На правах рукописи

Фильков Александр Иванович

ДЕТЕРМИНИРОВАННО-ВЕРОЯТНОСТНАЯ СИСТЕМА ПРОГНОЗА ЛЕСНОЙ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ

03.00.16 – «Экология» (физико-математические науки)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2005

Диссертация выполнена на кафедре физической и вычислительной механики механико-математического факультета Томского государственного университета.

Научный руководитель:	Заслуженный деятель науки РФ, доктор физико-математических наук, профессор Гришин Анатолий Михайлович
Официальные оппоненты:	член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор Левин Владимир Алексеевич
	доктор технических наук, профессор Доррер Георгий Алексеевич
Ведущая организация:	Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС РФ (г. Балашиха, Московской области)

Защита состоится 1 июля 2005 года в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.267.13 при Томском государственном университете по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, ауд. 229 (главный корпус ТГУ).

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Томского государственного университета по адресу: г. Томск, пр. Ленина, 34а.

Автореферат разослан «31» мая 2005 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета д.т.н. Ю.Ф. Христенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время в мире ежегодно регистрируется около 7 млн. пожаров. Основную часть природных пожаров составляют пожары в лесах. В отличие от обстановки с пожарами в населенных пунктах, в последние годы наметилась тенденция увеличения количества лесных пожаров. Так, в России в 2000 году зарегистрировано 18,9 тыс. пожаров, в 2001 году – 20,9 тыс. пожаров, а в 2002 году уже 34,3 тыс. пожаров. Лесные пожары охватывают площади от нескольких сотен до нескольких миллионов гектаров в год и оказывают разрушительное воздействие на окружающую среду.

В мае - июне 2000 года в окрестностях г. Лос-Аламос (США) произошел лесной пожар, который потом перекинулся и на сам город. Пожар длился целый месяц. Причиной пожара явились так называемые профилактические выжигания остатков сухой прошлогодней растительности. Эта технология широко используется в США для предотвращения крупных лесных пожаров. Однако в результате этих действий и сильного ветра возник неконтролируемый повальный верховой пожар, который уничтожил леса на территории 20000 га, а в самом г. Лос-Аламос сгорело 500 домов. Были эвакуированы около 30000 человек – почти все население этого города. Обычная научно-исследовательская работа Лос-Аламосской национальной лаборатории (LANL) была временно прекращена, а убытки от пожара превысили один миллиард долларов.

Недостатки американской системы прогноза пожарной опасности в полной мере проявились в связи с лесным пожаром в окрестностях г. Лос-Аламоса.

Поэтому создание научно обоснованной системы прогноза лесной пожарной опасности с учетом метеорологических факторов (скорость ветра, солнечное излучение, температура воздуха и почвы, относительная влажность воздуха), антропогенной (костры, преднамеренные поджоги, искры от транспорта и т.д.) и природной (пожары от молний при сухих грозах) нагрузок, физических процессов (сушка растительных горючих материалов {РГМ}, теплообмен слоя РГМ с окружающей средой и др.) происходящих в слое растительного горючего материала, продолжает оставаться актуальной задачей. В то же время на практике обычно применяют эмпирический индекс Нестерова (ГОСТ Р 22.1.09-99), который не имеет строгого физического смысла и лишь косвенно связан с реальными физическими процессами, благодаря которым происходит зажигание РГМ и возникновение лесных пожаров.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является разработка новой геоинформационной детерминированно-вероятностной системы прогноза лесной пожарной опасности, в рамках которой учитывается антропогенная нагрузка на леса (непогашенные костры, умышленные поджоги лесов и др.), а также природные и метеорологические факторы, влияющие на возникновение лесных пожаров. Исходя из указанной цели исследования, решались следующие задачи:

1. Разработка новой детерминированно-вероятностной методики прогноза лесной пожарной опасности.
2. Сбор и создание базы данных для новой системы прогноза лесной пожарной опасности.
3. Разработка экспертной геоинформационной системы и программного обеспечения для новой системы прогноза лесной пожарной опасности.
4. Тестирование новой системы прогноза с помощью ретроспективного анализа.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования диссертационной работы является конкретная природная катастрофа – возникновение лесных пожаров. Предмет исследования – всеобъемлющий анализ причин, вызывающих зажигание РГМ и возникновение лесных пожаров, и как результат новая система прогноза лесной пожарной опасности.

Методы исследования и фактический материал. Методологической базой исследования послужили работы [1-8], выполненные в Томском государственном университете. В качестве основных методов использовались методы физико-математического моделирования и статистического анализа данных.

Фактические материалы – сведения о лесных пожарах на территории Тимирязевского лесхоза за период с 2000 по 2004 годы, предоставленные дирекцией этого лесхоза, и метеоданные, предоставленные Новосибирским Региональным вычислительным центром.

Достоверность. Достоверность теоретических и экспериментальных результатов работы доказана на основе их сравнения с экспериментальными данными и данными наблюдений. Для оценки точности прогноза по новой методике использовался ретроспективный анализ горимости лесов Тимирязевского лесхоза за период с 2000 по 2004 годы.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1 Реализован комплексный теоретико-экспериментальный и детерминированно-вероятностный подход к оценке вероятности возникновения лесных пожаров с использованием как детерминированных методов механики сплошных многофазных сред для определения текущего влагосодержания слоя РГМ с учетом температуры воздуха в приземном слое атмосферы, солнечного излучения и действия ветра, так и методов теории вероятности и математической статистики для учета антропогенной нагрузки на лесной фитоценоз и действия сухих гроз.

