10^{-4}$	0,00	0,17
1 сутки	$5,77 \times 10^{-4}$	$5,77 \times 10^{-4}$	$5,80 \times 10^{-4}$	0,05	0,43
3 суток	$5,07 \times 10^{-4}$	$5,05 \times 10^{-4}$	$5,13 \times 10^{-4}$	0,38	1,34
1 неделя	$3,90 \times 10^{-4}$	$3,81 \times 10^{-4}$	$4,03 \times 10^{-4}$	2,26	3,15
2 недели	$2,47 \times 10^{-4}$	$2,20 \times 10^{-4}$	$2,63 \times 10^{-4}$	11,00	6,35
3 недели	$1,57 \times 10^{-4}$	$1,09 \times 10^{-4}$	$1,72 \times 10^{-4}$	30,22	9,78
1 месяц	$8,70 \times 10^{-4}$	$1,61 \times 10^{-4}$	$9,94 \times 10^{-4}$	81,51	14,23

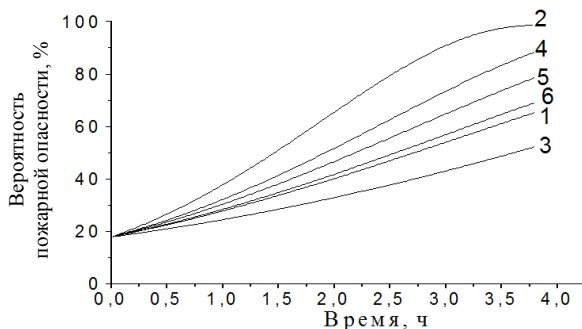


Рис. 2.3. Изменение вероятности пожарной опасности P_j для различных сценариев сушки:
 1 – $T_e = 295$, $\pi_e = 0,7$, $R_w(h) = 140$, $J_w = 70$, $V = 0,695$; 2 – $T_e = 300$, $\pi_e = 0,7$, $R_w(h) = 140$, $J_w = 70$, $V = 0,695$; 3 – $T_e = 295$, $\pi_e = 0,85$, $R_w(h) = 140$, $J_w = 70$, $V = 0,695$; 4 – $T_e = 295$, $\pi_e = 0,7$, $R_w(h) = 500$, $J_w = 70$, $V = 0,695$; 5 – $T_e = 295$, $\pi_e = 0,7$, $R_w(h) = 140$, $J_w = 200$, $V = 0,695$; 6 – $T_e = 295$, $\pi_e = 0,7$, $R_w(h) = 140$, $J_w = 70$, $V = 2$

На рис. 2.3 показано изменение вероятности пожарной опасности для различных сценариев сушки. Из анализа кривых этого рисунка видно, что наибольший вклад в вероятность пожарной опасности вносят температура окружающей среды, скорость ветра, величина плотности потока падающего солнечного излучения, величина плотности потока длинноволнового излучения. В то время как увеличение относительной влажности воздуха наоборот понижает пожарную опасность. Эти результаты согласуются с данными наблюдений [2, 122].

Кроме того, была проведена качественная оценка формулы (2.41). Результаты показали, что при повышении температуры воздуха и уменьшении относительной влажности воздуха время упреждения падает, а при понижении температуры воздуха и увеличении относительной влажности воздуха соответственно растет, что соответствует реально происходящим физическим процессам в природе.

2.6. Проверка методики прогноза лесной пожарной опасности путем ретроспективного анализа результатов наблюдений пожаров в Тимирязевском лесхозе

Для проверки новой методики воспользовались базами метеорологических данных Института оптики атмосферы СО РАН (г. Томск), экспедиционных данных (прил. 1), базой статистических данных о месте и времени пожаров в Тимирязевском лесхозе (прил. 2), созданной базой термокинетических постоянных для ОПГ (табл. 5.1).

В работе А.В. Волокитиной, М.А. Софронова [2] дается зависимость влагосодержания от количества выпавших осадков для различных типов покрова (табл. 2.4). Из анализа результатов этой работы следует, что мелкие растительные останки, такие как травяная ветошь, листья березы и осины, увлажняются приблизительно одинаково. Поэтому для этих РГМ были использованы данные по влагосодержанию рыхлоопадного типа напочвенного растительного покрова.

Для прогноза лесной пожарной опасности используем данные для верхнего слоя растительности, так как обычно загорается именно верхний слой.

Воспользуемся данными работы [117] для определения плотности ρ_1 . Для лишайника *Cladonia* $\rho_1 = 600 \text{ кг/м}^3$, для опада хвой $\rho_1 = 500 \text{ кг/м}^3$, для опада листвы $\rho_1 = 300 \text{ кг/м}^3$. Будем считать, что плотности у опада листвы и травы, лишайника и мха одинаковы.

Таблица 2.4

**Послойное влагосодержание напочвенного покрова после выпадения
осадков разной величины**

Тип покрова и слой	Величина осадков, мм								
	0,8– 1,5	1,6– 2,5	2,6– 4,0	4,1– 6,0	6,1– 9,0	9,1– 14,0	14,1– 21,0	21,1– 32,0	32,1– 48,0
Лишайниковый:									
верхний (3–4 см)	0,32	1,10	1,80	1,50			1,50		
нижний слой (3–4 см)	1,48	1,97	2,0	3,0	2,75		2,80		
подстилка (1 см)	0,30		3,50	4,50	5,0				
Рыхлоопадный:									
верхний (1 см)	0,30	0,56	0,48	0,80	0,90		0,78		
нижний (1 см)	0,30	0,52	0,30	0,85	0,90		1,05		
подстилка (0,5 см)	0,35	0,90	0,86	1,10	1,38		1,62		
Сухомшистый:									
верхний (2 см)	0,54	0,65	1,30		1,95	2,10	2,19	2,75	3,90
нижний (3 см)	0,50	1,55	1,35		1,28	2,60	2,42	2,90	3,30
подстилка (5 см)	0,86	1,50	1,0		1,02	2,36	2,10	3,0	2,80

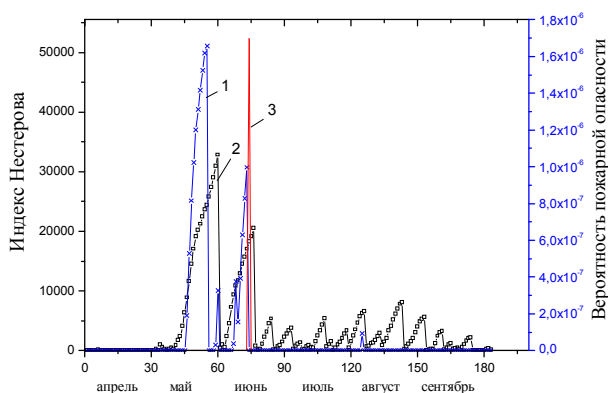
Примечание. Пустые клетки – нет данных.

Для проверки точности методики прогноза лесной пожарной опасности использовались статистические данные наблюдений пожаров в шести лесничествах (Моряковском, Богородском, Жуковском, Киреевском, Темерчинском, Тимирязевском учебном) Тимирязевского лесхоза за 2000–2004 гг., которые сравнивались с соответствующими значениями индекса Нестерова и вероятности возникновения лесного пожара для различных значений времени.

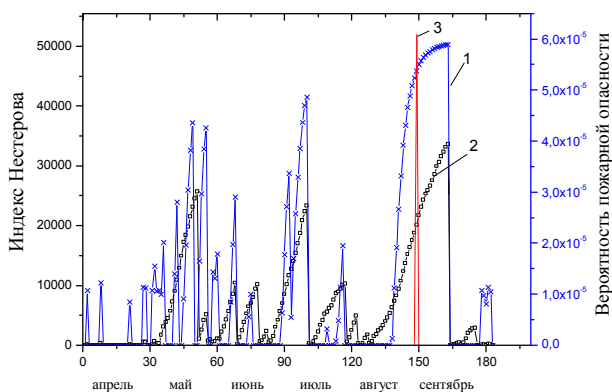
На рис. 2.4 представлено качественное сравнение изменения индекса Нестерова и вероятности пожарной опасности в течение пожароопасного сезона для Жуковского лесничества.

Из анализа кривых рис. 2.4 следует, что в некоторые дни пожароопасного сезона вероятность пожарной опасности равна нулю, в то время как значение индекса Нестерова [10] показывает некоторый класс засухи. Это, очевидно, объясняется тем, что отсутствие в основе индекса Нестерова учета динамики сушки слоя РГМ, природной и антропогенной нагрузок приводит к некоторой его погрешности.

Анализируя кривые на рис. 2.4, можно сделать вывод, что результаты, полученные на основе новой детерминированно-вероятностной методики прогноза лесной пожарной опасности, качественно верно согласуются со статистическими данными по горимости лесов в Жуковском лесничестве Тимирязевского лесхоза Томской области.



а – квартал 112-й, выдел 20-й, 2004 г.



б – квартал 71-й, выдел 23-й, 2003 г.

Рис. 2.4. Изменение индекса Нестерова и вероятности пожарной опасности, определенной по новой методике, за пожароопасный сезон для двух выделов *а* и *б*:
1 – вероятность пожарной опасности; *2* – индекс Нестерова; *3* – обнаруженный пожар

Надо сказать, что показатель Нестерова имеет размерность квадрата температуры $^{\circ}\text{C}^2$, которая не соответствует физике процесса возникновения лесных пожаров, в то время как предложенная в [137] вероятность возникновения лесного пожара безразмерна и имеет строгий физический и математический смысл.

Для проверки получаемых результатов результаты расчетов вероятности возникновения лесных пожаров сравнивались с классами засухи (КЗ), которые используются на практике [11] и рассчитываются при тех же самых условиях, определяемыми по комплексному показателю В.Г. Нестерова: I КЗ – при показателе менее 300 единиц, II – КЗ – от 301 до 1 000, III – КЗ от 1 001 до 3 000, IV КЗ – 3 001 до 10 000, V КЗ – от 10 001 до 30 000, VI КЗ – более 30 000 единиц.

Классы пожарной опасности предлагаемой методики определялись следующим образом. Максимальная величина лесной пожарной опасности на i -м выделе, которая может быть получена по формуле (2.1) равняется $\frac{F_i}{F}$. Присвоим a_6 максимальное значение VI КЗ по методике Нестерова. Так как в методике Нестерова верхняя граница VI КЗ отсутствует,

то будем считать что $a_6 = 90\,000$ единиц. Обозначим буквами a_j – верхние границы классов засухи по методике Нестерова, а буквами P_{mi} – максимальные значения вероятности возникновения лесного пожара на i -м выделе. Тогда общая формула для определения границ местной шкалы прогноза лесной пожарной опасности примет вид:

$$x_j = \frac{a_j P_{mi}}{a_6}, \quad P_{jmi} = \frac{F_{ik}}{F_k}, \quad j, k = 1, 2, 3, 4, 5, 6. \quad (2.42)$$

Здесь $j = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ соответствует j -му классу пожарной опасности; $k = 1$ соответствует Моряковскому, 2 – Богородскому, 3 – Киреевскому, 4 – Жуковскому, 5 – Учебному, 6 – Темерчинскому лесничествам; F_{ik} – выдел, для которого дается прогноз на k -м лесничестве; F_k – площадь k -го лесничества.

В результате были получены следующие значения вероятности возникновения лесного пожара для разных классов лесной пожарной опасности (КПО) для шести лесничеств Тимирязевского лесхоза:

$$\begin{aligned} 0 < \text{КПО}_1 \leq x_1 &= a_1 P_{mi} / a_6, \\ x_1 &= a_1 P_{mi} / a_6 < \text{КПО}_2 \leq x_2 = a_2 P_{mi} / a_6, \\ x_2 &= a_2 P_{mi} / a_6 < \text{КПО}_3 \leq x_3 = a_3 P_{mi} / a_6, \\ x_3 &= a_3 P_{mi} / a_6 < \text{КПО}_4 \leq x_4 = a_4 P_{mi} / a_6, \\ x_4 &= a_4 P_{mi} / a_6 < \text{КПО}_5 \leq x_5 = a_5 P_{mi} / a_6, \\ x_5 &= a_5 P_{mi} / a_6 < \text{КПО}_6 \leq x_6 = a_6 P_{mi} / a_6. \end{aligned} \quad (2.43)$$

Верхний предел влагосодержания РГМ, при котором возможно их горение (критическое влагосодержание), отличается у разных типов растительного покрова (табл. 2.5).

Таблица 2.5

Критические влагосодержания для различных типов растительного покрова

Источник	Опад хвои	Опад листьев	Травяная ветошь	Мох	Лишайник
В.Г. Нестеров [145]	—	—	—	0,45	—
М.А. Софронов [146]	—	—	0,25	0,25	—
В.И. Жуковская [147]	0,23	—	—	0,16	0,37
С.М. Вонский [148]	—	—	—	0,43	0,43
Э. Н. Валендик с соавт. [149]	0,20	—	0,25	0,10	0,25
М.А. Шешуков с соавт. [150, 151]	0,24	0,26	0,26	0,35	0,47
Н.П. Курбатский с соавт. [152]	—	—	—	0,25–0,40	0,25–0,40

Таким образом, у различных авторов данные по верхнему пределу критического влагосодержания достаточно сильно отличаются. В данной работе в качестве критических влагосодержаний для новой системы прогноза выбирались максимальные, минимальные, среднеарифметические значения этой величины, а также данные М.А. Шешукова [150, 151]. Из анализа полученных данных следует, что при уменьшении критических влагосодержаний точность методики несколько падает, а при увеличении наоборот растет. При использовании минимальных значений критического влагосодержания (табл. 2.5) в 45,5% случаев предложенная в работе методика дает более высокий класс пожарной опасности на день возникновения пожара, чем методика Нестерова, в 40,6% случаев получался равный класс пожарной опасности и в 13,9% класс пожарной опасности был ниже. Для максимальных значений критических влагосодержаний соответственно имеем – 55,5, 41, 3,5%, среднеарифметических значений – 52,5, 41,5, 5,9% и данных М.А. Шешукова – 55,5, 41, 3,5%. В связи с тем, что разница результатов, полученных по новой методике на основе среднеарифметических значений и данных М.А. Шешукова, составляет несколько процентов, то в качестве критических влагосодержаний ОПГ были приняты данные, полученные М.А. Шешуковым: для травяной ветоши – 0,26; для мха – 0,35; для опада хвои – 0,24; для опада листьев – 0,26; для лишайника – 0,47.

Результаты сравнения расчетов определения пожароопасных дней по методике Нестерова и ДВМ ПЛПО для Жуковского лесничества на основе использования понятия классов пожарной опасности представлены в табл. 2.6.

Таблица 2.6

Распределение дней пожароопасного сезона по классам пожарной опасности

Номер квартала, выдела	Год	Методика	Классы пожарной опасности					
			I	II	III	IV	V	VI
94, 18	2000	Нестерова	29	46	36	40	19	
		ДВМ ПЛПО	—	—	—	—	44	19
6	2003	Нестерова	19	24	26	44	41	5
		ДВМ ПЛПО	—	—	—	—	80	—
71, 23		Нестерова	19	24	26	44	41	5
		ДВМ ПЛПО	—	—	—	—	61	17
112, 20	2004	Нестерова	26	33	36	34	21	2
		ДВМ ПЛПО	—	2	1	5	12	—

Из анализа данных табл. 2.6 следует, что количество дней, попадающих в один из классов пожарной опасности, по новой методике меньше, чем по методике Нестерова, что согласуется с результатами наблюдений [2]. Это связано с учетом изменения влагосодержания напочвенного покрова. Как известно [153], влажные РГМ не воспламеняются даже при условии, что существует источник загорания. Прочерк в таблице означает, что текущее значение влагосодержания больше критического и вероятность возникновения пожара равна нулю, т.е. имеем нулевой класс пожарной опасности.

Для доказательства достоверности предлагаемой детерминированно-вероятностной методики проведен ретроспективный анализ [154] 202 возгораний в Тимирязевском лесхозе с учетом конкретных метеоусловий и антропогенной нагрузки на леса в 2000–2004 гг. В приложении 3 приведено сравнение КПО на день обнаружения пожара по методике Нестерова и детерминированно-вероятностной методики прогноза лесной пожарной опасности для Тимирязевского лесхоза.

Из анализа данных приложения 3 следует, что в 55,5% случаев прогноз по ДВМ ПЛПО дает более высокий КПО на день обнаружения пожара, чем по методике Нестерова, в 41% равный КПО с методикой Нестерова и только в 3,5% ниже. Этот результат свидетельствует о том, что новая методика прогноза лесной пожарной опасности более точно указывает на день возникновения пожара.

Новую систему прогноза лесной пожарной опасности рекомендуется использовать для получения оперативного прогноза (на шесть часов), дневного прогноза (по утренним данным), краткосрочного прогноза (на неделю), сезонного прогноза (на месяц). Существующая в России система метеостанций дает сведения о метеорологических данных каждые

шесть часов. Поэтому для краткосрочного прогноза по новой системе прогноза лесной пожарной опасности следует принять шесть часов.

2.7. Выводы

По итогам проделанной работы в данной главе были получены следующие результаты и сделаны выводы:

1. Разработана методика для определения вероятностей возникновения лесного пожара, с учетом антропогенной и природной нагрузок, через частоты событий и вероятность возникновения лесного пожара по метеоусловиям.

2. Получены точное аналитическое решение задачи с использованием линеаризованной системы обыкновенных дифференциальных уравнений для математического описания сушки слоя РГМ и упрощенное аналитическое решение, которое можно использовать для прогноза лесной пожарной опасности для тех случаев, когда нет сведений о температуре слоя РГМ и известна только температура воздуха в атмосфере.

3. Установлено, что решение линеаризованной системы уравнений предпочтительнее использовать для краткосрочных прогнозов (до недели), в то время как упрощенное аналитическое решение – для временных интервалов, превышающих неделю.

4. Предложена новая детерминированно-вероятностная интерпретация местных классов лесной пожарной опасности, результаты расчетов по которой согласуются с данными ретроспективного анализа пожаров в Тимирязевском лесхозе Томской области.

5. На основе проведенного ретроспективного анализа 202 возгораний в Тимирязевском лесхозе, с учетом конкретных метеоусловий и антропогенной нагрузки на леса в 2000–2004 гг., доказано, что новая система прогноза лесной пожарной опасности позволяет получать более достоверную информацию о прогнозе лесных пожаров с учетом действия сухих гроз, антропогенной нагрузки и метеорологических факторов, чем использование стандартной методики ГОСТ Р 22.1.09–99, основанной на формуле Нестерова.

ГЛАВА 3. ДЕТЕРМИНИРОВАННО-ВЕРОЯТНОСТНАЯ СИСТЕМА ПРОГНОЗА ТОРФЯНОЙ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ

3.1. Методика прогноза торфяной пожарной опасности

3.1.1. Свойства торфа и причины возгорания

Для разработки системы торфяной пожарной опасности необходимо выяснить основные пирологические особенности торфа и причины его возгорания. В состав органической части торфа входят пять основных элементов: С – 54–63%, Н – 5,8–6,6%, О – 34–36%, N – 1,5–2,6%, S – 0,2–0,5% [155]. Для болота характерно отложение на поверхности почвы не-полно разложившегося органического вещества, превращающегося в дальнейшем в торф. Он содержит до 50–60% углерода. Физические свойства торфа зависят от степени разложения⁵, дисперсности твёрдой части, оцениваемой удельной поверхностью. В естественном залегании торф содержит до 88–96% воды, имеет пористость до 96–97%. Слаборазложившийся торф в сухом состоянии имеет низкую плотность – до 300 кг/м³. Торф поглощает и удерживает значительные количества влаги, катионов металлов (особенно тяжёлых). Теплота сгорания (максимальная) составляет 24 МДж/кг.

Повышенная пожарная опасность торфа обусловлена его пористой структурой, малой плотностью и наличием в составе до 40% кислорода, что позволяет развиваться процессам горения в скоплениях и залежах скрыто, практически без доступа воздуха. Размер пор изменяется от 0,1 до 30 мкм, их объем – от $4 \cdot 10^{-5}$ до $7,3 \cdot 10^{-5}$ м³/кг, а удельная поверхность – соответственно от 268 до 332 м²/кг [155]. В сухом состоянии торф характеризуется плохой смачиваемостью, что усложняет ликвидацию пожаров и загораний. В ряду горючих ископаемых (по удельной теплоте сгорания) торф занимает место между древесиной и бурными углями. К показателям пожарной опасности торфа можно отнести также параметры, характери-

⁵ Под степенью разложения понимают отношение массы гумуса (разложившейся части органики) ко всей массе торфа.

зующие его теплофизические свойства. Значение коэффициента теплопроводности торфа изменяется от 0,1 до 0,5 Вт/м·К, практически не зависит от вида торфа и степени разложения и определяется плотностью, влажностью, газонасыщенностью, пористостью. Удельная теплоемкость сухого торфа составляет 1,96 кДж/кг·К. Торф со степенью разложения 30% не горит при влагосодержании, равном или больше 69–72%.

Согласно [18, 55, 155, 156] основными причинами торфяных пожаров являются: самовозгорание торфа; «сухие грозы»⁶; антропогенные источники (искры, возникающие при работе техники, неосторожное обращение с огнем и др.).

Самовозгорание торфа – это воспламенение торфа из-за его окисления кислородом воздуха. При этом не обязателен приток тепла извне. В процессе участвуют микроорганизмы, продукты жизнедеятельности которых накапливаются в анаэробных условиях и приводят к постепенному прогреванию массы торфа до 60–65°C. При последующем повышении температуры торф превращается в полукокс, склонный к спонтанному самовозгоранию под действием кислорода воздуха. Нужно отметить, что способность к самовоспламенению в основном имеет торф на полях добычи, в процессе его хранения. Как правило, торф имеет свойство к самовозгоранию, если его влажность меньше 28–30%. Степень пожароопасности также зависит от ботанического состава торфа и степени его разложения.

Значительный процент возгораний наблюдается также из-за грозовой активности, в частности «сухих гроз». При этом пожары от молний могут быть труднодоступными из-за их удалённости от объектов инфраструктуры.

Развитие торфяных пожаров обусловлено комплексом климатических, метеорологических, топографических и ряда других факторов. К их числу можно отнести продолжительность засушливого периода, интенсивность солнечной радиации, время суток, температуру воздуха, влажность, структуру и уплотненность торфяной залежи, степень разложения торфа, направление и скорость ветра, рельеф местности, наличие преград огню, уровень стояния грунтовых вод.

Так, продолжительность засушливого периода оказывает существенное влияние на характер развития пожаров на торфяных месторождениях. Анализ пожаров показывает, что крупные пожары наиболее часто возникают в периоды с мая по сентябрь, когда устанавливается засушливая погода. При этом происходит интенсивное иссушение торфяного пласта и понижение уровня стояния грунтовых вод. Проходящие кратковременные

⁶ «Сухие грозы» – удары молний без последующего ливня.

дожди несколько увлажняют почву, но не настолько, чтобы восполнить потери при испарении влаги. Обычно крупные торфяные пожары возникают не раньше, чем на 4–5-й день устойчивого засушливого периода.

Влага выпавшего после продолжительной засухи дождя очень медленно проникает в толщу торфа. Поэтому последний горит и в очень сырую осеннюю погоду и даже под снегом, когда напочвенный покров сильно увлажняется и гореть не может. При этом торф не горит, а тлеет.

Одним из путей решения задачи раннего предупреждения торфяных пожаров является использование математических моделей для прогнозирования возможных состояний лесоболотных ландшафтов, определения участков с наибольшей степенью пожароопасности. Вероятность возникновения торфяного пожара в них будет определяться двумя факторами: готовностью торфа к возгоранию, распространению горения и источниками огня. Готовность торфа к воспламенению и распространению горения по поверхности определяется влажностью его верхнего слоя в момент воспламенения, а процесс заглублиения пожара внутрь торфяной залежи и переход его в так называемую подземную форму зависят от распределения влажности торфа по глубине залежи.

Существующие методики определения пожарной опасности учитывают этот параметр эмпирически в обобщенном виде для всего торфяного массива. Однако влажность торфа в залежи распределена неравномерно, является функцией пространственных координат и изменяется динамически в зависимости от внешних условий. Зная распределение влажности по территории торфяного массива, можно выделить зоны повышенного пожарного риска. Информация такого рода может быть использована при организации системы мониторинга торфяных пожаров. Наиболее эффективным способом получения информации о пространственном распределении влаги в обоих случаях является метод математического моделирования.

3.1.2. Математическая модель прогноза пожаров на торфяниках

В работе [18] утверждается, что возникновение природного пожара носит вероятностный характер и зависит не только от погодных условий и грозовой активности, но и от уровня антропогенной нагрузки, скорости ветра, влагосодержания горючих материалов и реакционной способности этих материалов. Исходя из этого, предлагается физическая модель воз-

никновения торфяных пожаров аналогично с лесными пожарами (см. рис. 2.1).

Для разработки предлагаемой модели прогноза пожаров на торфяниках используется подход, предложенный в главе 2. В качестве достаточных условий невоспламенения слоя торфа будем считать

$$W_{ij} > W_{i*}. \quad (3.1)$$

Здесь W_{ij} – текущее влагосодержание слоя торфа на i -м выделе в j -й временной интервал; W_{i*} – критическое влагосодержание слоя торфа на i -м выделе, при котором торф не воспламеняется и пожар не возникает.

Согласно проведенному обзору [18, 42, 46, 50, 55, 156, 157] все причины вызывающие возгорание торфяников, можно разделить на две группы: природные (A_1) и антропогенные (A_2). Под природными причинами понимается возгорание в результате удара молнии при «сухих грозах», а под антропогенными – ряд причин: самовозгорание, брошенные на землю непогашенные окурки; тлеющие после выстрела из охотничьего ружья пыжи; непогашенные костры; искры из выхлопных труб автотранспорта; взрывы нефте-, газопроводов; техногенные пожары на буровых установках; падение летательных аппаратов; преднамеренные поджоги. Несмотря на то что самовозгорание происходит в результате жизнедеятельности микроорганизмов (природная группа), оно может произойти только в штабелях фрезерного торфа на полях добычи, поэтому самовозгорание вынесли в антропогенную группу. Эти причины в совокупности определяют пожароопасность торфа, характеризующую потенциальную возможность возникновения и развития пожаров.

Основными характеристиками предлагаемой модели являются:

1. Отрезок времени t , в рамках которого изучается явление зажигания торфяников. Обычно это промежуток с мая по сентябрь.

2. Выдел, под которым понимают i -й участок с конкретным типом торфа.

3. Общее число всех видов торфяной пожарной опасности на рассматриваемом i -м выделе для заданного времени t равно $D_i(t) = \sum_{n=1}^2 D_{in}(t)$, где $D_{in}(t)$ – число опасностей A_n n -го вида на том же выделе ($n = 1$ соответствует зажиганию торфа от молний; $n = 2$ – по антропогенным причинам).

Вероятность появления конкретного вида пожарной опасности определяется по формуле [39]:

$$P_{in}(A_n, t) = D_{in}(t) / D_i(t), \quad n = 1, 2. \quad (3.2)$$

Из анализа (3.2) следует, что $P_{in}(A_n, t) < 1$ по определению, а вероятность возникновения пожаров от всех видов опасности на i -м выделе равна

$$\sum_{n=1}^2 P_{in}(A_n, t) = \sum_{n=1}^2 D_{in}(t) / D_i(t) = 1. \quad (3.3)$$

Наряду с независимыми друг от друга причинами возникновения торфяных пожаров необходимо учитывать тот факт, что торф, влагосодержание которого больше критического, не горит. Кроме того, пожар не возникнет если на i -м выделе отсутствует горючий материал. Поэтому необходимо ввести величину вероятности того, что в момент времени t влагосодержание слоя торфа меньше критического:

$$P_i(C, t) = \begin{cases} 0 & \text{при } W_{it} \geq W_{i*}, \\ \frac{F_i}{F} (1 - W_{it} / W_{i*}) & \text{при } 0 < W_{it} < W_{i*}. \end{cases} \quad (3.4)$$

Здесь W_{it} – текущее влагосодержание слоя торфа на i -м выделе в момент времени t ; W_{i*} – критическое влагосодержание торфа на i -м выделе; F_i – площадь i -го выдела; F – площадь лесничества (лесхоза); значение $P_i(C, t) = 0$ соответствует случаю, когда на i -й площади нет торфа (поверхность дорог, рек и озер) или на слой торфа выпали осадки, в результате чего $W_{it} > W_{i*}$.

Легко видеть (3.4), что величина $P_i(C, t) < 1$.

Величина влагосодержания W_{it} определяется с помощью математической модели сушки слоя торфа, W_{i*} берется из литературных данных.

Представляет интерес количественная теория предсказания лесных пожаров, вызываемых молниями, развитая в [158]. Основу ее составляет соотношение

$$P(FFL) = H(FFL/L)P(L), \quad (3.5)$$

где $P(FFL/L)$ – вероятность возникновения лесного пожара при условии, что происходит удар молнии, $P(L)$ – вероятность появления молнии. Вос-

пользовавшись данным подходом, а также с учетом предложенной физической модели возникновения природных пожаров (см. рис. 2.1), уравнений (3.2)–(3.5) и теоремы умножения вероятностей получаем следующее выражение для вероятности возникновения торфяных пожаров на i -м выделе в момент времени t :

$$P_i(t) = \sum_{n=1}^2 P_{in}(A_n, t) P_{in}(PF / A_n, t) P_i(C, t). \quad (3.6)$$

Здесь $P_{in}(A_n, t)$ – вероятность появления конкретной n -й антропогенной и природной пожарной опасности в момент времени t , достаточной для зажигания слоя торфа; $P_{in}(PF / A_n, t)$ – вероятность возникновения пожара вследствие действия антропогенной и природной пожарной опасности n -го типа в тот же момент времени t ; $P_i(C, t)$ – вероятность готовности воспламенения.

Если расписать формулу (3.6) по видам пожарной опасности, то получим следующее выражение [159]:

$$P_i(t) = [P_{i1}(A_1, t) P_{i1}(PF / A_1, t) + P_{i2}(A_2, t) P_{i2}(PF / A_2, t)] P_i(C, t). \quad (3.7)$$

В работе [136] для прогнозирования лесных пожаров, вызванных молниями, предложили определение вероятности появления молний через соответствующие частоты. Данный подход был использован для нахождения величин $P_{in}(A_n, t)$, $P_{in}(PF / A_n, t)$:

$$P_{in}(A_n, t) \approx N_{A_n, i} / N_{FSi}, \quad P_{in}(PF / A_n, t) \approx N_{FA_n, i} / N_{FQi}, \quad n = 1, 2. \quad (3.8)$$

Здесь N_{A_i} – число дней для i -го выдела, когда имели место молнии (при сухих грозах); $N_{A_{2i}}$ – количество дней пожароопасных сезонов для i -го выдела, когда имела антропогенная нагрузка, достаточная для зажигания торфа; $N_{FA_n, i}$ – количество пожаров вследствие молний ($n = 1$) или антропогенных причин ($n = 2$) соответственно; N_{FSi} – общее число дней пожароопасных сезонов для i -го выдела за некоторый период времени; N_{FQi} – общее количество пожаров для i -го выдела за некоторый период времени. Из выражения (3.8) очевидно, что величины $P_{in}(A_n, t)$, $P_{in}(PF / A_n, t)$ меньше единицы.

Вероятность возникновения пожара вследствие самовозгорания будет рассчитываться только для тех выделов, которые находятся на территории торфяных разработок. Так как статистические данные по N_{A_2i} в лесхозах отсутствуют, воспользуемся статистическими данными работы Ю.А. Андреева, Г.Ф. Ларченко [136] для определения показателя пожароопасной посещаемости лесов вблизи населенного пункта $P_{i2}(A_2, t)$. Для определения появления пожарной опасности в результате самовозгорания торфа предлагается использовать метод, предложенный в [156].

Таким образом, зная текущее значение влагосодержания W_{ij} и статистическую информацию о выделе, можно рассчитать вероятность возникновения торфяного пожара для прогнозируемого промежутка времени.

3.2. Математическая модель низкотемпературной сушки слоя торфа

Согласно [18] среди основополагающих факторов, влияющих на возникновение низовых лесных и торфяных пожаров, следует выделить следующие:

1. Способность растительных горючих материалов (РГМ) к воспламенению, т.е. состояние при котором РГМ может воспламеняться от внешнего источника огня.

2. Способность РГМ к распространению огня, т.е. состояние, при котором огонь может самопроизвольно распространяться вдоль слоя РГМ.

3. Наличие природных и антропогенных источников огня.

Наибольший интерес представляет исследование влияния первых двух упомянутых факторов. Очевидно, что они напрямую связаны с влагосодержанием и сушкой РГМ. Кроме того, следует заметить, что влагосодержание, при котором РГМ способны к воспламенению, и влагосодержание, при котором огонь способен распространяться вдоль слоя РГМ без дополнительных источников энергии, различны, кроме того, эти значения различны для различных типов РГМ. Поэтому решение задачи о сушке РГМ занимает важнейшее место в процессе прогноза пожарной опасности.

Зная характеристики слоя торфа для конкретной местности, можно оценить вероятность ее пожарной опасности, а также рассчитать пожарную опасность для всех участков, входящих в исследуемую область, что, в свою очередь, позволит оптимально использовать ресурсы, направлен-

ные на предотвращение возникновения и ликвидацию пожара. Таким образом, необходимо разрабатывать относительно простые и в то же время достаточно точные и физически обоснованные математические модели для прогноза динамики сушки заболоченных территорий с целью прогноза их пожарной опасности.

Постановка задачи. Будем считать, что сушка слоя торфа происходит в результате воздействия внешней среды [160]. Рассматривается одномерная задача в декартовой системе координат: ось z направлена вертикально вниз, начало координат по оси z выбирается на границе раздела слоя торфа и атмосферы. Физическая модель представлена на рис. 3.1.

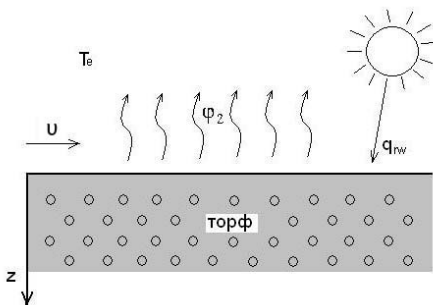


Рис. 3.1. Физическая модель сушки слоя торфа: u – скорость ветра; T_0 – температура окружающей среды; φ_2 – объемная доля воды; q_{rw} – плотность потока результирующего излучения от Солнца

Математическая модель сушки слоя торфа является однотемпературной, т.е. газовая фаза и конденсированная фаза (каркас) имеют одинаковую температуру [161]. Так как процесс сушки слоя торфа в природе происходит при невысоких температурах, предполагаем, что в самом слое торфа имеет место только испарение свободной воды. Торф в процессе сушки считался многофазной средой, состоящей из сухого органического вещества с объемной долей φ_1 , свободной и связанной воды с объемной долей φ_2 , газовой фазы φ_3 . Рассматривался такой слой торфа, у которого начальная объемная доля газовой фазы φ_{3in} ($0,1 < \varphi_{3in} < 0,2$) невелика по сравнению с объемными долями конденсированной фазы. Эта математическая модель представляет частный случай модели, предложенной в [162].

Математически сформулированная выше задача с учетом сделанных допущений сводится к решению следующей системы уравнений [163, 164]:

$$\frac{\partial \rho_3 \Phi_3}{\partial t} + \frac{\partial \rho_3 \Phi_3 v}{\partial z} = Q, \quad (3.9)$$

$$v = -\frac{\xi}{\mu} \frac{\partial P}{\partial z}, \quad P = \frac{\rho_3 R T}{M_3}, \quad (3.10)$$

$$\sum_{i=1}^2 c_{pis} \rho_{is} \Phi_i \frac{\partial T}{\partial t} + c_{p3} \rho_3 \Phi_3 \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) - q_{2s} R_{2s}, \quad (3.11)$$

$$\Phi_1 = \Phi_{1in}, \quad \Phi_3 = 1 - \Phi_1 - \Phi_2, \quad (3.12)$$

$$\rho_{2s} \frac{\partial \Phi_2}{\partial t} = -R_{2s}, \quad (3.13)$$

$$Q = R_{2s}, \quad R_{2s} = \frac{\rho_{2s} \Phi_2 k_{2s} \exp(-E_{2s} / RT)(1 - RH)}{\sqrt{T}}. \quad (3.14)$$

Для решения системы уравнений (3.9)–(3.14) используются следующие начальные и граничные условия:

$$T|_{t=0} = T_{in}, \quad \rho_3|_{t=0} = \rho_{3in}, \quad \Phi_i|_{t=0} = \Phi_{iin}, \quad i = 1, 2, \quad (3.15)$$

$$P|_{z=0} = P_e, \quad \frac{\partial P}{\partial z}|_{z=L} = 0, \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial z}|_{z=0} = \alpha_e (T_e - T_w) + \Phi_{sw} q_{rw} - q_{2s} R_{2s}, \quad T|_{z=L} = T_{in}, \quad (3.16)$$

$$q_{rw} = (1 - A) q_R(h) \cos \alpha - \varepsilon_s \sigma T_w^4 + J_w \cos \alpha, \quad (3.17)$$

где t – время; z – пространственная координата; Φ_i , $i = 1, 2, 3$ – объемные доли; $i = 1, 2, 3$ – торф, свободная и связанная вода, газовая фаза; ρ_i , $i = 1, 2, 3$ – плотности; v – скорость газообразных продуктов реакции испарения; Q – массовая скорость образования газовой фазы; P – давление газа в порах; $\mu = \mu_{in} (T / T_{in})^{0.5}$ – коэффициент динамической вязкости смеси газов; $\xi = \xi_* \Phi_3^3 / (1 - \Phi_3)^2$ – функция, описывающая влияние объемной доли на сопротивление; $\xi_* = d_p^2 / 120$ – характерная проницаемость; d_p – диаметр пор; M_3 – молекулярный вес газа; R – универсальная газовая постоянная;

T – температура торфа; C_{pi} , $i = 1, 2, 3$ – коэффициент теплоемкости; k_{2s} – предэкспоненциальный множитель реакции испарения; E_{2s} – энергия активации, характеризующая испарение воды; R_{2s} – массовая скорость испарения свободной и связанной воды в торфе; q_{2s} – тепловой эффект реакции R_{2s} ; λ – коэффициент теплопроводности; T_e – температура окружающей среды; α_e – коэффициент теплообмена торфа с внешней средой; $\varphi_{sw} = \varphi_{s1} + \varphi_{s2}$ – объемная доля конденсированной фазы на верхней границе слоя торфа; q_{rw} – плотность потока результирующего излучения на границе раздела сред; A – альбеда слоя торфа; $q_R(h)$ – суммарный радиационный поток на верхней границе слоя торфа; α – угол между горизонтальной плоскостью и слоем торфа; ε_s – коэффициент черноты слоя; σ – постоянная Стефана–Больцмана; J_w – плотность потока длинноволнового излучения на верхней границе слоя торфа; RH – относительная влажность воздуха. Индексы: s – конденсированная фаза; e – внешняя среда; in – начальное значение; w – параметры состояния при $z = 0$.

Методика расчета и база данных. Численное решение данной системы уравнений осуществлялось итерационно-интерполяционным методом с постоянным по времени шагом в соответствии с методикой, описанной в [165]. По результатам численных расчетов анализировалось изменение начальных объемных долей, давления и температуры для различных временных интервалов.

В расчетах были использованы следующие значения параметров: $L = 1$ м, $T_{in} = 278$ К, $\lambda_1 = 0,041$ Вт/(м·К), $C_{p1} = 951$ Дж/(кг·К), $C_{p2} = 4183$ Дж/(кг·К), $C_{p3} = 1020$ Дж/(кг·К), $M_3 = 0,029$ кг/моль, $\rho_2 = 1\,000$ кг/м³, $\rho_3 = 1,18$ кг/м³, $d_p = 5 \cdot 10^{-4}$ м, $R = 8,314$ Дж/(моль·К), $\alpha = 0^\circ$, $q_{2s} = 2\,250$ Дж/кг, $\varepsilon_s = 0,7$, $A = 0,6$, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/м²К⁴, $\varphi_{1in} = 0,243$, $\varphi_{2in} = 0,598$, $\varphi_{3in} = 0,159$, $\mu_{in} = 1,81 \cdot 10^{-5}$ Па·с, $E_{2s} = 36\,762$ Дж/моль, $k_{2s} = 0,482 \cdot 10^4$ К^{0,5}·с⁻¹, $\rho_1 = 815$ кг/м³, $W = 312\%$. Для перехода от влагосодержания к объемным долям использовали формулы, предложенные в [24]. В качестве метеорологической информации использовали данные по температуре воздуха и почвы, относительной влажности воздуха, скорости ветра, суммарному радиационному потоку с 18 по 24 мая 2000 г. с интервалом в 3 часа, предоставленные Государственным учреждением «Новосибирский ЦГМС–РСМЦ» и Институтом оптики атмосферы СО РАН. Выбор данного промежутка времени объясняется тем, что весенний период является одним из наиболее пожароопасных, кроме того, продолжительности в одну неделю достаточно для учета суточных колебаний параметров сушки. Торф, для которого проводился качественный анализ, и метеоинформация соответствовали Тимирязевскому лесхозу Томской области.

Для количественной проверки результаты численного моделирования сравнивались с экспериментальными данными процесса сушки в изотермических условиях при температуре 50°C и динамических при скоростях нагрева 20 и 30 К/мин [166, 167], полученными для трёх видов торфа. Термокинетические константы и начальные данные для процесса сушки трёх типов торфа приведены в табл. 3.1 [167].

Таблица 3.1

Характеристики образцов торфа [167]

Показатель	Образец 1	Образец 2	Образец 3
E_{28} , Дж/моль	36 762	36 029	42 346
k_{28} , $K^{0.5} \cdot c^{-1}$	$0,482 \cdot 10^4$	$0,467 \cdot 10^4$	$0,450 \cdot 10^5$
ρ_1 , кг/м ³	815	282	385
W , %	312	298	180

Результаты численного решения и их анализ. Для определения оптимального шага по времени и точек по пространству были проведены математические эксперименты, в которых исследовалось влияние их изменения на получаемый результат при решении системы (3.9)–(3.13). Было установлено, что решение сходится с уменьшением шага интегрирования. Однако разница в значениях относительных погрешностей δP , δT , и δW для временного шага 0,1 и 100 с составила менее 1%. Поэтому в качестве эталонного решения можно принять результаты расчетов при шаге 50 с.

Анализ результатов расчетов с различным количеством точек по глубине показывает, что увеличение количества точек практически не влияет на давление и влагосодержание. Так, разница между максимальным (900) и минимальным (50) количеством точек составила менее 1% для глубины 1 м. В то же время для температуры эта разница составила около 7%. Исходя из того, что для расчетов динамики влагосодержания большого количества торфяных участков может потребоваться значительное время при использовании большого количества точек по глубине, в качестве компромисса между временем счета и точностью можно взять 200 точек для глубины 1 м. При этом относительная погрешность искомым параметров составит менее 2%.

Параметрический анализ. В результате численного решения математической модели (3.9)–(3.13) с учетом реальных метеословий для временного промежутка в одну неделю были проведены тестовые расчеты и получены зависимости температуры слоя торфа (рис. 3.2), давления и

параметров состояния среды на верхней границе торфа (рис. 3.3), влаго-содержания (см. рис. 3.4) от времени.

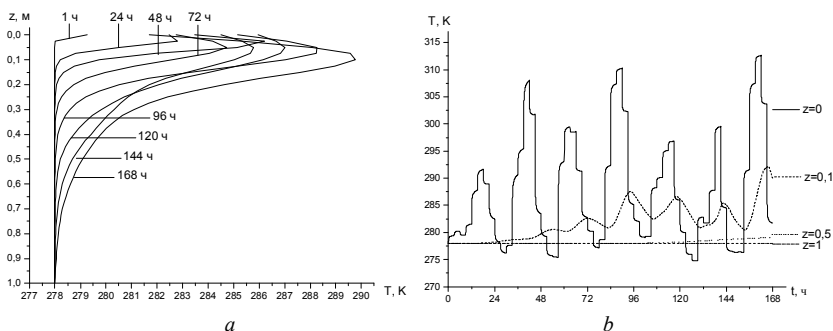


Рис. 3.2. Распределение температуры слоя торфа в различные моменты времени: a – по глубине слоя; b – для различных значений z

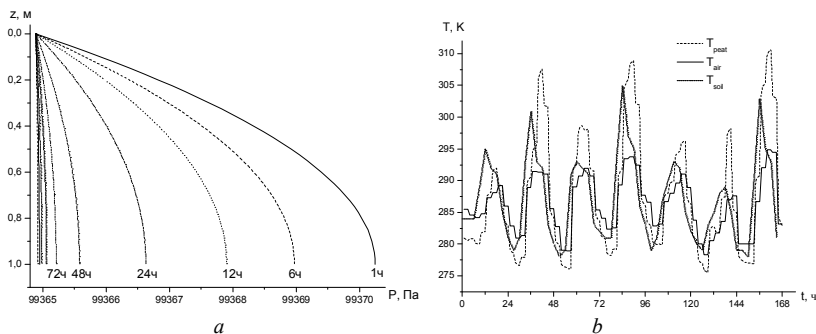


Рис. 3.3. Зависимости: a – давления газовой фазы от глубины слоя торфа в различные моменты времени; b – параметров состояния среды в различные моменты времени на верхней границе слоя торфа

Из анализа численного решения (рис. 3.2, a) следует, что с ростом времени температура на верхней границе растет и слой начинает равномерно прогреваться от поверхности вглубь слоя. Перегиб температуры слоя торфа на верхней границе связан с задаваемой температурой воздуха. Кривые на рис. 3.2, a соответствуют полуночи. В это время температура воздуха низкая, а температура верхнего слоя торфа выше за счет прогрева за предыдущие сутки, и к 00.00 ч торф не успевает остыть. Из рис. 3.2, b видно, что температура слоя торфа при $z = 0$ напрямую зависит

от параметров окружающей среды, возрастает и убывает в зависимости от времени суток. С увеличением глубины слоя зависимость уменьшается и при $z = 0,5$ суточные колебания метеопараметров не влияют на температуру слоя, что согласуется с [168]. При этом тепловая волна доходит до глубины 0,5 м только на 5-е сутки.