2 Разработана методика для определения вероятностей возникновения лесного пожара, с учетом антропогенной и природной нагрузок, через частоты событий и вероятность возникновения лесного пожара по метеоусловиям, на основе упрощенной математической модели сушки слоя РГМ, в рамках которой учитывается относительная влажность воздуха.

3 Получено численное решение задачи о сушке слоя РГМ, с учетом относительной влажности воздуха, а также найдены аналитическое и упрощенное аналитическое решение задачи о сушке слоя РГМ.

4 Получена простая формула для определения времени лесопожарного созревания лесов и создана компьютерная экспертная геоинформационная система прогноза лесной пожарной опасности на примере Белоярского лесхоза Томской области.

Теоретическая значимость полученных результатов. В диссертационной работе, впервые в теории лесных пожаров, была численно решена задача о прогнозе лесной пожарной опасности в результате одновременного расчета влагосодержания слоя РГМ на конкретном участке леса на основе новой постановки детерминированной задачи о сушке этого слоя и формул для вероятности возникновения лесного пожара с учетом антропогенной нагрузки, действия сухих гроз и условий погоды на том же участке леса. Кроме того, впервые получена аналитическая формула для определения времени лесопожарного созревания лесов на различных участках.

Значимость работы для практики состоит в том, что создана геоинформационная детерминированно-вероятностная система прогноза лесной пожарной опасности (на примере Белоярского лесхоза), которая позволяет предсказывать время и место возникновения лесных пожаров для различных временных интервалов: оперативный прогноз (на три часа), дневной прогноз (по утренним данным), краткосрочный прогноз (на неделю), сезонный прогноз (на месяц). Большое значение имеет новая интерпретация местных классов лесной пожарной опасности, заключающаяся в использовании значений вероятностей возникновения лесных пожаров, найденных на основе упомянутой выше задачи. Зная места с наиболее вероятным возникновением пожара, можно заранее подготовить силы и средства для его тушения, что позволит сохранить огромные финансовые средства и человеческие жизни. Наконец, зная вероятность возникновения пожара, можно оценить объем работ по ликвидации пожаров на всей территории, для которой дается прогноз, что позволит оперативно принимать управленческие решения при возникновении чрезвычайных ситуаций.

Новая система прогноза лесной пожарной опасности разрабатывалась при частичной финансовой поддержке Центральной базы авиационной охраны лесов Минприроды России. Ее планируется внедрить в 2005-2006 годах в Тимирязевском лесхозе Томской области и на Томской базе авиационной охраны лесов.

Апробация работы. Результаты теоретических и экспериментальных исследований, представленных в диссертации обсуждались и получили признание на 17 международных и региональных конференциях, в том числе IV Международной конференции «Лесные и степные пожары: возникновение, распространение, тушение и экологические последствия» (Иркутск, 2001), Международной конференции «Сопряженные задачи механики, информатики и

экологии» (Томск, 2002, 2004), Международной конференции «ENVIROMIS» (Томск, 2002, 2004), V Международной конференции «Природные пожары: возникновение, распространение, тушение и экологические последствия» (Красноярск, 2003), Региональной научно-практической конференции «Проблемы снижения риска и смягчения последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера на территории Сибирского региона» (Новосибирск, 2003), Второй Сибирской конференции «ГИС в науке, природопользовании и образовании» (Новосибирск, 2003), Международной конференции по математике и механике (Томск, 2003), Научно-практической конференции «Перспективы развития системы мониторинга и прогнозирования ЧС природного и техногенного характера» (Новосибирск, 2003), Международной конференции «Cites-2003» (Томск, 2003), V Минском международном форуме по тепло- и массообмену (Минск, 2004), XIII Симпозиуме по горению и взрыву (Черноголовка, 2005), IV научной конференции Волжского регионального центра РАРАН «Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения» (Саров, 2005).

Личный вклад автора заключается в экспериментальных исследованиях процесса сушки типичных РГМ (мох Шребера, опад хвои сосны обыкновенной, опад хвои кедра, опад хвои пихты, опад листьев березы, опад листьев осины); определении на основе полученных из эксперимента данных об убыли массы РГМ, термокинетических постоянных сушки в результате решения обратных задач математической физики; создании базы исходных данных для детерминированно-вероятностной модели сушки РГМ; выборе масштабов обезразмеривания для основной системы уравнений задачи о сушке слоя РГМ, в рамках которой учитывается парциальное давление паров воды в слое РГМ; определении вероятностей возникновения лесного пожара, с учетом антропогенной и природной нагрузок, через частоты событий и вероятности возникновения пожара по метеоусловиям с использованием степенного закона для новой детерминированно-вероятностной методики прогноза лесной пожарной опасности; получении численного и точного аналитического решения задачи с использованием линеаризованной системы обыкновенных дифференциальных уравнений для математического описания сушки слоя РГМ; получении простой формулы для определения времени лесопожарного созревания лесов; новой интерпретации местных классов лесной пожарной опасности с учетом детерминированно-вероятностных факторов; создании геоинформационной экспертной системы прогноза лесной пожарной опасности; оценки точности прогноза лесной пожарной опасности путем проведения ретроспективного анализа возгораний в Тимирязевском лесхозе с учетом конкретных метеоусловий и антропогенной нагрузки на леса в 2000-2004 годах.

По теме диссертации опубликовано 15 тезисов и 6 статей в журналах и сборниках избранных докладов конференций. Автор был исполнителем и

ответственным исполнителем двух хоздоговоров с Центральной базой авиационной охраны лесов Минприроды РФ (г. Пушкино, Московской области).

На защиту выносятся следующие положения:

1. Методика определения вероятностей возникновения лесного пожара, с учетом антропогенной и природной нагрузок, через частоты событий и вероятность возникновения лесного пожара по метеоусловиям, на основе упрощенной математической модели сушки слоя РГМ.
2. Численное решение упрощенной системы уравнений для описания сушки слоя РГМ с учетом парциального давления паров воды в приземном слое атмосферы (относительной влажности воздуха).
3. Аналитическое решение упрощенной математической модели сушки слоя РГМ и формула для времени лесопожарного созревания лесов.
4. База данных о напочвенном покрове типичных РГМ и их физических свойств.
5. Программное обеспечение для системы прогноза лесной пожарной опасности, на примере электронной карты Белоярского лесхоза Томской области.
6. Результаты тестирования новой методики с помощью ретроспективного анализа горимости лесов Тимирязевского лесхоза за период с 2000 по 2004 годы путем сравнения полученных данных с данными по методике Нестерова.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и трех приложений. Общий объем работы 162 страницы, в ней содержится 18 рисунков, 8 таблиц, список литературы включает 92 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении формулируется актуальность работы, цель и задачи исследования, излагается краткое содержание работы. Обозначен вклад автора в исследования по данной теме, отражена научная новизна работы, практическая и теоретическая значимость результатов.

В главе 1 проведен обзор существующих методик прогноза пожарной опасности. Рассмотрены зарубежные методики прогноза пожарной опасности, в частности канадская [9] и американская [10]. Эти методики очень похожи друг на друга в своей структуре, в подходах и принципах построения индекса пожарной опасности. Поэтому обе они обладают схожими как достоинствами, так и недостатками. Например, отсутствие физически содержательного смысла величин, фигурирующих в методиках, отсутствие размерности у некоторых величин и относительность оценки пожарной опасности. При построении оценки пожарной опасности используется огромное количество таблиц и поправок, полученных на основе эмпирических данных, а поэтому область

применения этих методик ограничивается только лесами этих стран и зонами с идентичным климатом, структурой лесов, населенностью территории и пр.

Дан анализ отечественных методик прогноза пожарной опасности. Разработанный Нестеровым В.Г. в 1949 году индекс горимости [11], претерпев ряд не принципиальных изменений, до сих пор используется в лесных хозяйствах и с 2000 года является Государственным стандартом (ГОСТом) при оценке пожарной опасности в России. В методике Нестерова 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.

Дальнейшим развитием методики прогноза пожарной опасности занимались Сверлова Л.И. [12], Иванова Г.А. [13], Захаров А.И. [14], группы ученых под руководством Коровина Г.Н. [15, 16], Доррера Г.А. [17]. Основной недостаток работ Сверловой Л.И., Ивановой Г.А., Захарова А.И. в том, что в основе их методик лежит индекс горимости Нестерова. В работах Коровина Г.Н., Доррера Г.А. предложено использовать влагосодержание слоя РГМ в качестве критерия оценки пожарной опасности. Однако в данных методиках не используются методы механики многофазных сред для описания физических процессов тепломассопереноса в слое РГМ и связанных с ними процессов испарения и конденсации влаги. Первой работой, в которой учитывался случайный характер возникновения и распространения лесного пожара, была диссертация Мухина А.С. [18]. В ней было предложено оценивать пожарную опасность лесных насаждений, используя модель Байеса. Среди достоинств данной методики можно отметить то, что впервые ее автор предложил использовать вероятности для прогноза пожарной опасности. Недостатками данной методики являются отсутствие учета антропогенных и природных факторов, метеорологических данных, а также игнорирование изменения влагосодержания слоя растительных горючих материалов в течении лесопожарного сезона.

Проведен анализ работ, посвященных изучению влияния природных и антропогенных факторов на возникновение лесных пожаров и их прогноз. В работах Иванова В.А. и его коллег [19] рассматривается влияние гроз на возникновение лесных пожаров. В работе американских авторов [20] предложена количественная теория предсказания лесных пожаров, вызываемых молниями. Вероятность появления молнии авторы определяли по статистической и динамической моделям риска. В их работе утверждается, что стоимость прогноза пожарной опасности по статистической модели значительно меньше, чем по динамической. Работа Андреева Ю.А. [21] посвящена анализу влияния антропогенных факторов на возникновение пожаров. Следует отметить огромную работу, проделанную Андреевым Ю.А., Ивановым В.А. с коллегами по исследованию влияния молний и

антропогенной нагрузки на воспламенение напочвенного покрова. Полученный статистический материал целесообразно использовать для разработки новых методик прогноза пожарной опасности.