Из рис. 3.3, *a* видно, что давление газовой фазы в слое торфа растет по глубине, что соответствует физике процесса. Однако в процессе сушки за счет фильтрации газов давление начинает выравниваться и стремиться к атмосферному. Также видно, что кривая температуры слоя торфа на рис. 3.3, *b* качественно согласуется с приведенными данными. С ростом температуры воздуха возрастает температура торфа и с понижением соответственно падает. При этом в самые жаркие часы температура слоя торфа и почвы значительно выше температуры воздуха. Это объясняется нагревом за счет излучения от Солнца. Так как коэффициент черноты торфа выше, чем почвы, то пик температуры торфа превышает температуру почвы на несколько градусов. Максимум различия между температурой воздуха и торфа составляет около 15 градусов. Согласно [169] при воздействии солнечного излучения температура верхнего слоя торфа может быть на 15–17°C выше температуры окружающей среды, что соответствует нашим результатам. Также известно [155], что суточное испарение почти прямо пропорционально количеству часов солнечного сияния в течение дня, причем из общего количества солнечной радиации, падающей на поверхность торфа, около 60% приходится на сушку торфа, и температура поверхности торфа при этом значительно превышает температуру окружающего воздуха.

Из анализа кривых на рис. 3.4 видно, что сушка верхнего слоя торфа с ростом времени происходит довольно быстро. При этом она зависит от параметров окружающей среды. Участки кривых, на которых влагосодержание слоя торфа меняется медленно, соответствуют ночному периоду суток. В этот промежуток времени отсутствует излучение от Солнца, понижается температура воздуха и поэтому скорость сушки замедляется. Видно, что при отсутствии осадков и положительных температурах воздуха уже на 5-е сутки верхний слой торфа толщиной 0,1 м высыхает до влагосодержания, меньше критического. В результате может иметь место воспламенение от любого источника зажигания.

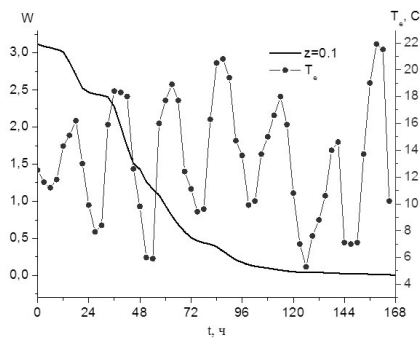


Рис. 3.4. Изменение температуры окружающей среды и влагосодержания слоя торфа в течение недели на глубине 0,1 м. Время 0 часов соответствует полуночи

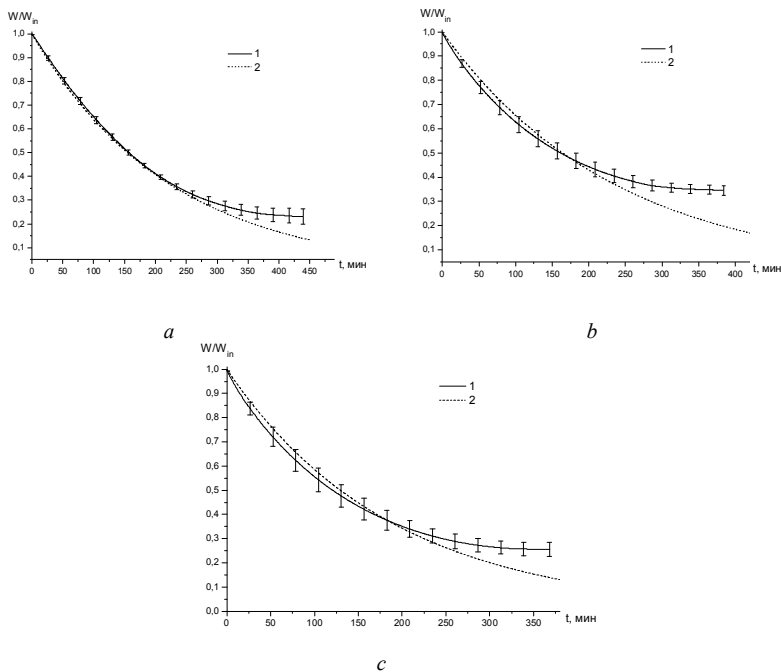


Рис. 3.5. Сравнение расчетных (пунктирные линии) и экспериментальных [167] (сплошные линии) зависимостей относительного влагосодержания при температуре 50°C для трех видов торфа: *a* – образец 1; *b* – образец 2; *c* – образец 3

Сравнение с экспериментом. Численные эксперименты проводились для изотермических условий при температуре сушки 50°C для трех видов торфа. Моделировались условия сушки галогеновой лампой в анализаторе влажности ANDMX-50. Согласно [167] слой торфа в расчетах имел глубину 0,015 м. Сравнение полученных результатов с экспериментальными данными представлено на рис. 3.5 для глубины 7,5 мм.

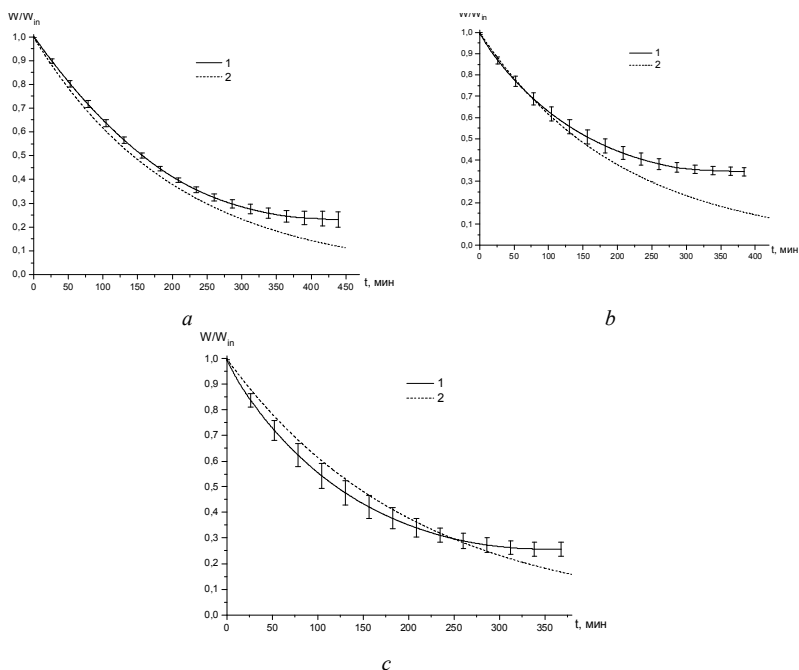


Рис. 3.6. Сравнение экспериментальных 1 [167] и расчетных 2 зависимостей относительного влагосодержания при температуре 50°C для трех видов торфа: *a* – образец 1; *b* – образец 2; *c* – образец 3

Из анализа кривых на рис. 3.5 видно, что начиная с некоторого момента времени скорость сушки торфа замедлялась, в отличие от расчетных данных. Этот момент времени определяется конечной стадией сушки, когда экспериментальная кривая начинает выходить на стационар. Это различие с численными данными связано с особенностью математической модели, где сделано допущение о том, что в слое торфа имеет место только испарение свободной воды. То есть в модели (3.9)–(3.13) сво-

бодная и связанная вода объединены и описываются одним параметром. Таким образом, при долгосрочных прогнозах (более недели) данная модель будет давать заниженные значения влагосодержания и соответственно повышенную пожарную опасность.

В работе [167] показано, что энергии активации для трех рассмотренных типов торфа имеют близкие значения, и делается вывод о возможности использования единственного оптимального значения кинетических параметров для математического моделирования процесса сушки торфов. Для проверки данной гипотезы мы взяли средние значения кинетических параметров (см. табл. 3.1) и на их основе провели расчеты. На рис. 3.6 представлено сравнение экспериментальных и расчетных данных для аналогичных условий на рис. 3.5 со средней кинетикой: $E_{2s} = 38\,379$ Дж/моль, $k_{2s} = 0,88 \cdot 10^4 \text{ К}^{0,5} \cdot \text{с}^{-1}$.

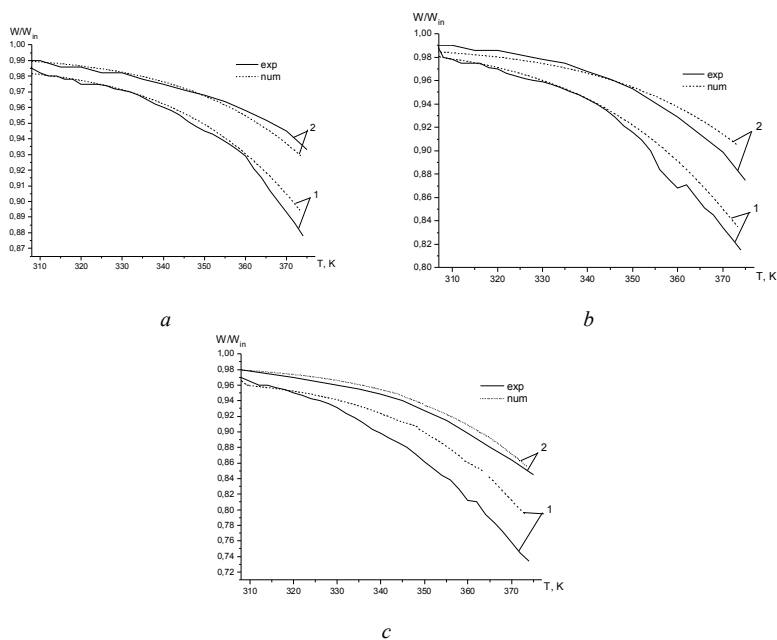


Рис. 3.7. Сравнение расчетных (пунктирные линии) и экспериментальных [166] (сплошные линии) зависимостей относительного влагосодержания для скоростей нагрева 20 (кривые 1) и 30 (кривые 2) К/мин для трех видов торфа: *a* – образец 1; *b* – образец 2; *c* – образец 3

Из рис. 3.6 видно, что численные результаты отличаются от тех, что получены с отдельной кинетикой для каждого типа торфа. При этом максимальная относительная погрешность численных значений, до выхода на стационар экспериментальной кривой, составляет около 11% для образцов 1 и 3 и 32% для образца 2. Видно, что до середины кривых сушки для всех трех типов торфа максимальная относительная погрешность численных значений не превышает 10%. При этом ранее делался вывод, что с отдельной кинетикой для каждого типа торфа прогноз не должен превышать одной недели. Таким образом, можно предположить, что использование осредненной кинетики допустимо для прогнозирования динамики влагосодержания слоя торфа только для прогноза не более 3 дней.

В случае динамической сушки моделировались условия испарения в термогравиметрическом анализаторе. Расчеты проводились для небольшого слоя торфа глубиной 0,01 м с предположением, что слой мгновенно прогревается при повышении температуры в соответствии со скоростью нагрева, т.е. температура на верхней и нижней границах одна и та же. Сравнение результатов вычисления с экспериментальными данными для глубины 0,005 м представлено на рис. 3.7.

Результаты сравнения показывают удовлетворительное совпадение данных для образцов торфа 1 и 2. Различие данных для образца 3 можно объяснить низкой степенью разложения – 10,5% (против 20 и 40% у образцов 1 и 2) и соответственно сильной его неоднородностью. Также видно, что с ростом температуры экспериментальные и численные данные начинают расходиться. Однако данный процесс начинается с 350 К для образцов 1 и 2 и с 330 К для образца 3.

Закключение. Проведенное математическое исследование показывает, что полученные численные результаты качественно и количественно согласуются с экспериментальными данными. Однако данная модель, как и любая другая, имеет ряд ограничений. В частности, для получения оптимальной точности максимальная температура сушки не должна превышать 330 К и время прогноза – одну неделю. В связи с тем что температура воздуха в бореальной зоне редко превышает 320 К, можно сделать вывод, что предложенная математическая постановка задачи (3.9)–(3.17) может быть использована для прогнозирования поведения влагосодержания и температуры в слое торфа для последующего прогноза пожарной опасности на торфяниках. Выдвинуто предположение о допустимости использования осредненной кинетики для прогнозирования динамики влагосодержания рассмотренных типов торфов.

3.3. Математическая модель расчета падающего солнечного излучения

Одним из основных факторов, влияющих на темпы сушки слоя РГМ (в частности торфа), является солнечное излучение. Данный параметр входит в модель сушки слоя торфа (3.9)–(3.17). В связи с тем что величина суммарного солнечного излучения, падающего на подстилающую поверхность, отсутствует в стандартном наборе метеоданных, измеряемых метеорологическими станциями, для вычисления их значений была использована полуэмпирическая модель [170]. Для расчета излучения в случае безоблачного неба она имеет вид

$$R_{clear}^{in} = \begin{cases} (a_g - a_w(z_s))S_{slope}So \cos \chi, & \cos \chi > 0, \\ 0, & \cos \chi \leq 0, \end{cases} \quad (3.18)$$

$$a_g = 0,485 = 0,515(1,014 - 0,16 / \sqrt{\cos \chi}), \quad (3.19)$$

$$a_w(\sigma) = 0,039 \left(\frac{r(\sigma)}{\cos \chi} \right)^{0,3}. \quad (3.20)$$

Здесь S_{slope} – косинус угла наклона подстилающей поверхности к горизонту; So – константа солнечного излучения, равная $1\,367 \text{ Вт/м}^2$; χ – зенитный угол Солнца; $r(\sigma)$ – количество водяного пара в интервале $[0, h]$, кг/м^2 ; z_T – верхняя граница атмосферного слоя, м; $\sigma = z_s$ – текущая высота, км.

$$r(\sigma) = \int_0^{z_T} r q d\sigma \cong \sum_1^{z_T} \frac{\rho_{i-1} q_{i-1} + \rho_i q_i}{2} h_i, \quad z_T = 11 \text{ км}, \quad (3.21)$$

где ρ_i – плотность воздуха, кг/м^3 ; q_i – масса водяного пара в единице массы влажного воздуха, кг/кг .

$$q_i = q_{vs},$$

$$q_{vs} = \frac{0,622 e_{vs}}{(p - 0,378 e_{vs})}, \quad (3.22)$$

$$e_{vs} = 610 \exp\left(\frac{\lambda}{R_v} \left(\frac{1}{273,15} - \frac{1}{T}\right)\right), \quad (3.23)$$

$$\lambda = \begin{cases} L_v & \text{при } T \geq 273,15, \\ L_s & \text{при } T < 273,15, \end{cases} \quad (3.24)$$

где e_{vs} – парциальное давление водяного пара, Па; p – давление воздуха, Па; T – температура воздуха, К; λ – скрытая теплота парообразования воды, Дж/кг; $L_v = 2,5 \times 10^6$ Дж/кг; $L_s = 2,83 \times 10^6$ Дж/кг; $R_v = 461,5$ Дж/кгК.

Количество водяного пара рассчитывалось до высоты 11 км. При этом на высоте от 0 до 4 км использовалась формула (3.21). Для определения концентрации водяного пара на интервале 4–11 км было использовано уравнение

$$r(\sigma)_h = r(\sigma)_0 \exp(\beta(h - h_0)), \quad (3.25)$$

где h , h_0 – значения высоты на верхней и нижней границе слоя, км; $r(\sigma)_h$ и $r(\sigma)_0$ – соответствующие значения концентрации водяного пара, кг/м²; β – эмпирический параметр [171], км⁻¹. Значения β , соответствующие умеренным широтам на период торфяной пожарной опасности? приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Значения β

Слой, км	β , км ⁻¹
0–4	–0,3207
4–8	–0,5331
8–11	–1,1396

Для определения значений температуры, плотности и давления на высоте h от нижней границы слоя использовались уравнения

$$T_h = T_0 - 6,5^\circ h, \quad (3.26)$$

$$\rho_h = \rho_0^* \exp\left(-\frac{\rho_0 g h}{P_0}\right), \quad (3.27)$$

$$P_h = \frac{P_0^* \rho_h}{\rho_0}, \quad (3.28)$$

где h – высота слоя, км; g – ускорение свободного падения, м/с²; индексы 0 и h соответствуют нижней и верхней границе слоя соответственно.

Значения, полученные с помощью формул (3.26)–(3.28), использовались как значения на $i+1$ -шаге при решении уравнения (3.21) внутри слоя 0–4 км.

В соответствии с [171] величина солнечного излучения с учетом облачности определяется по формуле

$$R_{cloud}^{in} = R_{clear}^{in} (1 - (a + bn)n), \quad (3.29)$$

где R_{clear}^{in} – поток суммарной радиации при безоблачном небе; n – количество облачности (в долях единицы); a и b – эмпирические коэффициенты, при этом b можно считать примерно постоянным (равным 0,38); коэффициент a зависит от широты (табл. 3.3).

Таблица 3.3

Значение эмпирического коэффициента a в зависимости от широты

Коэффициент	Широта, град.								
	0	10	20	30	40	50	60	70	80
a	0,65	0,66	0,67	0,68	0,67	0,64	0,60	0,50	0,45

Согласно [171] относительная ошибка расчета с использованием формулы (3.29) не превышает 8–10%.

Значения зенитного угла χ рассчитывались по формуле

$$\cos \chi = \sin(\varphi) \sin(d) + \cos(d) \cos(t), \quad (3.30)$$

где φ – широта; d – склонение; t – часовой угол. При этом часовой угол определяется по формуле

$$t = s - a, \quad (3.31)$$

где s – звёздное время; a – прямое восхождение.

Пример данных, использованных при расчете солнечного излучения, приведен в табл. 3.4. Временной шаг обновления метеоданных составлял 6 ч. Так как было необходимо определить значения излучения на каждый час в рамках временного периода, соответствующего пожароопасному сезону, значения метеоданных были линейно интерполированы для каждого часа.

На рис. 3.8 приведено сравнение полученных значений с измеренными значениями суммарного солнечного излучения с учетом облачности для г. Томска, предоставленные ИОА СО РАН.

Из графиков видно, что результаты численного моделирования хорошо согласуются (с коэффициентом корреляции $R = 0,89$) с фактическими значениями излучения. Стоит отметить, что относительная погрешность вычисления не превышает 14%. Кроме того, модель дает в среднем завышенные значения относительно реальных значений излучения, что приемлемо для расчета пожарной опасности.

Таблица 3.4

Входные данные

День	Месяц	Час	Точка росы, °C	Температура воздуха, °C	Атмосферное давление, мбар	Атмосферная влажность, %	Облачность	Зенитный угол, град.
3	5	14	4,18	13,7	997,37	53,67	6	41,04
3	5	15	3,46	12	997,26	57	7	44,74
3	5	16	2,74	10,3	997,15	60,33	8	50,70
3	5	17	2,02	8,7	997,05	63,67	9	58,08
3	5	18	1,3	7	996,94	67	10	66,21
3	5	19	1,08	6,5	996,58	68,33	10	74,57
3	5	20	0,86	6	996,22	69,67	10	82,76

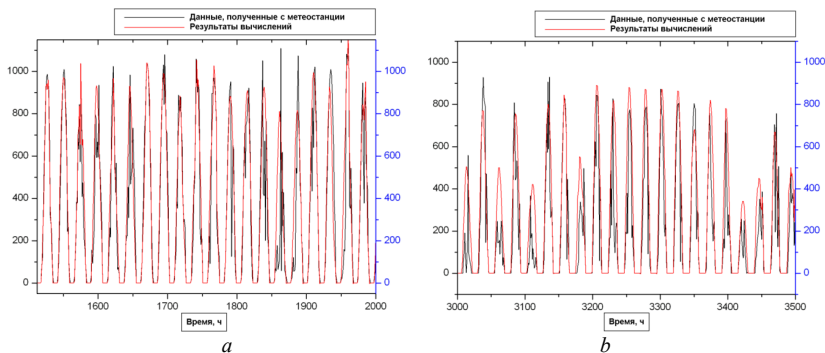


Рис. 3.8. Сравнение значений излучения с метеостанции с результатами численного эксперимента. *a* – период 2.06.2004 г. – 22.06.2004 г.;
b – период 4.08.2004 г. – 24.08.2004 г.

Результаты расчетов позволяют сделать предположение, что данная методика расчета солнечного излучения с учетом облачности может быть использована при моделировании торфяной и лесной пожарной опасности.

3.4. Тестирование новой системы прогноза пожарной опасности на торфяниках с помощью ретроспективного анализа с использованием статистических данных о месте и времени пожара

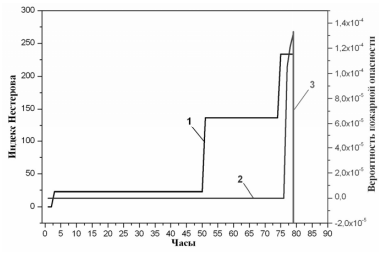
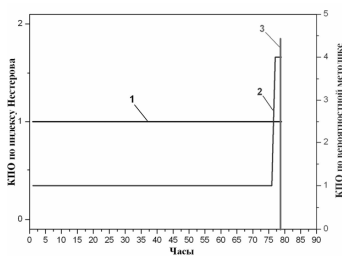
Для ретроспективной проверки методики были использованы метеорологические данные, которые были взяты с веб-ресурса (http://meteo.infospace.ru/win/wcarch/html/r_day_stn.sht?num=1040). Кроме этого, использовались статистические данные о месте и времени возникновения торфяных пожаров в Бакcharском районе Томской области за период 1989–2012 гг., а также база теплофизических постоянных типов торфа (прил. 4). Вычислялись значения склонения, прямого восхождения и зенитного угла Солнца для территории Бакcharского района Томской области. При этом использовались уравнения (3.18)–(3.31) при расчете суммарного солнечного излучения. Значения излучения рассчитывались для пожароопасного сезона, а именно с апреля по октябрь каждого года.

В качестве начала интервала сушки слоя торфа были выбраны дни, следующие за выпадением осадков величиной, превышающей 3 мм. Окончанием моделирования были выбраны дни, в которые были установлены факты торфяных пожаров. Для прогноза торфяной пожарной опасности использовали разработанную модель (3.9)–(3.17). Сушка верхнего слоя торфа моделировалась глубиной 0,1 м, так как обычно загорается именно верхний слой. При этом величина критического влагосодержания была принята равной 0,3 в соответствии с [172, 173].

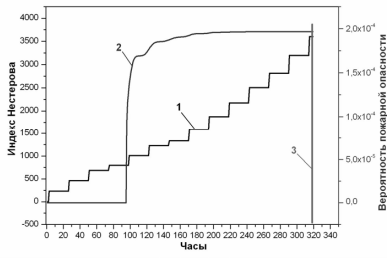
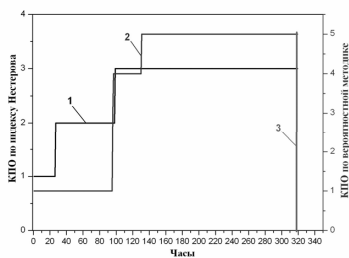
Для проверки полученных результатов результаты расчетов вероятности возникновения торфяных пожаров сравнивались с классами пожарной опасности (КПО), которые используются на практике [11] и рассчитываются при тех же самых условиях, определяемыми по комплексному показателю В.Г. Нестерова: I КПО – при показателе менее 300 единиц, II КПО – от 301 до 1 000, III КПО от 1 001 до 3 000, IV КПО – от 3 001 до 10 000, V КПО – от 10 001 до 30 000, VI КПО – более 30 000 единиц.

Классы пожарной опасности предлагаемой методики определялись аналогично классам лесной пожарной опасности, по формуле (2.43).

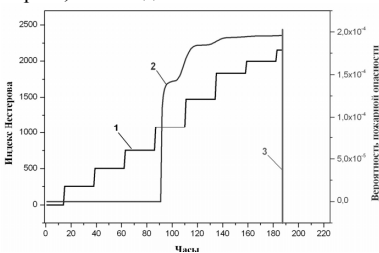
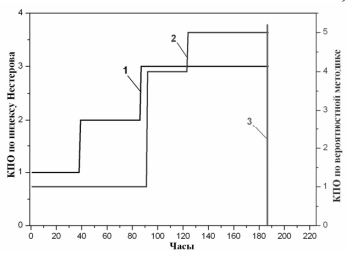
Для доказательства достоверности предлагаемой детерминированно-вероятностной методики проведен ретроспективный анализ торфяных пожаров в Бакcharском лесничестве с учетом конкретных метеоусловий и антропогенной нагрузки на леса с 1989 по 2012 г. На рис. 3.9 представлено сравнение изменения индекса Нестерова и вероятности пожарной опасности для четырех случаев пожаров на торфяниках на временных интервалах от времени последнего выпадения осадков до момента возникновения пожара.



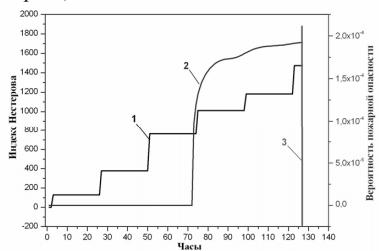
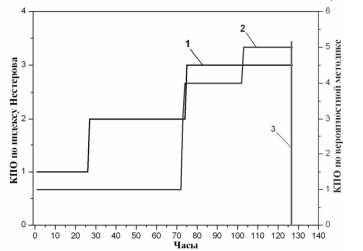
a – 02.05.2001 г., 77-й квартал



b – 21.08.2003 г., 87-й квартал, 71-й выдел



c – 1.09.2003 г., 182-й квартал, 13-й выдел



d – 7.09.2003 г., 143-й квартал, 11-й выдел

Рис. 3.9. Сравнение индекса Нестерова и значений вероятности возникновения торфяного пожара, а также КПО, рассчитанных по двум методикам для Бакчарского лесничества:
1 – методика Нестерова; 2 – детерминированно-вероятностная методика;
3 – обнаруженный пожар

Из анализа кривых на рис. 3.9 видно, что в некоторые дни пожаро-опасного сезона вероятность пожарной опасности равна нулю, в то время как индекс Нестерова показывает некоторый класс пожарной опасности. Это связано с учетом изменения влагосодержания напочвенного покрова. Как известно, влажные горючие материалы не воспламеняются даже при условии, что существует источник загорания. В эти дни текущее значение влагосодержания торфа было больше критического и вероятность возникновения пожара равна нулю. И, соответственно, имеем нулевой класс пожарной опасности.

Из анализа рис. 3.9 следует, что прогноз по детерминированно-вероятностной методике дает более высокий КПО с приближением ко дню обнаружения пожара, в то время как индекс, полученный по методике Нестерова, растет равномерно с начала расчета и показывает меньшее значение на день обнаружения пожара. Этот результат свидетельствует о том, что новая методика прогноза торфяной пожарной опасности более точно указывает на день возникновения пожара.

Анализируя кривые на рис. 3.9, можно сделать вывод, что результаты, полученные на основе новой детерминированно-вероятностной методики прогноза торфяной пожарной опасности, качественно и количественно согласуются со статистическими данными по горимости торфяников в Бакcharском лесничестве.

Новую систему прогноза торфяной пожарной опасности рекомендует-ся использовать для получения оперативного прогноза (на шесть часов), дневного прогноза (по утренним данным), краткосрочного прогноза (на неделю), сезонного прогноза (на месяц).

3.5. Выводы

В результате проделанной работы в данной главе были получены следующие результаты и сделаны выводы:

1. Разработана физически обоснованная детерминированно-вероятностная система прогноза пожаров на торфяниках, учитывающая все известные причины, вызывающие возникновение торфяных пожаров, а также метеорологическую информацию и характеристики напочвенного покрова.

2. Разработана однотемпературная математическая модель сушки слоя торфа, состоящего из сухого органического вещества, свободной и связанной воды, газовой фазы. Проведенное математическое исследование показывает, что полученные численные результаты качественно и коли-

чественно согласуются с экспериментальными данными. Сделан вывод, что предложенная математическая модель может быть использована для прогнозирования поведения влагосодержания и температуры в слое торфа для последующего прогноза пожарной опасности на торфяниках.

3. Выдвинуто предположение о допустимости использования осредненной кинетики для прогнозирования динамики влагосодержания рассмотренных типов торфов.

4. Предложена полуэмпирическая модель для расчета величины суммарного солнечного излучения, падающего на подстилающую поверхность, для облачного неба. Анализ данных показал, что результаты численного моделирования хорошо согласуются с фактическими значениями излучения и данная методика расчета солнечного излучения с учетом облачности может быть использована при моделировании торфяной и лесной пожарной опасности.

5. Проведена ретроспективная проверка методики прогноза торфяной пожарной опасности с использованием реальных метеорологических данных, статистических данных о месте и времени возникновения торфяных пожаров в Бакcharском районе Томской области, базы теплофизических постоянных типов торфа за период с 1989 по 2012 г. Полученные результаты свидетельствуют о том, что новая методика прогноза торфяной пожарной опасности более точно указывает на день возникновения пожара.

ГЛАВА 4. КИНЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ СУШКИ ПРИРОДНЫХ ГОРЮЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Известно, что лес представляет собой многоярусную многофазную реагирующую среду [117], степь является одноярусной реагирующей средой [174], а торф – пористое реагирующее твердое тело [123]. Математическое моделирование возникновения и распространения лесных и степных пожаров в настоящее время сдерживается отсутствием полноценных информационных баз данных о параметрах математических моделей [117, 174], усложнение которых идет в направлении все более полного и детального учета структуры и многообразия физико-химических превращений, использования сопряженных, двух- и трехмерных постановок задач. В этих условиях существенно возрастает роль обратных задач [175] как методологической основы создания информационных баз данных для математических моделей лесных и степных пожаров. Круг обратных задач механики реагирующих сред достаточно широк и многообразен ввиду широты и многообразия математических постановок прямых задач механики реагирующих сред. Кроме того, каждая прямая задача механики реагирующих сред в пределах принятой структуры математической модели может быть сопоставлена с некоторой обратной задачей. В известной классификации обратных задач механики реагирующих сред [175] важное место занимают обратные задачи химической кинетики. В отличие от прямых задач химической кинетики обратные задачи химической кинетики по определению термокинетических постоянных (ТКП) гетерогенных и гомогенных химических реакций являются некорректно поставленными задачами [176], что требует для их решения применения специальных регуляризирующих методов. В частности для прогноза природной пожарной опасности необходимо знание ТКП процессов сушки и пиролиза растительных горючих материалов.

4.1. Математическая постановка и метод решения ОКЗ

Изучение процесса сушки горючих материалов имеет большое теоретическое и практическое значение. Считается, что вода может быть свя-

зана с материалом химически, физико-химически и физико-механически. При этом наибольшей энергией связи обладает химически связанная вода, которая при сушке не удаляется. В работе [117] на основе анализа характерных времен многостадийного процесса испарения показано, что для лесных горючих материалов (ЛГМ) (хвоинок и тонких веточек) выполняются неравенства

$$t_{ev} > t_t, t_{ev} > t_f, t_{ev} > t_d, t_{ev} > t_e, \quad (4.1)$$

где t_{ev} – характерное время испарения, с; t_t – характерное время тепловой релаксации, с; t_f – характерное время фильтрации влаги, с; t_d – характерное время тепловлагоденоса вследствие диффузионного переноса пара, с; t_e – характерное время процессов переноса в пограничном слое у границы раздела газовой и конденсированной фаз, с. На основании этого утверждается, что стадией, лимитирующей испарение воды из ЛГМ, является десорбция. Для ее математического описания используется аналог формулы, выражающей закон Герца–Кнудсена [177]:

$$(\rho v)_w = \frac{AM(P_* - P)}{\sqrt{2\pi MRT}}, \quad P_* = P_0 \exp\left(-\frac{L_1}{RT}\right). \quad (4.2)$$

Здесь $(\rho v)_w$ – массовая скорость испарения с единицы поверхности, кг/(м²·с); P_* – давление насыщенного пара, Па; P – парциальное давление пара во внешней среде, Па; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); M – молекулярный вес воды, кг/моль; T – абсолютная температура, К; A – безразмерный постоянный множитель, P_0 – постоянный множитель (Па); L_1 – теплота испарения воды, Дж/моль.

Используя формально-кинетический подход, скорость испарения воды из некоторого фиксированного элемента ЛГМ с массой m_1 можно описать следующей математической моделью:

$$\frac{dm_1}{dt} = -\frac{k_1 P_* (m_1 - m_{1\infty})(1 - \varphi)}{\sqrt{T}}, \quad (4.3)$$

$$m_1|_{t=t_{in}} = m_{1in}, \quad (4.4)$$

где t – время, с; $\varphi = P/P_*$ – относительная влажность воздуха; k_1 – предэкспоненциальный множитель, $K^{0,5}/(\text{Па} \cdot \text{с})$. Иногда математическую

модель (4.3), (4.4) записывают через влагосодержание $W_1(t) = \Delta m_1 / m_{1dr}$, $\Delta m_1 = m_1 - m_{1dr}$. Здесь индексы: *in* – начальный, *dr* – сухой, ∞ – равновесное состояние, 1 – испарение.

Нахождение массы или влагосодержания образца по известным начальному условию и параметрам модели составляет цель прямых кинетических задач (ПКЗ). Цель обратных кинетических задач (ОКЗ) состоит в определении термокинетических постоянных $k_1 P_0$, L_1 по известным начальному условию, остальным параметрам модели и массе или влагосодержанию образца. Решение ОКЗ в отличие от ПКЗ представляет определенные математические трудности вследствие ее некорректности. Некорректность проявляется, как правило, в отсутствие устойчивости либо единственности решения при одновременном определении двух и более термокинетических параметров. Поэтому актуальной задачей является разработка численного алгоритма, позволяющего получить устойчивое решение ОКЗ с приемлемой для практики точностью.

Будем определять искомые термокинетические постоянные из условия согласования экспериментальных и расчетных (по математической модели (4.3), (4.4)) значений массы образца исследуемого материала для различных моментов времени [102]. Для определения термокинетических постоянных процесса сушки образец из исследуемого материала выдерживается при различных температурах стабилизации T_s до равновесного состояния, при котором его масса перестает изменяться ($m_1 = m_{1\infty}$). При этом одна и та же температура стабилизации может достигаться при различных относительных влажностях окружающего воздуха ϕ .

Аналитическое решение задачи (4.3), (4.4) имеет вид

$$\ln \frac{m_{1in} - m_{1\infty}}{m_1 - m_{1\infty}} = \frac{k_1 P_0 \exp(-\frac{L_1}{RT})(1 - \phi)t}{\sqrt{T}}. \quad (4.5)$$

В дальнейшем для простоты изложения метода нижний индекс «1», характеризующий процесс сушки, опускается. Искомые термокинетические постоянные kP_0 и L определяются из условия минимума функционала

$$I(B, L) = \int_{t_{in}}^{t_{fin}} \sum_{i=1}^N (F_1^i - B \exp(-\frac{L}{RT_{si}}) F_2^i)^2 dt, \quad (4.6)$$

представляющего среднеквадратичное отклонение невязки уравнения (4.5) на рассматриваемом временном интервале $[t_{in}, t_{fin}]$, при подстановке

в него экспериментальных зависимостей $m_i^{\text{exp}}(t)$, полученных для i температур стабилизации T_{si} ($i = \overline{1, N}$), где

$$F_1^i(m_i, m_{ini}, m_{\infty i}) = \ln \frac{m_{ini} - m_{\infty i}}{m_i - m_{\infty i}}; \quad F_2^i(m_i, m_{\infty i}, \varphi_i, T_{si}, t) = \frac{(1 - \varphi_i)t}{\sqrt{T_{si}}}, \quad B = kP_0.$$

Удовлетворяя функцию $I(B, L)$ необходимым условиям экстремума

$$\partial I / \partial B = 0, \quad \partial I / \partial L = 0, \quad (4.7)$$

для определения предэкспоненциального множителя B получим алгебраическое соотношение

$$B = \sum_{i=1}^N \exp\left(-\frac{L}{RT_{si}}\right) \int_{t_{in}}^{t_{fin}} F_1^i F_2^i dt / \left[\sum_{i=1}^N \exp\left(-\frac{2L}{RT_{si}}\right) \int_{t_{in}}^{t_{fin}} (F_2^i)^2 dt \right], \quad (4.8)$$

а для определения теплоты испарения моля связанной с веществом воды L – трансцендентное уравнение

$$\sum_{i=1}^N T_{si}^{-1} \exp\left(-\frac{L}{RT_{si}}\right) \int_{t_{in}}^{t_{fin}} F_1^i F_2^i dt - B \sum_{i=1}^N T_{si}^{-1} \exp\left(-\frac{2L}{RT_{si}}\right) \int_{t_{in}}^{t_{fin}} (F_2^i)^2 dt = 0. \quad (4.9)$$

Интегралы в (4.8), (4.9) вычисляются по формуле Симпсона, а трансцендентное уравнение (4.9) ввиду немонотонной зависимости $I(L)$ целесообразно решать методом деления отрезка пополам. Для интерполяции и аппроксимации расчетных и экспериментальных данных используются интерполирующие и аппроксимирующие кубические сплайны. При необходимости заданные с ошибкой экспериментальные зависимости $m_i^{\text{exp}}(t)$ сглаживаются с помощью эффективного метода регуляризации А.Н. Тихонова. Оценка устойчивости предлагаемого алгоритма, а также единственности и точности найденного решения осуществляется путем сравнения расчетных $m_i(t)$ и возмущенных экспериментальных $m_i^{\text{exp}}(t)$ зависимостей массы образца от времени. При этом расчетные зависимости $m_i(t)$ определяются по соотношению (4.5) с найденными из решения ОКЗ термокинетическими постоянными B, L .

Анализ предлагаемого метода показывает, что для получения единственного решения рассматриваемой ОКЗ необходимо использовать как минимум две температуры стабилизации.

Апробация метода на модельной и реальной задачах была проведена в работе [102], где показано, что данный метод является устойчивым, а погрешность определения ТКП пропорциональна погрешности исходных экспериментальных данных. Используя экспериментальные данные В.И. Жуковской [147], определены ТКП двухстадийных последовательных реакций сушки ЛГМ: лишайника, мха Шребера, опада хвои и опада Вейника.

4.2. Решение обратных задач аэротермохимии для определения термокинетических постоянных сушки степных горючих материалов

Вопросы физико-математического моделирования степных (травяных и кустарниковых) пожаров исследованы не так широко, как лесных, из-за недостатка надежных данных о теплофизических и термокинетических коэффициентах степных горючих материалов. Однако опасность они представляют не меньшую, так как дикие степи, сельскохозяйственные поля, кустарниковые заросли не редко имеют еще большую воспламеняемость и скорость распространения пожара по ним выше, чем при лесных пожарах.

4.2.1. Экспериментальные методики и результаты исследования процесса сушки СГМ

Для исследования процесса сушки были взяты СГМ, собранные в результате экспедиции с 5 по 7 мая 2010 г в районе г. Карасук Новосибирской области [178]. Растительность в этом районе является характерной для степей и южных лесостепей (рис. 4.1, *a*), представляющая собой злаково-полынную залежь, на которой четко выделяется 3 яруса (рис. 4.1, *b*): 1 – ярус злаков (прошлогодние побеги злаков, значительно реже прошлогодние цветonoсы полыней); 2 – ярус полыни (прошлогодние вегетативные части полыни австрийской); 3 – ярус типчака (куртины типчака, проростки злаков и других трав).

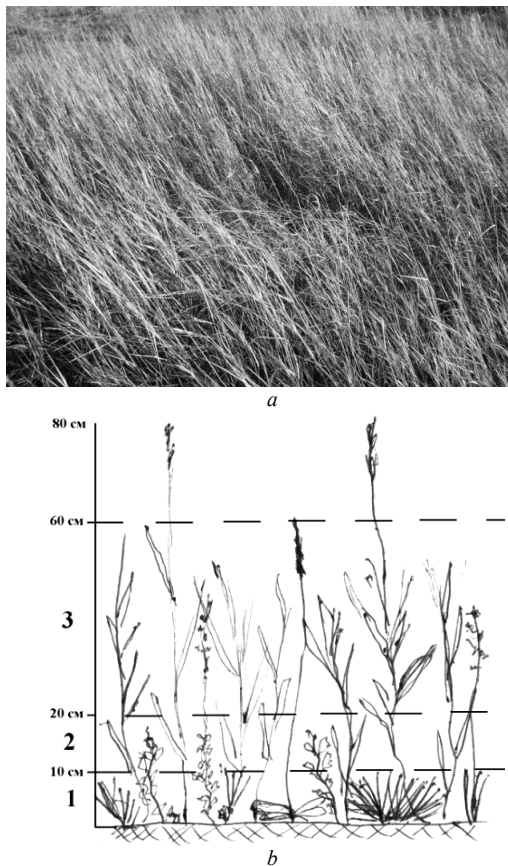


Рис. 4.1. Экспериментальная площадка: *a* – общий вид, *b* – ярусы типичной растительности

Общее проективное покрытие⁷ составило 15–20%. Биомассу на площадке определяли следующим образом. Срезали всю растительность с трех участков 1×1 м, далее разбирали по видам и определяли процентное соотношение от общей биомассы. Виды произрастающих растений, их биомасса и покрытие приведены в табл. 4.1.

⁷ Проективное покрытие – показатель, определяющий относительную площадь проекции отдельных видов или их групп, ярусов и т.д. на поверхность почвы. Различают общее проективное покрытие (покрытие всего яруса) и частное проективное покрытие (покрытие отдельных видов) [178].

Таблица 4.1

**Проективное покрытие и процентное соотношение биомассы доминантов
и со-доминантов к общему проективному покрытию**

Вид растения	Высота, см	Покрытие, %	Биомасса, %
<i>Elytrigia repens</i> (пырей ползучий)	60–80	40–50	75–95
<i>Artemisia austriaca</i> (полынь австрийская)	40–65	30–50	4–25
<i>Festuca ovina</i> (типчаك или овсяница овечья)	5–20	5–10	2–5
Остальные	до 20	1–5	1–2

Влагосодержание доминирующих растений *W* составило: пырей ползучий (образец 1) – 11%, полынь австрийская (образец 2) – 44%, типчак (образец 3) – 26,8%. Данные растения составляют основную часть биомассы, поэтому они были выбраны в качестве исследуемых образцов для определения термокинетических постоянных процесса сушки.

Экспериментальные исследования процесса сушки СГМ проводились в изотермических условиях при температурах 50, 80 и 100°C с помощью анализатора влажности МХ-50 фирмы А&D [179]. Сушка образцов осуществлялась в результате их нагрева галогеновой лампой в анализаторе влажности. Температура в анализаторе влажности достигала 100°C в течение 20 с. Регистрируемая температура соответствовала температуре на чашке, т.е. в нашем случае температуре поверхности образца. Дрейф температуры образца, в процессе испарения влаги, анализатор выравнивал автоматически до уровня заданной. Сушка образцов продолжалась до полного испарения влаги. Анализатор влажности имел встроенные весы, что давало возможность автоматически с заданной точностью достигать абсолютно сухого состояния образцов.

Начальная масса образцов составляла 1 г. Перед загрузкой образцов в анализатор влажности они предварительно нарезались на части размером 3–4 см. Для каждой температуры осуществлялось от 3 до 5 опытов, а затем полученные значения масс усреднялись. Далее рассчитывались доверительные интервалы δ с уровнем значимости 0,05. Погрешность измерения массы образцов составила $\pm 0,01$ г, а влагосодержания $\pm 0,01\%$.

4.2.2. Результаты определения термокинетических постоянных процесса сушки СГМ

В результате исследования процесса сушки при температурах 50, 80 и 100°C для каждого образца растительности были получены экспериментальные зависимости относительной массы образцов от времени (рис. 4.2).

Из анализа рис. 4.2 видно, что с увеличением температуры стабилизации скорость сушки растет, а убыль массы образцов варьируется значительно и составляет от 10% (пырей ползучий) до 50% (полынь австрийская), что согласуется с данными работы [180].

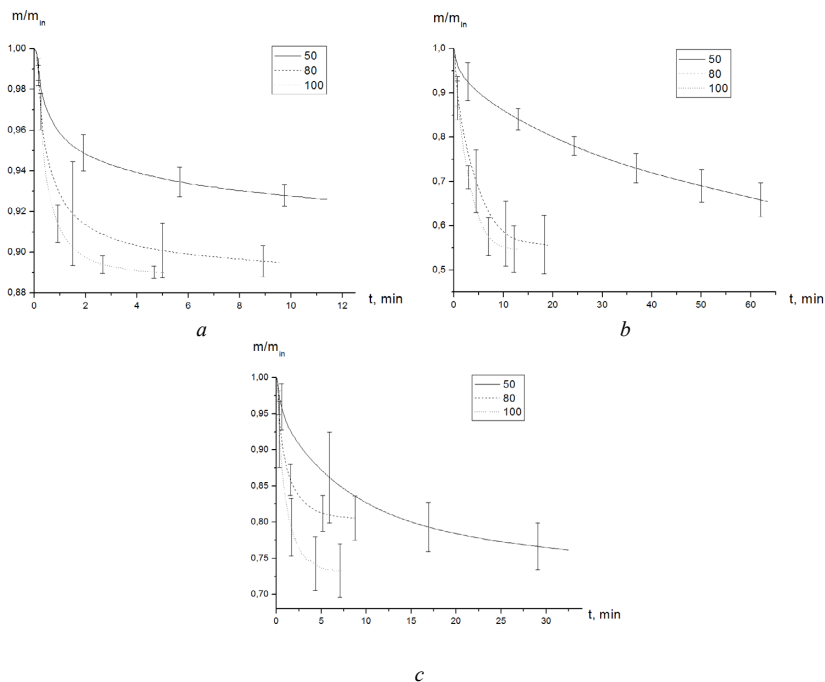


Рис. 4.2. Зависимость относительной массы образцов 1 (a), 2 (b) и 3 (c) СГМ для различных температур сушки

На рис. 4.3 показано влияние вида СГМ на процесс сушки при различных температурах стабилизации.