Рассмотрены методы моделирования и прогноза катастроф, разработанные в Томском государственном университете (ТГУ). В статьях и книге А.М. Гришина [4, 6, 8] 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. В монографиях [1-3] предложена общая математическая модель лесных пожаров, в рамках которой можно осуществлять математическое моделирование возникновения, распространения, тушения и экологических последствий лесных пожаров.

В [4, 6, 8] даны достаточные условия невоспламенения слоя РГМ

$$W_{ij}^{(k)} > W_{*i}^{(k)}. \qquad (1)$$

Здесь верхний индекс k соответствует основному проводнику горения (ОПГ), $W_{ij}^{(k)}$ – текущее влагосодержание k-го ОПГ на i-ом выделе в j-ый временной интервал, $W_{*i}^{(k)}$ - критическое влагосодержание k-го основного проводника горения на i-ом выделе, при котором ОПГ не воспламеняется и лесной пожар не возникает. Кроме того, в [4, 6, 8] предложена 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-ом участке (выделе) леса

$$P_j = \sum_{i=1}^{N} \left[P_{ij}(A) P_{ij}(ЛП/A) + P_{ij}(M) P_{ij}(ЛП/M) \right] P_{ij}(C). \qquad (2)$$

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

При выводе формулы (2) 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 [4, 6, 8] в том, что отсутствуют формулы для определения вероятностей антропогенной и природной нагрузок и для определения $P_{ij}(C)$.

В работах Катаевой Л.Ю. [5] и Лободы Е.Л. [7] рассматривались задачи о сушке и зажигании слоя растительных горючих материалов в различных постановках. В работе Катаевой Л.Ю. доказано, что горимость лесов однозначно связана с влагосодержанием растительных горючих материалов. В работе Лободы Е.Л. установлено, что упрощенная математическая модель сушки слоя РГМ качественно верно отражает влияния метеорологических факторов, и что тип почвы влияет на скорость сушки слоя РГМ.

В монографии [22] изложены общие подходы к экономическому анализу рисков ЧС природного и техногенного характера, обоснованию и осуществлению на этой основе рациональных программ деятельности в области повышения защищенности населения и территорий от природных и техногенных опасностей.

Представлены примеры и анализ использования новых информационных технологий для прогноза лесной пожарной опасности. В качестве примера рассмотрены функциональные возможности действующих систем спутникового мониторинга в России на федеральном, региональном и ведомственном уровнях, а также приводятся проекты космической системы обнаружения очагов лесных пожаров. Делается вывод, что необходимо использование общей математической модели, разработанной в ТГУ для создания методик раннего обнаружения и идентификации типов лесных пожаров.

Анализируются работы по картографированию и классификации растительных горючих материалов.

Глава 2 посвящена разработке новой детерминированно-вероятностной методики прогноза лесной пожарной опасности.

Представлена разработка новой методики прогноза лесной пожарной опасности. В качестве основных проводников горения для рассматриваемого участка леса, выбираем опад хвои (k=1), мох (k=2), лишайник (k=3), опад листвы (k=4) и травяную ветошь (k=5).

Для определения вероятностей возникновения лесных пожаров, за счет действия антропогенной нагрузки и молний в формуле (2), было предложено использовать определение вероятностей через частоты событий и воспользоваться статистическими данными для соответствующего лесхоза. Причем в общем случае при определении $P_{ij}(A)$ необходимо учитывать, что антропогенная нагрузка на леса включает в себя следующие составляющие: первая (техногенная): – нарушение правил эксплуатации техники при работе в лесу [21]; вторая (рекреационная) – неосторожное обращение с огнем людей отдыхающих в лесу [8]; третья – преднамеренные поджоги леса с целью последующей продажи горелого леса [21]; а также четвертая – преднамеренные

поджоги леса для нанесения ущерба потенциально опасным объектам, расположенным в лесу.

Предполагалось, что на каждом выделе имеется относительно однородный по своим механическим и физическим свойствам напочвенный покров. В этом случае на каждом i-ом участке можно считать, что имеет место только один главный основной проводник горения.

Очевидно, что под главным проводником горения напочвенного покрова следует понимать тот ОПГ, для которого массовая концентрация $C_i^{(k)} = m_i^{(k)} / \sum_{k=1}^{n} m_i^{(k)}$ (где $m_i^{(k)}$ - запас к-го ОПГ на i–ом выделе в абсолютно сухом состоянии) значительно больше массовых концентраций других ОПГ.

Тогда величина $P_{ij}(C)$ для лесопожарного сезона с учетом сформулированных выше представлений об ОПГ и механизме возникновения лесного пожара имеет следующее выражение

$$P_{ij}(C) = \begin{cases} 0 & при\ W_{ij} > W_{*i} \\ \dfrac{F_i}{F}\left(1 - \dfrac{W_{ij}}{W_{*i}}\right)^n & при\ 0 < W_{ij} \le W_{*i} \end{cases} \qquad (3)$$

Здесь W_{ij} - влагосодержание для j-го временного интервала на i-ом выделе максимального по массовой концентрации ОПГ; W_{*i} - критическое влагосодержание на i-ом выделе максимального по массовой концентрации ОПГ; значение $P_{ij}(C)=0$ соответствует случаю, когда на i-ой площади лесной территории нет РГМ (поверхность дорог, рек, озер и водонасыщенных болот) или на слой РГМ выпало более 3 мм осадков, в результате чего $W_{ij} > W_{*i}$; n - 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.