Из рис. 4.3 видно, что для всех трех видов СГМ кривые сушки при температурах стабилизации 50, 80 и 100 °C отличаются очень значительно. Можно сделать вывод, что процесс сушки носит сложный характер и существенно зависит от характеристик СГМ (влажность, строение и т.д.).

В результате обработки экспериментальных данных по описанной выше методике были получены значения термокинетических постоянных процесса сушки, представленные в табл. 4.2.

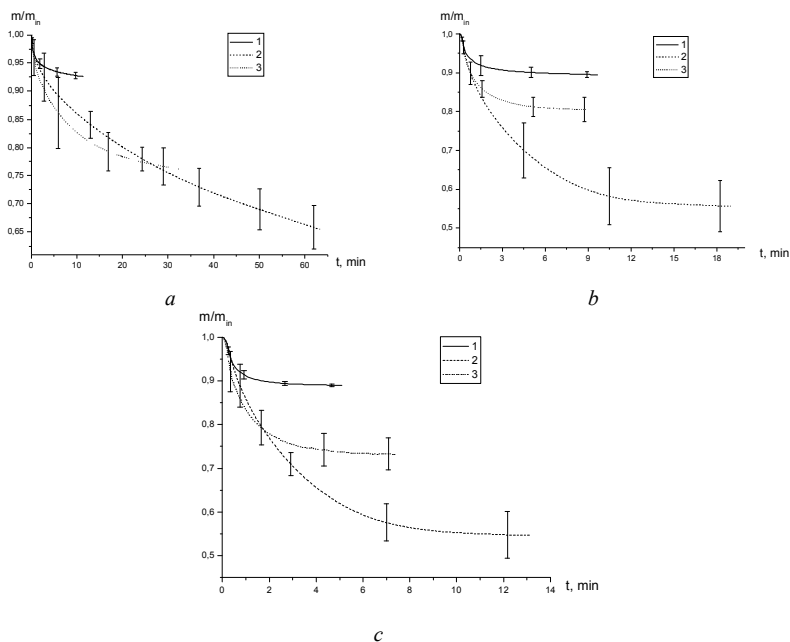


Рис. 4.3. Сравнение относительных масс трех различных образцов СГМ при температурах сушки 50 (а), 80 (б) и 100 (с) °С

Таблица 4.2

Термокинетические постоянные процесса сушки трех образцов СГМ

№ образца	L , Дж/моль	B , $K^{0.5} \cdot c^{-1}$
1	4970,8	$0,305 \cdot 10$
2	16557,8	$0,770 \cdot 10^2$
3	16870,1	$0,190 \cdot 10^3$

Из табл. 4.2 видно, что термокинетические постоянные процесса сушки образцов 2 и 3 СГМ имеют близкие значения и существенно отличаются от образца 1. Это можно объяснить различием во внутреннем и внешнем строении образцов. Так, образец 1 (*Elytrigia repens*) относится к экогруппе мезофитов⁸, а образцы 2 и 3 (*Artemisia austriaca* и *Festuca*

⁸ Мезофиты – наземные растения, которые приспособлены к обитанию в среде с более или менее достаточным, но не избыточным увлажнением почвы [181].

ovina) к экогруппе ксерофитов⁹. Согласно [181] образец 1 имеет относительно большой объем (размеры) и значительную листовую поверхность. Величина устьечных клеток у данного вида примерно в два раза больше, чем у ксерофитов типа *Artemisia austriaca* и *Festuca ovina*, что повышает интенсивность испарения. Образец 2, наоборот, обильно снабжен эфирномасличными железами, которые, испаряясь в воздухе, повышают его давление у поверхности листа, что вызывает снижение интенсивности испарения [181]. Кроме того, данный вид имеет обильное развитие эпидермальных волосков, которые, сплетаясь друг с другом, образуют подобие войлока, покрывающего листья, стебли. Такое густое войлочное опушение играет огромную роль в водном обмене растения. Прежде всего, опушение имеет серебристо-белый цвет, хорошо отражает солнечные лучи и тем самым предохраняет растение от перегрева. Кроме того, в нем накапливаются испаряющиеся водяные пары, создающие у поверхности листа повышенную влажность воздуха, что также ведет к снижению интенсивности испарения. Таким образом, густое опушение защищает растение от чрезмерной потери влаги.

Образец 3 также имеет ряд защитных механизмов [181], например узкие бороздчатые листья в виде щетинки (трубочки). Благодаря этому а) такие листья образуют небольшую испаряющую поверхность, б) устьица располагаются в бороздках или во внутренней части трубки свернутой листовой пластинки, где создается повышенная влажность воздуха, снижающая интенсивность испарения. Все это способствует затрудненному испарению воды. Кроме того, ксерофиты имеют высокое осмотическое давление клеточного сока (80–100 атм), что обеспечивает значительную сосущую силу. Характерна также засухоустойчивость протоплазмы, которая обладает большой вязкостью и эластичностью, значительно затрудняющими высыхание, что делает растение жизнеспособным даже при потере воды до 98%. Все эти приспособления ксерофитов (образцы 2 и 3) препятствуют испарению влаги и повышают теплоту испарения воды более чем в 3 раза в отличие от мезофита (образец 1).

Наблюдается отличие найденных термокинетических постоянных от опубликованных в литературе. Так, в работе [182] энергия активации составила 19 860 Дж/моль·К для ромашки крупной, в [183] – 26 760 Дж/моль·К для люцерны, в [184] – 34 727 Дж/моль для мании, в [117] –

⁹ Ксерофитами называют растения засушливых местообитаний. В процессе длительной эволюции у них выработались разнообразные приспособления, позволяющие ксерофитам жить в условиях малого содержания воды в почве, которое обычно сочетается с высокими температурами и низкой влажностью воздуха [181].

44 465 Дж/моль для вейника. Однако в этих работах приводятся энергии активации для других классов растений. Отличие в данных также объясняется расхождением условий проведения экспериментов и используемых математических моделей. Например, в работах [182–184] сушка осуществлялась при более низких температурах (30–60°C), что привело к повышению энергии активации, а в работе [117] используемая математическая модель сушки не учитывала влияния степенной зависимости от температуры. Известно, что вид математической модели при использовании формальной кинетики очень сильно влияет на величину получаемой энергии активации и может приводить к различию данных на порядок и более [185].

Для оценки точности полученных значений термокинетических постоянных были решены прямые задачи химической кинетики с использованием математической модели (4.3) и (4.4) на основе полученных термокинетических постоянных L и B . Полученные расчетные зависимости относительной массы образцов от времени сравнивались с экспериментальными (рис. 4.4).

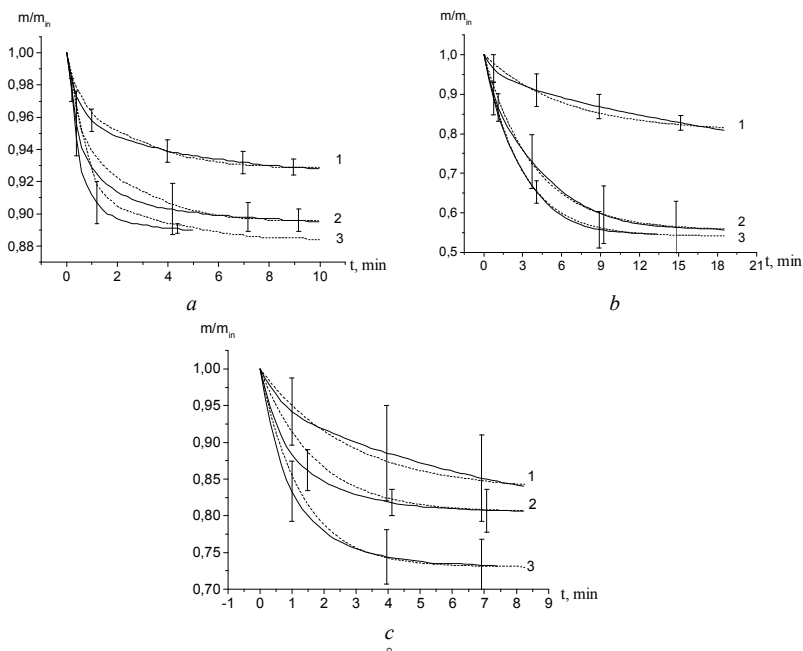


Рис. 4.4. Экспериментальные (сплошные линии) и расчетные (штриховые линии) зависимости убыли относительной массы образцов СГМ от времени, полученные при температурах сушки: 1 – 50°C, 2 – 80°C и 3 – 100°C: а – образец 1; б – образец 2; с – образец 3

Из рис. 4.4 следует удовлетворительное согласование расчетных и экспериментальных зависимостей, что говорит о достоверности полученных термокинетических постоянных.

На основе полученных экспериментальных данных с помощью разработанной методики решения обратных задач химической кинетики определены термокинетические постоянные процессов сушки различных образцов СГМ.

Анализируя изменение относительных масс образцов 1–3 и их термокинетические постоянные, можно предположить, что внутреннее и внешнее строение рассмотренных СГМ является доминирующим параметром, влияющим на процессы испарения.

Для исследуемого типа местности образец 1 имеет преобладающую биомассу и минимальное влагосодержание, что позволяет считать его основным проводником горения. Таким образом, математическое моделирование процессов сушки СГМ с целью прогноза пожарной опасности на данной местности по методике [19] целесообразно рассчитывать для основного проводника горения и использовать термокинетические постоянные образца 1.

4.3. Кинетические исследования процессов сушки торфа

4.3.1. Методики проведения экспериментов и подготовки образцов

Для исследования процессов сушки были взяты торфяная залежь верхового типа, собранная в районе г. Эдинбург (Шотландия), – образец 1 (рис. 4.5, *a*), торфяная залежь верхового типа – образец 2 (рис. 4.5, *b*) и торфяная залежь переходного типа – образец 3 (рис. 4.5, *c*), собранные в районе Томской области [167].

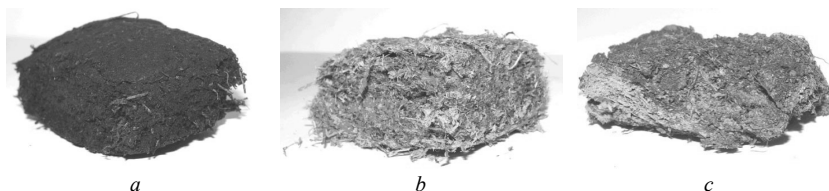


Рис. 4.5. Исследуемые образцы: *a* – образец 1; *b* – образец 2; *c* – образец 3

Для исследования влияния масштаба образцов, а также их свойств на кинетику процесса сушки были проведены эксперименты в динамиче-

ских и изотермических условиях. Экспериментальные исследования процесса сушки торфа проводились в изотермических условиях при температурах 50, 80 и 100°C для макромасштаба (несколько грамм). Динамические эксперименты процесса сушки проводились в диапазоне 27–223°C для микромасштаба (несколько миллиграмм) [166].

Динамические эксперименты были проведены на термогравиметрическом анализаторе Perkin–Elmer TGA Pyris 1 для микро масштаба. Изотермическая сушка образцов торфа осуществлялась с помощью измерителя влажности MX-50 фирмы A&D. В опытах при исследовании процесса сушки, образцы торфа представляли собой параллелепипеды шириной 0,03 м, длиной 0,03 м и высотой 0,015 м. Температура в измерителе влажности достигала 150°C в течение 30 с. Сушка образцов продолжалась до полного испарения влаги. Измеритель влажности имел встроенные весы, что давало возможность автоматически с заданной точностью достигать абсолютно сухого состояния образцов.

Масса образцов, используемых для исследования процесса сушки, составляла $5 \pm 0,02$ г (сухой образец) для измерителя влажности и $5 \pm 0,005$ г для термогравиметрического анализатора. Для каждой температуры осуществлялось от 3 до 10 опытов, а затем полученные значения масс осреднялись. Определялись доверительные интервалы δ с уровнем значимости 0,05.

Кроме того, для исследуемых образцов определялись их ботанический состав и степень разложения [186]. Ботанический состав определялся при помощи микроскопа по количественному соотношению в процентах остатков растений-торфообразователей, слагающих растительное волокно в пробе, освобожденной от гумуса. По ботаническому составу при помощи «ключей» определялись тип, группа и вид торфа. Сущность метода нахождения степени разложения образцов торфа заключалась в определении в процентах отношения площади, занятой бесструктурной частью, ко всей площади, занятой бесструктурной частью и растительными остатками, за которые принимались ткани, сохранившие клеточную структуру. Степень разложения находилась в результате исследования тонкого разжиженного слоя торфа на предметном стекле через микроскоп с увеличением 56–140^x.

Зольность¹⁰ образцов находилась в соответствии с ГОСТом 11306-83 [187]. В результате для образцов 1–3 были получены значения зольности

¹⁰ Зольность – это отношение в процентах массы золы к массе исходного абсолютно сухого вещества.

1,83, 7,65 и 3,25% соответственно. Плотность образцов составила 815 кг/м³ (образец 1), 282 кг/м³ (образец 2) и 385 кг/м³ (образец 3).

Все результаты исследования ботанического состава и степени разложения рассмотренных образцов торфа занесены в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Ботанический состав и степень разложения трех образцов торфа

№ обр.	Вид торфа	Ботанический состав	Глубина отбора образца торфа, м	Содержание, %	Степень разложения, %
1	Кустарничково-сфагновый верховой	Сфагнум магелланский	0,1–0,2	60	42
		Клюква		25	
		Древесина сосны и березы		Единичное	
		Сфагнум красноватый		5	
		Шейхцерия		10	
		Осока носиковая		Единичное	
2	Пушицево-сфагновый верховой	Кора и древесина сосны	0,3	30	20
		Корешки вересковых кустарников		10	
		Сфагнум узколистный		40	
		Сфагнум магелланский		10	
3	Шейхцериево-сфагновый переходный	Сфагнум балтийский	0,4–0,5	65	10,5
		Сфагнум узколистный		10	
		Пушица		10	
		Шейхцерия		10	
		Корешки вересковых кустарников		5	

4.3.2. Результаты исследования процесса сушки торфа

В результате исследования процесса сушки образцов массой 5 г при температурах 50, 80 и 100 °С для каждого образца торфа были получены экспериментальные зависимости относительной массы образцов от времени (рис. 4.6) [167, 188]. Влагосодержание образцов торфа 1–3 составило 312, 298 и 180% соответственно.

Из рис. 4.6 видно, что с увеличением температуры стабилизации скорость сушки растет, а убыль массы для всех трех образцов составляет от 75 до 85%.

На рис. 4.7 показано влияние типа торфа на процесс сушки при различных температурах стабилизации.

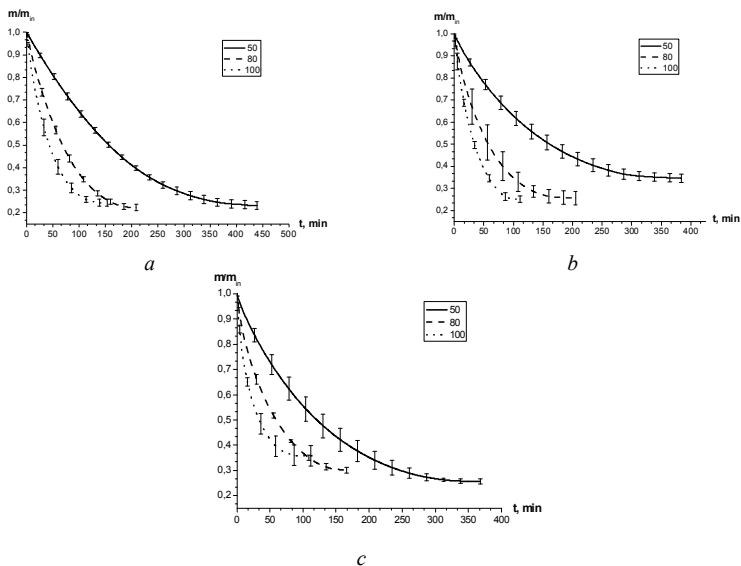


Рис. 4.6. Зависимость относительной массы образцов 1 (а), 2 (b) и 3 (с) торфа для различных температур сушки

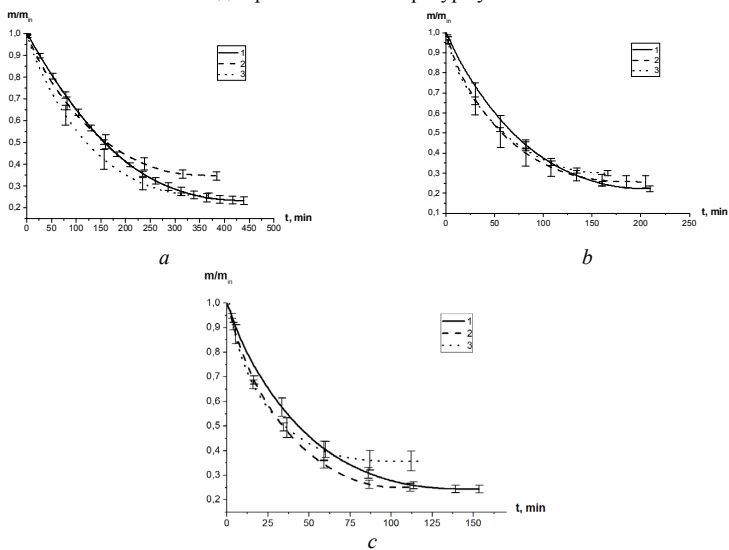


Рис. 4.7. Сравнение относительных масс трех различных образцов торфа при температурах сушки 50 (а), 80 (b) и 100 (с) °C

Из рис. 4.7 следует, что для всех трех типов торфа максимальное отличие кривых сушки при температурах стабилизации 50, 80 и 100 °C не превышает 20%. Отсюда можно предположить, что характеристики торфа (ботанический состав, зольность, плотность) незначительно влияют на скорость сушки.

На втором шаге для исследования кинетики сушки в динамических условиях были также проведены эксперименты на приборе Pyris® 1 TGA Perkin Elmer® в воздушной среде для тех же образцов торфа [166, 189]. Эксперименты были выполнены с различными скоростями нагрева (10, 20 и 30 К/мин).

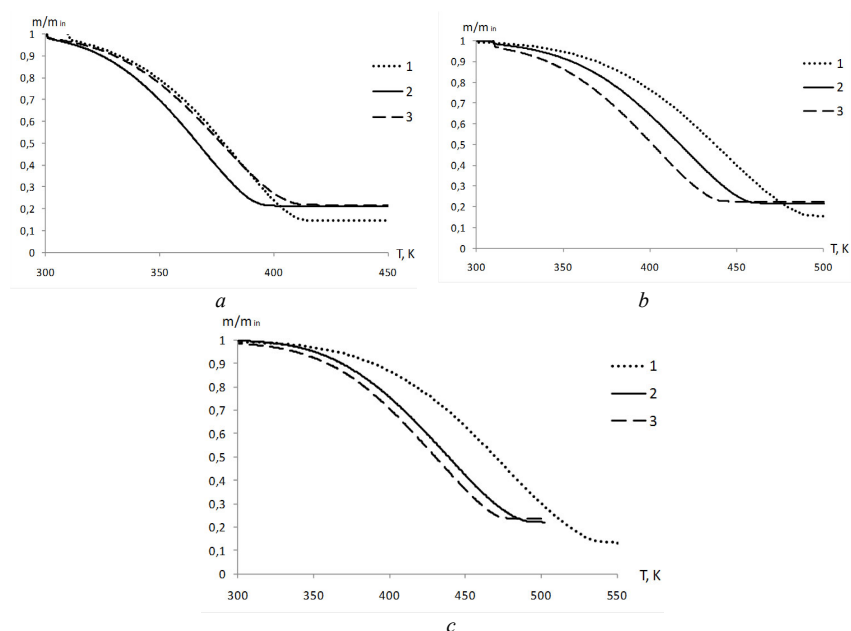


Рис. 4.8. Сравнение убыли относительных масс для трех различных образцов торфа при трех скоростях нагрева 10 (a), 20 (b) и 30 (c) К/мин

Значительная разница между скоростями нагрева ($\Delta\beta = 10$ К/мин) была очень важна для кинетических целей. Действительно, кинетика должна быть исследована в относительно широком диапазоне скоростей нагрева в целях обеспечения полного описания явления. На рис. 4.8 представлены скорости сушки для каждого образца торфа при разных скоростях нагрева.

Этот этап сушки является эндотермической фазой, в которой влага, поглощенная матрицей торфа, испаряется при росте температуры до 550 К. В температурном диапазоне от 300 до 550 К вода испаряется с потерей массы около 80% для образцов 2 и 3 и 85% – для образца 1. Эти результаты согласуются с найденным влагосодержанием, которое составило 610, 417 и 362% для образцов 1–3 соответственно. Влагосодержание определялось в результате сушки образцов при 333 К до постоянного веса.

В результате обработки экспериментальных данных и расчета по модели (4.3)–(4.9) были получены значения ТКП процессов сушки, представленные в табл. 4.4.

Таблица 4.4

Термокинетические постоянные процессов сушки трех образцов торфа

№ образца	L_1 , Дж/моль	B , $K^{0,5} \cdot c^{-1}$
1	36 762	$0,482 \cdot 10^4$
2	36 029	$0,467 \cdot 10^4$
3	42 346	$0,450 \cdot 10^5$

Из табл. 4.4 видно, что ТКП процесса сушки трех различных образцов торфа имеют близкие значения. Это подтверждают сделанные ранее выводы о том, что характеристики различных видов торфа незначительно влияют на процесс сушки.

Для оценки точности предложенных ТКП решались прямые задачи (4.3) и (4.4) на основе полученных ТКП. Полученные численные результаты сравнивались с экспериментальными данными (рис. 4.9).

Из рис. 4.9 следует удовлетворительное согласование расчетных и экспериментальных зависимостей, что говорит о достоверности полученных ТКП. Кроме того, наблюдается удовлетворительное согласование ТКП процесса сушки образцов торфа, полученных в настоящей работе и работе [92].

Уравнение Аррениуса связывает постоянную скорость простой одношаговой реакции с температурой через энергию активации и предэкспоненциальный множитель. В твердом теле изменение энергии активации может быть связано с гетерогенной природой тела или со сложностью механизма протекающих реакций. Имея экспериментальные данные в зависимости от степени конверсии, можно обнаружить многошаговые процессы и предсказывать кинетику реакции в широком диапазоне температур. Для исследования кинетики в этом подходе был применен изоконверсионный метод Kissinger–Akahira–Sunose (KAS) [190] без предположения о конкретной кинетической модели.

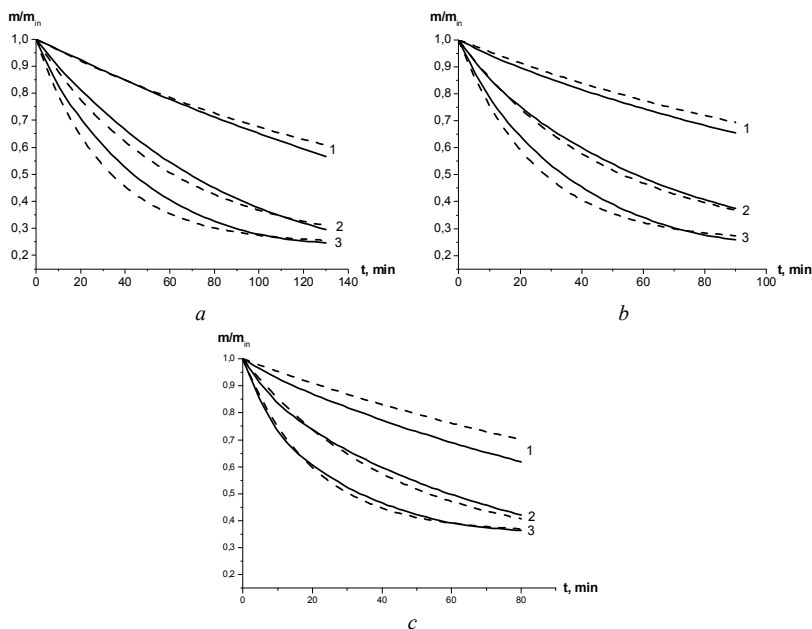


Рис. 4.9. Экспериментальные (сплошные) и расчетные (штриховые линии) зависимости убыли относительной массы образцов торфа от времени, полученные при температурах сушки: 1 – 50°C, 2 – 80°C и 3 – 100°C:
а – образец 1; б – образец 2; с – образец 3

На рис. 4.10 приведена полученная в [166] зависимость степени превращения от эффективной теплоты испарения воды. Степень превращения достигает единицы, когда образец полностью сухой. Значения $L_a(\alpha)$ были рассчитаны для α [0,05, 0,95] с шагом 0,05.

Эти результаты показывают, что процесс сушки можно рассматривать как одностадийный процесс. Для сравнения с ОКЗ мы использовали средние величины, полученные методом KAS для процесса сушки трех образцов торфа. В табл. 4.5 представлено сравнение ТКП, полученных двумя различными методами.

В табл. 4.5 показано, что средние значения, полученные методом KAS, находятся в хорошем согласовании со значениями, полученными с помощью метода ОКЗ для процесса сушки. Эти результаты подтверждают метод ОКЗ, несмотря на разные масштабы образцов и массы (несколько миллиграмм для TGA и несколько грамм для метода решения обратных задач).

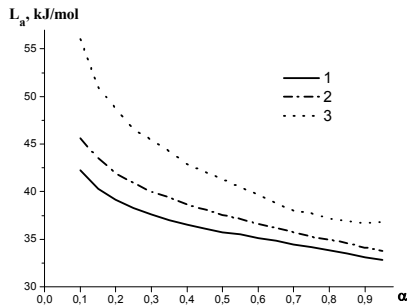


Рис. 4.10. Зависимость степени превращения от эффективной теплоты испарения воды

Таблица 4.5

**Термокинетические константы для процесса сушки
трех торфяных образцов**

№ образца	L (Дж/моль) ОКЗ	L_a (Дж/моль) КАС
1	36 762	36 120
2	36 029	38 010
3	42 346	42 260

Удалось найти только две работы, посвященные исследованию процессов сушки торфа. Первая – работа А.Н. Субботина [191], в которой найдены близкие значения $L_a = 47\,376$ Дж/моль. Вторая – работа [192], где $L_a = 68\,510$ Дж/моль для китайского торфа. Можно предположить, что разница в значениях L_a связана с особенностью используемой в [192] модели.

Для проверки возможности использования полученных ТКП в более широком интервале температур были проведены дополнительные эксперименты, в которых образцы торфа 2 высушивались в изотермических условиях при температурах 65 и 90°C и динамических условиях при скоростях сушки 15 и 25 К/мин. Экспериментальные зависимости относительной массы образцов от времени сравнивались с расчетными данными, полученными двумя методами (рис. 4.11).

Как видно из рис. 4.11, полученные расчеты показывают хорошее совпадение с экспериментальными данными, что свидетельствует о точности найденных ТКП. Из удовлетворительной близости теоретических и экспериментальных кривых следует вывод о возможности использования полученных ТКП для моделирования процесса сушки торфа.

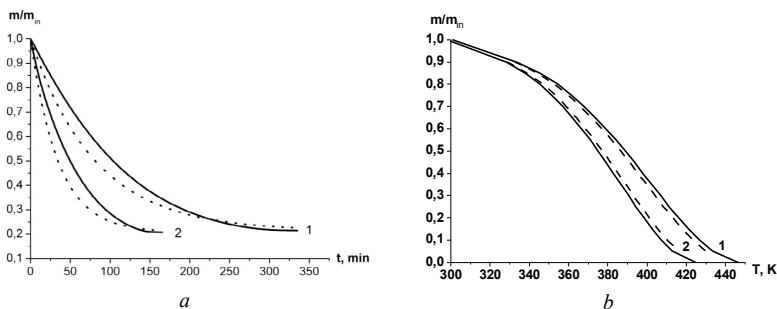


Рис. 4.11. Экспериментальные (сплошные линии) и расчетные (пунктирные линии) зависимости убыли относительной массы образца 2 от времени: *a* – для изотермических условий (*1* – 65°C и *2* – 90°C); *b* – для динамических условий (*1* – 15 К/мин и *2* – 25 К/мин)

В результате исследования было установлено, что экспериментальные данные и соответствующие термокинетические константы процесса сушки для каждого типа торфа существенно не различались. Это позволяет сделать вывод, что ни масштаб, ни тип торфа не оказывают существенного влияния на кинетику процесса сушки. Этот результат представляет интерес, так как KAS метод был применен к образцам с небольшой массой (частички торфа весом несколько миллиграмм), а метод решения обратных задач – к образцам торфа, представляющим собой пластинки (несколько грамм). Преимущество последнего метода состоит в том, что он позволяет изучать образцы в естественном состоянии, сохраняя структуру и объёмные свойства. Предложенный математический метод был проверен классическим кинетическим методом для двух скоростей нагрева.

4.4. Выводы

В результате проделанной работы в данной главе были получены следующие результаты и сделаны выводы:

1. На основе полученных экспериментальных данных с помощью разработанной методики решения обратных задач химической кинетики определены термокинетические постоянные процессов сушки различных образцов СГМ.

2. Анализируя изменение относительных масс образцов 1–3 и их термокинетические постоянные, можно предположить, что внутреннее и внешнее строение рассмотренных СГМ является доминирующим параметром, влияющим на процессы испарения.

3. Для исследуемого типа местности образец 1 СГМ имеет преобладающую биомассу и минимальное влагосодержание, что позволяет считать его основным проводником горения. Таким образом, математическое моделирование процессов сушки СГМ с целью прогноза пожарной опасности на данной местности по методике [19] целесообразно рассчитывать для основного проводника горения и использовать термокинетические постоянные образца 1.

4. Из удовлетворительной близости теоретических и экспериментальных кривых убыли массы образцов торфа следует вывод о возможности использования полученных ТКП для моделирования процесса сушки торфа.

5. Для исследования влияния масштаба образцов торфа, а также их свойств на кинетику процесса сушки были проведены эксперименты в динамических и изотермических условиях. В качестве образцов использовали три различных типа торфа. В результате исследования было установлено, что экспериментальные данные и соответствующие термокинетические константы процесса сушки для каждого типа торфа существенно не отличались. Это позволяет сделать вывод, что ни масштаб, ни тип торфа не оказывают сильного влияния на кинетику процесса сушки. Предложенный математический метод был проверен классическим кинетическим методом для двух скоростей нагрева. Сравнение показало хорошее согласование.

ГЛАВА 5. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК И ОСОБЕННОСТЕЙ ГОРЕНИЯ ПРИРОДНЫХ ГОРЮЧИХ МАТЕРИАЛОВ

5.1. Проведение экспедиции в Жуковское лесничество Тимирязевского лесхоза Томской области для сбора базы данных

Методика сбора образцов. Летом 2003 г. была проведена экспедиция в Жуковское лесничество Тимирязевского лесхоза Томской области для сбора образцов опада РГМ типичных выделов этого лесничества. Для определения типичных выделов использовали следующую методику. Все выделы этого лесничества сортировали по четырем критериям: порода леса, тип леса, группа возраста, полнота леса, как показано на рис. 5.1.

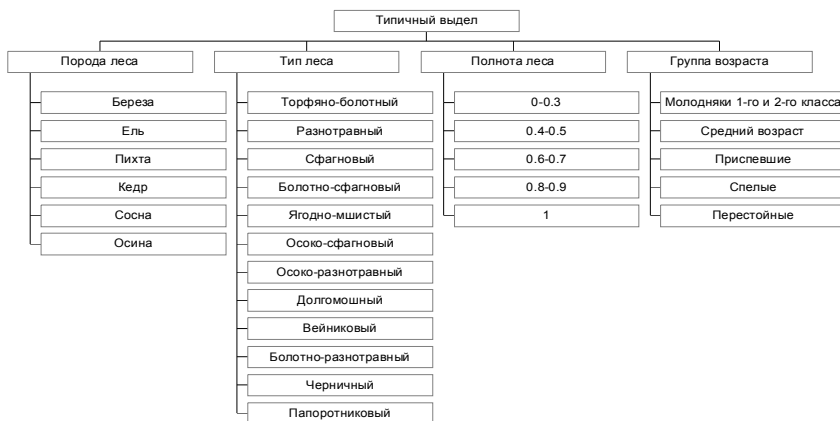


Рис. 5.1. Характеристики типичного выдела

Для исследования были взяты наиболее гигроскопичные горючие материалы: мхи, лишайники, а также опад, т.е. отмершие, но не разложившиеся части растений: листья и стебли трав, хвоя, листья деревьев.

Для определения влагосодержания и запаса слоя РГМ использовали методику, предложенную Н.П. Курбатским [31]. В рамках этой методики влагосодержание и запас горючих материалов определяли по образцам,

которые собирают вручную на участках с площадок размером $0,005 \text{ м}^2$. Как показано в [31] количество площадок надо брать тем больше, чем выше требуемая точность в определении массы и влагосодержания РГМ. Оптимальным вариантом (в отношении трудоемкости работы и точности результатов) в случае оценки запасов мохово-лишайникового покрова, опада, подстилки и влагосодержания являются площадки в количестве 10 штук на одном квадратном метре [124]. Площадки отбирали по принципу случайной выборки, новые площадки примыкали к предыдущим с интервалом $0,10\text{--}0,15 \text{ м}$ (рис. 5.2).

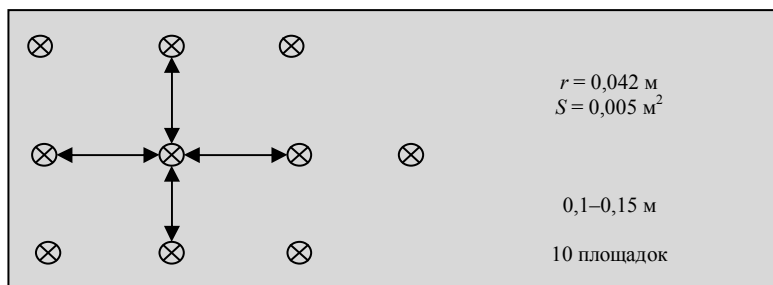


Рис. 5.2. Выбор площадок

После отбора проб площадку обрезали по границам цилиндром и проводили сбор опада, а также образцов мхов и лишайников. Одновременно с этим измеряли высоту опада для определения последующего запаса РГМ. В дождливую погоду наблюдения не производили. Образцы упаковывали в вакуумные мешочки из полиэтиленовой пленки, которые сразу складывали в один большой вакуумный пакет. Одновременно с этим в каждый мешочек клали бирку со следующей информацией, необходимой для обработки образцов: 1) дата и время сбора; 2) высота слоя; 3) номер выдела, квартала. В результате проведения экспедиции было собрано 65 пакетов с образцами опада типичных выделов.

Методика сушки растительных горючих материалов в лабораторных условиях. Использовались следующие экспериментальные приборы: весы аналитические типа АДВ-200 с инструментальной погрешностью $\pm 0,005 \text{ г}$; сушильный шкаф $0\text{--}150^\circ\text{C}$ с инструментальной погрешностью $\pm 2^\circ\text{C}$; ртутный термометр $0\text{--}500^\circ\text{C}$ «Состарен 2–69», с инструментальной погрешностью $\pm 1^\circ\text{C}$; микроволновый влагомер ВКФ – 43 с инструментальной погрешностью $\pm 0,5\%$.

Образцы РГМ, находящиеся в вакуумных мешочках, взвешивали на аналитических весах АДВ-200 2-го класса с точностью 10^{-3} г . Из полученного

веса вычитали массу мешочка и бирки, тем самым получая чистую массу образца. Затем образец разделяли на составные части по типам РГМ, определяя процентное содержание каждого типа. После этого их аккуратно перекладывали в специальные формы (масса каждой из которых заранее известна) и помещали в сушильный шкаф с установившейся температурой и объемом камеры $V = \pi r^2 H$ ($r = 0,12$ м – радиус, $H = 0,24$ м – высота). Объем образца РГМ был существенно меньше объема камеры. Сушку проводили в изотермических условиях при $T = (297, 318, 373) \pm 2$ °К. Образцы взвешивались каждые 10 мин при 318 °К и каждые 20 мин при 297 °К.

В результате были получены графики зависимости изменения массы Шребера, опада хвой сосны обыкновенной, опада хвой кедра, опада хвой пихты, опада листьев березы, опада листьев осины от времени при различных температурах. Для вычисления доверительных интервалов использовали критерий Стьюдента [193] с доверительной вероятностью 0,95.

Систематическая ошибка, связанная с нарушением условий термостатирования за время выемки образцов из сушильного шкафа и их взвешивания на аналитических весах, определялась следующим образом. Три однородных образца одинаковой массы в один момент времени были помещены в сушильный шкаф. Первый образец взвешивался каждые 10 мин, второй – каждые 20 мин, третий был взвешен только вначале и в конце процесса высушивания. В результате проведенного опыта систематическая ошибка составила 3%.

Безразмерная масса образцов определялась по формуле

$$\bar{m} = m / m_n, \quad (5.1)$$

где m_n – начальная масса, характеризующая количество влаги, испарившейся с поверхности исследуемого материала за время теплового воздействия; m – масса высушиваемого образца. Время сушки варьировалось в пределах $t = 100\text{--}640$ мин в зависимости от температуры окружающей среды.

Погрешность измерений, в свою очередь, составила: температуры $\pm 2^\circ\text{К}$, относительной влажности воздуха $\pm 1\%$, массы $\pm 0,01$ г.

Согласно [31] запасом РГМ называется их масса m_z , приходящаяся на один квадратный метр.

Для создания базы данных по запасам РГМ для типичных выделов использовалась следующая методика. Влагосодержание $W_i^{(k)}$ главного ОПГ на i -м выделе определяли по формуле [117]:

$$W_i^{(k)} = \frac{m_i^{(k)} - m_{i0}^{(k)}}{m_{i0}^{(k)}}, \quad (5.2)$$

где $m_i^{(k)}$ и $m_{i0}^{(k)}$ – массы главного ОПГ на i -м выделе в естественном и абсолютно сухом состояниях соответственно.

Таким образом, имея запас РГМ, приходящийся на один квадратный метр, и площадь типичного выдела S_b , можно посчитать массу РГМ на территории данного выдела:

$$m_b = m_3 S_b. \quad (5.3)$$

Результаты обработки экспедиционных данных. На основании проведенных экспериментальных исследований при использовании методики [102] были получены значения энергии активации и предэкспоненциального множителя (табл. 5.1).

Таблица 5.1

Численные значения термокинетических постоянных низкотемпературной сушки

Термокинетическая постоянная	Хвоя кедра	Хвоя сосны	Хвоя пихты	Листья березы	Листья осины	Мох Шребера
E_2 , Дж/моль	18 306	2 005	6 993	2 047	4 998	14 060
k_{02} , $K^{1/2}/c$	$0,24 \cdot 10^3$	0,09	1,07	0,11	0,42	4,73

Зная E_2 , k_{02} и m_n , с использованием математических моделей сушки [129] можно определить безразмерную массу образца в любой момент времени.

Было проведено сравнение экспериментальных данных низкотемпературной сушки типичных РГМ с расчетными данными, полученными на основе аналитического решения упрощенной математической модели [129], при эффективных значениях энергии активации E_2 и предэкспоненциального множителя k_{02} . Анализ результатов показал, что отличие не превышает 10%.

Из-за того, что в имеющейся базе метеорологических данных отсутствует плотность потока длинноволнового излучения J_w на верхней границе слоя РГМ, которая используется в нашей математической модели, необходимо воспользоваться данными работы [138].

Из табл. 5.2, зная плотность потока излучения от Солнца $q_R(h)$, можно найти плотность потока длинноволнового излучения J_w для любого времени года.

Таблица 5.2

Плотность потока длинноволнового излучения J_w на верхней границе слоя РГМ

Отношение	Зима	Весна	Лето	Осень
$J_w/q_R(h)$	2,54	1,67	1,81	2,42

Также в работе [138] представлены средние значения альбедо A : для хвойного леса – 0,10–0,15; для лиственного леса – 0,13–0,18. Для простоты примем альбедо для хвойного и лиственного леса, равное 0,14. Коэффициент черноты слоя для всех РГМ примем равным 0,95.

В результате обработки экспедиционных образцов была создана база данных типичных РГМ (прил. 1) и термокинетических постоянных (см. табл. 5.1) для новой системы прогноза лесной пожарной опасности. Эта база данных включает: номер квартала, номер выдела, начальную массу образца на площади 0,005 м², начальные массы типичных включений образца, абсолютно сухие массы типичных включений образца, абсолютно сухую массу образца на площади 0,005 м², высоту слоя РГМ.

5.2. Влияние плотности и неоднородности напочвенного покрова на скорость распространения низового лесного пожара

5.2.1. Описание экспериментальной установки и методики проведения экспериментов

Экспериментальные исследования проводились на комплексе для физического моделирования низовых лесных и степных пожаров [194]. Он существенно расширяет возможности и повышает эффективность исследований пожаров различного типа в лабораторных условиях (рис. 5.3). Указанная цель достигается путем оснащения испытательного комплекса отдельно коробом-полигоном для изучения зажигания и горения РГМ, датчиками пламени, устройством для генерации горения охвоенных веточек и их совокупности; устройством, моделирующим воздушные потоки с заданной скоростью, автоматизированной системой поджига; регистрирующей аппаратурой сбора и обработки информации; системой подготовки и экспресс-анализа образцов. Короб-полигон для изучения зажигания и горения РГМ имел следующие размеры: длина – 2 м, ширина – 1,5 м, высота – 0,13 м, и был наполнен землей. Глубина короба составляла 0,13 м, что позволяло имитировать различные толщины слоя горючего материала.

Система сбора и регистрации данных состояла из компьютера, трех пятиканальных аналого-цифровых преобразователей с подключаемыми термопарами типа ХА. Программа регистрации входных данных разрабо-

тана на базе программного комплекса LabView. Влагосодержание РГМ определялось при помощи анализатора влажности AND MX-50 с точностью до 0,01%.

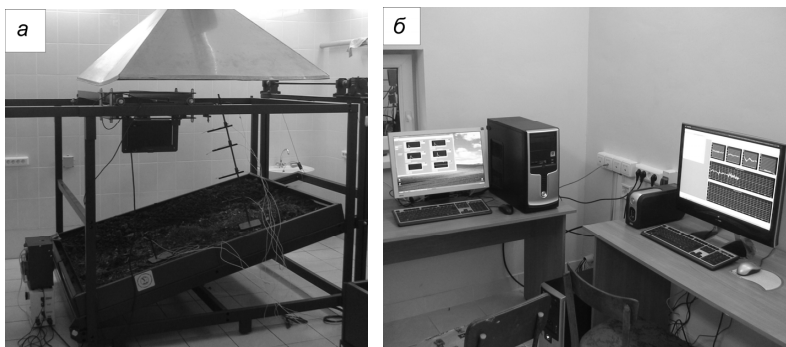


Рис. 5.3. Установка для физического моделирования низовых лесных и степных пожаров (а); система сбора и регистрации данных (б)

Эксперимент проводился следующим образом. На дно короба-полигона укладывался природный грунт, сверху на него размещали исследуемый слой ЛГМ. Перед укладкой ЛГМ в короб-полигон, проводился экспресс-анализ его влажности и влагосодержания в системе подготовки образцов. На слой ЛГМ укладывался источник тепла. В зависимости от целей исследования он может быть точечным либо линейным. Визуально процесс фиксировался с помощью видеокамеры. Затем запускалась система поджига, подавая электросигнал на источник тепла. Синхронно включалась регистрирующая аппаратура и проводился эксперимент.

Для учета влияния ширины слоя ЛГМ на скорость распространения, были проведены следующие опыты. Напочвенный покров укладывался в виде полосок различной ширины (0,1; 0,15 и 0,2 м) и длиной 0,4 м. Для каждой ширины полоски проводили от 3 до 5 опытов. Из анализа полученных результатов можно сделать вывод, что начиная с ширины полоски 0,15 м скорость распространения увеличивается незначительно.

В дальнейших опытах слой напочвенного покрова представлял собой полосу шириной 0,15 м и длиной 0,4 м. Толщина слоя ЛГМ h менялась в зависимости от условий эксперимента и не превышала 0,015 м. В качестве образцов ЛГМ брали хвою сосны, кедра, опад листьев березы и тополя.

В опытах слой ЛГМ представлял собой совокупность хвоинок или листья, равномерно разложенных на поверхности почвы, которые моделируют реальную подстилающую поверхность в лесу: высота слоя

$h = 0,01\text{--}0,015$ м, запас слоя $m_3 = \rho_{\text{сл}} h = 0,2\text{--}0,6$ кг/м², влагосодержание слоя $W = 4\text{--}11\%$. С точки зрения механики сплошной среды слой ЛГМ является рыхлой, пористой средой, основа которой – совокупность включений (хвоинок и листвы), а макропоры – пространство между ними. Включения были хаотически ориентированы относительно вертикали. Диапазоны характеристик слоя ЛГМ ($\rho_{\text{сл}}$, W) и его состав соответствовали характеристикам реального слоя ЛГМ в Тимирязевском лесхозе Томской области. Поэтому можно считать, что слой ЛГМ, созданный в лабораторных условиях, воспроизводил основные свойства реального слоя опада в лесу.

В качестве источника зажигания использовался эталонный источник (ЭИ) зажигания, выполненный в виде спирали плотной намотки, которую изготавливали из нихромовой проволоки диаметром 0,5 мм и сопротивлением 4,4 Ом. Спираль ЭИ нагревалась регулируемым источником тока до температуры 770–820 К. Источник зажигания располагался под слоем ЛГМ. Зажигание проводили для однородных составов с плотностями 15, 30, 40, 49 и 60 кг/м³ и неоднородных составов с различными процентными соотношениями для плотности 30 кг/м³. Для каждой плотности делали от 3 до 5 опытов, затем значения усредняли. Кроме того, определяли доверительные интервалы δ с уровнем значимости 0,05. Для всех опытов делалась проверка на грубые ошибки с помощью t -критерия [133]. Погрешность измерения массы образца составила $\pm 0,01$ г, влагосодержания $\pm 0,01\%$.