Величины $P_i(A)$, $P_i(ЛП/A)$, $P_i(M)$, $P_i(ЛП/M)$ можно найти, используя известное определение вероятности события через соответствующие частоты (статистическая модель риска [20])

$$P_i(A) \approx \frac{N_{Ai}}{N_{ПСi}},\ P_i(ЛП/A) \approx \frac{N_{ПАi}}{N_{КПi}},\ P_i(M) \approx \frac{N_{Mi}}{N_{ПСi}},\ P_i(ЛП/M) \approx \frac{N_{ПMi}}{N_{КПi}}. \qquad (4)$$

Здесь N_{Ai} и $N_{ПАi}$ - 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 период с 2000 по 2004 год; $N_{КПi}$ - общее количество пожаров для i-го выдела за пять лет с 2000 по 2004 год; N_{Mi} и $N_{ПСi}$ - число дней для i-го выдела, когда имели место молнии (при сухих грозах) и общее число дней пожароопасных сезонов для i-го выдела за период с 2000 по 2004 год; $N_{ПМi}$ - количество пожаров от молний при сухих грозах за пять лет с 2000 по 2004 год.

В связи с тем, что статистические данные по N_{Ai} в лесхозах отсутствуют, воспользуемся данными работы Андреева Ю.А., Ларченко Г.Ф. [23] для определения показателя пожароопасной посещаемости лесов вблизи населенного пункта $P_i(A)$.

Из-за того, что в математической модели сушки РГМ [1-3] используется объемная доля свободной и связанной воды k-го ОПГ $\varphi_2^{(k)}$ вместо влагосодержания $W_{ij}^{(k)}$, поэтому необходимо воспользоваться формулами перехода от влагосодержания к объемным долям [2].

Приводится упрощенная математическая модель низкотемпературной сушки слоя РГМ с учетом парциального давления паров воды и ее аналитическое решение. В работе [7] 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: 1) конвективный теплообмен между слоем РГМ и приземным слоем атмосферы удовлетворительно описывается с помощью граничных условий третьего рода с использованием известных коэффициентов конвективного теплообмена [24]; 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 [25]; 4) испарение связанной воды и капелек воды, прилипших к элементам РГМ, описывается одним и тем же законом Герца-Кнудсена.

Известно, что в среднем в одном лесхозе имеет место порядка 30 000 выделов. Поэтому даже если использовать упрощенную систему уравнений для описания сушки слоя РГМ, 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 были сделаны 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 описывается одной системой уравнений.

В результате приведения к безразмерному виду и осреднения по высоте слоя РГМ имеем следующие уравнения для определения средней безразмерной температуры к-фазы в слое РГМ и среднего влагосодержания в этом слое:

$$(1+a\overline{\varphi}_2)\frac{d\overline{\theta}_s}{d\tau}=\frac{1}{\delta^2}\{(\varphi_{1н}+\overline{\varphi}_2)[c-d(1+\beta\overline{\theta}_s)^4-(1-\varphi_{1н}-\overline{\varphi}_2)[c_0-d_0(1+\beta\overline{\theta}_s)^4]-$$
$$-Bi(\overline{\theta}_s-\theta_e)-Bi_0(\overline{\theta}_s-\theta_0)-\frac{b\overline{\varphi}_2\exp[\overline{\theta}_s/(1+\beta\overline{\theta}_s)]}{\sqrt{1+\beta\overline{\theta}_s}}[1-\pi_e\exp(-\frac{\overline{\theta}_s}{1+\beta\overline{\theta}_s})]\}+ \quad (5)$$
$$+\frac{[L-G(1+\beta\overline{\theta}_s)^4]}{\overline{k}_1}(1-\varphi_{1н}-\overline{\varphi}_2)(1-e^{-\overline{k}_1})-\frac{\overline{\varphi}_2}{\sqrt{1+\beta\overline{\theta}_s}}[1-\pi_e\exp(-\frac{\overline{\theta}_s}{1+\beta\overline{\theta}_s})]\exp(\frac{\overline{\theta}_s}{1+\beta\overline{\theta}_s})-$$
$$-\overline{\alpha}_v(\overline{\theta}_s-\theta_e).$$

Уравнение (5) представляет собой баланс энергии в к-фазе слоя РГМ, а уравнение (6) характеризует баланс влаги в слое РГМ

$$\frac{d\overline{\varphi}_2}{d\tau}=-\frac{\gamma\overline{\varphi}_2}{\sqrt{1+\beta\overline{\theta}_s}}[1-\pi_e\exp(-\frac{\overline{\theta}_s}{1+\beta\overline{\theta}_s})]\exp(\frac{\overline{\theta}_s}{1+\beta\overline{\theta}_s}). \quad (6)$$