Под зажиганием слоя ЛГМ понимается возникновение факела пламени над слоем ЛГМ. Момент зажигания и время распространения фиксировались с помощью видеокамеры и секундомера. Остановка секундомера осуществлялась в момент перегорания натянутой над слоем ЛГМ нити. Перед каждым опытом измерялось влагосодержание ЛГМ с помощью измерителя влажности MX-50 фирмы AND.

5.2.2. Результаты экспериментов для однородных составов

При проведении экспериментов для однородных составов с плотностями 15, 30, 40, 49 и 60 кг/м³ были получены следующие данные [195]. В табл. 5.3 и 5.4 приведены данные о скорости распространения фронта пламени для хвои кедра и хвои сосны при различных плотностях.

Из табл. 5.3 видно, что при плотности 15 кг/м³ зажигание не приводит к горению слоя хвои кедра, что, по-видимому, связано с высокой пористостью слоя и при зажигании факел пламени не перекидывается на соседние

хвоинки. С увеличением плотности однородного слоя хвои скорость распространения фронта волны горения повышается. Следует отметить, что в данных опытах одновременно с возрастанием плотности возрастает запас РГМ. Полученные данные могут быть описаны соотношением [12]:

$$u = u_0(1 - e^{-BM_3}), \quad (5.4)$$

где u_0 – скорость распространения фронта пожара при весьма больших запасах РГМ, $B = 4 \text{ м}^2/\text{кг}$ – параметр согласования; M_3 – масса запаса ЛГМ.

Таблица 5.3

**Скорость распространения фронта пламени для хвои кедра
при различных плотностях**

$\rho, \text{ кг/м}^3$	$h, \text{ м}$	$M_3, \text{ кг/м}^2$	$W, \%$	$(u \pm \Delta u) \times 10^3, \text{ м/с}$
15	0,01	0,15	4,8	–
30	0,01	0,30	4,7	$5,2 \pm 0,3$
40	0,01	0,40	4,2	$6,1 \pm 0,2$
49	0,015	0,735	4,8	$6,4 \pm 0,4$

Таблица 5.4

**Скорость распространения фронта пламени для хвои сосны
при различных плотностях**

$\rho, \text{ кг/м}^3$	$h, \text{ м}$	$M_3, \text{ кг/м}^2$	$W, \%$	$(u \pm \Delta u) \times 10^3, \text{ м/с}$
15	0,01	0,15	6,0	$2,7 \pm 0,3$
30	0,01	0,30	6,0	$3,2 \pm 0,4$
40	0,01	0,40	6,0	$3,4 \pm 0,3$
60	0,01	0,60	6,0	$3,2 \pm 0,2$

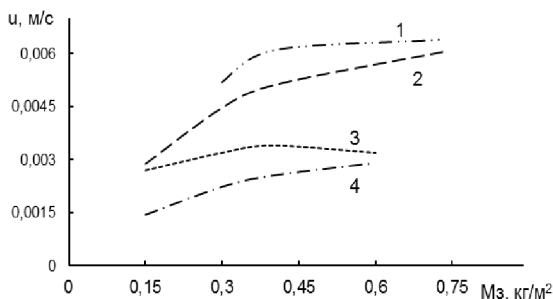


Рис. 5.4. Сравнение полученных экспериментальных данных (табл. 5.3, 5.4) с соотношением (5.4): кривая 1 – результаты эксперимента для хвои кедр; кривая 2 – соотношение (5.4); кривая 3 – результаты эксперимента для хвои сосны; кривая 4 – соотношение (5.4)

Если принять для хвои кедра $u_0 = 6,4 \cdot 10^{-3}$ м/с, а для хвои сосны $u_0 = 3,2 \cdot 10^{-3}$ м/с, то в координатах $u - M_3$ представленные в табл. 5.3 и 5.4 результаты достаточно удовлетворительно описываются соотношением (5.4) (рис. 5.4).

При плотности слоя из хвои сосны 60 кг/м^3 скорость распространения падает. Согласно [12] при увеличении плотности слоя расстояние между частицами уменьшается, соответственно, возрастает теплоотвод из зоны локального пламени внутрь слоя. Это должно приводить к уменьшению температуры газовой фазы на передней кромке факела пламени, а следовательно, к уменьшению скорости распространения пламени.

Анализируя данные табл. 5.3, 5.4, можно сказать, что наибольшая скорость распространения фронта пламени наблюдается по слою, состоящему из хвои кедра. При плотностях до 40 кг/м^3 скорость распространения для всех ЛГМ носит квазилинейный характер.

5.2.3. Результаты экспериментов по зажиганию неоднородных составов

При проведении экспериментов для смесей из хвои сосны, кедра, листья березы и тополя с различным процентным соотношением, высотой слоя $0,01 \text{ м}$ и плотностью 30 кг/м^3 были получены данные, представленные в табл. 5.5–5.7.

Из анализа данных, приведенных в табл. 5.5–5.7, видно, что увеличение в слое опада листья приводит к уменьшению скорости распространения фронта пожара, а при доведении ее до 90% слой ЛГМ погасал независимо от сорта хвои (табл. 5.5–5.7) и влагосодержания W .

Таблица 5.5

**Скорость распространения фронта пламени по слою
из листьев тополя бальзамического и хвои кедра**

Состав ЛГМ, %	W , %	$(u \pm \Delta u) \times 10^3$, м/с
Листья тополя – 10% Хвоя кедра – 90%	5,2	$5,5 \pm 0,6$
Листья тополя – 30% Хвоя кедра – 70%	7,0	$3,9 \pm 0,6$
Листья тополя – 50% Хвоя кедра – 50%	7,8	$4,0 \pm 0,8$
Листья тополя – 70% Хвоя кедра – 30%	6,4	$3,4 \pm 0,6$
Листья тополя – 90% Хвоя кедра – 10%	5,9	–

Таблица 5.6

**Скорость распространения фронта пламени
по слою из листвы березы и хвои кедра**

Состав ЛГМ, %	W , %	$(u \pm \Delta u) \times 10^3$, м/с
Листва березы – 10% Хвоя кедра – 90%	7,6	$4,2 \pm 0,3$
Листва березы – 30% Хвоя кедра – 70%	6,8	$4,1 \pm 0,3$
Листва березы – 50% Хвоя кедра – 50%	9,3	$3,9 \pm 0,2$
Листва березы – 70% Хвоя кедра – 30%	8,2	$3,3 \pm 0,6$
Листва березы – 90% Хвоя кедра – 10%	8,6	–

Таблица 5.7

**Скорость распространения фронта пламени по слою
из тополя бальзамического и хвои сосны**

Состав ЛГМ, %	W , %	$(u \pm \Delta u) \times 10^3$, м/с
Листва тополя – 10% Хвоя сосны – 90%	8,8	$2,5 \pm 0,2$
Листва тополя – 30% Хвоя сосна – 70%	10,1	$2,0 \pm 0,4$
Листва тополя – 50% Хвоя сосны – 50%	10,2	$2,0 \pm 0,5$
Листва тополя – 70% Хвоя сосны – 30%	9,9	–
Листва тополя – 90% Хвоя сосны – 10%	11,1	–

Горение слоя, состоящего из хвои и листвы, происходило в основном по отдельным хвоинкам. Листва при этом горела медленно. Кроме того, при 70% листвы тополя и 30% хвои сосны (табл. 5.7) происходило затухание факела пламени. Видимо, это связано с меньшим выделением количества тепла при горении хвои сосны, по сравнению с хвоей кедра, что приводило к прекращению горения. В случае горения слоя, состоящего из 10% листвы тополя и 90% хвои кедра (табл. 5.5), скорость распространения оказалась выше, чем при горении однородного слоя из хвои кедра (см. табл. 5.3). Это происходит потому, что влагосодержание неоднородного слоя определяется влагосодержанием листвы тополя и хвои кедра. В данном случае хвоя кедра имела влагосодержание меньше, чем в однородном слое, но на общее влагосодержание неоднородного слоя повлияла листва тополя. Так как скорость распространения в слое определяется хвойным РГМ, то скорость оказалась выше.

Таблица 5.8

**Скорость распространения фронта пламени для хвой кедр,
хвой сосны и листвы березы**

Состав ЛГМ, %	W , %	$(u \pm \Delta u) \times 10^3$, м/с
Хвоя кедр – 10% Хвоя сосны – 10% Листва березы – 80%	9,1	–
Хвоя кедр – 10% Хвоя сосны – 80% Листва березы – 10%	8,1	$2,5 \pm 0,5$
Хвоя кедр – 20% Хвоя сосны – 40% Листва березы – 40%	9,7	$2,6 \pm 0,3$
Хвоя кедр – 25% Хвоя сосны – 25% Листва березы – 50%	11,0	–
Хвоя кедр – 25% Хвоя сосны – 50% Листва березы – 25%	8,3	$2,5 \pm 0,2$
Хвоя кедр – 40% Хвоя сосны – 40% Листва березы – 20%	8,9	$2,6 \pm 0,3$
Хвоя кедр – 50% Хвоя сосны – 25% Листва березы – 25%	8,6	$3,0 \pm 0,4$
Хвоя кедр – 80% Хвоя сосны – 10% Листва березы – 10%	9,4	$3,3 \pm 0,3$

Из табл. 5.8 видно, что если хвой менее 50% от общего состава слоя, то пламя распространяется медленно и в конечном итоге затухает. Если в слое преобладает хвоя кедр, то скорость распространения факела пламени увеличивается примерно на 20%.

5.3. Влияние плотности светового потока на время зажигания различных образцов древесины

5.3.1. Описание экспериментальной установки и методики исследований

Источником потока лучистой энергии являлась оптическая печь «Уран-1» с ксеноновой лампой ДКсР-10000 [196] (рис. 5.5).

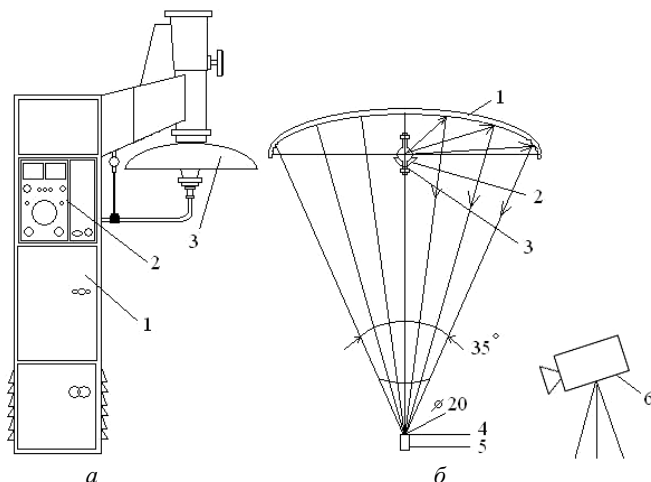


Рис. 5.5. Схема экспериментальной установки: *а* – конструктивное выполнение оптической печи типа Уран-1: 1 – блок питания; 2 – пульт управления; 3 – излучатель; *б* – оптический излучатель: 1 – отражатель; 2 – контротражатель; 3 – лампа; 4 – рабочее пятно; 5 – образец древесины; 6 – тепловизор

Из 10 кВт мощности, выделившейся на лампе, 5,5 кВт приходилось на излучение в оптической области. Распределение излучения по спектру составляло: 0,5 кВт (9%) в ультрафиолетовой части; 2 кВт (36%) в видимой и 3 кВт (55%) в инфракрасной части спектра. Максимальная плотность потока лучистой энергии в пятне диаметром 10^{-2} м составляла $4\,000\text{ кВт/м}^2$. Установка обеспечивала стабильность излучения во времени не ниже 95%, равномерность распределения потока лучистой энергии в пятне диаметром $2 \cdot 10^{-2}$ м – не ниже 87%. Изменение плотности потока лучистой энергии при отклонении от фокальной плоскости по оптической оси на расстояние $2 \cdot 10^{-3}$ м не превышало 5%. Диаметр сфокусированного потока составлял около $2 \cdot 10^{-2}$ м. Распределение интенсивности излучения по площади пятна определяли фотоэлектрическим методом с использованием световода из стекловолоконного жгута диаметром $2 \cdot 10^{-3}$ м марки ГОЖВ-Б-2-250 и фотодиода ФД-К-55. Световод перемещали по диаметру пятна во взаимно перпендикулярных направлениях. Кривые распределения интенсивности излучения имели максимум в центре пятна и плавно снижались к периферии. Время экспозиции потока излучения в эксперименте задавали с помощью дискового затвора, который обеспечивал трапециевидную форму импульса. Время раскрытия (закрытия)

затвора составляло 4% от времени экспозиции. С помощью дискового затвора время экспозиции в экспериментах варьировалось от 0,1 до 1 с. При длительности экспозиции свыше 1 с использовался электромагнитный затвор со временем раскрытия (закрытия) 0,1 с.

Блок регистрации экспериментальной установки обеспечивал измерения плотности потока лучистой энергии, времени экспозиции, момента появления пламени, температуры воспламенения и контролировал условия проведения опыта. Он включал датчик плотности потока лучистой энергии, фотодиоды, реле времени, светолучевой осциллограф Н-117 и тепловизор JADE J530SB, который представляет собой радиометрическую инфракрасную камеру на базе охлаждаемого сенсора с диапазоном 1,5–5,1 мкм. Температура поверхности образца фиксировалась при помощи тепловизора с погрешностью измерений, не превышающей 1%. В экспериментах использовался дисперсионный фильтр, позволяющий измерять температуры в диапазоне 763–1 773 К. Спектральный интервал этого дисперсионного фильтра составлял 2,5–2,7 мкм. При измерениях использовались калибровки завода-изготовителя.

Начало и конец экспозиции, а также момент появления продуктов газификации и пламени фиксировались при помощи тепловизора при частоте съемки 100 кадров в секунду, показания которого дублировались фотоэлектрической системой и записывали на шлейфовый осциллограф Н 117/1. За время воспламенения принимался промежуток времени от начала воздействия потока лучистой энергии до момента появления пламени над поверхностью исследуемого образца. Погрешность измерения времени воспламенения по появлению пламени не превышала 4% и в основном определяется физико-химическими свойствами исследуемого вещества. Плотность лучистого потока в месте расположения исследуемых образцов перед каждой серией опытов и для контроля в ходе серии измерялась калориметром. Калориметр представлял собой диск из меди диаметром $1 \cdot 10^{-2}$ м, толщиной $3 \cdot 10^{-3}$ м с термопарой, зачеканенной по центру диска на глубину $1,7 \cdot 10^{-3}$ м. Приемная поверхность калориметра зачернена ламповой копотью. Значение коэффициента отражения зачерненной поверхности калориметра в области спектра излучения 0,36–1,1 мкм составляло 1,5–2,0%. Погрешность измерения интенсивности излучения не превышала 10%. Плотность теплового потока изменяли в пределах 360–1 520 кВт/м².

В качестве исследуемых образцов использовалась древесина сосны (*Pinus silvestris*), березы (*Betula pubescens*), кедра (*Pinus sibirica*), лиственницы (*Larix sibirica*) и осины (*Populus tremula*) как наиболее распро-

страненных на территории РФ (около 78%) [197]. Образцы представляли собой цилиндры диаметром $1,6 \cdot 10^{-2}$ м и высотой $1 \cdot 10^{-2}$ м.

Поверхность образцов, поглощающая излучение, покрывалась ламповой копотью. Световое излучение падало на образцы перпендикулярно волокнам древесины. Исследования проводили в среде воздуха и при атмосферном давлении. Начальная температура образцов соответствовала комнатной – 297 К. Абсолютно сухое состояние древесины достигалось путем предварительного ее высушивания в сушильном шкафу при температуре 376 К в течении 48 ч. Неизменная влажность образцов обеспечивалась с помощью эксикатора, наполненного силикагелем. Для исследования влияния начальной температуры образца на время воспламенения высушенные сосновые образцы предварительно нагревали в сушильном шкафу около часа при температуре 373 К. Влажность образцов определяли при помощи анализатора влажности A&D MX-50 с точностью 0,01%.

5.3.2. Результаты зажигания древесины световым потоком

На рис. 5.6 приведены зависимости времени воспламенения от плотности потока лучистой энергии для древесины березы, кедра, лиственницы, осины и сосны с начальной температурой $T_{in} = 297$ К и влажностью $1,5 \pm 0,4\%$ [198].

Из рис. 5.6 видно, что при увеличении плотности потока излучения время задержки зажигания опытных образцов уменьшается. Время воспламенения древесины увеличивается по следующему ряду: кедр, лиственница, осина, сосна, береза. При снижении q ниже 100 кВт/м^2 период воспламенения начинает быстро увеличиваться и возгорание материала становится маловероятным [199].

Под действием потока лучистой энергии происходит газификация древесины, так как при температуре поверхности свыше 573 К преобладает газообразование [200], скорость которой зависит от сорта древесины и плотности потока лучистой энергии. Косвенно о степени газификации можно судить по интенсивности отраженной лучистой энергии в процессе нагрева образца. Если степень газификации определить как отношение $k = J/J_0$, где J_0 – интенсивность фона, которую определяли по отражению излучения от поверхности датчика теплового потока, на поверхность которого нанесена ламповая копоть, а J – интенсивность отраженного излучения от продуктов газификации древесины и частичек ламповой сажи,

то при плотности потока лучистой энергии $1\,300\text{ кВт/м}^2$ получаем степень газификации образцов древесины, представленную в табл. 5.9.

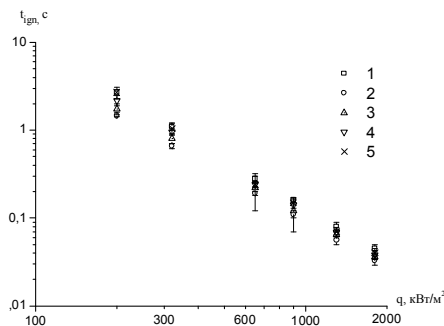


Рис. 5.6. Зависимость времени воспламенения от плотности потока лучистой энергии для различных образцов древесины: 1 – береза; 2 – кедр; 3 – лиственница; 4 – осина; 5 – сосна

Таблица 5.9

Степень газификации образцов древесины

Степень газификации / материал	Береза	Осина	Лиственница	Сосна	Кедр
$k = J / J_0$	$1,2 \pm 0,2$	$1,8 \pm 0,1$	$2,3 \pm 0,5$	$3,4 \pm 1,4$	$3,4 \pm 1,5$

Из табл. 5.9 видно, что наиболее интенсивно происходит газификация кедра и сосны. Слабо газифицирует береза и осина. Это, по-видимому, связано с повышенным содержанием смол в образцах кедра и сосны. Визуальное наблюдение показало, что после воздействия потока лучистой энергии на поверхности погашенных образцов березы имеется плотный и ровный слой углеродистых частиц. Погашенная поверхность образцов сосны волнистая, с неравномерным содержанием углеродистых частиц. На вершине волны наблюдается повышенное содержание углеродистых частиц, в нижней части видны осмоленные волокна древесины.

После прекращения воздействия излучения ксеноновой лампы наблюдали, как правило, погасание древесины. В процессе исследования было проведено 29 испытаний для образцов березы и 38 для образцов сосны. В результате только 0,6% образцов березы, имеющих начальную температуру $T_{in} = 297\text{ K}$, продолжали гореть в пламенном режиме и столько же в тлеющем. Образцы сосны горели в пламенном режиме в 1,5% случаев и 0,8% – в тлеющем режиме; это продолжалось не более

2 мин. Полного сгорания исследуемых образцов в изученных условиях не наблюдалось.

На рис. 5.7 представлены графические результаты сравнения времени воспламенения образцов древесины сосны и березы при $T_{in} = 297$ К и различных влажностях w .

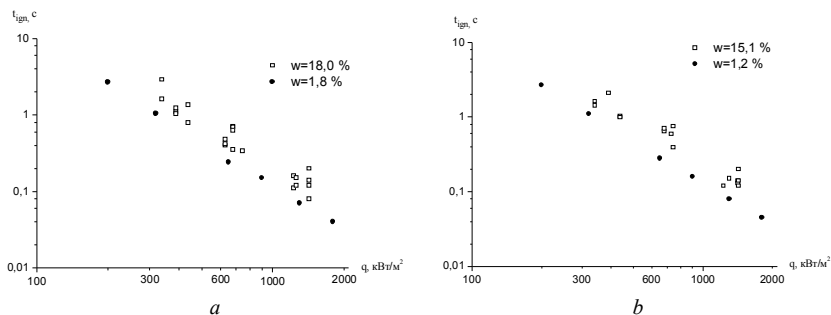


Рис. 5.7. Зависимость времени воспламенения от плотности потока лучистой энергии для образцов сосны (а) и березы (б) при $T_{in} = 297$ К и различных влажностях w

В исследованном диапазоне потоков лучистой энергии увеличение влажности древесины в пределах от 1,8 до 18% приводит к росту времени воспламенения более чем на 50%. Необходимо отметить, что с повышением влажности древесины существенно возрастает разброс опытных данных по времени воспламенения.

На рис. 5.8 представлены результаты, полученные в ходе воспламенения древесины сосны с начальной температурой $T_{in} = 297$ К и 373 К и влажностью $w = 1,8\%$.

Согласно данным рис. 5.8 время воспламенения образцов, предварительно нагретых при температуре 373 К, меньше, чем образцов при комнатной температуре. В зависимости от интенсивности теплового излучения повышение начальной температуры образцов от 297 до 373 К снижает время воспламенения древесины сосны в 1,5–2 раза.

Можно предположить, что это связано с уменьшением затрат на нагрев образцов сосны и испарение свободной воды. Однако при потоке лучистой энергии свыше 1 400 кВт/м² время воспламенения нагретых и ненагретых образцов отличается незначительно. Видимо, в данном случае поглощенная энергия излучения в прогретом слое образца несоизмеримо больше той энергии, которая была накоплена при предварительном нагреве образцов в печи.

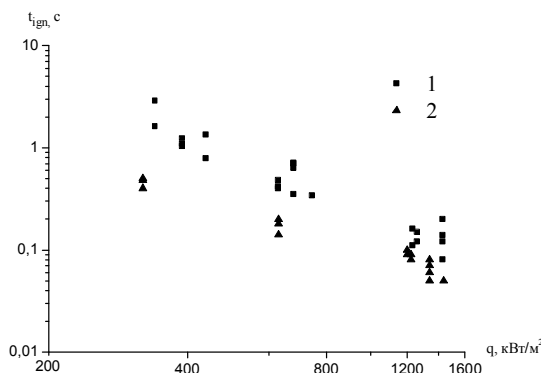


Рис. 5.8. Зависимость времени воспламенения от плотности потока лучистой энергии для образцов сосны с начальными температурами: $T_{in} = 297$ К (1) и 373 К (2)

Для определения температуры поверхности образцов сосны и березы были сняты термограммы с помощью тепловизора JADE J530SB с использованием фильтра 2,5–2,7 мкм. Обработка термограмм осуществлялась с помощью программного обеспечения Altair 5.60.027. Температуры поверхности образцов определяли в результате осреднения данных на заданной окружности, которая составляла порядка 5% от площади образца и располагалась в центре сфокусированного потока. На рис. 5.9 приведен профиль температуры поверхности образца березы с влажностью 1,2% при плотности потока лучистой энергии 745 кВт/м² для $T_{in} = 297$ К.

Из анализа профиля температуры поверхности и тепловизионной съемки процесса следует, что образец воспламенился после перекрытия затвора оптической печи. Видно, что температура воспламенения 844 К значительно ниже температуры образца во время его нагрева под действием излучения ксеноновой лампы, которая составила от 970 до 1150 К. По-видимому, на показания тепловизора оказывают влияние разогретые продукты пиролиза, экранирующие поверхность образца. Поэтому в настоящей работе, чтобы исключить возможное влияние разогретых продуктов пиролиза и уменьшить погрешности измерений, использовались данные, полученные после перекрытия затвора.

В табл. 5.10 приведены температуры поверхности воспламенения образцов сосны и березы с влажностью $\approx 1,5\%$ при различных плотностях потока лучистой энергии.

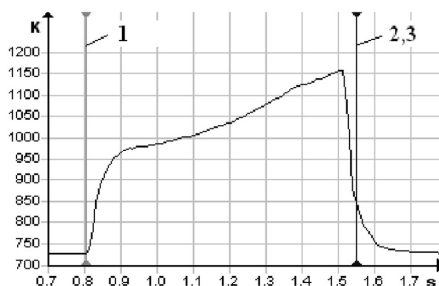


Рис. 5.9. Профиль температуры поверхности образца березы при воздействии излучения ксеноновой лампы:
1 – начало экспозиции; 2 – время воспламенения; 3 – конец экспозиции

Таблица 5.10

Температуры поверхности образцов сосны и березы в момент воспламенения потоком лучистой энергии

q , кВт/м ²	T_{ign} , K	
	Сосна	Береза
438	848±17	811±11
745	861±15	848±39
1420	894±103	872±43

Установлено, что изменение плотности потока лучистой энергии от 438 до 1 420 кВт/м² привело к увеличению температуры поверхности воспламенения древесины на 50–60 градусов, причем температура поверхности сосны примерно на 15–20 градусов выше, чем у березы. Этот факт согласуется с результатами экспериментальных работ [201, 202], где отмечено, что температура поверхности воспламенения мягких пород древесины на 50 градусов выше, чем твердых. Объясняется это различным строением древесины. Как известно, древесина состоит из трех основных компонентов – целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина, каждый из которых имеет свою характерную температуру воспламенения [203]. Более высокая температура воспламенения у лигнина, а самая низкая – у гемицеллюлозы. По сравнению с твердыми породами (береза) мягкие породы древесины (сосна) содержат меньшее количество гемицеллюлозы и большее лигнина, что, соответственно, может привести к повышению температуры поверхности воспламенения сосны по сравнению с березой при прочих равных условиях.

На рис. 5.10 приведено сравнение температур поверхности образцов древесины сосны и березы с влажностью 1,5% в момент воспламе-

нения с данными работы [204] при различных плотностях потока лучистой энергии.

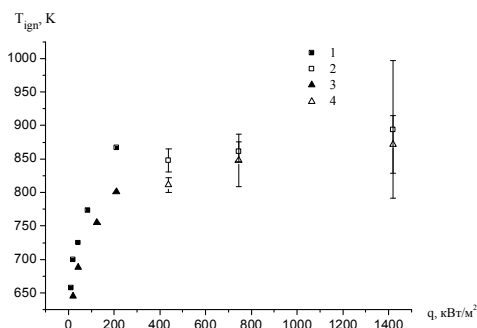


Рис. 5.10. Сравнение температур поверхности образцов сосны и березы в момент воспламенения: 1 – сосна [204]; 2 – сосна; 3 – береза [204]; 4 – береза

Представленные на рис. 5.10 результаты не противоречат численным значениям, полученным в рамках тепловой модели авторами публикации [204], где показано, что в диапазоне тепловых потоков от 21 до 210 кВт/м² изменение температуры воспламенения составило: для сосны от 700 до 870 К, для березы – от 650 до 800 К.

5.4. Исследования в природных условиях степных и полевых пожаров

В настоящее время вопрос прогнозирования возникновения и распространения степных и полевых пожаров недостаточно изучен и, как следствие, не созданы качественные модели и методики их прогноза. Поэтому на начальном этапе необходимо исследовать основные характеристики и закономерности возникновения и распространения степных и полевых пожаров, такие как скорость фронта пожара и вероятность их воспламенения [205–209].

Физическое моделирование пожаров проводилось в результате серии экспериментов. Первая часть экспериментов 2008, 2009 и 2011 гг. по исследованию полевых пожаров проводилась на территории Базового экспериментального комплекса (БЭК) ИОА СО РАН [205–209]. Раститель-

ность на этом участке представляла собой бурьянистое луговое разнотравно-злаково-бодяковое сообщество.

Другая часть экспериментов прошла с 5 по 7 мая 2010 г. в районе г. Карасук Новосибирской области, где были проведены натурные эксперименты по исследованию степных пожаров [209]. Горючие материалы в этом районе являлись характерными для степей и южных лесостепей. Экспериментальная площадка, на которой проводились опыты, имела нулевой угол наклона (высота 115 м над ур. м.). На площадке четко выделялось 3 яруса: 1 – ярус злаков (прошлогодние побеги злаков, значительно реже прошлогодние цветоносы полынью); 2 – ярус полыни (прошлогодние вегетативные части полыни австрийской); 3 – ярус типчака (куртины типчака, проростки злаков и других трав).

Во всех экспериментах использовали следующее оборудование. Масса m горючих материалов (ГМ) определялась при помощи электронных весов A&D EK-1200G с точностью 10^{-2} кг, влагосодержание W ГМ и почвы – при помощи анализатора влажности A&D MX-50 с точностью 0,01%. Температура воздуха, относительная влажность и атмосферное давление контролировались при помощи метеостанции Meteoscanner RS T01923 и измерителя температуры и скорости движения воздуха ТКА-ПКМ (модель 52).

В первой части экспериментов [205, 206] на каждой площадке были определены количественный состав доминирующих растений и запас РГМ, который в расчете на 1 м² составил: для 1-й, 2-й площадок – 0,135 кг; для 3-й площадки – 0,515 кг; для 4-й и 5-й площадок – 0,105 кг. Растительность представляла собой высохшую траву высотой до 0,5 м. Кроме того, на площадках имелся слой из живой травы около 0,08 м с отдельными включениями до 0,2 м.

Параметры окружающей среды составили: температура воздуха T 297–299 К, относительная влажность воздуха ϕ 15–21%, скорость ветра v 1,0–5,93 м/с, атмосферное давление P_e 738–741 мм рт. ст. Суммарные относительные погрешности определения параметров не превышали $\delta w/w \cdot 100\% \leq 3,3\%$, $\delta m/m \cdot 100\% \leq 1,2\%$, $\delta P_e/P_e \cdot 100\% \leq 6,0\%$, $\delta T/T \cdot 100\% \leq 5,3\%$, $\delta \phi/\phi \cdot 100\% \leq 2,5\%$.

Зажигание производилось равномерно по всей ширине площадки исследований путем создания зоны поджига, которая состояла из полосы льна, пропитанной легкими фракциями нефтепродуктов для быстрого и равномерного формирования фронта пожара. Температурные измерения осуществлялись при помощи гребенок термпар ХА, расположенных в продольном направлении относительно выбранной площадки исследований.

Термопары располагались на вертикальных стойках с шагом 1 м в направлении, параллельном фронту пожара, на высоте 0,25 м над уровнем земли.

Для определения вероятности загорания площадок от антропогенных источников (в данном случае горящая спичка) были проведены следующие эксперименты. На каждую площадку не менее трех раз случайным образом бросалась горящая спичка. Во всех случаях наблюдались воспламенение горючего материала и его устойчивое горение. Можно предположить, что при данном влагосодержании РГМ и появлении даже точечного источника загорания (горящая спичка, непотушенный окуроч) произойдет 100-процентное загорание и, как следствие, пожар.

По результатам видеосъемки была определена скорость горения на площадках 1, 3–5 (рис. 5.11), которая рассчитывалась по времени движения кромки пожара от одной стойки крепления термопар к другой. В связи с тем, что на второй площадке фронт пожара двигался навстречу камере, скорость его распространения определить не удалось.

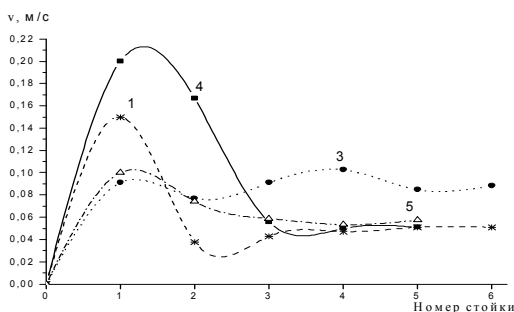


Рис. 5.11. Скорость горения на площадках 1, 3–5

Из рис. 5.11 следует, что скорость горения на 1-й стойке значительно выше, чем на следующих. Это связано с тем, что поджиг площадок происходил с помощью пропитанной нефтепродуктами полосы льна, горение которой сопровождалось выделением большого количества тепла. Таким образом, выделявшаяся энергия влияла на скорость распространения, поэтому первые две стойки можно исключить из рассмотрения. Также видно, что скорость горения на 3-й площадке примерно в 2 раза выше, чем на остальных. По-видимому, этот эффект связан с запасом РГМ, который на 3-й площадке в 4 раза выше, чем на 1, 4 и 5-й площадках. От стойки к стойке скорость меняется незначительно, что согласуется с данными других авторов [12, 174].

Во второй части экспериментов [209] при исследовании степных пожаров температура воздуха T варьировалась в пределах 289–293 К, относительная влажность воздуха ϕ – 32–45%, атмосферное давление P_e – 738–741 мм рт. ст., запас СГМ – 126,8–153,7 г/м². Скорость ветра (направление) составляла 1–8 м/с, температура и влагосодержание почвы – 287,8 К и 14,7% соответственно, влагосодержание доминирующих растений W (пырей, полын, типчак) – 11, 44 и 26,8% соответственно.

Данная серия экспериментов была посвящена определению вероятности зажигания площадок от антропогенных источников (в данном случае горящая спичка и древесные угли).

На площадку с запасом СГМ 0,185 кг/м² случайным образом бросали тлеющие угли. Масса углей варьировалась от $0,4 \times 10^{-3}$ до $3,5 \times 10^{-3}$ кг, при этом геометрические размеры составили $(10\text{--}20) \times 10^{-3}$ м в диаметре. Поверхностная температура, измеренная пирометром, изменялась в диапазоне 663–1 243 К. Согласно [210] удельная теплота сгорания древесного угля равна 33 890 кДж/кг, т.е. энергия, которую способны были выделить образцы угля, варьировалась в диапазоне 13,5–118,6 кДж. Во всех случаях воспламенения не наблюдалось. Для повышения вероятности воспламенения запас СГМ был искусственно завышен до 0,680 кг/м². В результате в отдельных случаях наблюдалось тление, которое не приводило к воспламенению. Можно предположить, что вероятность возникновения степного пожара от тлеющих частиц указанного размера мала, так как мала плотность растительного покрова и тлеющая частица не соприкасается с достаточным количеством элементов СГМ. Согласно [211] энергии углей должно быть достаточно для зажигания слоя СГМ. Но следует отметить, что влагосодержание типчака, который образовывал нижний ярус растительности и находился в непосредственной близости от брошенного угля, близко к критическим значениям влагосодержания для растений, указанных в [211]. Однако непосредственный контакт угля с элементами растительности отсутствовал, вследствие чего значительная часть энергии, выделяемой углем при горении, уходила в почву и окружающий воздух.

Во втором случае на площадки с запасом 0,185 кг/м² и 0,254 г/м² 30 раз случайным образом бросалась горящая спичка¹¹. Учитывая данные [24, 210], максимальная энергия, которую могла выделить при горении спичка, не превышала 1,5 кДж. В результате получили следующий процент воспламенения и устойчивого горения: для площадки с запасом 0,185 кг/м² – 57%, для площадки с запасом 0,254 кг/м² – 77%. Можно

¹¹ ГОСТ 1820–2001. Спички. Технические условия.

предположить, что величина запаса влияет на вероятность воспламенения и увеличение его на 37% (до 0,254 г/м²) в данных условиях приводит к увеличению вероятности появления пожара на 20%. Следует отметить, что наличие открытого источника огня даже малого размера приводит к резкому увеличению вероятности возникновения пожара в отличие от опытов с тлеющими частицами, что согласуется с работой [212].

Дополнительно были проведены эксперименты с использованием имитатора «огненного дождя» (совокупности точечных источников зажигания), представлявшего собой пиропатрон в виде цилиндрической трубки диаметром 15 мм, длиной 150 мм с толщиной стенки 1,5–2 мм, заполненной твердой газогенерирующей смесью с частицами активированного угля. Фрагменты активированного угля имели размеры от 2 до 5 мм, что позволяло регулировать время сгорания частиц и интенсивность тепловыделения в очаге пожара. В результате исследований обнаружено, что возгорание возникает только в одном из 9 случаев. Это обусловлено тем, что, с одной стороны, частицы имеют небольшой размер и в процессе полета выгорают, с другой стороны, они имеют небольшую энергию и под воздействием ветра долетают до слоя СГМ уже с энергией, недостаточной для воспламенения.

5.5. Исследование в природных условиях образования горящих частиц

Проблема распространения природных пожаров, которые являются причиной загорания домов и зданий, наблюдается уже более 100 лет. За это время уничтожены тысячи таких объектов. Ожидается, что влияние этих пожаров резко возрастет [213], так как довольно быстро увеличивается количество жилых построек в лесных районах [214]. Кроме того, глобальное изменение климата увеличивает вероятность и интенсивность лесных пожаров [215].

Основными факторами, влияющими на воспламенение строительных материалов и распространение таких пожаров, являются радиационный и конвективный перенос тепла от пламени и горящие частицы, которые могут накапливаться на крыше и в углах зданий, заборах или попасть внутрь помещений и привести к их возгоранию [216]. Образование горящих частиц – это процесс, в результате которого горючие материалы, такие как кустарники, деревья и строительные материалы, нагреваются и разделяются на более мелкие горящие частички во время пожара [217,

218]. Впоследствии частицы переносятся далеко от пожара посредством конвективной колонки [219], создавая точечные пожары и являясь причиной зажигания построек.

На протяжении последних 40 лет исследования были сосредоточены на изучении того, как далеко могут летать частицы [220–223], в то время как очень мало исследований посвящено их генерации [224]. Разработка эффективной методики для характеристики генерации горящих частиц и их падения позволит предложить решения для предотвращения возгораний на природно-урбанизированных территориях.

Поэтому для изучения характеристик образования горящих частиц был проведен натурный эксперимент в рамках крупного проекта, связанного с изучением топливной нагрузки на скорость распространения и интенсивность пожара [225]. Эксперимент представляет собой преднамеренный отжиг, который проводился на основном участке леса в районе Нью-Джерси, США, в марте 2013 г. Этот экспериментальный пожар дал возможность изучить образование горящих частиц на участке, для которого растительные горючие материалы были уже описаны как с помощью отбора образцов, так и с использованием лидара.

Кроме того, характеристики пожара, который был причиной образования горящих частиц, измерялись с помощью различных экспериментальных комплексов. Специальные вышки обеспечивали измерение температуры, скорости и направления ветра, тепловых потоков. Мульти-спектральная воздушная съемка позволяла регистрировать фронт распространения пожара как в видимом, так и в ИК спектре. Данные измерения позволили определить интенсивность пожара и связать ее с образованием частиц.

5.5.1. Описание участка и поведения пожара

Эксперимент был проведен в Национальном сосновом заповеднике на юге штата Нью-Джерси, США. Местность представляла собой равнину с небольшими склонами. Почвы – песчаные, кислые, имеющие чрезвычайно низкое количество питательных веществ. Верхний ярус леса состоял из дубовых и сосновых пород. Участок имел площадь около 6 га с преобладанием смоляной сосны (*Pinus rigida* Mill.) и раскидистого дуба (*Quercus* spp.). Нижний ярус состоял из кустарника, дуба, черники (*Gaylussacia* spp.) и голубики (*Vaccinium* spp.).

На экспериментальном участке была установлена сеть из четырех метеорологических башен в верхнем ярусе леса и двенадцати башен в подлеске. Три башни в верхнем ярусе высотой 12,5 м были расположены внутри участка, а четвертая «контрольная» башня располагалась с подветренной стороны на соседнем участке. На башнях установлены следующие датчики: ультразвуковые анемометры (RM 80001V, R.M. Young Co.®) в верхней части каждой башни для обеспечения измерения трех компонент скорости ветра и температуры с высокой частотой (10 Гц), а также целый ряд термопар (Omega SSRTC-GG-K-36-36, Omega Scientific®), расположенных на башнях через каждые 1,5 м. Данные измерений записывались на регистраторы (CR-7000, Campbell Scientific®), помещенные в водонепроницаемые контейнеры. На «контрольной» башне были установлены дополнительные датчики для измерения скорости и направления ветра, температуры воздуха и относительной влажности, падающего коротковолнового и суммарного излучений, атмосферного давления, теплового потока в почве на глубине 10 см, температуры почвы, влагосодержания и температуры опада. Горизонтальные оси ультразвуковых анемометров были ориентированы в направлении восток – запад и север – юг (истинный север). Это позволило оценить трехмерные режимы турбулентности до, во время и после прохождения фронта пожара сквозь башни.

Кроме того, характеристики пожара измерялись с помощью инструментальных комплексов (FBP) предоставленных Лесной службой США. Эти комплексы предназначены для быстрой установки и обеспечения измерений целого ряда различных характеристик пожара [226]. Комплекс включает в себя сдвоенный датчик теплового потока (модель 64–20T, Medtherm®), который позволяет измерять как радиационный, так и суммарный тепловой поток, термопары типа К (0,13 мм диаметр), два датчика движения потока (для вертикальной и горизонтальной компонент) и созданный по заказу узконаправленный радиометр [227]. Установленные на участке комплексы с датчиками были ориентированы с востока на запад. Полученные данные записывались с частотой 10 Гц с использованием регистратора данных (CR1000, Campbell Scientific®). Кроме того, ряд цифровых и аналоговых камер был размещен по всему участку. Эти камеры были предназначены для регистрации характеристик пожара, таких как геометрические размеры пламени. Упрощенная схема расположения приборов представлена на рис. 5.12. Следует отметить, что на схеме изображена только одна камера и не показаны башни, расположенные в подлеске.

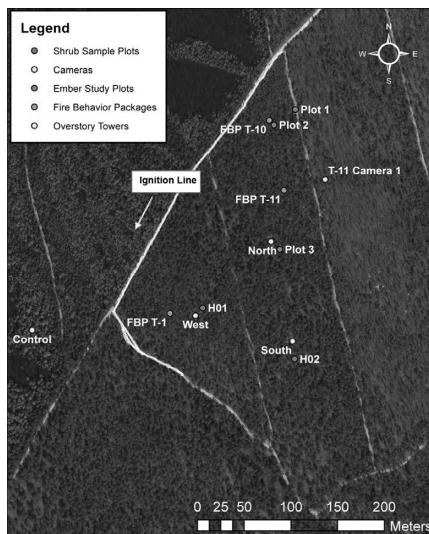


Рис. 5.12. Расположение наиболее важных установок на участке:

Plot 1, 2, 3 – площадки 1, 2 и 3 соответственно;

FBP T-1, T-10, T-11 – инструментальные комплексы 1, 10 и 11 соответственно;

North, South, West, Control – метеорологические башни

Для того чтобы понять механизм образования горящих частиц, необходимо получить представление о характеристиках пожара. Во время эксперимента на участке где проводилось исследование горящих частиц, наблюдался низовой лесной пожар. Изучение участка после пожара показало, что кроны деревьев не подверглись воздействию пожара. Отсутствие верхового пожара также подтверждается видеозаписью. На рис. 5.13 показан один кадр видеозаписи с FBP T-11, который был расположен в месте, где происходило изучение горящих частиц.

Другим показателем поведения пожара является профиль температуры, зарегистрированный на больших башнях верхнего яруса. На рис. 5.14 показаны максимальные температуры, зарегистрированные с термодпар, расположенных на разных высотах Северной башни. Территория вокруг башни была незначительно очищена от горючих материалов в процессе сборки и установки оборудования, в результате чего регистрируются низкие температуры, измеренные даже близко к поверхности. Тем не менее отсутствие высоких температур дальше в пологое леса подтверждает предположение об отсутствии верхового пожара в этой области.



Рис. 5.13. Кадр видеозаписи с камеры Т-11 во время пожара

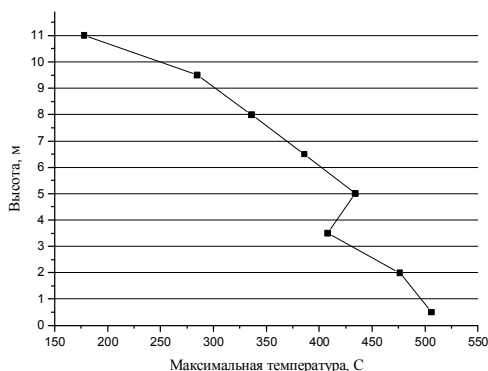


Рис. 5.14. Максимально зарегистрированные температуры на Северной башне верхнего яруса

Погрешность измерения температуры составила порядка $\pm 50^{\circ}\text{C}$ [226]. Таким образом, скачок максимальной температуры на высоте 3,5 м может быть отнесен к ошибкам измерения. Кроме того, измерения лучистого потока и температуры, полученные с использованием ФВР Т-10 и Т-11, могут быть использованы для изучения интенсивности пожара. Измерения потоков, по оценкам, имели погрешность менее $\pm 3 \text{ кВт м}^{-2}$. Несмотря на то что видеозапись не была доступна с башни 10, сравнения между измерениями ФВР в этих двух местах могут помочь оценить относительную интенсивность пожара. Из табл. 5.11 видно, что в обоих местах суммарный лучистый поток и время воздействия (оцененное с использованием данных о потоке и температуре) имеют близкие значения. Таким образом, разумно предположить, что интенсивность пожара, наблюдаемого на

видео рядом с FBP T-11 (рис. 5.14), сопоставима с той, что была рядом с FBP T-10.

Таблица 5.11

Сравнение данных, полученных с FBP T-10 и T-11

Местоположение	Суммарный радиационный поток ($>1 \text{ кВт м}^{-2}$), кДж м^{-2}	Время воздействия (температура $>100^\circ\text{C}$), с
FBP T-10	8 810	106
FBP T-11	8 503	93

Температурные интервалы были взяты от первого до последнего измеренного значения в 100°C , в то время как значения потока излучения – по всему интегралу (от первого до последнего измеренного значения $\geq 1 \text{ кВт м}^{-2}$). Найденные значения этих интегралов соответствуют данным, полученным D. Frankman и др. [228], для низовых пожаров. Пик значений потока излучения также был использован для грубой оценки скорости распространения. Если предположить, что фронт пожара продвигался между FBP T-10 и T-11, то скорость распространения равна $0,19 \text{ м/с}$.

Стоит также отметить, что измерение ветра в верхнем ярусе (ультразвуковые анемометры на больших башнях) и подлеске (датчики давления на FBPS) показало очень низкие значения. До пожара приземный ветер внутри полога леса был близок к нулю. В верхнем ярусе леса скорость ветра не превышала 7 м/с со средним значением около $1,6 \text{ м/с}$. Явная инверсия направления течения приземного ветра показывает, что ветер, генерируемый пожаром, преобладает над естественным ветром. Действительно, наблюдался рост величины приземного ветра примерно в 5 раз как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях. Значительное влияние пожара на локальный ветер при прохождении фронта пожара также можно увидеть на видеозаписях.

Все проведенные измерения указывают на низовой пожар в условиях слабого ветра, при котором локальный поток сильно зависел от сил плавучести или конвективной колонки. В работе F. Morandini и X. Silvani [229] по исследованию низового лесного пожара при слабом ветре была измерена интенсивность пожара как показатель тепла, выделяющегося в единицу времени на единицу длины фронта пожара, которая изменялась в диапазоне $8\,300\text{--}31\,000 \text{ кВт м}^{-1}$. Полученные нами значения находятся в соответствии с результатами измерений для других подобных пожаров. Таким образом, можно предположить, что исследование образования горящих частиц в данном эксперименте соответствует интенсивности пожара в пределах этого диапазона.

5.5.2. Исследование горящих частиц

Для сбора частиц за основу взяли методику, предложенную ранее в [217]. На трех площадках на землю укладывался огнестойкий лист гипсокартона, выровненный по уровню. На лист расставляли по 20 алюминиевых поддонов размером $0,3 \times 0,24$ м каждый (рис. 5.15, *a* и *b*). Площадь поддонов составила $1,4 \text{ м}^2$. На дно каждого поддона укладывали пластиковую сетку с диаметром ячеек 2 мм для последующего извлечения собранных частиц. В поддоны наливали воду для тушения горящих частиц, попавших в них. Площадка 1 была расположена рядом с дорожкой (рис. 5.12), площадка 2 – рядом с башней 10 и площадка 3 – рядом с башней 12. Только на площадке 2 поддоны были накрыты тонкой пластиковой пленкой (рис. 5.15, *b*). Предварительные лабораторные эксперименты показали, что пленка позволяет определить местоположение и ориентировочные размеры упавшей частицы, а также понять, в каком состоянии находилась частица в момент падения. Если частица имела достаточную энергию, то она либо проходила сквозь пленку и затухала в воде, либо приклеивалась к пленке. Это означало, что собранные частицы были или в пламенном или тлеющем режиме. Поэтому большое количество частиц, найденных на площадке 3, можно объяснить тем, что без пленки мы не можем отделить горящие частицы от холодных, упавших после пожара. Следует отметить, что интенсивность пожара была не одинаковой на площадках участка. На рис. 5.16, *a* и *b* представлены фотографии площадок 2 и 3 соответственно после пожара.

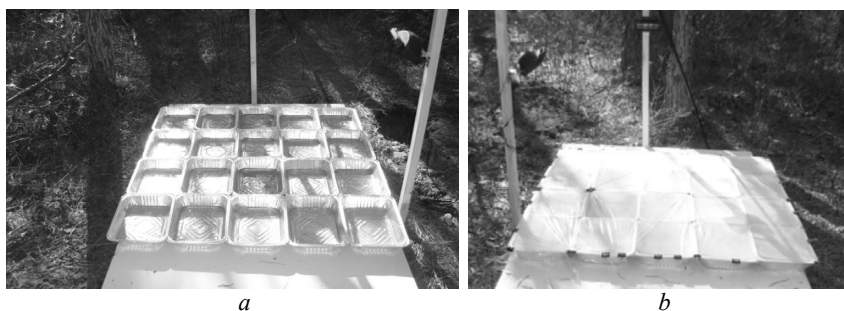


Рис. 5.15. Экспериментальные площадки: *a* – площадка 1, не покрытая пленкой; *b* – площадка 2, покрытая пленкой

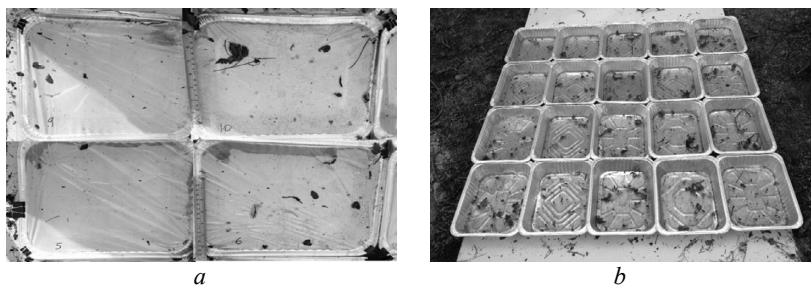


Рис. 5.16. Площадки после пожара: *a* – площадка 2; *b* – площадка 3

Собранные частицы высушивались в печи при температуре 80°C и затем взвешивались на лабораторных весах. При этом учитывались только частицы с массой более 5 мг. У частиц измеряли длину (>0,5 см) и ширину с помощью электронного штангенциркуля. Погрешность измерений составила не более 6%. В табл. 5.12 приведено количество частиц, собранных на площадках, в зависимости от площади поверхности и массы. На рис. 5.17 показаны частицы, собранные в результате эксперимента.

Таблица 5.12

Количество частиц в зависимости от площади поверхности и массы

Номер площадки	Количество частиц												
	Площадь поверхности $\times 10^{-3} \text{ м}^2$							Масса (> 0,005 г)					
	0–10	10–20	20–30	30–50	>50	Всего	Всего (м^{-2})	0,005–0,01	0,01–0,02	0,02–0,05	0,05–0,1	>0,1	Всего
Площадка 1	53	22	9	7	3	94	67	41	23	12	5	2	83
Площадка 2	62	26	7	0	3	98	70	26	27	4	2	2	61
Площадка 3	212	138	63	34	28	475	339	94	125	78	21	15	333

Следует отметить, что большинство частиц составляли чешуйки коры (70–89% для площадок 1–3), остальные – это веточки сосны и кустарников. Предварительный анализ распределения частиц в поддонах не показал никакой зависимости между расположением поддона на площадке и количеством частиц. Распределение частиц по массе представлено на рис. 5.18.

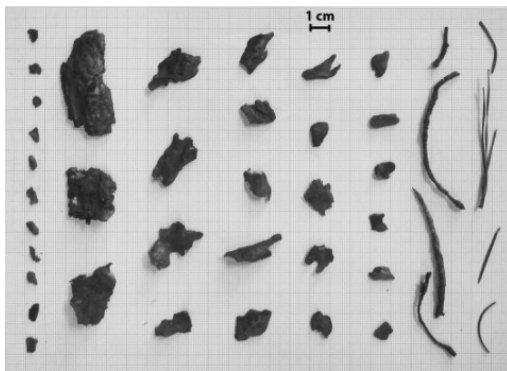


Рис. 5.17. Образцы горящих частиц

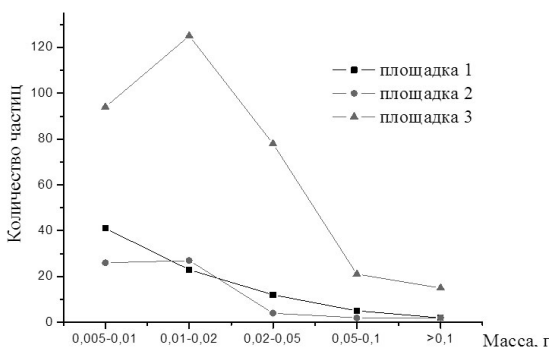


Рис. 5.18. Распределение частиц для различных диапазонов массы

Большинство частиц имело массу от 5 до 20 мг, и только несколько частиц было обнаружено с массой более 0,1 г.

Анализ размера частиц показал, что большинство (45–63%) – это частицы с удельной поверхностью $(0-10) \times 10^{-5} \text{ м}^2$. Около 80% всех частиц находилось в диапазоне $(0-20) \times 10^{-5} \text{ м}^2$. Для 21 частицы на площадке 3 была измерена толщина, которая варьировалась от 0,53 до 4,48 мм, среднее значение 1,65 мм. Только две частицы были более 3 мм, и одна из них была толщиной более 1 см. На рис. 5.19 приведено распределение площади поверхности частиц для трех площадок.

Ясно видно, что количество частиц уменьшается по мере увеличения площади поверхности. Эта зависимость может быть описана кубическим уравнением. Для объяснения отсутствия частиц на площадке 2 в

диапазоне $(30-50) \times 10^{-5} \text{ м}^2$ необходимо провести дополнительные эксперименты.

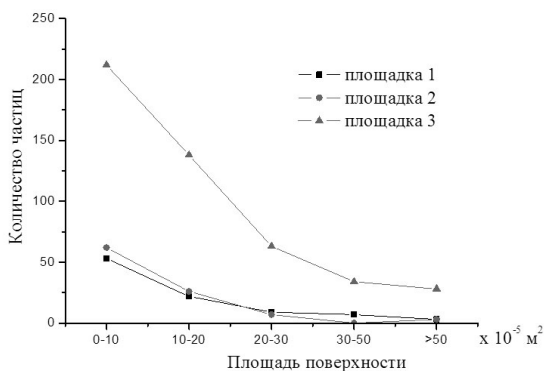


Рис. 5.19. Распределение частиц по площади поверхности

Видно, что имеются схожие результаты для площадки 1 (без пленки) и площадки 2 (с пленкой). Площадка 1 была около дорожки (см. рис. 5.12), и, следовательно, она была менее подвержена воздействию фронта пожара и получила частицы во время пожара, а не после. Площадка 2 была больше подвержена воздействию пожара, но пленка позволила отделить частицы от холодных частиц, упавших с деревьев после пожара. Следует отметить, что площадка 3 содержит примерно в 6 раз больше частиц, чем площадки 1 и 2. Если разделить количество частиц на площадке 3 на 6, то получим результаты, представленные на рис. 5.20, 5.21.

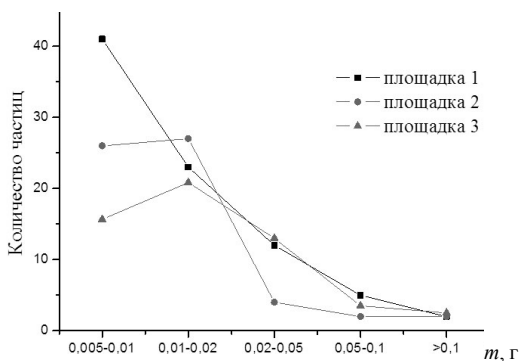


Рис. 5.20. Распределение частиц по массе

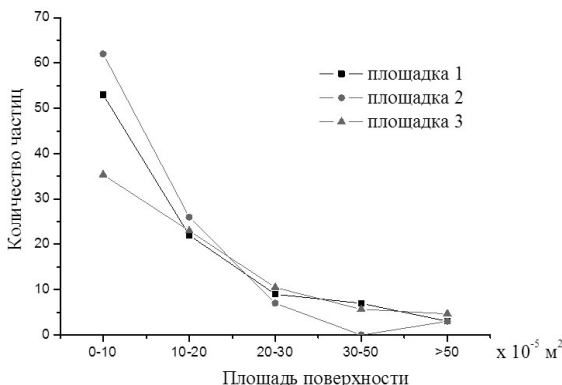


Рис. 5.21. Распределение частиц по площади поверхности

Из рис. 5.20, 5.21 видно, что наблюдается один и тот же тренд для частиц больше 10^{-4} м² и тяжелее 10 мг. Отсюда можно предположить, что 5/6 частиц на площадке 3 упало после пожара. Существенное различие наблюдается только для маленьких и легких частиц. Это означает, что большая часть мелких частиц упала во время пожара на площадке 3, чем на площадках 1 и 2.

5.5.3. Исследование выгорания сосновой коры

Как уже отмечалось, большинство найденных частиц составляли частички коры. Поэтому важно определить, какой вклад вносит кора в образование частиц при лесном пожаре. На рис. 5.22 наглядно показано, что ствол дерева подвергся воздействию низового лесного пожара, и это не только в результате горения тонких веточек и кустарников. В целях измерения вариации окружности / диаметра ствола была апробирована методика, в результате которой было показано, что определенное количество коры ствола дерева сгорает в результате пожара.

Измерения были проведены для 3 сосновых деревьев. Для этого вбивали гвозди вокруг ствола дерева на определенных высотах, что позволяло исследовать длину окружности до и после лесного пожара путем измерения расстояния между гвоздями. Это позволило оценить изменение диаметра ствола. Вычитая длины окружностей до и после пожара, получили распределение их вариаций (рис. 5.23) с погрешностью 2,0 мм.



Рис. 5.22. Ствол дерева до и после пожара

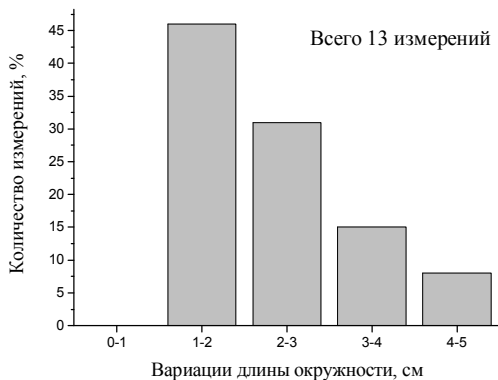


Рис. 5.23. Вариации длин окружностей после пожара

Около 45% вариаций длин окружностей находились в диапазоне от 10 до 20 мм, значительно превышая величину погрешности измерений. Остальные достигали 50 мм, чего нельзя не принять во внимание. Также следует отметить, что кора может в результате воздействия тепла расслаиваться и расширяться. Поэтому измеренные вариации могут иметь погрешности из-за этого. Для учета данного эффекта были проведены измерения диаметра стволов. Так как ствол дерева нельзя рассматривать как идеальный цилиндр, то были измерены 4 радиуса для 4 секторов по 90° на разных высотах до и после пожара. На рис. 5.24 представлено распределение вариаций радиусов для различных диапазонов размеров. По-

грешность измерений в результате перехода от окружности к радиусу составила 0,32 мм.

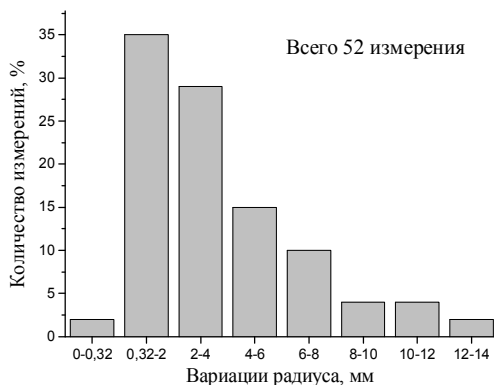


Рис. 5.24. Вариации радиусов после пожара

Приведенное распределение показывает, что во время пожара выгорало вглубь несколько миллиметров коры. Большинство вариаций находится между 0,32 и 4 мм и может достигать местами 14 мм.

С помощью этого простого метода были успешно измерены окружности с приемлемой погрешностью. Большинство изменений окружности находились в диапазоне от 10 до 30 мм, а радиуса – между 0,32 и 4 мм (с максимальным значением около 14 мм), который имел тот же порядок величин толщины коры, собранной в поддонах. Это свидетельствует о том, что кора вносит вклад в процесс распространения пожара.

5.6. Выводы

В результате проделанной работы в данной главе были получены следующие результаты и сделаны выводы:

1. Создана база данных типичных РГМ Тимирязевского лесхоза и Бакчарского района Томской области (прил. 1, 4).

2. Увеличение плотности слоя ЛГМ до некоторого критического значения влечет за собой рост скорости распространения пламени. Увеличение количества листы в общем составе смеси приводит к уменьшению скорости горения.

3. При моделировании скорости горения смеси из хвойных и лиственных горючих материалов допустимо проводить расчеты только для хвой-

ного проводника горения, так как им определяется скорость распространения волны горения.

4. После кратковременного воздействия (до 5 с) мощных потоков лучистой энергии (до $1\,500\text{ кВт/м}^2$) устойчивое горение или тление древесины сосны и березы маловероятно (менее 2%).

5. Начальная температура образца однозначно влияет на время воспламенения образцов древесины, но с ростом плотности потока лучистой энергии разница во времени воспламенения становится незначительной.

6. Через 1,5 мин после попадания источника открытого огня в слой СГМ формируется устойчивый фронт степного пожара, который распространяется в направлении скорости ветра.

7. Наиболее вероятной причиной возникновения степного пожара в пожароопасный сезон является источник открытого огня, которым может являться даже брошенная спичка. Вероятность возникновения степного пожара от горящей спички зависит от запаса СГМ и для запаса $0,254\text{ кг/м}^2$ достигает 77%.

8. Возникновение степного пожара от тлеющих частиц массой до 3,5 г и максимальной энергией 118,6 кДж маловероятно.

9. Разработаны две различные методологии для изучения генерации горящих частиц, образующихся в результате низового лесного пожара.

10. Изучены количество и характеристики (масса и размеры) частиц, образованных в результате пожара на 3 участках. Обнаружено, что большинство частиц (от 70 до 89%) были кусочками коры. Около 30% всех частиц имели массу от 10 до 20 мг и только несколько из них – более 0,1 г. Около 80% всех частиц имели площадь поверхности в диапазоне $(0\text{--}20)\times 10^{-5}\text{ м}^2$. Толщина частиц не превышала 0,5 см. Количество частиц уменьшалось с увеличением их площади поверхности.

11. Было установлено, что количество частиц той же площади поверхности и массы на площадке 3 в 6 раз больше по сравнению с площадкой 1, которая была на краю участка и площадки 2, которая была покрыта пленкой, позволяющей отделить частицы, упавшие после пожара.

12. Предложена методика для измерения уменьшения окружности / диаметра стволов деревьев на разных высотах после пожара. Для этого три сосны на участке были выбраны случайным образом. Было установлено, что поверхности стволов обгорали более чем на 2 м в высоту, не смотря на отсутствие верхового пожара. Изменение окружности находилось в диапазоне от 10 до 30 мм, а радиуса – от 0,32 до 4 мм, при этом изменения радиуса могли достигать до 14 мм, что имело тот же порядок величин, что и частички коры, собранные на площадках.

ГЛАВА 6. ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОГНОЗА ВОЗНИКНОВЕНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ В ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ

В настоящее время актуальны задачи реализации моделей прогноза природных пожаров на ЭВМ. Особый интерес представляют программные комплексы, реализующие визуализацию численного моделирования в геоинформационных системах. Подобные комплексы обеспечивают наглядность получаемых результатов и простоту обработки данных.

Создание программных вычислительных систем и комплексов, позволяющих прогнозировать поведение природных пожаров и оценивать уровень опасности в режиме реального времени, является основной целью физико-математического моделирования. Среди разработанных в последние годы и внедренных компьютерных систем прогноза пожарной опасности можно выделить системы, представленные в [9, 230, 231]. В качестве общего недостатка данных систем следует отметить их неуниверсальность, т.е. невозможность их использования в любой точке мира без предварительной адаптации. Это связано в первую очередь с тем, что в данные системы заложены эмпирические данные, полученные для определенных РГМ и климатических условий, которые существенно отличаются в разных частях света. Кроме того, большинству систем присущи неточности и ошибки, возникающие при реализации заложенных в них математических моделей, например, при вводе новых данных система может выдавать неадекватные результаты.

Возможность реализации той или иной модели с помощью ЭВМ гарантирует ее дальнейшее использование в практических целях. Поэтому, как правило, на практике используются упрощенные математические модели. Основным требованием к таким моделям является простота и малое время счета. Не следует забывать, что в реальных условиях такие системы оперируют с огромным числом данных, поэтому возможности даже современных компьютерных систем не способны реализовать весь объем вычислений, заложенный в теоретические модели лесных пожаров, в режиме, необходимом для оперативного использования полученных результатов. Иными словами, время работы системы прогноза пожара должно быть сопоставимо со временем, необходимым для принятия

решений, направленных на предупреждение или тушение пожара, эвакуацию людей или других принципиальных мер.

С развитием геоинформационных технологий, появилась возможность реализовывать интегрированные системы прогноза природных пожаров, работающие непосредственно с использованием картографических материалов, представленных в электронном виде. В такие карты может быть заложена информация о топографических особенностях местности и распределении РГМ. Полученный при этом результат представляется возможным отобразить с помощью графических средств, что, безусловно, способствует более эффективной работе людей, управляющих поведением пожара.

6.1. Создание крупномасштабных векторных карт для прогноза возникновения и распространения пожаров

Основной базисной информацией в завершенной геоинформационной системе мониторинга лесных пожаров должна быть картографическая база данных по состоянию лесного и почвенного покрова. Эти данные необходимы прежде всего для оценки пространственного распределения степени пожарной опасности на заданной территории. В связи с этим требуется создание крупномасштабных карт.

Для визуализации результатов моделирования лесных пожаров в соответствии с лесотаксационными описаниями¹² была создана электронная карта Жуковского лесничества Тимирязевского лесхоза Томской области, которая позволяет получать детальную информацию о лесорастительных условиях территории [232]. В качестве топографической основы используется карта Томской области, имеющая следующие базовые покрытия: реки и озера, дороги, населенные пункты. В составе созданной цифровой карты имеются следующие тематические слои: кварталы лесничества¹³, выделы¹⁴ и дороги. В качестве атрибутивной информации используются стандартное лесотаксационное описание выделов, а также данные о запасе, начальном влагосодержании и термокинетических постоянных РГМ, полученных в результате проведенных ранее экспедиций [19].

¹² Лесотаксационное описание – это паспорт лесного участка, по которому можно судить о его ценности и состоянии и намечать лесохозяйственные мероприятия.

¹³ Квартальная сеть – схема деления лесного массива на части, более-менее сходные по размеру.

¹⁴ Выдел – достаточно однотипный лесной участок, являющийся частью квартала.

При создании карты использовалась следующая технология. На первом этапе было получено растровое изображение Жуковского лесничества с помощью сканера. Затем оно было импортировано в программу Easy Trace 8.4 PRO, где с помощью внутренних инструментов было создано монохромное изображение с границами кварталов и выделов (рис. 6.1).

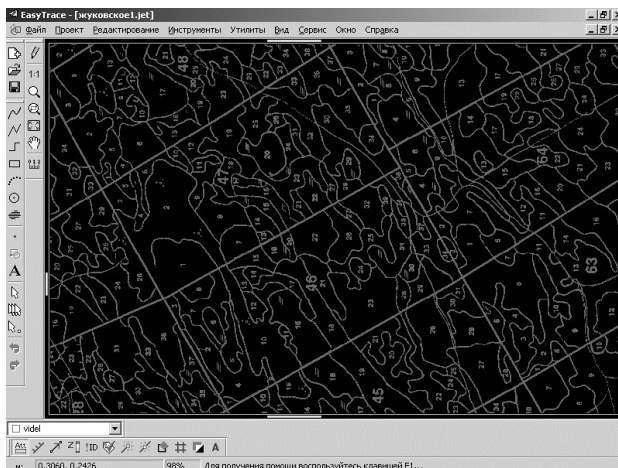


Рис. 6.1. Монохромное изображение с границами кварталов и выделов Жуковского лесничества

На втором этапе была проведена оцифровка границ и созданы векторные слои кварталов, выделов и дорог. Далее они были экспортированы в shp-файлы. На следующем этапе созданные shp-файлы были добавлены в ArcMap, где с помощью инструмента Spatial Adjustment была осуществлена «привязка» полученных слоев к векторной карте Томской области (рис. 6.2).

На рис. 6.3 показан пример созданной электронной карты с делением по выделам и кварталам.

Затем было проведено наполнение атрибутивных таблиц информацией по каждому выделу, включающей в себя тип леса, полноту, группу возраста, бонитет, площадь, тип покрова (рис. 6.4).

В результате проделанной работы была разработана технология создания электронных карт для новой системы прогноза возникновения и распространения природных пожаров с делением территории по кварталам и выделам в соответствии с лесотаксационными описаниями.

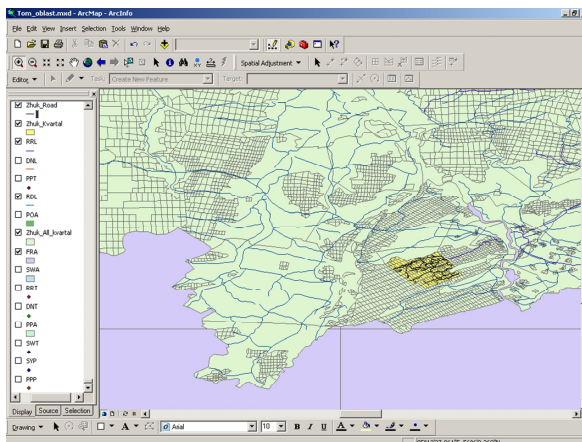


Рис. 6.2. Электронная карта Жуковского лесничества с «привязкой» к Томской области

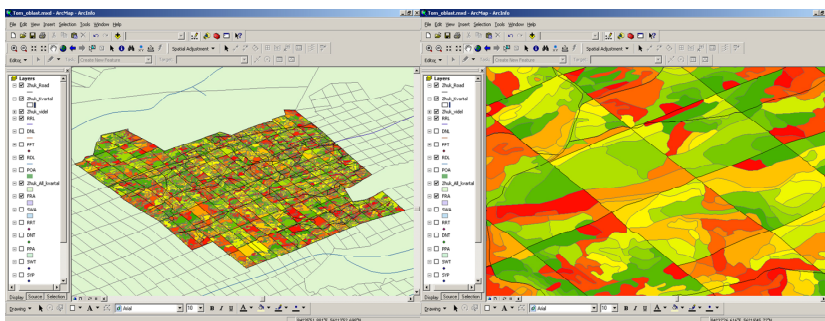


Рис. 6.3. Пример работы геоинформационной системы прогноза лесной пожарной опасности на основе виртуальных данных на примере Жуковского лесничества

ArcView GIS 3.2a

Файл Редактировать Таблица Поле Окно Справка

0 27 выбрано

Videl_lines.dbf

Kvartal	Videl	Ploshchad_les	Tip_les	Gruppy_vozr	Pishota	Ploshchad	Tip_pokrov	Vozrast_slo	Vozrast
32	26	000000	00000	0	0.0	2.9		0.02	
81	13	000000	00000	0	0.0	0.7	23	0.02	
27	26	Sosna	SF	0	0.0	6.4	8	0.049333	
72	10	Sosna	YaMSh	0	0.0	3.0	3	0.013333	
67	24	Bereza		3	0.7	6.5	8	0.063333	
78	38	Bereza		4	0.7	12.2	22	0.01	
102	5	Bereza	DM	7	0.7	2.4	24	0.041	
76	34	Bereza	MSh	6	0.6	8.4	4	0.015	
69	3	Bereza	MSh	7	0.3	2.9	8	0.049333	
75	15	Bereza	MSh	7	0.8	4.2	24	0.099	
30	13	Bereza	OSRT	4	0.6	4.6	7	0.036667	
33	20	Bereza	OSRT	5	0.9	0.9	32	0.016667	
28	3	Bereza	OSRT	6	0.4	2.1	32	0.013333	
26	26	Bereza	OSF	3	0.5	3.4		0.043333	

Рис. 6.4. Атрибутивная информация о характеристиках типичных выделов

Разработанная электронная карта территории позволяет:

1. Учитывать состояние напочвенных РГМ и их горимость.
3. Представлять результаты моделирования на электронной карте для оценки пожароопасной ситуации на данной территории.
4. Осуществлять оперативный документированный обмен информацией.

Для представления результатов моделирования торфяных пожаров мы воспользовались электронной картой Бакчарского лесхоза Томской области, предоставленной Сибирским научно-исследовательским институтом сельского хозяйства и торфа Россельхозакадемии.

6.2. Состав и структура программного комплекса прогноза возникновения и распространения природных пожаров

Геоинформационное обеспечение программного комплекса прогноза возникновения и распространения природных пожаров (ПК ПВиРПП) должно включать пять основных компонент, как показано на рис. 6.5 [233, 234]. Это цифровые карты, базы данных, детерминированно-вероятностная методика, которая объединяет в себя компьютерные программы и математические модели [235, 236].

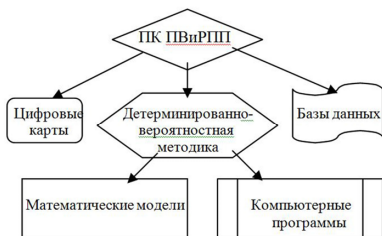


Рис. 6.5. Состав ПК ПВиРПП

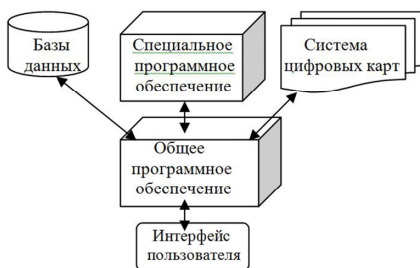


Рис. 6.6. Обобщенная структура ПК ПВиРПП

На рис. 6.6 представлена обобщенная структура ПК ПВиРПП, которая включает в себя базы данных (БД), специальное программное обеспечение, системы цифровых карт, общее программное обеспечение, интерфейс пользователя.

В составе общего программного обеспечения ГИС используются средства геоинформационной системы ArcView GIS 3.2, позволяющие отображать интересующую нас информацию или результат ее обработки на цифровых картах, вести раздел картографической информации и выполнять связанный с нею набор функций [237]:

- обслуживание информационных запросов по лесотаксационным единицам, включающим как логические (поиск по заданному набору характеристик), так и пространственные критерии (поиск по карте);
- обновление и редактирование баз данных;
- оформление и вывод тематических карт территорий.

В качестве системы управления базой данных (СУБД) используются встроенные средства ArcView GIS 3.2, которые поддерживают формат данных, совместимый с dBASE IV.

Специальное программное обеспечение в данной ГИС предназначено для задач ввода и обработки информации с применением средств ГИС, для задач моделирования, комплексного анализа, прогноза пожарной опасности, распространения пожаров и других прикладных задач. Поэтому в состав специального программного обеспечения включаются программные средства моделирования процессов функционирования объекта исследований и воздействия на него других объектов окружающей среды. Входящие в состав специального программного обеспечения прикладные программы обработки данных включены в среду ГИС с помощью языка AVENUE.

Использование разнородной информации для решения задачи прогноза лесной пожарной опасности требует учета ее пространственных свойств (административное, лесотаксационное, ландшафтное, видовое районирование, географическая «привязка» населенных пунктов). Поэтому система цифровых карт включает топографическую основу и тематические слои. В качестве топографической основы используется карта Томской области масштаба 1:500 000, имеющая следующие базовые покрытия: реки и озера, дороги, населенные пункты. В составе системы цифровых карт имеются следующие тематические слои: лесничества, контуры лесничеств, квартальная сетка, южная граница лесхоза, кварталы лесхоза как полигональные объекты.

Время ввода информации и отображения результатов в ArcView составляет менее минуты. Расчеты проводились на компьютере с процессором AMD Atlon 3700 Гц и оперативной памятью 2 Гб. Минимальные требования к программному обеспечению экспертной системы ПЛПО: операционная система Windows XP, геоинформационная система ArcView GIS 3.2.

Информация, поставляемая в БД ГИС, была получена из различных учреждений и органов федерального и территориального управления (лесные хозяйства, гидрометеоцентры) [238], а также в результате экспедиционных исследований.

6.3. Описание работы программного комплекса

6.3.1. Интерфейс (оболочка) для ввода исходных данных и вывода результатов математического моделирования в графическом виде

Основное окно проекта (на примере работы прогноза лесной пожарной опасности). Основным окном проекта является окно вида, включающее в себя несколько активных тем. Используемая топографическая основа состоит из карты Томской области, карты населенных пунктов Томской области, карты Жуковского лесничества Тимирязевского лесхоза Томской области (рис. 6.7) и карты торфяников, расположенных на территории Бакcharского района Томской области.

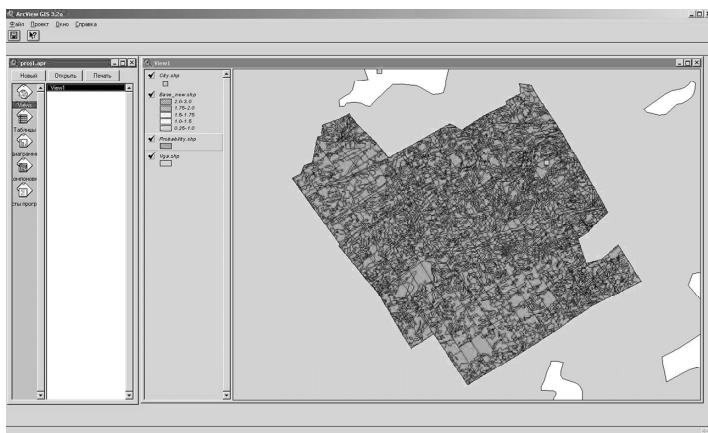


Рис. 6.7. Стартовый интерфейс проекта

С помощью Avenue были написаны модули (инструменты), которые связывают результаты прогноза возникновения и расчета контура пожара с цифровой картой (рис. 6.8).

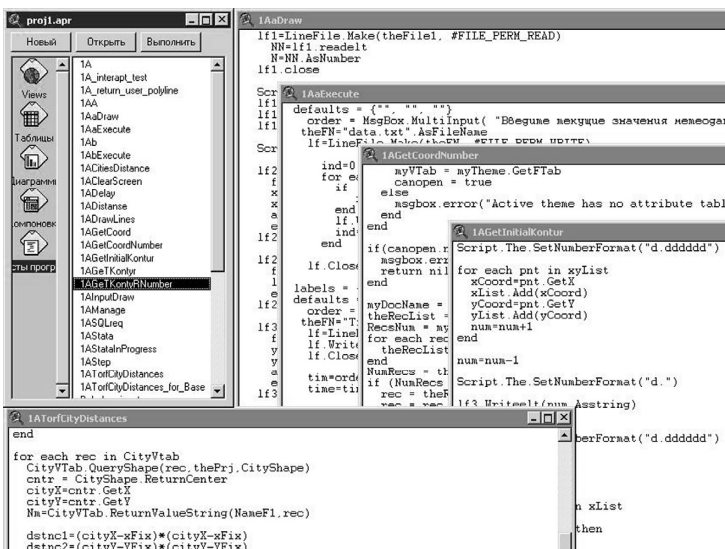


Рис. 6.8. Программы управления системами прогноза возникновения и распространения пожаров

При переходе в окно вида становится доступной панель инструментов (рис. 6.9), в том числе панель управления разработанными средствами прогноза лесной пожарной опасности (рис. 6.10).

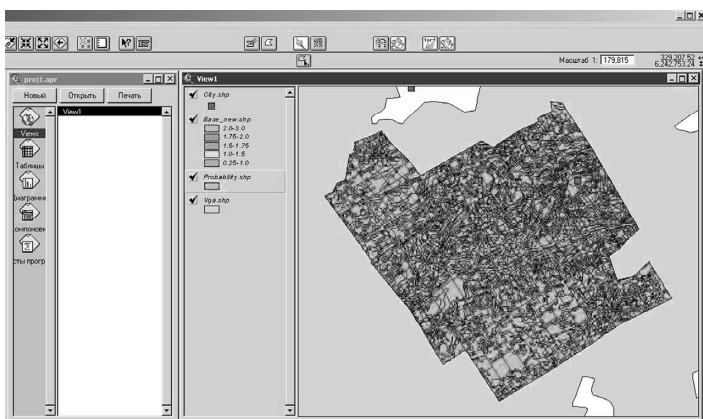


Рис. 6.9. Активное окно вида с панелью инструментов пользователя



Рис. 6.10. Панель управления разработанными средствами прогноза торфяной пожарной опасности

Комплекс предусматривает визуализацию прогноза возникновения лесных, степных и торфяных пожаров и двух вариантов распространения контура низового лесного пожара. Для каждого варианта в графическом интерфейсе пользователя ArcView создан свой инструмент, который при нажатии на него производит выполнение определенных действий.

Основными средствами ввода данных и управления отображением результата являются инструменты, представленные на рис. 6.11.



Рис. 6.11. Основные инструменты управления вводом данных, прогнозом и способами представления результатов

Инструменты, условно объединенные в группу 1, используются для прогноза торфяной пожарной опасности и отображения её результатов в активной теме. Инструменты в группе 2 позволяют оценить лесную пожарную опасность и представить результат прогноза в виде цветовой схемы пожарной опасности. Инструменты группы 3 позволяют моделировать распространение низового лесного пожара. Инструменты группы 4 используются для удаления результатов прогноза распространения лесного пожара, а также для восстановления результата последнего прогноза.

6.3.2. Визуализация результатов прогноза лесной, степной и торфяной пожарной опасности

Прогноз лесной и степной пожарной опасности. В качестве топографической основы в пакете прикладных программ используется карта Томской области (рис. 6.12, а), имеющая следующие базовые покрытия: реки, озера, дороги и населенные пункты [239]. Для представления ре-

зультатов численного моделирования использовались электронная карта Жуковского лесничества Тимирязевского лесхоза Томской области (рис. 6.12, *b*), которая позволяет получать детальную информацию о лесорастительных условиях территории.

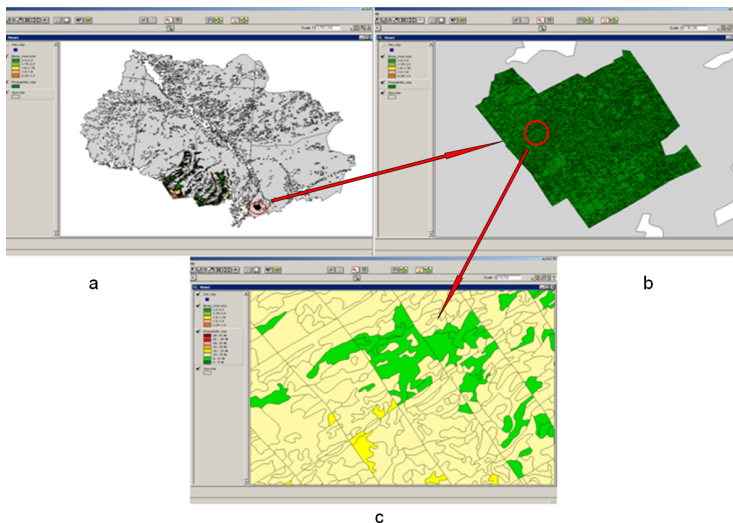


Рис. 6.12. Электронная карта: *a* – Томской области; *b* – Жуковского лесничества; *c* – кварталов и выделов лесничества

На первом шаге оператор включает соответствующий инструмент и в открывшемся диалоговом окне вводит метеоданные: текущую температуру воздуха и почвы в °C, относительную влажность воздуха в %, скорость ветра в м/с, количество выпавших осадков в мм и суммарную солнечную радиацию в Вт/м² (рис. 6.13).

Затем ArcView обращается к программе для расчета вероятности возникновения пожара по разработанной методике [19]. Результаты работы программы записываются в виде таблицы значений вероятности возникновения пожара для каждого выдела леса в текстовый файл. Далее осуществляется автоматическое связывание данной таблицы с атрибутивной таблицей лесотаксационного описания и представление результата прогноза в виде цветовой шкалы (рис. 6.14).

Каждый выдел имеет свою цветовую заливку, цвет которой соответствует значению вероятности возникновения пожара. Цвет заливки меняется от зеленого к красному, соответствующему максимальной вероятности

сти возникновения пожара. Это позволяет наглядно представить результаты прогноза и оперативно оценить пожарную ситуацию. Также возможен вариант представления результатов по классам пожарной опасности и влагосодержанию напочвенного покрова.

Рис. 6.13. Панель ввода метеоданных

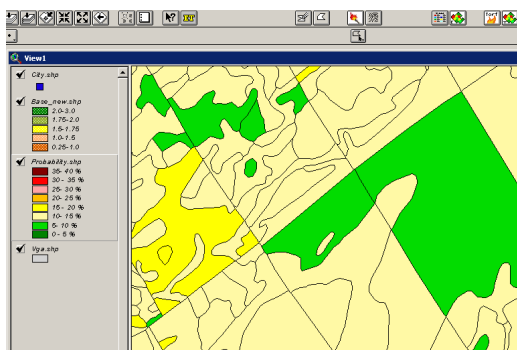


Рис. 6.14. Результат прогноза лесной пожарной опасности

Прогноз торфяной пожарной опасности. В качестве топографической основы использовались карта торфяников Бакcharского района и карта населенных пунктов Томской области. Для данных карт были составлены атрибутивные таблицы, содержащие значимые для моделирования пожарной опасности характеристики местности и РГМ (рис. 6.15) [240].

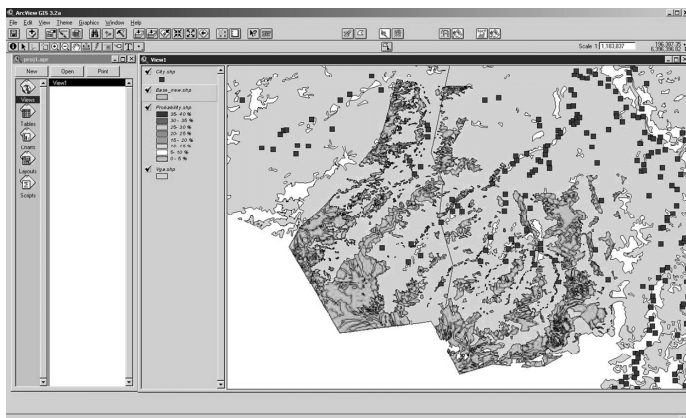


Рис. 6.15. Карта торфяников Бакcharsкого района Томской области с делением на выделы по породам торфа

Характеристики территорий и пород растительных горючих материалов представлены в виде атрибутивных таблиц данных, соответствующих темам. Необходимые для работы данные обрабатываются посредством запросов из соответствующих таблиц. Пример атрибутивных таблиц представлен на рис. 6.16.

Area	Centroid	Area	Centroid	Area	Centroid	Area	Centroid	Area	Centroid
2.00	0.00	4.4	1106	11	0	1421	40	1300	0
2.00	0.00	1.5	1105	11	0	1421	40	1300	0
6.00	0.00	2.0	1105	11	0	1399	0	0	0
6.00	0.00	1.3	1105	11	0	1211	0	0	0
6.00	0.00	8.4	1105	11	0	1212	0	0	0
6.00	0.00	2.0	1105	11	0	1421	40	1300	0
6.00	0.00	2.7	1105	11	0	1421	25	1300	0
2.00	0.00	30	1105	11	0	1399	0	0	0
2.00	0.00	8.3	1105	11	0	1421	40	0	0
6.00	0.00	40.6	1105	11	0	0	0	0	0
6.00	0.00	1.3	1105	11	0	1211	0	0	0
6.00	0.00	2.1	1105	11	0	1212	0	0	0
6.00	0.00	4.7	1105	11	0	1212	0	0	0
6.00	0.00	1.6	1105	11	0	1211	0	0	0
6.00	0.00	1.9	1105	11	0	1211	0	0	0
6.00	0.00	8.1	1105	11	0	1212	0	0	0
6.00	0.00	2.3	1105	11	0	1212	0	0	0
6.00	0.00	8.2	1105	11	0	1212	0	0	0
6.00	0.00	3.9	1105	11	0	1212	0	0	0
6.00	0.00	6.8	1105	11	0	0	0	0	0
6.00	0.00	1.5	1105	11	0	0	0	0	0
6.00	0.00	1.2	1105	11	0	0	0	0	0
6.00	0.00	1.5	1105	11	0	0	0	0	0
6.00	0.00	6.3	1105	11	0	0	0	0	0
6.00	0.00	3.0	1105	11	0	0	0	0	0
6.00	0.00	1.7	1105	11	0	0	0	0	0
6.00	0.00	2.4	1105	11	0	0	0	0	0
6.00	0.00	1.8	1105	11	0	1442	15	0	0
6.00	0.00	7.0	1105	11	0	1212	0	0	0
4.00	0.00	1.2	1105	11	0	1442	15	0	0
2.00	0.00	6.2	1105	11	0	300	0	0	0
5.00	0.00	0.5	1105	11	0	0	0	0	0
6.00	0.00	1.3	1105	11	0	1212	0	0	0
2.00	0.00	4.0	1105	11	0	1421	25	0	0
6.00	0.00	2.7	1105	11	0	0	0	0	0
5.00	0.00	10.0	1105	11	0	0	0	0	0

Area	Centroid	Area	Centroid	Area	Centroid	Area	Centroid	Area	Centroid
1	1	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
2	2	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
3	3	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
4	4	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
5	5	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
6	6	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
7	7	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
8	8	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
9	9	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
10	10	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
11	11	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
12	12	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
13	13	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
14	14	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
15	15	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
16	16	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
17	17	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
18	18	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
19	19	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
20	20	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
21	21	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
22	22	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
23	23	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
24	24	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
25	25	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
26	26	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
27	27	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
28	28	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
29	29	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
30	30	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
31	31	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
32	32	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
33	33	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
34	34	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
35	35	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
36	36	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
37	37	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
38	38	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
39	39	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
40	40	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
41	41	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
42	42	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
43	43	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
44	44	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
45	45	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
46	46	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
47	47	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000

Рис. 6.16. Пример атрибутивных таблиц данных

При выборе темы торфяников Бакcharsкого района становится активной панель инструментов для работы с данной темой. После выбора

нужного инструмента активируется панель ввода данных. Пользователю необходимо ввести значения температуры воздуха в градусах Цельсия, атмосферного давления – в миллиметрах ртутного столба, атмосферной влажности – в процентах, облачности и время прогноза (рис. 6.17).