Эти уравнения необходимо решать с использованием следующих начальных условий

$$\overline{\theta}_s(0)=0,\ \overline{\varphi}_2(0)=\varphi_{2н}. \quad (7)$$

Безразмерные величины в этих уравнениях имеют вид: $\overline{\theta}_s^{(k)}=\frac{(\overline{T}_s^{(k)}-T_*)E^{(k)}}{RT_*^2}$,

$\theta_e^{(k)}=\frac{(T_e-T_*)E^{(k)}}{RT_*^2}$, $\theta_0^{(k)}=\frac{(T_0-T_*)E^{(k)}}{RT_*^2}$, $a^{(k)}=\frac{\rho_2 C_{p2}}{\rho_1^{(k)}\varphi_{1i}^{(k)}C_{p1}^{(k)}}$, $c_0^{(k)}=c^{(k)}\exp(-\overline{k}_1^{(k)})$, $d_0^{(k)}=d^{(k)}\exp(-\overline{k}_1^{(k)})$,

$\tau=t/t_*$, $\beta^{(k)}=RT_*/E^{(k)}$, $\pi_\lambda^{(k)}=\lambda_2/\lambda_1^{(k)}\varphi_{1i}^{(k)}$, $L^{(k)}=\frac{k_1\rho_1^{(k)}\sqrt{T_*}\exp(E^{(k)}/RT_*)}{q_2^{(k)}\rho_2 k_{02}^{\otimes(k)}}[(1-A)q_R(h)+J_W]\cos\alpha$,

$k_{02}^{\otimes(k)}=k_{02}^{(k)}s^{(k)}$, $\pi_e^{(k)}=\frac{P_{2e}}{P_{02}}\exp\left(\frac{E^{(k)}}{RT_*}\right)$, $\gamma^{(k)}=\frac{\rho_1^{(k)}\varphi_{1H}^{(k)}C_{p1}^{(k)}RT_*^2}{q_2^{(k)}E^{(k)}\rho_2}$, $(\delta^{(k)})^2=\frac{q_2^{(k)}E^{(k)}\rho_2 k_{02}^{\otimes(k)}h^2}{\lambda_1^{(k)}\varphi_{1H}^{k}\sqrt{T_*}RT_*^2}\exp\left(-\frac{E^{(k)}}{RT_*}\right)$,

$\overline{\alpha}_v^{(k)}=\frac{\alpha_v^{(k)}RT_*^2\sqrt{T_*}}{q_2^{(k)}E^{(k)}\rho_2 k_{02}^{\otimes(k)}}\exp\left(\frac{E^{(k)}}{RT_*}\right)$, $\overline{k}_1^{(k)}=k_1\rho_1^{(k)}h$, $\gamma^{(k)}=\frac{\rho_1^{(k)}\varphi_{1H}^{(k)}C_{p1}^{(k)}RT_*^2}{q_2^{(k)}E^{(k)}\rho_2}$, $c^{(k)}=\frac{E^{(k)}h[(1-A)q_R(h)+J_W]\cos\alpha}{\lambda_1^{(k)}\varphi_{1H}^{(k)}RT_*^2}$,

$d^{(k)}=\frac{\varepsilon_s\sigma T_*^2 hE^{(k)}}{\lambda_1^{(k)}\varphi_{1H}^{(k)}R}$, $b^{(k)}=\frac{E^{(k)}q_2^{(k)}\rho_2 k_{02}^{\otimes(k)}h}{\lambda_1^{(k)}\varphi_{1H}^{(k)}RT_*^2\sqrt{T_*}}\exp\left(-\frac{E^{(k)}}{RT_*}\right)$, $Bi_0^{(k)}=\frac{\alpha_0 h}{\lambda_1^{(k)}\varphi_{1H}^{(k)}}$, $Bi_e^{(k)}=\frac{\alpha_e h}{\lambda_1^{(k)}\varphi_{1H}^{(k)}}$,

$G^{(k)}=\frac{k_1\rho_1^{(k)}\sqrt{T_*}\exp(E^{(k)}/RT_*)\varepsilon\sigma T_*^4}{q_2^{(k)}\rho_2 k_{02}^{\otimes(k)}}$. В качестве размерных величин использовались следующие параметры: $t_*^{(k)}$ - характерное время; верхний индекс k

соответствует главному ОПГ на i-ом выделе; t - время; $\overline{T}_s^{(k)}$ - осредненная температура конденсированной фазы; $\lambda_s^{(k)}$ - 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 [2]; λ - коэффициент теплопроводности газовой фазы; Nu – число Нуссельта; d_s – диаметр элемента РГМ; $\rho_r^{(k)}$, $C_{pr}^{(k)}$ - плотности и теплоемкости сухого органического вещества (r=1), и свободной и связанной с сухим органическим веществом воды (r=2); $\varphi_1^{(k)}$ - объемная доля сухого органического вещества; $\overline{\varphi}_2^{(k)}$ - осредненная объемная доля свободной и связанной с сухим органическим веществом воды; $E^{(k)}$ - энергия активации, характеризующая испарение связанной воды; R - универсальная газовая постоянная; q_{Rw} и $q_{Rz}^{(k)}$ - плотности потока результирующего излучения, на границе раздела сред и потока излучения, проникающего в слой РГМ; $q_2^{(k)}$ - теплота испарения единицы массы воды; A - альбедо слоя РГМ; $q_R(h)$ - плотность потока излучения от 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, где z – вертикальная координата, а h – высота напочвенного покрова; $k_{02}^{(k)} = AP_{02}S_0\sqrt{M}/\sqrt{2\pi R}$ - постоянная величина; A, P_{02} - постоянные множители, определяемые экспериментально; S_0 - поверхность эффективного элемента РГМ; M - молекулярная масса воды.