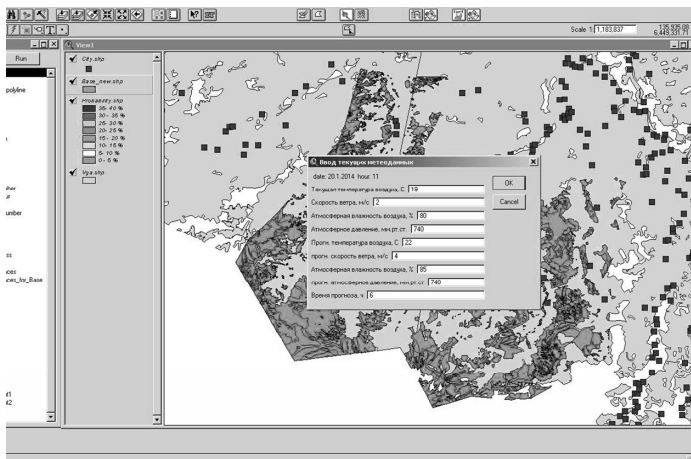


Рис. 6.17. Панель ввода метеоданных

После ввода метеоданных автоматически запускается вычислительный модуль, определяющий текущее влагосодержание слоя торфа для каждого выдела [241]. При этом вызывается ряд подпрограмм, вычисляющих зависимые от метеоданных характеристики среды, такие как точка росы, значения зенитного угла, склонения, суммарного солнечного излучения с учетом облачности на заданной временной интервале.

Визуализация результатов моделирования вызывается автоматически после завершения работы вычислительного модуля. При этом тема, содержащая карту торфяников, автоматически становится активной. Полученные в результате моделирования данные вносятся в атрибутивную таблицу данных активной темы (рис. 6.18).

При отображении результата пользователю предлагается выбрать интересующий его критерий оценки пожарной опасности либо построить цветовую схему непосредственно по значениям текущего влагосодержания. Каждый выдел выделяется цветом, соответствующим диапазону значений выбранного столбца таблицы. По умолчанию цветовая схема формируется по значениям влагосодержания слоя торфа.

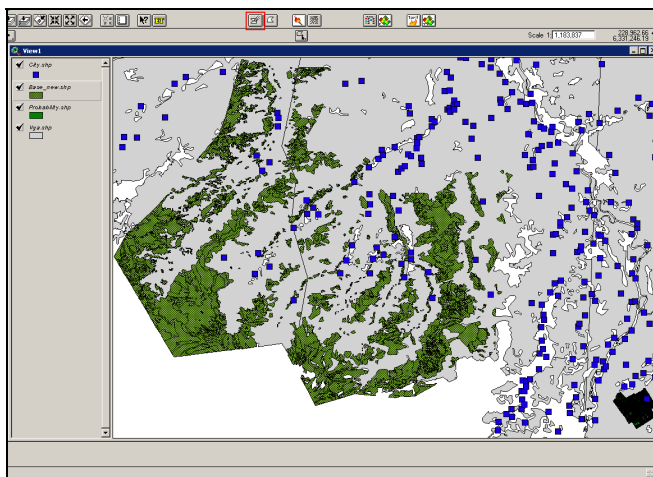


Рис. 6.20. Инструмент очистки темы от цветовых схем

Цветовая схема составляется путем выполнения написанных запросов данных из атрибутивной таблицы. После получения результата запроса, вычисляются диапазоны изменения значений для построения цветовой схемы.

После использования инструмента очистки темы пользователь может заново применить цветовые схемы, формирующиеся по уже имеющимся в таблице атрибутивной информации значениям критериев оценки пожарной опасности.

6.3.3. Визуализация результатов прогноза распространения низового лесного пожара

Математическая модель расчета скорости распространения контура пожара Э.В. Конева. В качестве расчетной модели были использованы упрощенная математическая модель и методика расчета выбросов от низовых лесных пожаров, предложенная Э.В. Коневым [12]. Данная модель является полуэмпирической, и ее использование обусловлено простотой и точностью прогноза [239]. Метод Конева позволяет рассчитать скорость распространения каждой точки фронта пожара по ряду входных параметров.

При этом вводятся следующие допущения:

- 1) считается, что очаг лесного пожара представляет собой плоский источник поллютантов, который увеличивается с ростом времени [12];
- 2) при превышении влагосодержания ЛГМ некоторого критического значения процесс горения прекращается;
- 3) запас ЛГМ не меняется по периметру контура лесного пожара и скорость распространения не зависит от времени;
- 4) контур лесного пожара в любой момент времени в неподвижной системе координат описывается эллипсом:

$$\frac{(x-x_0)^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1, a = \frac{(\omega_A + \omega_B)t}{2}, b = \omega_C t, x_0 = \frac{(\omega_A + \omega_B)t}{2}. \quad (6.1)$$

Здесь a, b – полуоси эллипса; x, y – координаты контура эллипса; x_0, y_0 – координаты центра эллипса; t – время; $\omega_A, \omega_B, \omega_C$ – скорости распространения фронта пожара по направлению ветра, против скорости ветра и перпендикулярно скорости ветра соответственно.

Для определения ω_n в различных точках контура низового лесного пожара используем формулу, которая с учетом описанных выше обозначений имеет вид [12]:

$$\omega_n = \omega_{n0} \frac{f_1(V_e, \alpha)(m_3 / m_0)^n [1 - C_1(W - W_0) + C_2(W - W_0)^2 + D(T - T_0)]}{f_2(\beta)[1 + D(\rho - \rho_0) / \rho_0]},$$

$$f_1(V_e, \alpha) = 1 + B_1 V_e \cos \alpha, \quad 0 \leq V_e \leq V_1, \quad B_1(\alpha \leq 90^\circ) = B_1(0), \quad B_1(\alpha > 90^\circ) = B_1(\pi), \quad (6.2)$$

$$f_2(\beta) = \begin{cases} 0,86[1 - \sin 2(\beta - 8^\circ)], & 8^\circ < \beta \leq 40^\circ, \\ 1 - \sin \beta, & -18^\circ < \beta \leq 8^\circ, \\ \approx 1,4 & \text{если } \beta \leq 18^\circ, \end{cases}$$

где ω_{n0} – скорость распространения низового пожара на горизонтальной подстилающей поверхности; V_e – скорость ветра; α – угол между направлением скорости распространения фронта пожара и скоростью ветра; β – угол наклона к горизонту рельефа местности; m_0 – запас ЛГМ в абсолютно сухом состоянии; $n = (0,2-0,35)$ – эмпирический коэффициент; C_1, C_2, D, B_1, V_1 – эмпирические постоянные; W – влагосодержание ЛГМ; T_0, W_0 – начальные температура слоя ЛГМ и влагосодержание соответствен-

но; T – температура воздуха; ρ_0 – плотность слоя ЛГМ на горизонтальной подстилающей поверхности, при которой скорость распространения лесного пожара равна ω_{n0} ; ρ – плотность слоя ЛГМ.

Численные тесты. Текущие значения скорости ветра V_e на высоте 10 м, влагосодержания W и запаса ЛГМ m_0 , температуры воздуха T , плотности слоя ЛГМ ρ , угла наклона рельефа к горизонту β , высоты слоя ЛГМ h_1 и верхней границы полого леса задавались пользователем. Данные параметры варьировались в следующих пределах: $V_e = 0 \dots 10$ м/с, $W = 5 \dots 100\%$, $m_0 = 0,01 \dots 4,5$ кг/м², $T = 10 \dots 50^\circ\text{C}$, $\rho = 1 \dots 30$ кг/м³, $\beta = 0 \dots 40^\circ$, $h_1 = 0,01 \dots 0,15$ м, $\bar{h}_3 = 2 \dots 10$ м.

Полученные в результате численного моделирования соотношения между скоростями фронта и фланга, а так же фронта и тыла контура пожара сравнивались с соответствующими соотношениями, полученными в результате экспериментов для различных значений скоростей ветра (рис. 6.21). Численные расчеты получены при следующих входных данных: $W = 40\%$, $T = 27^\circ\text{C}$, $\rho = 30$ кг/м³, $\beta = 10^\circ$, $h_1 = 0,02$ м, $\bar{h}_3 = 4$ м.

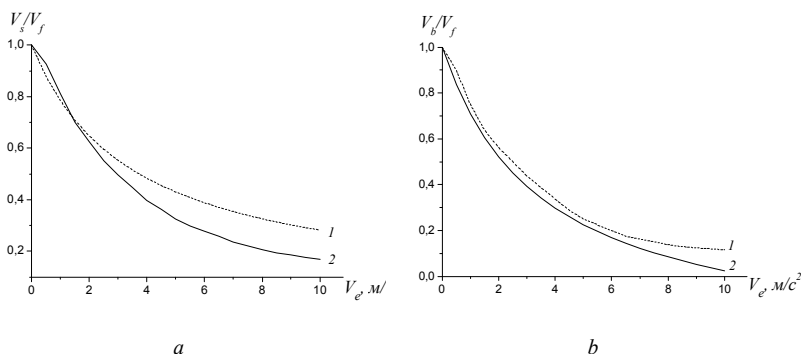


Рис. 6.21. Отношение скорости фланга V_s к скорости фронта контура V_f (a) и скорости тыла V_b к скорости фронта контура V_f (b), полученные в результате численного моделирования (кривая 2) и эксперимента (кривая 1) [151] при различных значениях скорости неустойчивого по направлению ветра

Из анализа кривых на рис. 6.21 следует, что с ростом скорости ветра экспериментальные и численные данные начинают расходиться. При этом скорость фронта пожара, рассчитанная по модели (6.2), имеет завышенные значения по сравнению с экспериментом. Это можно объяснить следующим образом. В рассматриваемой модели (6.2) при расчете скоро-

сти фронта пожара на заданный промежуток времени скорость ветра считается постоянной величиной, в то время как в приводимых для сравнения экспериментах [151] скорость ветра неустойчива по величине и направлению. Известно [242], что скорость ветра, как правило, зависит от времени, её величина и направление меняются непрерывно со временем. Величина изменений может быть весьма значительной, даже в очень коротких периодах времени, что приводит к изменению режима распространения фронта пожара [243]. При этом необходимо учитывать неоднородность напочвенного и растительного покрова. Если внезапно меняется скорость ветра, то пожар будет иметь некоторое время для адаптации к новой ситуации. И чем выше первоначальная скорость ветра, тем больше времени требуется для адаптации к новой ситуации. В связи с этим при численных расчетах скорость фронта пожара увеличивается с ростом скорости ветра и имеет значения выше, чем экспериментальные.

Максимальное расхождение результатов численного моделирования и экспериментальных данных относительно диапазона изменений экспериментальных данных для скорости 10 м/с составляет 11% для отношения V_s/V_f и 9% для отношения V_b/V_f .

Так же были проведены сравнения значений скорости распространения пожара с экспериментальными данными разных авторов [244, 245], полученные при различных метеорологических условиях и значениях эмпирических параметров (табл. 6.1).

Таблица 6.1

Сравнение результатов расчета скорости фронта и тыла контура пожара с экспериментальными данными разных авторов

Показатель	[244]	[245]	[245]	[245]
V_e , м/с	1,5	0,3	0,4	0,8
T , °C	29	14,1	14,1	14,1
W , %	15	14	14	14
h_1 , м	0,1	0,1	0,1	0,1
ρ , кг/м ³	—	6,3	6,3	6,3
β , град/	5	—	—	—
V_{fe} , м/с	0,0213	0,01	0,0117	0,0154
V_{be} , м/с	0,0046	0,0023	0,0023	0,0022
V_{fc} , м/с	0,0225	0,0088	0,0102	0,0167
V_{bc} , м/с	0,005	0,002	0,0021	0,002
δV_{fe} , %	5,6	12	12,8	8,4
δV_{bc} , %	8,7	13	8,6	9

Примечание. h_1 – высота слоя ЛГМ; нижний индекс e – экспериментальные данные; c – расчетные данные по формуле (6.2); δ – относительная погрешность измерений.

Из анализа данных табл. 6.1 видно хорошее совпадение для значений скорости фронта и тыла пожара. Максимальная относительная погрешность не превышает 15%.

Таким образом, полученные результаты расчетов можно считать достаточными для построения комплекса прогноза распространения низовых лесных пожаров для скоростей ветра до 10 м/с на основе предложенной численной модели.

Алгоритм расчета контура пожара. Приняв за единичный шаг по времени 1 с, можно определить расстояние, на которое переместится каждая точка контура, следовательно, можно определить координаты точек контура на следующем шаге.

На начальном этапе работы программы, используя метод Конева, рассчитываются координаты контура пожара на небольшом временном интервале. Далее для расчета нового контура используется формула (6.2). Зная текущие координаты точек контура, можно определить направление движения каждой точки как продолжение отрезка, соединяющего центр фигуры с каждой точкой контура. Используя формулу (6.2), определяется расстояние, на которое переместится каждая точка за временной шаг.

Таким образом, можно определить координаты точек контура на временном шаге, представленном на рис. 6.22.

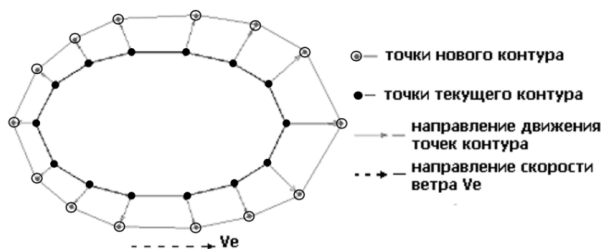
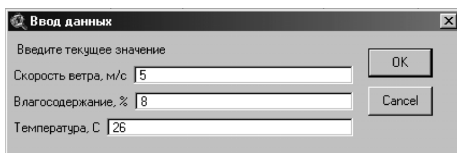


Рис. 6.22. Схема расчета контура пожара

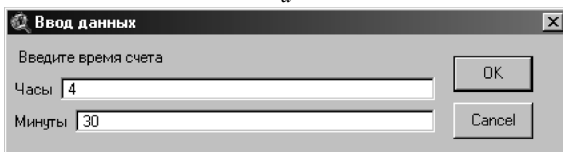
Для длительных расчетов расстояние между соседними точками контура увеличивается, так как согласно алгоритму расчет контур имеет постоянное количество точек. Поэтому при достижении некоторого критического значения (в данном случае 90 м) в середину отрезка добавляется новая точка. Критическое значение определялось экспериментальным путем, чтобы, с одной стороны, расстояние между точками было меньше характерного размера выдела и, с другой стороны, не загружать численные расчеты большим количеством точек.

Прогноз распространения контура пожара из конкретной точки.

При включении этого инструмента оператором необходимо выбрать центр контура пожара на карте при помощи левой кнопки компьютерной мыши. При этом проходит автоматический процесс захвата координат текущего положения курсора и записи их в файл вместе с лесотаксационными характеристиками выдела. После получения координат центра открывается диалоговое окно и оператор осуществляет ввод метеорологических данных (скорость ветра в м/с, температура воздуха в °С, влагосодержание напочвенного покрова в %) и времени счета при помощи реализованных панелей ввода (рис. 6.23, а, b).



a



b

Рис. 6.23. Панель ввода начальных данных (a) и времени счета (b)

После ввода начальных параметров модуль осуществляет обращение к внешней программе, которая рассчитывает координаты точек контура пожара на заданный временной интервал, учитывая особенности каждого выдела. В результате формирования программой таблицы координат встроенный модуль подгружает их в приложение ArcView GIS и осуществляет прорисовку контура (рис. 6.24).

Прогноз распространения пожара относительно начального контура. Захват точек и соединение их в контур осуществляется пользователем при помощи третьего инструмента. При использовании инструмента в системе прогноза пользователем сначала выбирается начальный контур, с которого будет моделироваться распространение пожара. При этом формируется таблица характеристик местности для каждой точки контура, так как начальный контур может располагаться на выделах с различными характеристиками ЛГМ. После формирования начального контура пользователю предлагается ввести метеоданные и выбрать направление ветра (рис. 6.25).

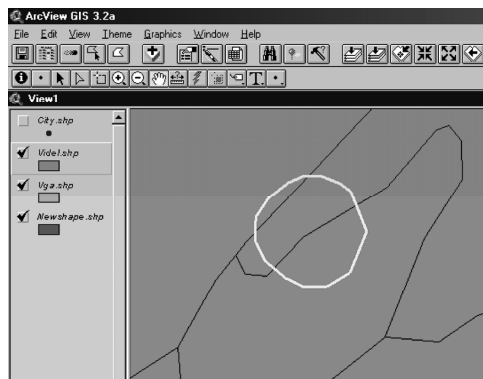


Рис. 6.24. Прорисовка результатов расчета контура

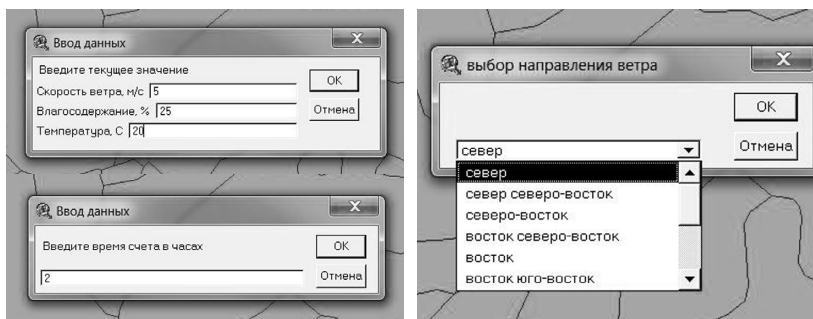


Рис.6.25. Панели ввода начальных параметров для моделирования распространения контура пожара

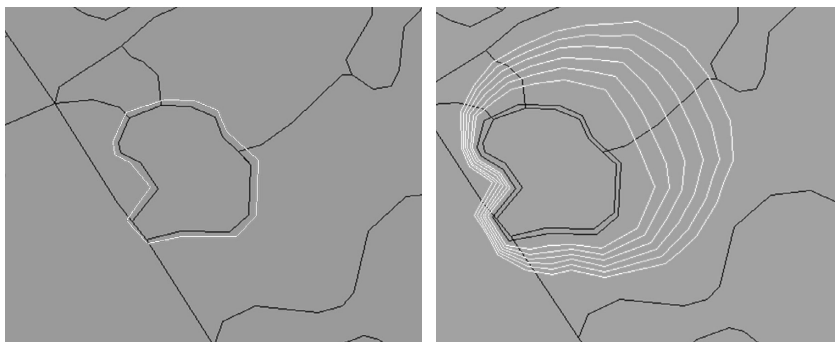


Рис. 6.26. Развитие контура низового лесного пожара. В качестве направления ветра выбрано значение «восток – северо-восток»

После ввода начальных параметров начинается моделирование распространения пожара из начального контура. При этом характеристики точек контура обновляются с ходом распространения. Так как с развитием пожара расстояние между точками увеличивается, было предусмотрено дополнение контура новыми точками между двумя соседними в случае, если расстояние между ними на текущем шаге превышает некоторое критическое. Также в случае, если две соседние точки оказываются слишком близкими друг к другу и расстояние между ними становится меньше некоторого критического расстояния, происходит удаление одной из точек и обновление контура. На рис. 6.26 представлен пример распространения контура пожара.

На основании полученных расчетов оператор имеет возможность принять необходимые решения при возникновении чрезвычайной ситуации.

6.4. Выводы

В результате проделанной работы в данной главе были получены следующие результаты и сделаны выводы:

1. Разработана технология создания электронных карт для новой системы прогноза возникновения и распространения природных пожаров.

2. Создан геоинформационный программный комплекс прогноза возникновения и распространения природных пожаров на примере двух районов Томской области.

3. Комплекс предусматривает визуализацию прогноза возникновения лесных, степных и торфяных пожаров и двух вариантов распространения контура низового лесного пожара. Для каждого варианта в графическом интерфейсе пользователя ArcView GIS создан свои инструменты, при активации которых производится выполнение определенных действий.

4. Разработанный программный комплекс позволяет:

- определять вероятность возникновения лесных пожаров на охраняемой территории в прогнозируемый период с учетом состояния напочвенного покрова, природной и антропогенной нагрузки;

- осуществлять прогноз распространения контура пожара с учетом текущих метеорологических данных и особенностей каждого выдела;

- представлять результаты прогноза возникновения и распространения пожара на электронной карте, что дает наглядное представление о пожароопасной ситуации на данной территории;

- оценить уровень объема работ по ликвидации пожаров и заранее подготовить силы и средства для их тушения на всей территории, для которой дается прогноз.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения исследований были получены следующие основные результаты:

1. Разработана методика для определения вероятностей возникновения лесного пожара с учетом антропогенной и природной нагрузок, через частоты событий и вероятность возникновения лесного пожара по метеоусловиям.

2. Получены точное аналитическое решение задачи для математического описания сушки слоя РГМ и упрощенное аналитическое решение, которое можно использовать для прогноза лесной пожарной опасности для тех случаев, когда нет сведений о температуре слоя РГМ и известна только температура воздуха в атмосфере.

3. Предложена новая детерминированно-вероятностная интерпретация классов лесной пожарной опасности, результаты расчетов по которой согласуются с данными ретроспективного анализа пожаров на примере Тимирязевского лесхоза Томской области.

4. Доказано, что новая система прогноза лесной пожарной опасности позволяет получать более достоверную информацию о прогнозе лесных пожаров с учетом действия сухих гроз, антропогенной нагрузки и метеорологических факторов, чем использование стандартной методики ГОСТ Р 22.1.09–99, основанной на формуле Нестерова, на примере ретроспективного анализа 202 возгораний в Тимирязевском лесхозе с учетом конкретных метеоусловий и антропогенной нагрузки на леса в 2000–2004 гг.

5. Разработана физически обоснованная детерминированно-вероятностная система прогноза пожаров на торфяниках, учитывающая все известные причины, вызывающие возникновение торфяных пожаров, а также метеорологическую информацию и характеристики напочвенного покрова.

6. Разработана однотемпературная математическая модель сушки слоя торфа, состоящего из сухого органического вещества, свободной и связанной воды, газовой фазы. Показано, что для получения оптимальной точности, максимальная температура сушки не должна превышать 330 К и время прогноза – одну неделю.

7. Проведена ретроспективная проверка методики прогноза торфяной пожарной опасности с использованием реальных метеорологических данных, статистических данных о месте и времени возникновения торфя-

ных пожаров, базы теплофизических постоянных типов торфа за период с 1989 по 2012 г. на примере Бакчарского района Томской области. Полученный результат свидетельствует о том, что новая методика прогноза торфяной пожарной опасности более точно указывает на день возникновения пожара.

8. Показано, что внутреннее и внешнее строение рассмотренных СГМ является доминирующим параметром, влияющим на процессы испарения.

9. На примере исследования трех основных типов торфа показано, что ни масштаб, ни тип торфа не оказывают сильного влияния на кинетику процесса сушки.

10. Увеличение плотности напочвенного покрова из хвои сосны до 40 кг/м^3 влечет за собой рост скорости распространения пламени. Увеличение количества листвы в общем составе смеси приводит к уменьшению скорости горения.

11. Начальная температура образца однозначно влияет на время воспламенения образцов древесины, но при потоке лучистой энергии свыше 1400 кВт/м^2 разница во времени воспламенения становится незначительной.

12. Изучены количество и характеристики (масса и размеры) образования горящих частиц на примере натурального пожара на юге штата Нью-Джерси США. Установлено, что большинство частиц (от 70 до 89%) были кусочками коры. Около 30% всех частиц имели массу от 10 до 20 мг, и только несколько из них более 0,1 г. Около 80% всех частиц имели площадь поверхности в диапазоне $(0-20) \times 10^{-5} \text{ м}^2$. Количество частиц уменьшалось с увеличением их площади поверхности.

13. Создан геоинформационный программный комплекс прогноза возникновения и распространения природных пожаров на примере двух районов Томской области. Он предусматривает визуализацию прогноза возникновения лесных, степных и торфяных пожаров и двух вариантов распространения контура низового лесного пожара. Для каждого варианта в графическом интерфейсе пользователя ArcView GIS создан свой инструмент, при активации которого производится выполнение определенных действий.

Основные результаты были получены в ходе многолетней работы по ряду грантов РФФИ, ФЦП, МО, стипендии Президента РФ, CRDF, Fulbright и опубликованы в рецензируемых зарубежных и российских журналах, и других изданиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Stocks B.J., Alexander M.E., McAlpine R.S.* Canadian Forest Fire Danger Rating System. Canadian Forestry service, 1987. 500 p.
2. *Волокитина А.В., Софронов М.А.* Классификация и картографирование растительных горючих материалов. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2002. 314 с.
3. *Deeming J.E., Lancaster G.W., Fosberg M.A.* The National FireDanger Rating System. New York ; London ; Toronto ; USDA : Forest Service, 1972. 165 p.
4. *Курбатский Н.П., Костырина Т.В.* Национальная система расчета пожарной опасности США // Обнаружение и анализ лесных пожаров. Красноярск : ИЛИД СО АН СССР, 1977. С. 38–90.
5. *Rothermel R.C.* A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. Ogden : USDA, Forest Service Research Paper. Int115. Inter-Mountain forest and range experiment Station, 1972. 40 p.
6. *Andrews Patricia L., Chase Carolyn H.* BEHAVE : Fire behavior prediction and fuel modeling system-BURN subsystem, part 2, Gen. Tech. Rep. INT–260. Ogden, UT : U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Inter-mountain Research Station, 1989. 93 p.
7. *Scott J.H.* Nexus : a system for assessing crown fire hazard // Fire Mgmt Notes. 1999. № 59. P. 20–24.
8. *McArthur A.G.* Fire Behaviour in Eucalypt Forests. Canberra : Forestry and Timber Bureau, 1967. Leaflet. № 107. 36 p.
9. *Cruz M.G., Gould J.* National Fire Behaviour Prediction System // Proc. of the Biennial Conference of the Institute of Foresters of Australia, Caloundra, Queensland, Australia. 2009. P. 285–291.
10. *Нестеров В.Г.* Горимость леса и методы ее определения. М. : Гослесбумиздат, 1949. 76 с.
11. ГОСТ Р 22.1.09–99 «Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Мониторинг и прогнозирование лесных пожаров. Общие требования». 2000. URL: <http://rossert.narod.ru/alldoc/info/1z113/g22423.html>
12. *Конев Э.В.* Физические основы горения растительных материалов. Новосибирск : Наука, 1977. 239 с.
13. *Доррер Г.А.* Динамика лесных пожаров. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2008. 404 с.

14. *Albini F.A.* Physical model for fire spread in brush // 11 Int. Symposium on Combustion. Pittsburgh. 1967. P. 553–560.
15. *Гришин А.М.* Математические модели лесных пожаров. Томск : Изд-во Том. ун-та, 1981. 277 с.
16. *Гришин А.М.* Математические модели лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск : Наука, 1992. 408 с.
17. *Grishin A.M.* Mathematical modeling of forest fires and new methods of fighting them / ed. by F. Albini. Tomsk : Publishing House of the Tomsk University, 1997. 390 p.
18. *Гришин А.М.* Моделирование и прогноз катастроф. Томск : Томский государственный университет, 2003. Ч. 1. 524 с.
19. *Гришин А.М., Фильков А.И.* Прогноз возникновения и распространения лесных пожаров. Кемерово : Практика, 2005. 201 с.
20. *Бурасов Д.М., Гришин А.М.* Математическое моделирование низовых лесных и степных пожаров. Кемерово : Практика, 2006. 134 с.
21. *Morvan D., Dupuy J.L.* Modeling of fire spread through a forest fuel bed using a multiphase formation // Combustion and flame. 2001. № 127. P. 1981–1994.
22. *Горшков В.И.* Самовозгорание веществ и материалов. М. : ВНИИПО, 2003. 446 с.
23. *Вогман Л.П., Дегтярев А.Г.* Горение растительного сырья // Пожаровзрывобезопасность. 1993. № 1. С. 29–34.
24. *Гришин А.М.* Физика лесных пожаров. Томск : Томский государственный университет, 1999. 207 с.
25. *Захаров А.И.* Динамика влажности лесных горючих материалов и возникновение пожаров от гроз (В условиях Тюменской области) : автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Л., 1983. 18 с.
26. *Коровин Г.Н., Покрывайло В.Д., Гришман З.М. и др.* Основные направления развития и совершенствования системы оценки и прогноза пожарной опасности // Лесные пожары и борьба с ними. Л. : ЛенНИЛХ, 1986. С. 18–31.
27. *Доррер Г.А.* Модель суточной динамики влагосодержания проводников горения // Лесные пожары и их последствия. Красноярск : ИЛ и ДСОАН СССР, 1985. С. 110–124.
28. *Иванова Г.А.* Лесопожарная роль доминантов напочвенного покрова в сосняках разнотравно-брусничных : автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Красноярск, 1985. 21 с.
29. *Сверлова Л.И.* Метод оценки пожарной опасности в лесах по условиям погоды с учетом поясов атмосферной засушливости и сезонов года. Хабаровск, 2000. 46 с.

30. Горев Г.В. Оценка климатической предрасположенности территории к возникновению лесных пожаров (на примере Томской области) : автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Томск, 2004. 24 с.

31. Курбатский Н.П. Исследование количества и свойств лесных горючих материалов // Вопросы лесной пирологии / ИлиД СО АН СССР. Красноярск, 1970. С. 5–58.

32. Мухин А.С. Совершенствование информационного обеспечения в охране лесов от пожаров : автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. М., 1996. 24 с.

33. Смирнов Н.В., Дунин-Барковский И.В. Курс теории вероятностей и математической статистики. М. : Наука, 1969. 511 с.

34. Барановский Н.В. Теплофизические аспекты прогностического моделирования лесной пожарной опасности : автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Томск, 2012. 32 с.

35. Иванов В.А. Лесные пожары от гроз на Енисейской равнине : автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Красноярск, 1996. 23 с.

36. Smeyers, Franklin R. Model for the prediction of lightning-caused forest fires // Milwaukee Symp. Automat Contr. Milwaukee, Wis., 1974. N.J., 1974. P. 203–208.

37. Андреев Ю.А. Влияние антропогенных и природных факторов на возникновение пожаров в лесах и населенных пунктах : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / ФГУ ВНИИПО МЧС России. М., 2003. 45 с.

38. Пичугин А.В. Торфяные месторождения. М. : Высшая школа, 1967. 275 с.

39. Попцова Е.В., Фильков А.И. О создании системы прогноза торфяной пожарной опасности // Современные проблемы математики и механики : материалы III Всероссийской молодежной научной конференции / под ред. А.И. Филькова. Томск : Томский государственный университет, 2012. С. 199–203.

40. Artsybashev E.S. Forest fires and their control. [Russian translation (1983) for the U.S. Department of Agriculture and the National Science Foundation, Washington D.C., by Amerind Publishing Co. Pvt. Ltd., New Delhi]. Lesnye Pozhary i Bor'ba s Nimi. Lesnaya Promyshlennost' Publishers, Moscow, Russia. 1974. 160 p.

41. Чулюков М.А. Исследование пожаров на полях добычи фрезерного торфа и вопросов борьбы с ними : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Министерство высшего образования СССР. Моск. торф. ин-т. М., 1957. 13 с.

42. Технологические регламенты на складирование и хранение фрезерного торфа. Л. : МТП РСФСР, ВНИИТП, 1966. 11 с.

43. Гришин А.М., Голованов А.Н., Лобода Е.Л. и др. Физическое и математическое моделирование возникновения и распространения торфяных пожаров. Томск : Изд-во Том. ун-та, 2012. 124 с.
44. Варенцов В.С., Лазарев А.В. Технология производства фрезерного торфа : учеб. пособие для вузов. М. : Недра, 1970. 288 с.
45. Гришин А.М. Математическое моделирование лесных пожаров // Численные методы механики сплошной среды. 1978. Т. 9, № 4. С. 30–56.
46. Frandsen W.H. Ignition probability of organic soils // Can. J. For. Res. 1997. № 27. P. 1471–1477.
47. Hartford R.A. Smoldering combustion limits in peat as influenced by moisture, mineral content, and organic bulk density. In Proceedings of the 10th Conference on Fire and Forest Meteorology, April 1989, Ottawa, Ont. Edited by D.C. MacIver, H. Auld, and R. Whitewood. Forestry Canada, Petawawa National Forestry Institute, Chalk River, Ont. 1989. P. 282–286.
48. Fons W.L. Analysis of fire spread in light forest fuels // J. Agric. Res. 1946. № 72. P. 93–121.
49. Frandsen W.H. The influence of moisture and mineral soil on the combustion limits of smoldering forest duff // Can. J. For. Res. 1987. V. 17. P. 1540–1544.
50. Лиштвак И.И., Базин Е.Т., Косов В.И. Физические процессы в торфяных залежах. Минск : Наука и техника, 1989. 271 с.
51. Фильков А.И., Попцова Е.В. Пожарная опасность на торфяниках и ее прогноз // Математическое и физическое моделирование опасных природных явлений и техногенных катастроф : материалы Всероссийской конференции. Томск : Томский государственный университет, 2012. С. 83–84.
52. Женихов Ю.Н. Геоэкологические основы рационального использования торфоболотных ресурсов Верхневолжского региона : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Тверь, 2000. 35 с.
53. Малков Л.М., Малков А.А. Самовозгорание фрезерного топливного торфа в штабелях и солнечная активность // Труды ВНИИТП. Вып. 50. 1983. С. 32–37.
54. Малков А.А. Влияние внешних факторов на саморазогревание фрезерного торфа // Торфяная промышленность. 1982. № 11. С. 19–21.
55. Чулюков М.А., Чайков В.И. Торфяные пожары и меры борьбы с ними. М. : Недра, 1969. 112 с.
56. Шпынев В.М. Исследования торможения процесса саморазогревания фрезерного торфа в штабелях // Торфяная промышленность. 1983. № 12. С. 19–20.

57. Курбатский И.П., Телицын Г.П. Современная теория распространения лесных низовых пожаров. Архангельск : Гидромет, 1976. С. 90–97.

58. Правила пожарной безопасности для предприятий торфяной промышленности / Министерство топливной промышленности РСФСР. М., 1981. Ч. 2. 102 с.

59. Бережной С.А., Еношевский Б.А., Колесин В.К. и др. Охрана труда в торфяной промышленности : учебник для вузов / под ред. С.А. Бережного. М. : Недра, 1989. 310 с.

60. Kellner E., Halldin S. Water budget and surface-layer water storage in a Sphagnum bog in central Sweden // Hydrol. Processes. 2002. № 16. P. 87–103.

61. Kennedy G.W., Price J.S. A conceptual model of volumechange controls on the hydrology of cutover peats // Journal of Hydrology. 2005. № 302. P. 13–27.

62. Garnier P., Perrier E., Angulo A.J., Baveye P. Numerical model of 3–dimensional anisotropic deformation and water flow in welling soil // Soil Sci. 1997. № 162. P. 410–420.

63. Oostindie K., Bronswijk J.J.B. FLOCR – A simulation model for the calculation of water balance, cracking and surface subsidence of clay soils // Rep. 47, Winand Staring Cent., Agric. Res. Dep., Wageningen, Netherlands, 1992. 53 p.

64. Kennedy G.W., Price J.S. Simulating soil water dynamics in a cutover bog // Water resources research. 2004. V. 40. P. 1–13.

65. Harbaugh A.W., Banta E.R., Hill M.C., McDonald M.G. Modflow-2000, The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model – User Guide to Modularization Concepts and the Ground-Water Flow Process // U.S. Geological Survey Open-File Report 00–92. 2000. P. 121.

66. Restrepo J.I., Montoya A.M., Obeysekera J. A wetland simulation module for the Modflow ground water model // Ground Water. 1998. V. 36, № 5. P. 764–770.

67. Running S.W., Coughlan J.C. A general model of forest ecosystem processes for regional applications. I. Hydrologic balance, canopy gas exchange and primary production processes // Ecol. Model. 1988. № 42. P. 125–154.

68. Jansson P.E., Karlberg L. Coupled Heat and Mass Transfer Model for Soil–Plant–Atmosphere Systems // Royal Institute of Technology. Department of Civil and Environmental Engineering. Stockholm, 2001. P. 321.

69. Zhang Y.Li, Trettin C. et al. An integrated model of soil, hydrology, and vegetation for carbon dynamics in wetland ecosystems // Global Biogeochem. Cycles. 2002. V. 16, № 4. P. 1–17.

70. Engel T., Priesack E. Expert-N, a building-block system of nitrogen models as resource for advice, research, water management and policy // Inte-

grated Soil and Sediment Research: A Basis for Proper Protection / eds. by H.J.P. Eijsackers, T. Hamers. Dordrecht, The Netherlands : Kluwer Academic Publishers, 1993. P. 503–507.

71. *Flerchinger G.N., Saxton K.E.* Simultaneous heat and water model of a freezing snow-residue-soil system // I. Theory and development. Trans. Am. Soc. Agric. Eng. 1989. V. 32, № 2. P. 565–571.

72. *Hillel D.* Fundamentals of Soil Physics. N.Y. : Academic Press, 1980. 413 p.

73. *Frolking S., Crill P.* Climate controls on temporal variability of methane flux from a poor fen in southeastern New Hampshire : measurement and modeling // Global Biogeochem. Cycles. 1994. № 8. P. 385–397.

74. *Granberg G., Grip H., Ottoson Lofvenus M., Sundh I., Svensson B., Nilsson M.* A simple model for simulation of water content, soil frost, and soil temperatures in boreal mixed mires // Water Resour. Res. 1999. № 35. P. 3771–3782.

75. *Guertin D.P., Barten P.K., Brooks K.N.* The peatland hydrological impact model : development and testing // Nord. Hydrol. 1987. № 18. P. 79–100.

76. *Исаков Г.Н., Кузин А.Я., Кулижский С.П., Субботин А.Н.* Прогнозирование структурного состояния и температурно-влажностных режимов переноса в верхних горизонтах почвогрунтов // Труды 4 Минского международного форума по тепломассообмену. Минск, 2000. С. 160–169.

77. *Wiktorsson L.-P., Wanzl W.* Kinetic parameters for coal pyrolysis at low and high heating rates – a comparison of data from different laboratory equipment // Fuel. 2000. № 79. P. 701–716.

78. *Biagini E., Lippi F., Petarca L., Tognotti L.* Devolatilization Rate of Biomasses and Coal-Biomass Blends : An Experimental Investigation // Fuel. 2002. V. 81, № 8. P. 1041–1050.

79. *Cozzani V., Petarca L., Tognotti L.* Devolatilization and Pyrolysis of Refuse Derived Fuels : Characterization and Kinetic Modelling by Thermogravimetry and Calorimetric Approach // Fuel. V. 74, № 6. P. 903–912.

80. *Biagini E., Cioni M., Tognotti L.* Development and characterization of a lab-scale entrained flow reactor for testing biomass fuels. Fuel. 2005. V. 84, № 12–13. P. 1524–1534.

81. *Chen H.X., Liu N.A., Fan W.C.* Two-step consecutive reaction model and kinetic parameters relevant to the decomposition of Chinese forest fuels // J. Appl. Polym. Sci. 2006. V. 102. P. 571–576.

82. *Sutcu H.* Pyrolysis of peat : Product yield and characterization // Korean J. Chem. Eng. 2007. V. 24. P. 736–741.

83. *Guldogan Y., Durusoy T., Bozdemir T.O.* Pyrolysis Kinetics of Blends of Tuncbilek Lignite with Denizli Peat // Thermochim. Acta. 1999. V. 332. P. 75–81.

84. *Helsen L., Van den Bulck E.* Kinetics of the Low-Temperature Pyrolysis of Chromated Copper Arsenate-Treated Wood // *J. Anal. Appl. Pyrolysis*. 2000. V. 53. P. 51–79.
85. *Jones J.M., Kubacki M., Kubica K., Ross A.B., Williams A.* Devolatilization Characteristics of Coal and Biomass Blends // *J. Anal. Appl. Pyrolysis*. 2005. V. 74. P. 502–511.
86. *Klose W., Stuke V.* Comparison of the Pyrolysis of Different Types of Biomass and Coals // *Fuel Process. Technol.* 1993. V. 36. P. 283–289.
87. *Koufopoulos C.A., Maschio G., Lucchesi A.* Kinetic Modelling of the Pyrolysis of Biomass and Biomass Components // *Can. J. Chem. Eng.* 1989. V. 67. P. 75–84.
88. *Meesri C., Moghtaderi B.* Lack of Synergetic Effects in the Pyrolytic Characteristics of Woody Biomass/Coal Blends Under Low and High Heating Rate Regimes // *Biomass Bioenerg.* 2002. V. 23(1). P. 55–66.
89. *Nassar M.M.* Thermal Analysis Kinetics of Bagasse and Rice Straw // *Energy Sol.* 1999. V. 21. P. 131–137.
90. *Vamvuka D., Kakaras E., Kastanaki E., Grammelis P.* Pyrolysis Characteristics and Kinetics of Biomass Residuals Mixtures with Lignite // *Fuel*. 2003. V. 82. P. 1949–1960.
91. *Vamvuka D., Troulinos S., Kastanaki E.* The Effect of Mineral Matter on the Physical and Chemical Activation of Low Rank Coal and Biomass Materials // *Fuel*. 2006. V. 85. P. 1763–1771.
92. *Гришин А.М., Голованов А.Н., Суков Я.В.* Экспериментальное определение теплофизических, термокинетических и фильтрационных характеристик торфа // *ИФЖ*. 2006. Т. 79, № 3. С. 131–136.
93. *Алексеев Б.В., Гришин А.М.* Физическая газодинамика реагирующих сред. М., 1985. С. 45–49.
94. *Борисов А.А., Киселев Я.С., Удилов В.П.* Кинетические характеристики низкотемпературного горения торфа // *Теплофизика лесных пожаров*. Новосибирск : ИТФ СО АН СССР, 1984. С. 23–30.
95. *Гришин А.М., Абалтусов В.Е., Зверев В.Г. и др.* // *Физика горения и методы ее исследования*. Чебоксары, 1981. С. 129–139.
96. *Гришин А.М., Голованов А.Н., Суков Я.В., Абрамовских А.А.* О механизме зажигания и горения торфа // *Материалы 6-й Международной конференции*. Иркутск : Изд-во Том. ун-та, 2005. С. 38.
97. *Гришин А.М., Голованов А.Н., Суков Я.В., Прейс Ю.И.* Экспериментальное исследование процессов зажигания и горения торфа // *ИФЖ*. 2006. Т. 79, № 3. С. 137–142.

98. *Гришин А.М.* Об одном методе определения термокинетических постоянных гетерогенных реакций // ДАН СССР. Наука. 1972. Т. 205, № 1. С. 52–55.

99. *Гришин А.М., Кузин А.Я., Исаков Г.Н.* Определение термокинетических постоянных некоторых веществ // Математическое моделирование аэротермохимических явлений. М. : Изд. ВЦ АН СССР, 1974. С. 73–87.

100. *Гришин А.М., Кузин А.Я.* О решении некоторых обратных задач аэротермохимии // ФГВ. 1973. № 5. С. 658–665.

101. *Гришин А.М., Кузин А.Я., Синицин С.П., Ярославцев Н.А.* О решении обратных задач механики реагирующих сред // ИФЖ. Т. 56, № 3. 1989. С. 459–464.

102. *Гришин А.М., Кузин А.Я., Алексеенко Е.М.* Определение кинетических характеристик процесса сушки лесных горючих материалов // ИФЖ. 2003. Т. 76, № 5. С. 170–175.

103. *Коробейничев О.П., Шварцберг В.М., Шмаков А.Г.* Химия горения фосфорорганических соединений // Успехи химии. 2007. Т. 76, № 11. С. 1094–1121.

104. *Коробейничев О.П., Палецкий А.А., Волков Е.Н.* Структура пламени и химия горения энергетических материалов // Химическая физика. 2008. Т. 27, № 4. С. 34–59.

105. *Коробейничев О.П.* Применение масс-спектрометрии для изучения кинетики распада твердых веществ // Успехи химии. 1969. № 12. С. 2113–2128.

106. *Коробейничев О.П., Тютюнников Ю.Т., Улановский М.П.* Применение время-пролетного масс-спектрометра для исследования кинетики разложения углей // Химия твердого топлива. 1970. № 4. С. 132–135.

107. *Bodoev N.V., Korobeinichev O.P., Denisov S.V., Paletsky A.A.* Investigation of Fast Heating Pyrolysis of Sapropelitic Coals by Mass-Spectrometric Thermal Analysis // Journal of Thermal Analysis. 1990. V. 36. P. 481–488.

108. *Коробейничев О.П., Шмаков А.Г., Чернов А.А. и др.* Тушение пожаров с помощью аэрозолей растворов солей // Физика горения и взрыва. 2010. Т. 46, № 1. С. 20–25.

109. *Коробейничев О.П., Палецкий А.А., Гончикжапов М.Б. и др.* Пиролиз и горение лесных горючих материалов // Труды VIII Всероссийской конференции с международным участием «Горение твердого топлива». Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН (13–16 ноября 2012 г., Новосибирск). 2012. С. 50.1–50.8.

110. *Гончикжапов М.Б., Палецкий А.А., Коробейничев О.П.* Кинетика пиролиза лесных горючих материалов в инертной / окислительной среде при быстром и медленном темпах нагрева // Материалы конференции

«СИББЕЗОПАСНОСТЬ-СПАССИБ». Новосибирск : Сибирская государственная геодезическая академия, 2012. № 1. С. 38–44.

111. *Лоцилов С.А.* Влияние термокинетических параметров пиролиза и двухфазности лесных горючих материалов на процессы распространения лесных пожаров : дис. ... канд. физ.-мат. наук. Н. Новгород, 2013. 116 с.

112. *Гришин А.М.* Моделирование и прогноз катастроф (основные определения и понятия теории катастроф и общие закономерности их возникновения и развития) : учеб. пособие. Томск : Томский государственный университет, 2002. 124 с.

113. *Гришин А.М.* Катастрофы : оценка вероятности возникновения, эстафетный механизм развития и экологические последствия // Материалы Междунар. конференции «Сопряженные задачи механики и экологии». Томск : Изд-во Том. ун-та, 1996. С. 62–71.

114. *Гришин А.М.* Моделирование и прогноз техногенных и экологических катастроф // Избранные доклады международной конференции «Математическое и физическое моделирование сопряженных задач механики реагирующих сред и экологии». Томск : Томский государственный университет, 2000. С. 64–88.

115. *Гришин А.М.* Моделирование и прогноз экологических катастроф // Экологические системы и приборы. 2001. № 2. С. 12–21.

116. *Гришин А.М., Голованов А.Н., Катаева Л.Ю., Лобода Е.Л.* Постановка и решение задачи о сушке слоя лесных горючих материалов // Физика горения и взрыва. 2001. Т. 37, № 1. С. 65–76.

117. *Гришин А.М.* Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск : Наука, 1992. 408 с.

118. *Гришин А.М., Зима В.П., Кузнецов В.Т., Скорик А.И.* Зажигание лесных горючих материалов потоком лучистой энергии // Физика горения и взрыва. 2002. Т. 38, № 1. С. 30–35.

119. Physico-mathematical theory of Forest Fires // European Commission Environment Climate Programme Advanced Study Course on Wildfire Management. Proceeding of the Advanced Study Course held in Marathon, Greece 6–14 October 1997 / ed. by G. Eftichidis, P. Balabanis, A. Ghazi. Final Report, Athens, 1999. Printed in the Netherland, 1999. P. 369–384.

120. The methods to fight Forest Fires // European Commission Environment Climate Programme Advanced Study Course on Wildfire Management. Proceeding of the Advanced Study Course held in Marathon, Greece 6–14 October 1997 / ed. by G. Eftichidis, P. Balabanis, A. Ghazi. Final Report, Athens, 1999. Printed in the Netherland, 1999. P. 385–398.

121. Катаева Л.Ю. Применение понятий и методов механики жидкости и газа для решения некоторых актуальных задач экологии : дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск, 2000. 180 с.

122. Лобода Е.Л. Физико-математическое моделирование сушки и зажигания слоя лесных горючих материалов : дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск, 2002. 125 с.

123. Гришин А.М. Общие математические модели лесных и торфяных пожаров и их приложения // Успехи механики. 2002. Т. 1, № 4. С. 41–89.

124. Гришин А.М. Моделирование природных и техногенных катастроф в XXI веке // Совместный выпуск журналов «Вычислительные технологии» и «Регионального вестника Востока» по материалам межд. конф. «Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании». Новосибирск-Алматы. Усть-Каменогорск, 2003. Ч. 1. С. 289–295.

125. Гришин А.М., Грузин А.Д., Капустин В.А. Смешанная конвекция над нагретой поверхностью со вдувом // ПМТФ. 1980. № 4. С. 57–65.

126. Лыков А.В. Теория сушки. М. : Энергия, 1968. 470 с.

127. Фридланд А.Я., Ханамирова Л.С., Фридланд И.А. Информатика : Толковый словарь основных терминов. М. : Наука, 1998. 240 с.

128. Ильин В.П. Геометрическое и функциональное моделирование в задачах физики // Proceeding of International Conference RDAMM. 2001. Vol. 6, pt. 2 / Special Issue. P. 315–321.

129. Гришин А.М., Фильков, А.И. Об одной модели прогноза лесной пожарной опасности // ИФЖ. 2003. Т. 76, № 5. С. 154–158.

130. Filkov A.I., Gladkiy D.A. Updating of Deterministic-probabilistic Technique for Predicting Forest Fire Hazard : Fire Prevention and Management // VI International Conference on Forest Fire Research : Conference Proceedings, November, 15–18, 2010. ADAI/CEIF. Coimbra, Portugal, 2010. P. 1–3.

131. Фильков А.И. Анализ детерминированно-вероятностной модели прогноза лесной пожарной опасности и ее проверка на достоверность // Физика и химия наноматериалов : сб. материалов междунар. школы-конференции молодых ученых (13–16 декабря 2005 г., Томск). Томск : Томский государственный университет, 2005. С. 469–474.

132. Фильков А.И., Гришин А.М. Детерминированно-вероятностная модель и ее применение для прогноза лесной пожарной опасности // Международная конференция «ПКИ 2006», Октябрь 24–26, 2006, Баку, Азербайджан. Баку : ИД «Информационные технологии», 2006. С. 71–74.

133. Математический энциклопедический словарь / гл. ред. Ю.В. Прохоров. М. : Сов. энцикл., 1988. 846 с.

134. *Гришин А.М., Фильков А.И., Борисова Ю.Ю.* Детерминированно-вероятностные модели прогноза природной пожарной опасности // Пожары в лесных экосистемах Сибири. Материалы Всерос. конф. с междунар. участием. Красноярск : Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, 2008. С. 48–50.
135. *Grishin A.M., Filkov A.I.* A Deterministic-probabilistic System for Predicting Forest Fire Hazard // *Fire Safety Journal*. 2011. V. 46. P. 56–62.
136. *Андреев Ю.А., Ларченко Г.Ф.* Социально-психологические аспекты рекреационных посещений леса и возникновение пожаров // Лесные пожары и борьба с ними. М. : ВНИИЛМ, 1987. С. 251–263.
137. *Гришин А.М., Фильков А.И.* Определение вероятности лесной пожарной опасности и использование ГИС для нанесения ее на электронную карту Белоярского лесхоза Томской области // Труды международной конференции ENVIROMIS-2002. Томск : Изд-во Томского ЦНТИ, 2002. Т. 1. С. 83–88.
138. *Павлов А.В.* Энергообмен в ландшафтной среде Земли. Новосибирск : Наука, 1984. 256 с.
139. *Гришин А.М., Фильков А.И.* О геоинформационной системе прогноза лесной пожарной опасности // Экологические системы и приборы. 2004. № 8. С. 26–28.
140. *Франк-Каменецкий Д.А.* Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М. : Наука, 1987. 492 с.
141. *Фильков А.И.* Упрощенная математическая модель низкотемпературной сушки слоя растительных горючих материалов // Физика и химия высокоэнергитических систем : сборник материалов II Всерос. конф. молодых ученых (4–6 мая 2006 г., г. Томск). Томск : Изд-во Том. ун-та, 2006. С. 315–320.
142. *Березин И.С., Жидков Н.П.* Методы вычислений. М. : Физматгис, 1960. Т. 2. 620 с.
143. *Grishin A.M., Filkov A.I.* Geoinformation system of predicting forest fire danger // *Wildlife fire : initiation, spread, suppressing and ecological consequences* : Proceeding of the 5-th International conference. Tomsk : Publishing House of Tomsk University, 2004. P. 175–185.
144. *Фильков А.И.* Использование аналитических решений для прогноза лесной пожарной опасности и ее проверка в ретроспективе // Известия вузов. Физика. 2006. № 3. Приложение. С. 266–267.
145. *Нестеров В.Г.* Природа лесных пожаров в сосняках-брусничниках и сосняках-черничниках // Тр. ВНИИЛХ. 1939. Вып. 9. С. 5–21.

146. *Софронов М.А.* Лесные пожары в горах Южной Сибири. М. : Наука, 1967. 152 с.
147. *Жуковская В.И.* Увлажнение и высыхание гигроскопических лесных горючих материалов // Вопросы лесной пирологии / ИЛИД СО АН СССР. Красноярск, 1970. С. 105–141.
148. *Вонский С.М., Вересова И.М., Жданко В.А.* Влияние осадков на изменение влажности и горимости лесного напочвенного покрова и подстилки // Лесные пожары и технические средства борьбы с ними. ЛенНИИЛХ. Л., 1974. С. 66–72.
149. *Валендик Э.Н., Гевель Н.Ф.* О полноте сгорания некоторых лесных горючих материалов // Проблемы лесной пирологии / ИЛИД СО АН СССР. Красноярск, 1975. С. 127–137.
150. *Шешуков М.А.* К вопросу составления пожарных карт // Сб. трудов ДальНИИЛХ. 1966. Вып. 8. С. 407–416.
151. *Шешуков М.А.* Исследование природы лесных пожаров в основных лесных формациях Нижнего Приамурья. Красноярск : Институт леса и древесины, 1970. 204 с.
152. *Курбатский Н.П.* Техника и тактика тушения лесных пожаров. М. : Гослесбумиздат, 1962. 154 с.
153. *Голованов А.Н., Лобода Е.Л.* Определение предельных условий зажигания лесных горючих материалов // Лесные и степные пожары : возникновение, распространение, тушение и экологические последствия : материалы 4-й междунар. конф. Томск : Изд-во Том. ун-та, 2001. С. 33–35.
154. *Гришин А.М., Фильков А.И.* Ретроспективный анализ системы прогноза лесной пожарной опасности // Экологические системы и приборы. 2005. № 8. С. 23–25.
155. *Соловьев С.В.* Экологические последствия лесных и торфяных пожаров : дис. ... канд. техн. наук. М., 2006. 222 с.
156. *Шпынев В.М.* Влияние внешних факторов на саморазогревание торфа // Торфяная промышленность. 1983. № 12. С. 19–20.
157. *Малков Л.М., Козлов В.А., Гублер Е.В.* Комплексная оценка склонности фрезерного торфа к саморазогреванию и самовозгоранию // Торфяная промышленность. 1983. № 8. С. 18–21.
158. *Smeyer J., Franklin R.* Model for the prediction of lightning-caused forest fires // Milwaukee Symp. Automat Contr. Milwaukee's. Wisc. 1974. N.Y., 1974. P. 203–208.
159. *Фильков А.И.* О создании системы торфяной пожарной опасности // Пожары и чрезвычайные ситуации : предотвращение, ликвидация. 2013. № 1. С. 18–24.

160. Фильков А.И., Гладкий Д.А. Математическое моделирование низкотемпературной сушки слоя торфа // Вестник ТГУ. Математика и механика. 2012. № 3(19). С. 93–106.

161. Фильков А.И., Гришин А.М., Гладкий Д.А. О математическом моделировании испарения свободной и связанной воды в слое торфа // Фундаментальные и прикладные вопросы механики и процессов управления : Всерос. науч. конф., посвящ. 75-летию со дня рождения акад. В.П. Мяникова : сб. докл. Владивосток : ИАПУ ДВО РАН, 2011. С. 391–394.

162. Гришин А.М. Моделирование и прогноз катастроф. Кемерово : Практика, 2005. Ч. 2. 562 с.

163. Filkov A.I., Grishin A.M., Gladky D.A. Mathematical research into moisture evaporation in a peat layer // MCS 7: материалы конференции, 11–15 сентября 2011. Sardinia, Italy, 2011. P. 1–3. 1 CD-ROM.

164. Гладкий Д.А., Гришин А.М., Фильков А.И. Математическое моделирование низкотемпературной сушки слоя торфа // Современные проблемы математики и механики : материалы II Всерос. молодежн. науч. конф. / под ред. А.И. Филькова. Томск : Изд-во Том. ун-та, 2011. С. 45–54.

165. Гришин А.М., Зинченко В.И., Ефимов К.Н. и др. Итерационно-интерполяционный метод и его приложения: учеб. пособие. Томск : Томский государственный университет, 2004. 320 с.

166. Cancellieri D., Leroy-Cancellieri V., Leoni E., Simeoni A., Kuzin A.Ya., Filkov A.I., Guillermo R. Kinetic Investigation on the Smouldering Combustion of Boreal Peat // Fuel. 2012. № 93. P. 479–485.

167. Filkov A.I., Kuzin A.Ya., Sharypov O.V., Leroy-Cancellieri V., Cancellieri D., Leoni E., Simeoni A., Rein G. A comparative study to evaluate the drying kinetics of Boreal peats from micro to macro scales // Energy Fuels. 2012. V. 26, № 1. P. 349–356.

168. Ковриго В.П., Кауричев И.С., Бурлакова Л.М. Почвоведение с основами геологии. М. : Колос, 2000. 416 с.

169. Миронов В.А., Палюх Б.В., Ветров А.Н. Основы построения интеллектуальных информационных систем для прогнозирования, предупреждения и ликвидации торфяных пожаров. Тверь : ТГТУ, 2004. 104 с.

170. Hurley P. TAPM V4. Part 1: Technical Description // CSIRO Marine and Atmospheric Research Paper. 2008. № 25. URL: http://www.cmar.csiro.au/research/tapm/docs/tapm_v4_technical_paper_part1.pdf

171. Матвеев Л.Т. Основы общей метеорологии. Физика атмосферы, Л., 1965. СПб. : Гидрометеиздат, 2000. 751 с.

172. Фильков А.И., Гладкий Д.А. Численные исследования сушки слоя торфа // Современные проблемы математики и механики : материалы

III Всерос. молодежн. научн. конф. / под ред. А.И. Филькова. Томск : Изд-во Том. ун-та, 2012. С. 231–235.

173. Кузнецов В.Т., Лобода Е.Л. Экспериментальное исследование воспламенения торфа под воздействием потока лучистой энергии // Физика горения и взрыва. 2010. № 6. С. 86–92.

174. Бурасов Д.М., Гришин А.М. Математическое моделирование лесных и степных пожаров. Кемерово : Практика, 2006. 134 с.

175. Гришин А.М., Зинченко В.И., Кузин А.Я, Синицын С.П. и др. Решение некоторых обратных задач механики реагирующих сред. Томск : Томский государственный университет, 2006. 418 с.

176. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М. : Наука, 1974. 224 с.

177. Гришин А.М., Кузин А.Я., Фильков А.И. Определение термокинетических постоянных процессов сушки и пиролиза растительных горючих материалов и торфа // Изв. вузов. Физика. 2009. № 2/2. С. 107–112.

178. Фильков А.И. Определение термокинетических постоянных процесса сушки степных горючих материалов // Теплофизика и аэромеханика. 2012. Т. 19, № 6. С. 731–738.

179. Фильков А.И. Термокинетические постоянные процесса сушки степных горючих материалов // Современные проблемы математики и механики : материалы Всерос. молодежн. науч. конф. Томского государственного университета (13–15 октября 2010 г.). Томск : Изд-во Том. ун-та, 2010. С. 227–232.

180. Гришин А.М., Голованов А.Н., Русаков С.В. Об испарении свободной и связанной с лесным горючим материалом воды в изотермических условиях // ИФЖ. 2003. Т. 76, № 5. С. 175–180.

181. Прокопьев Е.П. Экология растений : учеб. Томск : Изд-во Том. ун-та, 2001. С. 90–142.

182. Hakibu T., Carrier D.J., Sokhansanj S., Crowe T. Drying of Feverfew (*Tanacetum Parthenium* L.) // Canadian Agricultural Biosystems Engineering. 2005. V. 47. P. 3. 57–3. 61.

183. Sokhansanj S., Patil R.T. Kinetics of dehydration of green alfalfa // Drying Technology. 1996. V. 14. P. 1197–1234.

184. Saucedo-Castañeda G., Raimbault M., Viniegra-González G. Energy of activation in cassava silages // Journal of the Science of Food and Agriculture. 1990. V. 53. P. 559–562.

185. Deliang Zhou and David J. W. Grant Model Dependence of the Activation Energy Derived from Nonisothermal Kinetic Data // J. Phys. Chem. A. V. 108. 2004. P. 4239–4246.

186. ГОСТ 28245-89 Торф. Методы определения ботанического состава и степени разложения. М. : Изд-во стандартов, 1983. 8 с.
187. ГОСТ 11306-83 Торф и продукты его переработки. Методы определения зольности. М. : Изд-во стандартов, 1989. 7 с.
188. *Kuzin A.Ya., Filkov A.I., Leroy V. and others.* Determination of Drying and Pyrolysis Kinetics for Various Kinds of Peat: Fire Behaviour // VI International Conference on Forest Fire Research: Conference Proceedings, November, 15–18, 2010. ADAI/CEIF. Coimbra, Portugal, 2010. P. 1–11.
189. *Cancellieri D., Leroy-Cancellieri V., Leoni E. and others.* Kinetic Study of Thermal Degradation of Peats by TGA: Fire Behaviour // VI International Conference on Forest Fire Research: Conference Proceedings, November, 15–18, 2010. ADAI/CEIF. Coimbra, Portugal, 2010. P. 1–11.
190. *Kissinger H.E.* Reaction kinetics in differential thermal analysis // Analytical Chemistry, 1957. V. 29. P. 1702–1706.
191. *Subbotin A.N.* Special Features of Propagation of Peat Fire // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2003. V. 76(5). P. 159–165.
192. *Chen H., Zhao W., Liu N.* Thermal analysis and decomposition kinetics of Chinese forest peat under nitrogen and air atmospheres // Energy and Fuels. 2011. V. 25(2). P. 797–803.
193. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике. Для научных работников и инженеров. М. : Наука, 1974. 832 с.
194. *Гришин А.М., Зима В.П., Кузнецов В.Т. и др.* Комплекс установок для исследования природных пожаров // Изв. вузов. Физика. 2009. № 2/2. С. 84–90.
195. *Фильков А.И., Горина И.А., Сладкова Т.Е.* О влиянии плотности и неоднородности напочвенного покрова на скорость распространения низового лесного пожара // Изв. вузов. Физика. 2009. № 2/2. P. 160–165.
196. *Лопатина Г.Г., Сосоров В.П. и др.* Оптические печи. М. : Металлургия, 1967. 215 с.
197. *Состояние природной среды в СССР в 1988 году: Межведомственный доклад / под общ. ред. В.Г. Соколовского // Госкомприрода СССР. 1990. С. 148–156.*
198. *Кузнецов В.Т., Фильков А.И.* Воспламенение различных видов древесины потоком лучистой энергии // Физика горения и взрыва. 2011. Т. 47, № 1. С. 74–79.
199. *Kuznetsov V.T., Filkov A.I.* Ignition of Various Wood by a Radiant Energy Flux: Fire Behaviour // VI International Conference on Forest Fire Research: Conference Proceedings, November, 15–18, 2010. ADAI/CEIF. Coimbra, Portugal, 2010. P. 1–8.
200. *Shafizadeh F.* Utilization of Biomass by Pyrolytic Methods // Joint Forest Biology / Wood Chemistry Mtg., Madison WI. 1997. P. 191–199.

201. Fangrat J., Hasemi Y., Yoshida M., and Hirata T. Surface Temperature at Ignition of Wooden Based Slabs // Fire Safety J. 1996. № 27. P. 249–259.
202. Moghtaderi B., Novozhilov V., Fletcher D. F., and Kent J.H. A New Correlation for Bench-scale Piloted Ignition Data of Wood // Fire Safety J. 1997. № 29. P. 41–59.
203. Buchanan M.A. The Ignition Temperature of Certain Pulps and Other Wood Components // TAPPI. 1952. № 35. P. 209–211.
204. Заболотный А.Е., Заболотная М.М., Тимошин В.Н. Определение зон безопасного применения твердотопливных генераторов пожаротушающих аэрозолей // Вопросы специального машиностроения. 1995. Вып. 7–8. С. 15–22.
205. Гришин А.М., Фильков А.И., Лобода Е.Л. и др. Физическое моделирование полевых и степных пожаров в натуральных условиях // Пожарная безопасность. 2010. № 2. С. 100–105.
206. Гришин А.М., Фильков А.И., Кузнецов В.Т. и др. Физическое моделирование полевых и степных пожаров в натуральных условиях // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы : материалы XVI Междунар. объединенного симпозиума. Томск : Изд-во ИОА СО РАН, 2009. С. 249–252.
207. Grishin A.M., Filkov A.I., Loboda E.L. and others. A Field Experiment on Grass Fire Effects on Wooden Constructions and Peat Layer Ignition // International journal of Wildland Fire. 2014. V. 23(3). P. 445–449.
208. Гришин А.М., Фильков А.И., Лобода Е.Л. и др. Натурные экспериментальные исследования воздействия полевого пожара на деревянные ограждения и слой торфа // Пожарная Безопасность. 2013. № 3. С. 52–58.
209. Гришин А.М., Фильков А.И., Лобода Е.Л. и др. Экспериментальные исследования возникновения и распространения степного пожара в натуральных условиях // Вестник ТГУ. Математика и механика. 2011. № 2(14). С. 91–102.
210. Справочник. Пожаро-взрывоопасность веществ и материалов и средств их тушения / под ред. А.Н. Баратова, А.Я. Корольченко. М. : Химия, 1990. Кн. 2. 384 с.
211. Гришин А.М., Лобода Е.Л. Экспериментальные исследования критического влагосодержания и критической энергии зажигания для отдельных видов полевой растительности // Известия высших учебных заведений. Физика. 2009. Т. 52, № 2/2. С. 96–100.
212. Kim D.H., Lee M.B., Viegas D.X. Ignition of Surface fuels by Cigarette in Forest Fire: Fire Prevention and Management // VI International Conference on Forest Fire Research: Precedings of conference, 15–18 November 2010 / ADAI/CEIF. Coimbra, Portugal, 2010. CD ROM.

213. *Foote E.I., Manzello S.L., and Liu J.* Characterizing firebrand exposure during wildland-urban interface fires // Proc. Fire and Materials 2011 Conference. P. 479–491.
214. *Hammer R.B., Radeloff V.C., Fried J.S., and Stewart S.I.* Wildland-urban interface housing growth during the 1990s in California, Oregon, and Washington // International Journal of Wildland Fire. 2007. V. 16(3). P. 255–265.
215. *Flannigan M.D., Stocks B.J. and Wotton B.M.* Climate change and forest fires // Science of the Total Environment. 2000. V. 262(3). P. 221–229.
216. *Cohen, J.D.* What is the Wildland Fire Threat to Homes? USDA Forest Service Gen. Tech. Rep. PSW–GTR–173. 2000. P. 189–195.
217. *Manzello S.L., Cleary T.G., Shields J.R. and others.* Experimental investigation of firebrands: Generation and ignition of fuel beds // Fire Safety Journal. 2008. V. 43(3). P. 226–233.
218. *Manzello S.L., Shields J.R., Cleary T.G. and others.* On the development and characterization of a firebrand generator // Fire Safety Journal. 2008. V. 43(4). P. 258–268.
219. *Koo E., Pagni P.J., Weise D.R. and Woycheese J.P.* Firebrands and spotting ignition in large-scale fires // International Journal of Wildland Fire. 2010. V. 19(7). P. 818–843.
220. *Tarifa C., Del Notario P. and Moreno F.* On the flight paths and lifetimes of burning particles of wood // Proc. 10th Combustion Institute. 1965. P. 1021–1037.
221. *Albini F.A.* Spot fire distance from burning trees – a predictive model // General Technical Report GTR–INT–56, USDA Forest Service, Ogden, UT. 1979. 73 p.
222. *Albini F.A.* Transport of Firebrands by Line Thermals // Combustion Science and Technology. 1983. V. 32(5–6). P. 277–288.
223. *Tse S.D., Fernandez-Pello A.C.* On the flight paths of metal particles and embers generated by power lines in high winds – a potential source of wildland fires // Fire Safety Journal. 1998. V. 30(4). P. 333–356.
224. *Manzello S.L., Suzuki S., Hayashi Y.* Enabling the study of structure vulnerabilities to ignition from wind driven firebrand showers: A summary of experimental results // Fire Safety Journal. 2012. V. 54. P. 181–196.
225. *Mueller E., Filkov F., Butler B. and others.* Fuel Treatment Effectiveness in Reducing Wildfire Intensity and Spread Rate – An Experimental Review // Proceedings of 4th Fire Behavior and Fuels Conference, 18–22 February 2013, Raleigh, NC and 1–4 July 2013, St. Petersburg, Russia. International Association of Wildland Fire: Missoula, MT, 2014. P. 360–362. 1 электр. опт. диск CD–ROM.
226. *Butler B., Jimenez D., Forthofer J. and others.* A portable system for characterizing wildland fire behavior // VI International Conference on Forest

Fire Research: Precedings of conference, 15–18 November 2010. ADAI/CEIF. Coimbra, Portugal, 2010. CD ROM.

227. *Butler B.* Experimental measurements of radiant heat fluxes from simulated wildfire flames // Proc. Proceedings of the 12th Conference on Fire and Forest Meteorology, 1993. P. 104–111.

228. *Frankman D., Webb B.W., Butler B.W. and others.* Measurements of convective and radiative heating in wildland fires // International Journal of Wildland Fire. 2013. V. 22. P. 157–167.

229. *Morandini F., Silvani X.* Experimental investigation of the physical mechanisms governing the spread of wildfires // International Journal of Wildland Fire. 2010. V. 19(5). P. 570–582.

230. *Yassemi S., Dragicevic S., Schmidt M.G.* Design and implementation of an integrated GIS-based cellular automata model to characterize forest fire behaviour // Ecological modelling. 2008. V. 210. P. 71–84.

231. *Guarnieri F., Andersen C.K., Olampi S., Chambinaud N.* FIRELAB: towards a problem solving environment to support forest fire behaviour modelling // Proc. III International Conference on Forest Fire Research / 14th Conference on Fire and Forest Meteorology. Luso. 1998. Vol. I. P. 483–496.

232. *Фильков А.И.* Создание крупномасштабных векторных карт для прогноза пожарной опасности // Изв. вузов. Физика. 2009. № 2/2. С. 156–160.

233. *Гришин А.М., Фильков А.И.* Геоинформационная система прогноза лесной пожарной опасности // Природные пожары: возникновение, распространение, тушение и экологические последствия : материалы 5-й междунар. конф. Томск : Томский государственный университет, 2004. С. 175–185.

234. *Фильков А.И., Сладкова Т.Е., Горина И.А.* О создании электронных карт для прогноза лесной пожарной опасности и базы данных для нее // Пожары в лесных экосистемах Сибири. Материалы Всероссийской конференции с международным участием. Красноярск : Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, 2008. С. 84–86.

235. *Гришин А.М., Фильков А.И.* О геоинформационной системе прогноза лесной пожарной опасности // Экологические системы и приборы. 2004. № 8. С. 26–28.

236. *Фильков А.И.* Геоинформационное обеспечение для системы прогноза лесных пожаров // Международная конференция по математике и механике: Избранные доклады. Томск : Изд-во Том. ун-та, 2003. С. 235–240.

237. *Введение в Arc View GIS.* Новосибирск : Учебный центр «ГИС-проект», 1997. 221 с.

238. *Проект организации и развития лесного хозяйства Белоярского мехлесхоза Томского управления лесного хозяйства Министерства лесного хозяйства РСФСР.* Новосибирск, 1986. Т. 1, кн. 1.

239. *Гладкий Д.А., Фильков А.И.* Программный комплекс для визуализации результатов прогноза возникновения и распространения лесных пожаров в геоинформационной системе // Современные проблемы математики и механики : материалы Всерос. молодежн. науч. конф. Томского государственного университета (13–15 октября 2010 г.). Томск : Изд-во Том. ун-та, 2010. С. 39–44.

240. *Фильков А.И., Гладкий Д.А.* Разработка программного комплекса для визуализации результатов прогноза возникновения и распространения лесных пожаров в геоинформационной системе // Физика и химия высокоэнергетических систем : сборник материалов VI Всерос. конф. молодых ученых (14–17 апреля 2010 г., г. Томск). Томск : ТМЛ-Пресс, 2010. С. 181–184.

241. *Фильков А.И., Гладкий Д.А.* Разработка программного комплекса для визуализации результатов прогноза возникновения и распространения лесных пожаров в геоинформационной системе // Вычислительные технологии. 2011. Т. 16, № 5. С. 89–99.

242. *Гришин А.М., Долгов А.А., Цимбалюк А.Ф.* Методика определения и расчета выбросов загрязняющих веществ от лесных пожаров. Издание официальное. М. : Государственный комитет Российской Федерации по охране окружающей сред, 1997. 24 с.

243. *Viegas X.D.* Wind and topography effects on fire behavior // Advanced study course on Wildfire Management. Proceedings of the Advanced study course held in Marathon, Greece (6–14 October 1997) / eds. by G. Eftichidis, P. Balabanis, A. Ghazi. 1998. P. 125–141.

244. *Королев Г.М., Охrameц Т.И.* К вопросу о скорости распространения лесных пожаров // Природные пожары: возникновение, распространение, тушение и экологические последствия : материалы 5-й Междунар. конф. Томск : Томский государственный университет, 2003. С. 127.

245. *Валендик Э.Н., Воробьев О.Ю., Матвеев А.М.* Прогнозирование контуров лесных пожаров на ЭВМ // Характеристика процессов горения в лесу. Красноярск, 1977. С. 52–56.

ПРИЛОЖЕНИЯ

База данных для прогноза лесной пожарной опасности

Номер квартала	Номер выдела	Начальная масса образца на площади 0,005 м ² , г	Начальная масса хвой в образце, г	Начальная масса листьев в образце, г	Начальная масса травы в образце, г	Начальная масса мха в образце, г	Абсолютно сухая масса хвой в образце, г	Абсолютно сухая масса листьев в образце, г	Абсолютно сухая масса травы в образце, г	Абсолютно сухая масса мха в образце, г	Абсолютно сухая масса образца на площади 0,005 м ² , г	Высота слоя РГМ, см
166	23	3,798	0,252	3,165	0,382	0	0,2	1,892	0,266	0	2,358	3,6
97	1	3,464	0,194	2,904	0,366	0	0,154	1,746	0,264	0	2,164	2,6
102	20	3,942	0,248	3,296	0,398	0	0,204	1,978	0,276	0	2,458	3,8
102	11	5,202	0,728	4,1	0,374	0	0,582	2,482	0,262	0	3,326	4,1
107	22	5,404	0,144	4,514	0,746	0	0,114	2,724	0,522	0	3,36	4,6
95	2	4,994	0,178	4,566	0,25	0	0,134	2,744	0,17	0	3,048	4,7
106	5	7,368	0,758	5,496	1,114	0	0,604	3,306	0,752	0	4,662	5,4
75	15	6,93	0,532	5,326	1,072	0	0,422	3,194	0,748	0	4,364	5,9
102	9	5,112	2,488	1,27	1,354	0	1,99	0,76	0,946	0	3,696	4,2
103	7	6,292	4,636	1,322	0,334	0	3,706	0,794	0,23	0	4,73	5
72	8	3,582	2,332	0,696	0,584	0	1,862	0,614	0,386	0	2,862	3,5
109	13	4,716	2,776	1,254	0,686	0	2,216	0,748	0,474	0	3,438	4
78	18	4,53	2,286	1,258	0,986	0	1,824	0,752	0,688	0	3,264	2,7
118	19	7,636	5,416	1,696	0,524	0	4,33	1,014	0,362	0	5,706	5,6
94	11	4,344	2,75	1,05	0,544	0	2,198	0,626	0,378	0	3,202	3,7
24	18	3,896	2,474	0,904	0,518	0	1,974	0,538	0,356	0	2,868	4,2
126	21	4,882	2,612	1,148	1,122	0	2,086	0,686	0,778	0	3,55	4,1
96	24	5,606	4,032	0,83	0,744	0	3,224	0,496	0,518	0	4,238	4
154	24	4	3,134	0,148	0,718	0	2,502	0,084	0,498	0	3,084	3,9
112	3	10,542	2,268	2,26	0	6,014	1,812	1,35	0	2,402	5,564	7
98	20	5,784	3,658	1,254	0,872	0	2,924	0,75	0,606	0	4,28	4,7

Номер квар- тала	Но- мер вы- дела	Началь- ная масса образца на пло- щади 0,005 м ² , г	Начальная масса хвой в образце, г	Начальная масса листьев в образце, г	Начальная масса травы в образце, г	Начальная масса мха в образце, г	Абсолютно сухая масса хвой в образце, г	Абсолютно сухая масса листьев в образце, г	Абсолютно сухая масса травы в образце, г	Абсолютно сухая масса мха в образце, г	Абсолютно сухая масса образца на пло- щади 0,005 м ² , г	Высота слоя ргМ, см
102	5	6,042	1,778	3,1	1,164	0	1,418	1,856	0,81	0	4,084	4,1
96	14	4,414	0	2,184	2,23	0	0	1,308	1,554	0	2,862	4
119	13	4,266	2,172	0,712	1,342	0	1,734	0,422	0,936	0	3,092	4,3
165	12	5,098	2,862	0,524	1,712	0	2,286	0,31	1,194	0	3,79	4
165	28	4,32	3,234	0	1,086	0	2,584	0	0,754	0	3,338	3,8
99	20	6,596	3,19	2,202	1,204	0	2,546	1,316	0,838	0	4,7	5,1
96	10	5,514	3,176	1,176	1,162	0	2,538	0,7	0,81	0	4,048	3,9
96	17	6,272	0,846	0,41	0	5,016	0,674	0,242	0	2,002	2,918	4,8
18	12	5,224	0	4,114	1,11	0	0	2,462	0,772	0	3,234	3,8
112	4	6,4	0,832	0	0	5,568	0,662	0	0	2,224	2,886	5,6
93	8	4,518	0	3,778	0,74	0	0	2,242	0,518	0	2,76	4,9
104	11	4,256	3,332	0,34	0,584	0	2,68	0,206	0,41	0	3,296	3,6
131	8	4,698	1,084	0,618	0,782	2,214	0,862	0,368	0,542	0,88	2,652	4
96	22	4,304	0	3,216	1,088	0	0	1,926	0,75	0	2,676	3,3
158	12	4,41	0	3,634	0,776	0	0	2,164	0,54	0	2,704	5,1
158	17	3,428	0	2,836	0,592	0	0	1,698	0,41	0	2,108	4
95	13	4,106	2,356	0,982	0,768	0	1,88	0,584	0,532	0	2,996	4,1
81	4	5,568	4,4	0,334	0,834	0	3,516	0,196	0,578	0	4,29	5,3

Приложение 2

Результаты обнаружения лесных пожаров в Тимирязевском лесхозе

Дата обнаружения пожара	Лесничество	Номер квартала	Номер выдела	Причина возникновения пожара
20.05.2000	Учебное	58	4	Неосторожное обращение с огнем
20.05.2000	Учебное	140	1	Неосторожное обращение с огнем
22.05.2000	Учебное	53	5	Неосторожное обращение с огнем
22.05.2000	Учебное	53	3	Неосторожное обращение с огнем
23.05.2000	Учебное	26	11	Неосторожное обращение с огнем
24.05.2000	Учебное	36	31	Неосторожное обращение с огнем
24.05.2000	Учебное	139	1	Неосторожное обращение с огнем
25.05.2000	Учебное	13	40	Неосторожное обращение с огнем
26.05.2000	Учебное	35	7	Неосторожное обращение с огнем
26.05.2000	Учебное	73	1	Неосторожное обращение с огнем
27.05.2000	Моряковское	124	7,9	Неосторожное обращение с огнем
27.05.2000	Учебное	14	2	Неосторожное обращение с огнем
27.05.2000	Учебное	57	1	Неосторожное обращение с огнем
28.05.2000	Учебное	67	8	Неосторожное обращение с огнем
28.05.2000	Учебное	67	9	Неосторожное обращение с огнем
15.06.2000	Учебное	64	6	Неосторожное обращение с огнем
17.06.2000	Учебное	65	2	Неосторожное обращение с огнем
17.06.2000	Учебное	61	5	Неосторожное обращение с огнем
17.06.2000	Учебное	25	3	Неосторожное обращение с огнем
18.06.2000	Учебное	30	37	Неосторожное обращение с огнем
19.06.2000	Учебное	67	10	Неосторожное обращение с огнем
20.06.2000	Темерчинское	36	1	Неосторожное обращение с огнем
20.06.2000	Учебное	39	24	Неосторожное обращение с огнем
21.06.2000	Жуковское	76	9,13	Неосторожное обращение с огнем
21.06.2000	Жуковское	94	1	Неосторожное обращение с огнем
21.06.2000	Учебное	126	17	Неосторожное обращение с огнем
21.06.2000	Учебное	39	18	Неосторожное обращение с огнем
21.06.2000	Темерчинское	28	7	Неосторожное обращение с огнем
21.06.2000	Темерчинское	126	6	Неосторожное обращение с огнем
21.06.2000	Учебное	126	4	Неосторожное обращение с огнем
22.06.2000	Учебное	41	31	Неосторожное обращение с огнем
22.06.2000	Учебное	50	10	Неосторожное обращение с огнем
23.06.2000	Учебное	126	4	Неосторожное обращение с огнем
25.06.2000	Учебное	36	38	Неосторожное обращение с огнем
26.06.2000	Учебное	20	29	Неосторожное обращение с огнем
26.06.2000	Учебное	20	23	Неосторожное обращение с огнем
26.06.2000	Учебное	36	19	Неосторожное обращение с огнем

Дата обнаружения пожара	Лесничество	Номер квартала	Номер выдела	Причина возникновения пожара
26.06.2000	Учебное	36	25	Неосторожное обращение с огнем
26.06.2000	Учебное	55	3	Неосторожное обращение с огнем
26.06.2000	Учебное	36	26	Неосторожное обращение с огнем
26.06.2000	Учебное	35	39	Неосторожное обращение с огнем
27.06.2000	Богородское	30	12	Неосторожное обращение с огнем
28.06.2000	Учебное	36	23	Неосторожное обращение с огнем
28.06.2000	Учебное	26	36	Неосторожное обращение с огнем
30.06.2000	Учебное	36	22	Неосторожное обращение с огнем
01.07.2000	Учебное	55	7	Неосторожное обращение с огнем
01.07.2000	Учебное	25	17	Неосторожное обращение с огнем
01.07.2000	Учебное	56	1	Неосторожное обращение с огнем
02.07.2000	Учебное	36	23	Неосторожное обращение с огнем
02.07.2000	Учебное	59	3	Неосторожное обращение с огнем
03.07.2000	Темерчинское	127	17	Неосторожное обращение с огнем
03.07.2000	Учебное	7	33	Неосторожное обращение с огнем
03.07.2000	Учебное	65	1	Неосторожное обращение с огнем
04.07.2000	Учебное	30	33	Неосторожное обращение с огнем
04.07.2000	Учебное	24	11	Неосторожное обращение с огнем
04.07.2000	Учебное	26	19	Неосторожное обращение с огнем
05.07.2000	Учебное	61	2	Неосторожное обращение с огнем
05.07.2000	Учебное	61	4	Неосторожное обращение с огнем
05.07.2000	Учебное	60	5	Неосторожное обращение с огнем
06.07.2000	Учебное	35	37	Неосторожное обращение с огнем
07.07.2000	Учебное	58	5	Неосторожное обращение с огнем
08.07.2000	Учебное	67	10	Неосторожное обращение с огнем
09.07.2000	Учебное	66	1	Неосторожное обращение с огнем
10.07.2000	Учебное	34	6	Неосторожное обращение с огнем
10.07.2000	Учебное	33	24	Неосторожное обращение с огнем
11.07.2000	Жуковское	93	8, 12–14	Неосторожное обращение с огнем
11.07.2000	Жуковское	94	1, 2, 4, 7–9, 11–13, 18	Неосторожное обращение с огнем
11.07.2000	Учебное	33	14	Неосторожное обращение с огнем
13.07.2000	Учебное	55	1	Неосторожное обращение с огнем
13.07.2000	Учебное	20	31	Неосторожное обращение с огнем
31.07.2000	Учебное	30	31	Неосторожное обращение с огнем
01.08.2000	Учебное	36	25	Неосторожное обращение с огнем
01.08.2000	Учебное	46	9	Неосторожное обращение с огнем
05.08.2000	Учебное	35	3	Неосторожное обращение с огнем
07.08.2000	Учебное	33	27	Неосторожное обращение с огнем
08.08.2000	Учебное	81	17	Грозовой разряд

Дата обнару- жения пожара	Лесничество	Номер квартала	Номер выдела	Причина возникновения пожара
15.08.2000	Учебное	35	8	Неосторожное обращение с огнем
15.08.2000	Учебное	30	33	Неосторожное обращение с огнем
17.08.2000	Учебное	23	4	Неосторожное обращение с огнем
17.08.2000	Учебное	23	15	Неосторожное обращение с огнем
17.08.2000	Учебное	29	8	Неосторожное обращение с огнем
17.08.2000	Учебное	43	5	Неосторожное обращение с огнем
17.08.2000	Учебное	70	2	Неосторожное обращение с огнем
17.08.2000	Учебное	23	14	Неосторожное обращение с огнем
18.08.2000	Учебное	34	9	Неосторожное обращение с огнем
18.08.2000	Учебное	34	7	Неосторожное обращение с огнем
20.08.2000	Учебное	23	28	Неосторожное обращение с огнем
20.08.2000	Учебное	23	29	Неосторожное обращение с огнем
27.08.2000	Учебное	26	1	Неосторожное обращение с огнем
03.09.2000	Учебное	60	1	Неосторожное обращение с огнем
07.09.2000	Учебное	59	5	Неосторожное обращение с огнем
08.09.2000	Учебное	20	31	Неосторожное обращение с огнем
08.09.2000	Учебное	26	16	Неосторожное обращение с огнем
08.09.2000	Учебное	29	8	Неосторожное обращение с огнем
08.09.2000	Учебное	35	34	Неосторожное обращение с огнем
10.09.2000	Учебное	23	4	Неосторожное обращение с огнем
10.09.2000	Учебное	23	3	Неосторожное обращение с огнем
10.09.2000	Учебное	23	20	Неосторожное обращение с огнем
06.05.2001	Учебное	41	7	Неосторожное обращение с огнем
06.05.2001	Учебное	41	9	Неосторожное обращение с огнем
08.05.2001	Учебное	64	2	Неосторожное обращение с огнем
08.05.2001	Учебное	64	5	Неосторожное обращение с огнем
08.05.2001	Учебное	65	1	Неосторожное обращение с огнем
09.05.2001	Учебное	60	2	Неосторожное обращение с огнем
09.05.2001	Учебное	25	2	Неосторожное обращение с огнем
09.05.2001	Учебное	35	15	Неосторожное обращение с огнем
10.05.2001	Богородское	113	11, 21–23	Неосторожное обращение с огнем
10.05.2001	Богородское	114	15, 22, 24–26	Неосторожное обращение с огнем
10.05.2001	Богородское	115	30, 31	Неосторожное обращение с огнем
14.05.2001	Учебное	65	1	Неосторожное обращение с огнем
15.05.2001	Учебное	19	19	Неосторожное обращение с огнем
15.05.2001	Учебное	12	21	Неосторожное обращение с огнем
16.05.2001	Учебное	39	2	Неосторожное обращение с огнем
16.05.2001	Учебное	40	31	Неосторожное обращение с огнем
17.05.2001	Учебное	71	1	Неосторожное обращение с огнем
17.05.2001	Учебное	59	1	Неосторожное обращение с огнем

Дата обнару- жения пожара	Лесничество	Номер квартала	Номер выдела	Причина возникновения пожара
17.05.2001	Учебное	26	28	Неосторожное обращение с огнем
19.05.2001	Учебное	53	6	Неосторожное обращение с огнем
23.05.2001	Учебное	26	36	Неосторожное обращение с огнем
23.05.2001	Учебное	56	1	Неосторожное обращение с огнем
23.05.2001	Учебное	53	5	Неосторожное обращение с огнем
24.05.2001	Учебное	59	3	Неосторожное обращение с огнем
24.05.2001	Учебное	20	23	Неосторожное обращение с огнем
24.05.2001	Учебное	31	2	Неосторожное обращение с огнем
24.05.2001	Учебное	60	5	Неосторожное обращение с огнем
26.05.2001	Учебное	36	25	Неосторожное обращение с огнем
26.05.2001	Учебное	70	5	Неосторожное обращение с огнем
26.05.2001	Учебное	59	4	Неосторожное обращение с огнем
26.05.2001	Учебное	67	10	Неосторожное обращение с огнем
27.05.2001	Моряковское	172	2	Неосторожное обращение с огнем
27.05.2001	Учебное	12	31	Неосторожное обращение с огнем
27.05.2001	Учебное	20	14	Неосторожное обращение с огнем
28.05.2001	Учебное	64	2	Неосторожное обращение с огнем
01.06.2001	Учебное	30	31	Неосторожное обращение с огнем
05.06.2001	Учебное	40	34	Неосторожное обращение с огнем
09.06.2001	Учебное	30	22	Неосторожное обращение с огнем
09.06.2001	Учебное	30	31	Неосторожное обращение с огнем
09.06.2001	Учебное	20	31	Неосторожное обращение с огнем
21.06.2001	Учебное	30	2	Неосторожное обращение с огнем
21.06.2001	Учебное	67	10	Неосторожное обращение с огнем
22.06.2001	Учебное	30	32	Неосторожное обращение с огнем
22.06.2001	Учебное	24	3	Неосторожное обращение с огнем
27.06.2001	Богородское	30	4	Неосторожное обращение с огнем
28.06.2001	Учебное	30	2	Неосторожное обращение с огнем
28.06.2001	Учебное	31	17	Неосторожное обращение с огнем
28.06.2001	Учебное	24	3	Неосторожное обращение с огнем
04.07.2001	Учебное	35	19	Неосторожное обращение с огнем
04.07.2001	Учебное	25	9	Неосторожное обращение с огнем
07.07.2001	Учебное	14	12	Неосторожное обращение с огнем
09.07.2001	Учебное	25	9	Неосторожное обращение с огнем
13.07.2001	Учебное	36	20	Неосторожное обращение с огнем
28.07.2001	Учебное	35	1	Неосторожное обращение с огнем
01.08.2001	Учебное	12	21	Неосторожное обращение с огнем
04.08.2001	Учебное	56	1	Неосторожное обращение с огнем
04.08.2001	Учебное	35	21	Неосторожное обращение с огнем
04.08.2001	Учебное	35	17	Неосторожное обращение с огнем