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.

Новую систему прогноза лесной пожарной опасности рекомендуется использовать для получения оперативного прогноза (на три часа), дневного

прогноза (по утренним данным), краткосрочного прогноза (на неделю), сезонного прогноза (на месяц). Обозначим любой временный отрезок, на который дается прогноз, буквой n.

Используя упрощенную постановку задачи, разлагаем уравнения (5) и (6) в ряд Тейлора до второго члена в окрестности точек $\overline{\theta}_s^{(k)}$, $\overline{\varphi}_2^{(k)}$. Будем считать, что каждому i-му выделу соответствует только один главный ОПГ, тогда в уравнениях можно верхний индекс k не учитывать и опустим для простоты черту осреднения в уравнениях (5) и (6). Отбрасывая малые члены, имеем систему двух линейных дифференциальных уравнений первого порядка для определения объемной доли свободной и связанной воды и температуры слоя ЛГМ. Интегрируя ее 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:

$$\varphi_2 = \exp\left(c_n^{(2)}\tau\right)\left\{M_n - R_n\left[\exp\left(-c_n^{(2)}\tau\right)-1\right] + D_n\left[\exp\left(\tau\left\langle s_n^{(1)} - c_n^{(2)}\right\rangle\right)-1\right] + \right. \quad (8)$$
$$\left. + Y_n\left[\exp\left(\tau\left\langle s_n^{(2)} - c_n^{(2)}\right\rangle\right)-1\right]\right\}$$

$$\theta_s = (\theta_{sn} - k_n - h_n)\exp\left[s_n^{(1)}(\tau-\tau_n)\right] + h_n\exp\left[s_n^{(2)}(\tau-\tau_n)\right] + k_n. \quad (9)$$

Здесь $R_n = \frac{f_n^{(2)} + b_n^{(2)}k_n}{c_n^{(2)}}$, $D_n = \frac{b_n^{(2)}(\theta_{sn} - k_n - h_n)\exp(-s_n^{(1)}\tau_n)}{s_n^{(1)} - c_n^{(2)}}$, $f_1(\theta_{sn}, \varphi_{2n}) = a_n^{(1)}$,

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

$a_n^{(1)} - b_n^{(1)}\theta_{sn} - c_n^{(1)}\varphi_{2n} = f_n^{(1)}$, $a_n^{(2)} - b_n^{(2)}\theta_{sn} - c_n^{(2)}\varphi_{2n} = f_n^{(2)}$, $s_n^{(1)}, s_n^{(2)} = \frac{b_n^{(1)} + c_n^{(2)} \pm \sqrt{(b_n^{(1)} - c_n^{(2)})^2 + 4b_n^{(2)}c_n^{(1)}}}{2}$,

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

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

$- \frac{b_n^{(2)}h_n\exp(-s_n^{(2)}\tau_n)}{s_n^{(2)} - c_n^{(2)}}(\exp(\tau_n[s_n^{(2)} - c_n^{(2)}]) - 1)].$

Тогда вероятность возникновения пожара по географическим и метеорологическим причинам в момент τ определяется по формуле (2).

Следовательно, удается определить вероятность возникновения пожара в любой момент времени.

Получено упрощенное аналитическое решение задачи. Для этого было сделано 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 (6) примет вид

$$\varphi_2 = \varphi_{2n} \exp\left[-\gamma_n \left(1-\pi_{en}\right)\left(\tau-\tau_n\right)\right]. \qquad (10)$$

В результате было получено простое аналитическое решение 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 растительный горючий материал достигает критического влагосодержания.

Из формулы (10) получаем выражение для определения времени лесопожарного созревания лесов

$$\tau_* = \tau_n + \frac{1}{\gamma_n\left(1-\pi_{en}\right)} \ln\frac{\varphi_{2n}}{\varphi_{2*}}. \qquad (11)$$

Представлены результаты численного решения задачи, сравнение с аналитическим и упрощенным аналитическим решением и их анализ. Показано изменение вероятности пожарной опасности для различных сценариев сушки и проведена качественная оценка формулы для определения времени лесопожарного созревания лесов.

Третья глава посвещена созданию базы данных для новой системы прогноза лесной пожарной опасности.

Летом 2003 года 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. Они в свою очередь делились в соответствии с лесотаксационными описаниями лесников.

Для определения влагосодержания и запаса слоя РГМ использовали методику предложенную Н.П. Курбатским [26]. В рамках этой методики влагосодержание и запас горючих материалов определяли по образцам, которые собирают вручную на участках с площадок размером 0.005 м^2. 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 [27]. Площадки отбирали по принципу случайной выборки, новые площадки примыкали к предыдущим с интервалом 10-15 см.