Дата обнару- жения пожара	Лесничество	Номер квартала	Номер выдела	Причина возникновения пожара
04.08.2001	Учебное	26	5	Неосторожное обращение с огнем
05.08.2001	Учебное	36	20	Неосторожное обращение с огнем
05.08.2001	Учебное	35	14	Неосторожное обращение с огнем
06.08.2001	Учебное	38	26	Неосторожное обращение с огнем
06.08.2001	Учебное	36	3	Неосторожное обращение с огнем
06.08.2001	Учебное	38	22	Неосторожное обращение с огнем
06.08.2001	Учебное	36	22	Неосторожное обращение с огнем
06.08.2001	Учебное	35	20	Неосторожное обращение с огнем
06.08.2001	Учебное	38	15	Неосторожное обращение с огнем
07.08.2001	Учебное	38	14	Неосторожное обращение с огнем
08.08.2001	Учебное	30	37	Неосторожное обращение с огнем
08.08.2001	Учебное	25	11	Неосторожное обращение с огнем
08.08.2001	Учебное	26	9	Неосторожное обращение с огнем
16.08.2001	Учебное	20	26	Неосторожное обращение с огнем
29.08.2001	Учебное	36	27	Неосторожное обращение с огнем
29.08.2001	Учебное	59	3	Неосторожное обращение с огнем
29.08.2001	Учебное	65	1	Неосторожное обращение с огнем
17.09.2001	Учебное	12	25	Неосторожное обращение с огнем
05.05.2002	Учебное	26	3	Неосторожное обращение с огнем
06.05.2002	Учебное	72	1	Неосторожное обращение с огнем
08.05.2002	Учебное	20	36	Неосторожное обращение с огнем
19.05.2002	Учебное	20	36	Неосторожное обращение с огнем
20.05.2002	Учебное	13	33	Неосторожное обращение с огнем
20.05.2002	Учебное	36	6	Неосторожное обращение с огнем
20.05.2002	Учебное	14	13	Неосторожное обращение с огнем
20.05.2002	Учебное	15	2	Неосторожное обращение с огнем
21.05.2002	Учебное	9	26	Неосторожное обращение с огнем
22.05.2002	Учебное	71	1	Неосторожное обращение с огнем
22.05.2002	Учебное	71	4	Неосторожное обращение с огнем
22.05.2002	Учебное	30	16	Неосторожное обращение с огнем
22.05.2002	Учебное	30	14	Неосторожное обращение с огнем
22.05.2002	Учебное	31	1	Неосторожное обращение с огнем
23.05.2002	Учебное	13	30	Неосторожное обращение с огнем
23.05.2002	Учебное	20	23	Неосторожное обращение с огнем
24.05.2002	Учебное	57	1	Неосторожное обращение с огнем
24.05.2002	Учебное	13	33	Неосторожное обращение с огнем
24.05.2002	Учебное	25	17	Неосторожное обращение с огнем
24.05.2002	Учебное	25	9	Неосторожное обращение с огнем
24.05.2002	Учебное	7	4	Неосторожное обращение с огнем
26.05.2002	Учебное	12	21	Неосторожное обращение с огнем

Дата обнару- жения пожара	Лесничество	Номер квартала	Номер выдела	Причина возникновения пожара
26.05.2002	Учебное	20	23	Неосторожное обращение с огнем
26.05.2002	Учебное	18	20	Неосторожное обращение с огнем
26.05.2002	Учебное	18	17	Неосторожное обращение с огнем
26.05.2002	Учебное	26	6	Неосторожное обращение с огнем
27.05.2002	Моряковское	135	15	Неосторожное обращение с огнем
27.05.2002	Моряковское	170	16	Неосторожное обращение с огнем
28.05.2002	Учебное	20	26	Неосторожное обращение с огнем
28.05.2002	Учебное	20	25	Неосторожное обращение с огнем
28.05.2002	Учебное	20	28	Неосторожное обращение с огнем
06.05.2003	Учебное	26	13	Неосторожное обращение с огнем
06.05.2003	Учебное	55	4	Неосторожное обращение с огнем
09.05.2003	Учебное	41	21	Неосторожное обращение с огнем
09.05.2003	Учебное	40	15	Неосторожное обращение с огнем
10.05.2003	Учебное	65	1	Неосторожное обращение с огнем
10.05.2003	Учебное	65	2	Неосторожное обращение с огнем
11.05.2003	Учебное	20	21	Неосторожное обращение с огнем
11.05.2003	Учебное	20	24	Неосторожное обращение с огнем
11.05.2003	Учебное	20	11	Неосторожное обращение с огнем
11.05.2003	Учебное	26	25	Неосторожное обращение с огнем
11.05.2003	Учебное	20	22	Неосторожное обращение с огнем
12.05.2003	Учебное	57	3	Неосторожное обращение с огнем
12.05.2003	Учебное	36	3	Неосторожное обращение с огнем
12.05.2003	Учебное	25	2	Неосторожное обращение с огнем
12.05.2003	Учебное	25	5	Неосторожное обращение с огнем
12.05.2003	Учебное	25	3	Неосторожное обращение с огнем
12.05.2003	Учебное	18	30	Неосторожное обращение с огнем
12.05.2003	Учебное	18	31	Неосторожное обращение с огнем
12.05.2003	Учебное	18	32	Неосторожное обращение с огнем
12.05.2003	Учебное	18	33	Неосторожное обращение с огнем
12.05.2003	Учебное	24	1	Неосторожное обращение с огнем
12.05.2003	Учебное	24	2	Неосторожное обращение с огнем
12.05.2003	Учебное	24	3	Неосторожное обращение с огнем
12.05.2003	Учебное	64	5	Неосторожное обращение с огнем
12.05.2003	Учебное	35	29	Неосторожное обращение с огнем
12.05.2003	Учебное	56	3	Неосторожное обращение с огнем
13.05.2003	Киреевское	175	4,7	Неосторожное обращение с огнем
14.05.2003	Богородское	57	—	Неосторожное обращение с огнем
14.05.2003	Богородское	90	28, 31, 44, 45	Неосторожное обращение с огнем
14.05.2003	Учебное	57	3	Неосторожное обращение с огнем
15.05.2003	Учебное	50	6	Неосторожное обращение с огнем

Дата обнаружения пожара	Лесничество	Номер квартала	Номер выдела	Причина возникновения пожара
15.05.2003	Учебное	24	38	Неосторожное обращение с огнем
15.05.2003	Учебное	16	3	Неосторожное обращение с огнем
15.05.2003	Учебное	65	1	Неосторожное обращение с огнем
17.05.2003	Темерчинское	126	17	Неосторожное обращение с огнем
17.05.2003	Учебное	36	5	Неосторожное обращение с огнем
17.05.2003	Учебное	55	1	Неосторожное обращение с огнем
17.05.2003	Учебное	65	2	Неосторожное обращение с огнем
17.05.2003	Учебное	126	17	Неосторожное обращение с огнем
17.05.2003	Учебное	24	24	Неосторожное обращение с огнем
18.05.2003	Учебное	31	4	Неосторожное обращение с огнем
18.05.2003	Учебное	26	3	Неосторожное обращение с огнем
18.05.2003	Учебное	26	4	Неосторожное обращение с огнем
19.05.2003	Учебное	23	4	Неосторожное обращение с огнем
19.05.2003	Учебное	59	5	Неосторожное обращение с огнем
21.05.2003	Учебное	44	2	Неосторожное обращение с огнем
21.05.2003	Учебное	44	10	Неосторожное обращение с огнем
21.05.2003	Учебное	43	8	Неосторожное обращение с огнем
21.05.2003	Учебное	38	33	Неосторожное обращение с огнем
22.05.2003	Учебное	67	9	Неосторожное обращение с огнем
22.05.2003	Учебное	31	8	Неосторожное обращение с огнем
23.05.2003	Учебное	68	1	Неосторожное обращение с огнем
23.05.2003	Учебное	56	5	Неосторожное обращение с огнем
24.05.2003	Учебное	34	4	Неосторожное обращение с огнем
24.05.2003	Учебное	15	19	Неосторожное обращение с огнем
24.05.2003	Учебное	15	16	Неосторожное обращение с огнем
03.06.2003	Учебное	20	24	Неосторожное обращение с огнем
04.06.2003	Темерчинское	144	5	Неосторожное обращение с огнем
04.06.2003	Учебное	24	17	Неосторожное обращение с огнем
04.06.2003	Учебное	35	17	Неосторожное обращение с огнем
04.06.2003	Учебное	15	2	Неосторожное обращение с огнем
04.06.2003	Учебное	20	22	Неосторожное обращение с огнем
04.06.2003	Учебное	71	3	Неосторожное обращение с огнем
06.06.2003	Учебное	35	16	Неосторожное обращение с огнем
07.06.2003	Учебное	29	23	Неосторожное обращение с огнем
07.06.2003	Учебное	29	30	Неосторожное обращение с огнем
07.06.2003	Учебное	36	16	Неосторожное обращение с огнем
11.06.2003	Учебное	40	39	Неосторожное обращение с огнем
12.06.2003	Учебное	50	14	Неосторожное обращение с огнем
12.06.2003	Учебное	23	9	Неосторожное обращение с огнем
13.06.2003	Учебное	30	23	Неосторожное обращение с огнем

Дата обнаружения пожара	Лесничество	Номер квартала	Номер выдела	Причина возникновения пожара
13.06.2003	Учебное	35	32	Неосторожное обращение с огнем
13.06.2003	Учебное	30	28	Неосторожное обращение с огнем
13.06.2003	Учебное	62	1	Неосторожное обращение с огнем
15.06.2003	Учебное	26	32	Неосторожное обращение с огнем
16.06.2003	Учебное	65	2	Неосторожное обращение с огнем
16.06.2003	Учебное	43	9	Неосторожное обращение с огнем
20.06.2003	Богородское	87	17	Неосторожное обращение с огнем
20.06.2003	Учебное	36	40	Неосторожное обращение с огнем
21.06.2003	Учебное	39	11	Неосторожное обращение с огнем
21.06.2003	Учебное	39	29	Неосторожное обращение с огнем
21.06.2003	Учебное	36	9	Неосторожное обращение с огнем
26.06.2003	Учебное	12	21	Неосторожное обращение с огнем
26.06.2003	Учебное	11	36	Неосторожное обращение с огнем
26.06.2003	Учебное	19	14	Неосторожное обращение с огнем
27.06.2003	Учебное	20	25	Неосторожное обращение с огнем
27.06.2003	Учебное	20	11	Неосторожное обращение с огнем
27.06.2003	Учебное	53	9	Неосторожное обращение с огнем
28.06.2003	Темерчинское	50	22	Неосторожное обращение с огнем
28.06.2003	Учебное	50	14	Неосторожное обращение с огнем
28.06.2003	Учебное	16	24	Неосторожное обращение с огнем
29.06.2003	Учебное	58	6	Неосторожное обращение с огнем
29.06.2003	Учебное	31	19	Неосторожное обращение с огнем
30.06.2003	Учебное	65	2	Неосторожное обращение с огнем
30.06.2003	Учебное	63	8	Неосторожное обращение с огнем
30.06.2003	Учебное	41	32	Неосторожное обращение с огнем
01.07.2003	Учебное	14	12	Неосторожное обращение с огнем
01.07.2003	Учебное	14	14	Неосторожное обращение с огнем
01.07.2003	Учебное	14	8	Неосторожное обращение с огнем
02.07.2003	Темерчинское	52	14	Неосторожное обращение с огнем
02.07.2003	Темерчинское	139	14	Неосторожное обращение с огнем
02.07.2003	Темерчинское	52	14	Неосторожное обращение с огнем
02.07.2003	Темерчинское	139	14	Неосторожное обращение с огнем
03.07.2003	Учебное	10	20	Неосторожное обращение с огнем
03.07.2003	Учебное	71	3	Неосторожное обращение с огнем
04.07.2003	Учебное	52	6	Неосторожное обращение с огнем
05.07.2003	Учебное	31	24	Неосторожное обращение с огнем
05.07.2003	Учебное	70	8	Неосторожное обращение с огнем
06.07.2003	Темерчинское	124	3	Неосторожное обращение с огнем
06.07.2003	Темерчинское	124	3	Неосторожное обращение с огнем
06.07.2003	Учебное	72	3	Неосторожное обращение с огнем

Дата обнаружения пожара	Лесничество	Номер квартала	Номер выдела	Причина возникновения пожара
06.07.2003	Учебное	31	4	Неосторожное обращение с огнем
06.07.2003	Учебное	30	27	Неосторожное обращение с огнем
06.07.2003	Учебное	58	6	Неосторожное обращение с огнем
07.07.2003	Учебное	60	8	Неосторожное обращение с огнем
08.07.2003	Учебное	34	14	Неосторожное обращение с огнем
08.07.2003	Учебное	10	30	Неосторожное обращение с огнем
08.07.2003	Учебное	36	31	Неосторожное обращение с огнем
08.07.2003	Учебное	12	30	Неосторожное обращение с огнем
08.07.2003	Учебное	20	29	Неосторожное обращение с огнем
09.07.2003	Учебное	35	6	Неосторожное обращение с огнем
16.07.2003	Учебное	31	34	Неосторожное обращение с огнем
16.07.2003	Учебное	31	8	Неосторожное обращение с огнем
16.07.2003	Учебное	58	5	Неосторожное обращение с огнем
17.07.2003	Темерчинское	141	27	Неосторожное обращение с огнем
17.07.2003	Темерчинское	141	27	Неосторожное обращение с огнем
20.07.2003	Учебное	13	33	Неосторожное обращение с огнем
21.07.2003	Учебное	64	10	Неосторожное обращение с огнем
22.07.2003	Учебное	25	26	Неосторожное обращение с огнем
22.07.2003	Учебное	35	19	Неосторожное обращение с огнем
22.07.2003	Учебное	19	24	Неосторожное обращение с огнем
24.07.2003	Учебное	59	2	Неосторожное обращение с огнем
30.07.2003	Темерчинское	127	5	Неосторожное обращение с огнем
30.07.2003	Темерчинское	127	5	Неосторожное обращение с огнем
30.07.2003	Учебное	23	20	Неосторожное обращение с огнем
30.07.2003	Учебное	61	5	Неосторожное обращение с огнем
30.07.2003	Учебное	60	1	Неосторожное обращение с огнем
08.08.2003	Учебное	60	1	Неосторожное обращение с огнем
15.08.2003	Учебное	55	3	Неосторожное обращение с огнем
15.08.2003	Учебное	26	15	Неосторожное обращение с огнем
16.08.2003	Учебное	2	21	Неосторожное обращение с огнем
16.08.2003	Учебное	27	6	Неосторожное обращение с огнем
16.08.2003	Учебное	58	5	Неосторожное обращение с огнем
16.08.2003	Учебное	33	8	Неосторожное обращение с огнем
16.08.2003	Учебное	20	22	Неосторожное обращение с огнем
16.08.2003	Учебное	36	4	Неосторожное обращение с огнем
17.08.2003	Учебное	19	21	Неосторожное обращение с огнем
17.08.2003	Учебное	26	12	Неосторожное обращение с огнем
17.08.2003	Учебное	57	3	Неосторожное обращение с огнем
17.08.2003	Учебное	53	5	Неосторожное обращение с огнем
17.08.2003	Учебное	26	26	Неосторожное обращение с огнем

Дата обнаружения пожара	Лесничество	Номер квартала	Номер выдела	Причина возникновения пожара
17.08.2003	Учебное	30	13	Неосторожное обращение с огнем
17.08.2003	Учебное	30	30	Неосторожное обращение с огнем
17.08.2003	Учебное	26	14	Неосторожное обращение с огнем
18.08.2003	Учебное	26	13	Неосторожное обращение с огнем
18.08.2003	Учебное	26	27	Неосторожное обращение с огнем
18.08.2003	Учебное	31	13	Неосторожное обращение с огнем
18.08.2003	Учебное	60	8	Неосторожное обращение с огнем
18.08.2003	Учебное	61	5	Неосторожное обращение с огнем
19.08.2003	Учебное	33	9	Неосторожное обращение с огнем
19.08.2003	Учебное	33	14	Неосторожное обращение с огнем
20.08.2003	Темерчинское	72	30, 32, 33	Неосторожное обращение с огнем
20.08.2003	Темерчинское	85	6, 8–10, 16, 17	Неосторожное обращение с огнем
20.08.2003	Темерчинское	86	1	Неосторожное обращение с огнем
20.08.2003	Учебное	21	20	Неосторожное обращение с огнем
21.08.2003	Темерчинское	7	5	Неосторожное обращение с огнем
21.08.2003	Темерчинское	27	19, 22, 26	Неосторожное обращение с огнем
21.08.2003	Темерчинское	54	20	Неосторожное обращение с огнем
21.08.2003	Учебное	55	5	Неосторожное обращение с огнем
21.08.2003	Учебное	57	2	Неосторожное обращение с огнем
22.08.2003	Жуковское	71	30, 31	Неосторожное обращение с огнем
22.08.2003	Темерчинское	24	17	Неосторожное обращение с огнем
22.08.2003	Учебное	23	24	Неосторожное обращение с огнем
22.08.2003	Учебное	25	15	Неосторожное обращение с огнем
23.08.2003	Богородское	31	9	Неосторожное обращение с огнем
23.08.2003	Учебное	62	4	Неосторожное обращение с огнем
23.08.2003	Учебное	7	20	Неосторожное обращение с огнем
23.08.2003	Учебное	25	11	Неосторожное обращение с огнем
24.08.2003	Темерчинское	49	12, 17	Неосторожное обращение с огнем
24.08.2003	Учебное	34	10	Неосторожное обращение с огнем
24.08.2003	Учебное	34	15	Неосторожное обращение с огнем
24.08.2003	Учебное	22	23	Неосторожное обращение с огнем
25.08.2003	Учебное	25	27	Неосторожное обращение с огнем
26.08.2003	Темерчинское	19	11	Неосторожное обращение с огнем
27.08.2003	Жуковское	71	23	Неосторожное обращение с огнем
27.08.2003	Учебное	14	10	Неосторожное обращение с огнем
27.08.2003	Учебное	47	8	Неосторожное обращение с огнем
27.08.2003	Учебное	14	4	Неосторожное обращение с огнем
28.08.2003	Темерчинское	125	19	Неосторожное обращение с огнем
28.08.2003	Учебное	7	19	Неосторожное обращение с огнем

Дата обнару- жения пожара	Лесничество	Номер квартала	Номер выдела	Причина возникновения пожара
28.08.2003	Учебное	25	16	Неосторожное обращение с огнем
28.08.2003	Учебное	47	9	Неосторожное обращение с огнем
28.08.2003	Учебное	18	20	Неосторожное обращение с огнем
29.08.2003	Богородское	89	37	Неосторожное обращение с огнем
29.08.2003	Учебное	30	26	Неосторожное обращение с огнем
29.08.2003	Учебное	14	5	Неосторожное обращение с огнем
29.08.2003	Учебное	13	15	Неосторожное обращение с огнем
29.08.2003	Учебное	7	20	Неосторожное обращение с огнем
30.08.2003	Учебное	15	7	Неосторожное обращение с огнем
30.08.2003	Учебное	7	27	Неосторожное обращение с огнем
31.08.2003	Темерчинское	47	24	Неосторожное обращение с огнем
31.08.2003	Темерчинское	125	7	Неосторожное обращение с огнем
31.08.2003	Учебное	31	18	Неосторожное обращение с огнем
31.08.2003	Учебное	26	31	Неосторожное обращение с огнем
01.09.2003	Учебное	20	30	Неосторожное обращение с огнем
03.09.2003	Учебное	22	23	Неосторожное обращение с огнем
03.09.2003	Учебное	61	2	Неосторожное обращение с огнем
03.09.2003	Учебное	31	4	Неосторожное обращение с огнем
03.09.2003	Учебное	30	13	Неосторожное обращение с огнем
04.09.2003	Богородское	71	8, 9, 19	Неосторожное обращение с огнем
04.09.2003	Учебное	58	7	Неосторожное обращение с огнем
04.09.2003	Учебное	26	25	Неосторожное обращение с огнем
04.09.2003	Учебное	49	4	Неосторожное обращение с огнем
04.09.2003	Учебное	59	8	Неосторожное обращение с огнем
05.09.2003	Учебное	47	6	Неосторожное обращение с огнем
06.09.2003	Темерчинское	126	8, 1	Неосторожное обращение с огнем
06.09.2003	Учебное	59	3	Неосторожное обращение с огнем
06.09.2003	Учебное	49	2	Неосторожное обращение с огнем
06.09.2003	Учебное	49	4	Неосторожное обращение с огнем
07.09.2003	Богородское	88	26, 28	Неосторожное обращение с огнем
07.09.2003	Учебное	30	18	Неосторожное обращение с огнем
07.09.2003	Учебное	67	4	Неосторожное обращение с огнем
08.09.2003	Темерчинское	69	20	Неосторожное обращение с огнем
09.09.2003	Учебное	24	41	Неосторожное обращение с огнем
09.09.2003	Учебное	39	7	Неосторожное обращение с огнем
09.09.2003	Учебное	39	8	Неосторожное обращение с огнем
09.09.2003	Учебное	39	13	Неосторожное обращение с огнем
09.09.2003	Учебное	39	14	Неосторожное обращение с огнем
09.09.2003	Учебное	63	7	Неосторожное обращение с огнем
09.09.2003	Учебное	34	14	Неосторожное обращение с огнем

Дата обнару- жения пожара	Лесничество	Номер квартала	Номер выдела	Причина возникновения пожара
09.09.2003	Учебное	24	40	Неосторожное обращение с огнем
10.09.2003	Темерчинское	127	11, 12	Неосторожное обращение с огнем
10.09.2003	Учебное	26	31	Неосторожное обращение с огнем
14.05.2004	Учебное	55	1	Неосторожное обращение с огнем
16.05.2004	Учебное	56	5	Неосторожное обращение с огнем
16.05.2004	Учебное	15	7	Неосторожное обращение с огнем
17.05.2004	Моряковское	55	2, 4–6, 8	Неосторожное обращение с огнем
17.05.2004	Моряковское	58	1,2	Неосторожное обращение с огнем
18.05.2004	Темерчинское	43	–	Неосторожное обращение с огнем
18.05.2004	Темерчинское	45	22	Неосторожное обращение с огнем
18.05.2004	Учебное	56	5	Неосторожное обращение с огнем
18.05.2004	Учебное	56	6	Неосторожное обращение с огнем
18.05.2004	Учебное	7	1	Неосторожное обращение с огнем
21.05.2004	Темерчинское	122	40	Неосторожное обращение с огнем
21.05.2004	Учебное	14	20	Неосторожное обращение с огнем
21.05.2004	Учебное	14	8	Неосторожное обращение с огнем
21.05.2004	Учебное	14	10	Неосторожное обращение с огнем
22.05.2004	Учебное	47	13	Неосторожное обращение с огнем
24.05.2004	Учебное	66	1	Неосторожное обращение с огнем
24.05.2004	Учебное	36	7	Неосторожное обращение с огнем
24.05.2004	Учебное	36	16	Неосторожное обращение с огнем
24.05.2004	Учебное	36	6	Неосторожное обращение с огнем
24.05.2004	Учебное	36	38	Неосторожное обращение с огнем
25.05.2004	Учебное	26	6	Неосторожное обращение с огнем
26.05.2004	Учебное	34	4	Неосторожное обращение с огнем
26.05.2004	Учебное	34	10	Неосторожное обращение с огнем
26.05.2004	Учебное	39	23	Неосторожное обращение с огнем
26.05.2004	Учебное	28	11	Неосторожное обращение с огнем
27.05.2004	Темерчинское	126	5, 6, 12	Неосторожное обращение с огнем
27.05.2004	Темерчинское	127	1,2	Неосторожное обращение с огнем
27.05.2004	Моряковское	135	16	Неосторожное обращение с огнем
27.05.2004	Моряковское	142	19	Неосторожное обращение с огнем
27.05.2004	Моряковское	147	4, 10, 13	Неосторожное обращение с огнем
27.05.2004	Моряковское	152	34	Неосторожное обращение с огнем
27.05.2004	Моряковское	157	3	Неосторожное обращение с огнем
30.05.2004	Темерчинское	45	18	Неосторожное обращение с огнем
30.05.2004	Темерчинское	127	14	Неосторожное обращение с огнем
02.06.2004	Моряковское	169	3	Неосторожное обращение с огнем
04.06.2004	Учебное	6	36	Неосторожное обращение с огнем
05.06.2004	Темерчинское	127	5	Неосторожное обращение с огнем

Дата обнару- жения пожара	Лесничество	Номер квартала	Номер выдела	Причина возникновения пожара
05.06.2004	Учебное	56	2	Неосторожное обращение с огнем
06.06.2004	Темерчинское	58	5,8	Неосторожное обращение с огнем
06.06.2004	Учебное	55	1	Неосторожное обращение с огнем
06.06.2004	Учебное	12	26	Неосторожное обращение с огнем
06.06.2004	Учебное	20	24	Неосторожное обращение с огнем
10.06.2004	Учебное	55	6	Неосторожное обращение с огнем
11.06.2004	Учебное	56	2	Неосторожное обращение с огнем
13.06.2004	Моряковское	124	38	Грозовой разряд
13.06.2004	Жуковское	112	19,2	Грозовой разряд
14.06.2004	Темерчинское	127	9	Неосторожное обращение с огнем
15.06.2004	Учебное	57	1	Неосторожное обращение с огнем
16.06.2004	Учебное	15	13	Неосторожное обращение с огнем
16.06.2004	Учебное	20	31	Неосторожное обращение с огнем
22.06.2004	Учебное	20	21	Неосторожное обращение с огнем
22.06.2004	Учебное	26	40	Неосторожное обращение с огнем
28.06.2004	Учебное	55	1	Неосторожное обращение с огнем
29.06.2004	Учебное	65	2	Неосторожное обращение с огнем
30.06.2004	Учебное	30	7	Неосторожное обращение с огнем
01.07.2004	Темерчинское	125	10	Неосторожное обращение с огнем
13.07.2004	Моряковское	54	23	Неосторожное обращение с огнем
13.07.2004	Моряковское	55	12	Неосторожное обращение с огнем
16.07.2004	Учебное	55	2	Неосторожное обращение с огнем
17.07.2004	Учебное	26	15	Неосторожное обращение с огнем
17.07.2004	Учебное	29	33	Неосторожное обращение с огнем
17.07.2004	Учебное	21	33	Неосторожное обращение с огнем
17.07.2004	Учебное	21	23	Неосторожное обращение с огнем
18.07.2004	Учебное	55	3	Неосторожное обращение с огнем
18.07.2004	Учебное	25	16	Неосторожное обращение с огнем
18.07.2004	Учебное	58	1	Неосторожное обращение с огнем
18.07.2004	Учебное	26	37	Неосторожное обращение с огнем
18.07.2004	Учебное	19	20	Неосторожное обращение с огнем
22.07.2004	Жуковское	97	15, 26	Неосторожное обращение с огнем
25.07.2004	Учебное	19	12	Неосторожное обращение с огнем
25.07.2004	Учебное	47	8	Неосторожное обращение с огнем
25.07.2004	Учебное	8	40	Неосторожное обращение с огнем
25.07.2004	Учебное	25	12	Неосторожное обращение с огнем
25.07.2004	Учебное	24	4	Неосторожное обращение с огнем
25.07.2004	Учебное	34	20	Неосторожное обращение с огнем
25.07.2004	Учебное	67	7	Неосторожное обращение с огнем
26.07.2004	Учебное	20	13	Неосторожное обращение с огнем

Дата обнаружения пожара	Лесничество	Номер квартала	Номер выдела	Причина возникновения пожара
27.07.2004	Учебное	36	28	Неосторожное обращение с огнем
29.07.2004	Учебное	8	27	Неосторожное обращение с огнем
29.07.2004	Учебное	11	45	Неосторожное обращение с огнем
29.07.2004	Учебное	25	17	Неосторожное обращение с огнем
29.07.2004	Учебное	26	11	Неосторожное обращение с огнем
01.08.2004	Учебное	36	24	Неосторожное обращение с огнем
01.08.2004	Учебное	26	22	Неосторожное обращение с огнем
02.08.2004	Учебное	10	14	Неосторожное обращение с огнем
02.08.2004	Учебное	35	10	Неосторожное обращение с огнем
02.08.2004	Учебное	5	58	Неосторожное обращение с огнем
02.08.2004	Учебное	19	6	Неосторожное обращение с огнем
02.08.2004	Учебное	34	15	Неосторожное обращение с огнем
03.08.2004	Учебное	56	2	Неосторожное обращение с огнем
03.08.2004	Учебное	56	4	Неосторожное обращение с огнем
12.08.2004	Учебное	20	21	Неосторожное обращение с огнем
12.08.2004	Учебное	55	2	Неосторожное обращение с огнем
13.08.2004	Учебное	20	21	Неосторожное обращение с огнем
13.08.2004	Учебное	53	10	Неосторожное обращение с огнем
14.08.2004	Учебное	67	8	Неосторожное обращение с огнем
15.08.2004	Учебное	20	10	Неосторожное обращение с огнем
15.08.2004	Учебное	10	20	Неосторожное обращение с огнем
17.08.2004	Учебное	59	5	Неосторожное обращение с огнем
18.08.2004	Учебное	67	8	Неосторожное обращение с огнем
18.08.2004	Учебное	23	2	Неосторожное обращение с огнем
18.08.2004	Учебное	23	3	Неосторожное обращение с огнем
18.08.2004	Учебное	23	5	Неосторожное обращение с огнем
18.08.2004	Учебное	23	6	Неосторожное обращение с огнем
19.08.2004	Учебное	26	38	Неосторожное обращение с огнем
19.08.2004	Учебное	20	22	Неосторожное обращение с огнем
20.08.2004	Темерчинское	127	19, 21	Неосторожное обращение с огнем
23.08.2004	Учебное	26	39	Неосторожное обращение с огнем
24.08.2004	Учебное	10	26	Неосторожное обращение с огнем
24.08.2004	Учебное	22	15	Неосторожное обращение с огнем
25.08.2004	Учебное	67	6	Неосторожное обращение с огнем
26.08.2004	Учебное	36	25	Неосторожное обращение с огнем
27.08.2004	Моряковское	170	16	Неосторожное обращение с огнем
27.08.2004	Учебное	67	4	Неосторожное обращение с огнем
29.08.2004	Учебное	64	5	Неосторожное обращение с огнем
29.08.2004	Учебное	64	10	Неосторожное обращение с огнем
30.08.2004	Учебное	59	5	Неосторожное обращение с огнем
30.08.2004	Учебное	17	17	Неосторожное обращение с огнем

Приложение 3

Сравнение классов лесной пожарной опасности по методике, предлагаемой в настоящей работе, и методике Нестерова

№	Лесничество	Квар- тал	Выдел	Год	Месяц	День	Методика Нестерова	ДВМ ПЛПО
1	Учебное	35	7	2000	Май	26	IV	IV
2	Учебное	73	1	2000	Май	26	IV	IV
3	Учебное	67	8	2000	Май	28	IV	IV
4	Учебное	64	6	2000	Июнь	15	III	IV
5	Учебное	20	29	2000	Июнь	26	III	IV
6	Учебное	20	23	2000	Июнь	26	III	IV
7	Учебное	36	19	2000	Июнь	26	III	IV
8	Учебное	55	3	2000	Июнь	26	III	IV
9	Богородское	30	12	2000	Июнь	27	IV	IV
10	Учебное	26	36	2000	Июнь	28	IV	IV
11	Учебное	36	22	2000	Июнь	30	IV	IV
12	Учебное	55	7	2000	Июль	1	IV	IV
13	Учебное	25	17	2000	Июль	1	IV	IV
14	Учебное	56	1	2000	Июль	1	IV	IV
15	Учебное	59	3	2000	Июль	2	IV	IV
16	Темерчинское	127	17	2000	Июль	3	IV	IV
17	Учебное	30	33	2000	Июль	4	I	V
18	Учебное	24	11	2000	Июль	4	I	V
19	Учебное	58	5	2000	Июль	7	III	IV
20	Учебное	55	1	2000	Июль	13	III	IV
21	Учебное	20	31	2000	Июль	13	III	IV
22	Учебное	34	7	2000	Август	18	IV	III
23	Учебное	34	9	2000	Август	18	IV	IV
24	Учебное	20	31	2000	Сентябрь	8	III	IV
25	Учебное	26	16	2000	Сентябрь	8	III	IV
26	Учебное	29	8	2000	Сентябрь	8	III	IV
27	Учебное	23	4	2000	Сентябрь	10	III	IV
28	Учебное	64	2	2001	Май	8	III	IV
29	Учебное	25	2	2001	Май	9	III	IV
30	Учебное	59	1	2001	Май	17	III	IV
31	Учебное	53	6	2001	Май	19	III	IV
32	Учебное	26	36	2001	Май	23	IV	IV
33	Учебное	56	1	2001	Май	23	IV	IV
34	Учебное	59	3	2001	Май	24	IV	IV
35	Учебное	20	23	2001	Май	24	IV	IV
36	Учебное	31	2	2001	Май	24	IV	IV
37	Учебное	36	25	2001	Май	26	IV	IV

№	Лесничество	Квар- тал	Выдел	Год	Месяц	День	Методика Нестерова	ДВМ ПЛПО
38	Учебное	12	31	2001	Май	27	IV	IV
39	Учебное	20	14	2001	Май	27	IV	IV
40	Учебное	64	2	2001	Май	28	IV	IV
41	Учебное	30	32	2001	Июнь	22	III	IV
42	Учебное	56	1	2001	Август	4	III	IV
43	Учебное	35	21	2001	Август	4	III	IV
44	Учебное	36	20	2001	Август	5	III	IV
45	Учебное	38	22	2001	Август	6	III	IV
46	Учебное	36	22	2001	Август	6	III	IV
47	Учебное	35	20	2001	Август	6	III	IV
48	Учебное	38	14	2001	Август	7	III	IV
49	Учебное	30	37	2001	Август	8	IV	IV
50	Учебное	25	11	2001	Август	8	IV	IV
51	Учебное	36	27	2001	Август	29	I	I
52	Учебное	59	3	2001	Август	29	I	I
53	Учебное	26	3	2002	Май	5	III	IV
54	Учебное	72	1	2002	Май	6	IV	IV
55	Учебное	20	36	2002	Май	8	IV	IV
56	Учебное	20	36	2002	Май	19	II	IV
57	Учебное	13	33	2002	Май	20	III	IV
58	Учебное	71	1	2002	Май	22	III	IV
59	Учебное	71	4	2002	Май	22	III	IV
60	Учебное	30	16	2002	Май	22	III	IV
61	Учебное	30	14	2002	Май	22	III	IV
62	Учебное	31	1	2002	Май	22	III	IV
63	Учебное	20	23	2002	Май	23	III	IV
64	Учебное	57	1	2002	Май	24	III	IV
65	Учебное	13	33	2002	Май	24	III	IV
66	Учебное	25	17	2002	Май	24	III	IV
67	Учебное	7	4	2002	Май	24	III	IV
68	Учебное	12	21	2002	Май	26	IV	IV
69	Учебное	18	20	2002	Май	26	IV	IV
70	Учебное	18	17	2002	Май	26	IV	IV
71	Моряковское	170	16	2002	Май	27	IV	IV
72	Учебное	26	13	2003	Май	6	III	IV
73	Учебное	55	4	2003	Май	6	III	IV
74	Учебное	20	21	2003	Май	11	III	IV
75	Учебное	20	24	2003	Май	11	III	IV
76	Учебное	20	11	2003	Май	11	III	IV
77	Учебное	25	2	2003	Май	12	III	IV
78	Учебное	18	30	2003	Май	12	III	IV

№	Лесничество	Квар- тал	Выдел	Год	Месяц	День	Методика Нестерова	ДВМ ПЛПО
79	Учебное	18	32	2003	Май	12	III	IV
80	Учебное	35	29	2003	Май	12	III	IV
81	Учебное	56	3	2003	Май	12	III	IV
82	Темерчинское	126	17	2003	Май	17	IV	IV
83	Темерчинское	126	17	2003	Май	17	IV	IV
84	Учебное	55	1	2003	Май	17	IV	IV
85	Учебное	65	2	2003	Май	17	IV	IV
86	Учебное	24	24	2003	Май	17	IV	IV
87	Учебное	31	4	2003	Май	18	IV	IV
88	Учебное	26	3	2003	Май	18	IV	IV
89	Учебное	26	4	2003	Май	18	IV	IV
90	Учебное	59	5	2003	Май	19	IV	IV
91	Учебное	23	4	2003	Май	19	IV	V
92	Учебное	31	8	2003	Май	22	IV	IV
93	Учебное	68	1	2003	Май	23	IV	IV
94	Учебное	34	4	2003	Май	24	IV	IV
95	Учебное	15	19	2003	Май	24	IV	IV
96	Учебное	29	23	2003	Июнь	7	III	IV
97	Учебное	29	30	2003	Июнь	7	III	IV
98	Учебное	36	16	2003	Июнь	7	III	IV
99	Учебное	58	6	2003	Июнь	29	III	IV
100	Учебное	31	19	2003	Июнь	29	III	IV
101	Учебное	65	2	2003	Июнь	30	III	IV
102	Учебное	41	32	2003	Июнь	30	III	IV
103	Учебное	14	14	2003	Июль	1	III	IV
104	Учебное	71	3	2003	Июль	3	IV	IV
105	Учебное	52	6	2003	Июль	4	IV	IV
106	Учебное	31	24	2003	Июль	5	IV	IV
107	Учебное	70	8	2003	Июль	5	IV	IV
108	Темерчинское	124	3	2003	Июль	6	IV	IV
109	Темерчинское	124	3	2003	Июль	6	IV	IV
110	Учебное	31	4	2003	Июль	6	IV	IV
111	Учебное	58	6	2003	Июль	6	IV	IV
112	Учебное	30	27	2003	Июль	6	IV	V
113	Учебное	60	8	2003	Июль	7	IV	IV
114	Учебное	20	29	2003	Июль	8	IV	IV
115	Учебное	10	30	2003	Июль	8	IV	V
116	Учебное	36	31	2003	Июль	8	IV	V
117	Учебное	12	30	2003	Июль	8	IV	V
118	Учебное	26	13	2003	Август	18	III	IV
119	Учебное	31	13	2003	Август	18	III	IV

№	Лесничество	Квар- тал	Выдел	Год	Месяц	День	Методика Нестерова	ДВМ ПЛПО
120	Учебное	60	8	2003	Август	18	III	IV
121	Учебное	61	5	2003	Август	18	III	IV
122	Учебное	33	9	2003	Август	19	III	IV
123	Темерчинское	85	6	2003	Август	20	III	IV
124	Темерчинское	72	30	2003	Август	20	III	IV
125	Темерчинское	72	32	2003	Август	20	III	IV
126	Учебное	21	20	2003	Август	20	III	V
127	Темерчинское	27	26	2003	Август	21	IV	IV
128	Учебное	55	5	2003	Август	21	IV	IV
129	Учебное	57	2	2003	Август	21	IV	IV
130	Темерчинское	54	20	2003	Август	21	IV	V
131	Жуковское	71	30	2003	Август	22	IV	IV
132	Богородское	31	9	2003	Август	23	IV	IV
133	Учебное	7	20	2003	Август	23	IV	IV
134	Учебное	25	11	2003	Август	23	IV	IV
135	Темерчинское	49	12	2003	Август	24	IV	V
136	Темерчинское	49	17	2003	Август	24	IV	V
137	Учебное	34	10	2003	Август	24	IV	V
138	Учебное	25	27	2003	Август	25	IV	IV
139	Жуковское	71	23	2003	Август	27	IV	IV
140	Учебное	47	8	2003	Август	27	IV	IV
141	Учебное	47	9	2003	Август	28	IV	IV
142	Темерчинское	50	22	2003	Август	28	IV	V
143	Учебное	7	19	2003	Август	28	IV	V
144	Учебное	25	16	2003	Август	28	IV	V
145	Учебное	18	20	2003	Август	28	IV	V
146	Учебное	30	26	2003	Август	29	IV	V
147	Учебное	7	20	2003	Август	29	IV	V
148	Учебное	15	7	2003	Август	30	IV	V
149	Учебное	31	18	2003	Август	31	IV	V
150	Учебное	26	31	2003	Август	31	IV	V
151	Учебное	61	2	2003	Сентябрь	3	IV	V
152	Учебное	31	4	2003	Сентябрь	3	IV	V
153	Учебное	30	13	2003	Сентябрь	3	IV	V
154	Учебное	49	4	2003	Сентябрь	4	IV	IV
155	Богородское	71	8	2003	Сентябрь	4	IV	V
156	Учебное	58	7	2003	Сентябрь	4	IV	V
157	Учебное	59	8	2003	Сентябрь	4	IV	V
158	Учебное	47	6	2003	Сентябрь	5	IV	IV
159	Темерчин- ское	126	8	2003	Сентябрь	6	IV	IV
160	Учебное	49	2	2003	Сентябрь	6	IV	IV

№	Лесничество	Квар- тал	Выдел	Год	Месяц	День	Методика Нестерова	ДВМ ПЛПО
161	Учебное	49	4	2003	Сентябрь	6	IV	IV
162	Учебное	59	3	2003	Сентябрь	6	IV	V
163	Учебное	30	18	2003	Сентябрь	7	IV	V
164	Учебное	67	4	2003	Сентябрь	7	IV	V
165	Темерчинское	69	20	2003	Сентябрь	8	IV	V
166	Учебное	24	41	2003	Сентябрь	9	IV	V
167	Учебное	39	7	2003	Сентябрь	9	IV	V
168	Учебное	39	8	2003	Сентябрь	9	IV	V
169	Учебное	24	40	2003	Сентябрь	9	IV	V
170	Темерчинское	127	11	2003	Сентябрь	10	IV	IV
171	Учебное	26	31	2003	Сентябрь	10	IV	V
172	Учебное	55	1	2004	Май	14	III	IV
173	Учебное	15	7	2004	Май	16	IV	IV
174	Моряковское	55	5	2004	Май	17	IV	IV
175	Учебное	56	6	2004	Май	18	IV	IV
176	Темерчинское	45	22	2004	Май	18	IV	V
177	Учебное	14	20	2004	Май	21	IV	IV
178	Темерчинское	122	40	2004	Май	21	IV	V
179	Учебное	47	13	2004	Май	22	IV	IV
180	Учебное	66	1	2004	Май	24	IV	V
181	Учебное	36	16	2004	Май	24	IV	V
182	Учебное	36	7	2004	Май	24	IV	V
183	Темерчинское	127	14	2004	Май	30	IV	IV
184	Учебное	6	36	2004	Июнь	4	IV	IV
185	Темерчинское	127	5	2004	Июнь	5	V	IV
186	Учебное	56	2	2004	Июнь	5	V	IV
187	Учебное	55	1	2004	Июнь	6	V	IV
188	Учебное	20	24	2004	Июнь	6	V	IV
189	Темерчинское	58	8	2004	Июнь	6	V	V
190	Учебное	55	6	2004	Июнь	10	V	IV
191	Учебное	56	2	2004	Июнь	11	V	IV
192	Учебное	36	24	2004	Август	1	III	IV
193	Учебное	10	14	2004	Август	2	III	IV
194	Учебное	5	58	2004	Август	2	III	IV
195	Учебное	19	6	2004	Август	2	III	IV
196	Учебное	56	2	2004	Август	3	III	IV
197	Учебное	56	4	2004	Август	3	III	IV
198	Темерчинское	127	19	2004	Август	20	III	IV
199	Учебное	26	39	2004	Август	23	I	I
200	Учебное	10	26	2004	Август	24	I	I
201	Учебное	22	15	2004	Август	24	I	I

Приложение 4

Статистические данные о месте и времени возникновения торфяных пожаров в Бакcharском районе Томской области за период 1989–2012 гг.

№	Дата	Место	Причина
1	2.05.2000	Кв. 77 Бакcharского лесничества, болото из-под торфоразработки	Неосторожное обращение с огнем
2	21.08.2003	Кв. 87, выдел 71, 50 км трассы Томск-Бакchar	Не затушенный населением костер
3	1.09.2003	Кв. 182, выдел 13	Не затушенный населением костер
4	7.09.2003	Кв. 143, выдел 11	Не затушенный населением костер

База теплофизических постоянных типов торфа Бакcharского района

Типы торфа	Влажность w , %	Влагосодержание W , %	Плотность в естественном состоянии ρ , кг/м ³	Плотность в абсолютно сухом состоянии ρ_0 , кг/м ³
Древесный	86,7	652	940	125,02
Древесно-травяной	88,7	785	1000	113
Древесно-моховой	89,4	843	990	104,94
Травяной	90,2	920	970	95,06
Травяно-моховой	90,7	975	970	90,21
Древесный	88,9	801	960	106,56
Древесно-травяной	89,5	852	960	100,8
Древесно-моховой	90,1	910	920	91,08
Травяно-моховой	90,7	975	1060	98,58
Моховой	90,6	964	850	79,9
Травяно-моховой	92,2	118	830	64,74
Моховой	92,7	1269	760	55,48
Древесно-травяной	92,4	1216	1080	82,08

Научное издание

Александр Иванович Фильков

**ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ВОЗНИКНОВЕНИЯ
ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ**

Редакторы: Н.А. Афанасьева, Ю.П. Готфрид
Компьютерная верстка А.И. Лелююр
Дизайн обложки Л.Д. Кривцовой

Подписано к печати 26.12.2014 г. Формат 60×84¹/₁₆.

Бумага для офисной техники. Гарнитура Times.

Усл. печ. л. 16.

Тираж 250 экз. Заказ № 802.

Отпечатано на оборудовании
Издательского Дома

Томского государственного университета
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

Тел. 8+(382-2)–53-15-28

Сайт: <http://publish.tsu.ru>

E-mail: rio.tsu@mail.ru

ISBN 978-5-94621-456-8



9 785946 214568