Далее образцы РГМ, в лабораторных условиях, взвешивали на аналитических весах АДВ–200 с точностью 10^{-3} г, для получения массы образца. Затем образец разделяли на составные части по типам РГМ, определяя процентное содержание каждого типа. После этого их аккуратно перекладывали в специальные формы и помещали в сушильный шкаф с установившейся температурой. Сушку проводили в изотермических условиях при T = (297, 318, 373) ± 2 ºК.

В результате были получены графики зависимости изменения массы мха Шребера, опада хвои сосны обыкновенной, опада хвои кедра, опада хвои пихты, опада листьев березы, опада листьев осины от времени при различных температурах. Для вычисления доверительных интервалов использовали критерий Стьюдента, с доверительной вероятностью 0.95 для 3 - 5-ти точечного эксперимента. Графики зависимости изменения массы от времени для основных проводников горения строились по точкам, равноудаленным от границ доверительных интервалов. Эти графики использовались для определения термокинетических постоянных, при решении обратной задачи математической физики [28].

На основании проведенных экспериментальных исследований при использовании методики [28], были получены значения энергии активации и предэкспоненциального множителя (таблица 1).

Таблица 1 - Численные значения термокинетических постоянных низкотемпературной сушки

	Хвоя кедра	Хвоя сосны	Хвоя пихты	Листья березы	Листья осины	Мох Шребера
E_2 (Дж/моль)	18306,3	2005	6993	2047	4998	14060
k_{02} ($К^{1/2}$/с)	$0{,}24 \cdot 10^3$	0,087	1,067	0,11	0,418	4,73

Проведено сравнение экспериментальных данных низкотемпературной сушки типичных РГМ с расчетными данными, полученными на основе аналитического решения упрощенной математической модели, с использованием полученных термокинетических постоянных. Из анализа полученных результатов следует, что отличие расчетных данных от экспериментальных не превышает 10 %.

В результате обработки экспедиционных образцов была создана база данных типичных РГМ и термокинетических постоянных для новой системы прогноза лесной пожарной опасности.

В главе 4 описано создание компьютерной экспертной геоинформационной системы прогноза лесной пожарной опасности и проведена проверка этой методики путем ретроспективного анализа результатов наблюдений пожаров в Тимирязевском лесхозе Томской области.

Показан состав и структура геоинформационного обеспечения программного комплекса прогноза лесной пожарной опасности и приводится описание создания электронной крупномасштабной карты типичного лесхоза (на примере Белоярского лесхоза Томской области).

Представлено описание работы компьютерной экспертной геоинформационной системы прогноза лесной пожарной опасности.

Для проверки новой методики воспользовались базами метеорологических, экспедиционных данных, термо-кинетичеких постоянных для ОПГ, базой статистических данных о месте и времени пожаров в 6 лесничествах (Моряковском, Богородском, Жуковском, Киреевском, Темерчинском, Тимирязевском учебном) Тимирязевского лесхоза за 2000 – 2004 годы, которые сравнивались с соответствующими значениями индекса Нестерова и вероятности возникновения лесного пожара для различных значений времени.

У различных авторов данные по верхнему пределу критического влагосодержания достаточно сильно отличаются. В данной работе, в качестве критических влагосодержаний для новой системы прогноза, брали максимальные, минимальные, среднеарифметические, а также данные М.А. Шешукова [29, 30]. Из анализа полученных данных, следует, что при уменьшении критических влагосодержаний точность методики несколько падает, а при увеличении соответственно растет. 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.

Учет количества выпавших осадков ведется за счет экспериментальных данных полученных в работе [27].

Проведено качественное сравнение изменения индекса Нестерова и вероятности пожарной опасности в течение пожароопасного сезона для Жуковского лесничества. Из анализа полученных результатов следует, что в некоторые дни пожароопасного сезона вероятность пожарной опасности равна нулю, в то время как индекс Нестерова 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. 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.

Для проверки получаемых результатов, результаты расчетов вероятности возникновения лесных пожаров сравнивались с классами засухи (КЗ), определяемыми по комплексному показателю В.Г. Нестерова, которые используются на практике (ГОСТ Р 22.1.09-99) и рассчитываются при тех же самых условиях.

Классы пожарной опасности (КПО) по нашей методике определялись следующим образом. Максимальная величина лесной пожарной опасности на i-ом выделе, которая может быть получена по формуле (2) равняется $\frac{F_i}{F}$. Присвоим a_6 максимальное значение VI КЗ по методике Нестерова. Т.к. 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-ом выделе. Тогда общая формула, для определения границ местной шкалы прогноза лесной пожарной опасности, примет вид:

$$x_j = \frac{a_j P_{mi}}{a_6},\ P_{mi} = \frac{F_{ik}}{F_k},\ j,k=1,2,3,4,5,6. \qquad (12)$$

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

Для доказательства достоверности предлагаемой детерминированно-вероятностной методики проведен ретроспективный анализ 202 возгораний в Тимирязевском лесхозе с учетом конкретных метеоусловий и антропогенной нагрузки на леса в 2000-2004 годах. Из анализа данных 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.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Создана база данных типичных РГМ Тимирязевского лесхоза Томской области. На основе экспериментальных данных и математической модели сушки РГМ, решены обратные задачи математической физики и найдены термокинетические постоянные, однозначно характеризующие сушку этих РГМ.

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

3. 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.

4. 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.

5. 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.

6. Создана геоинформационная экспертная система прогноза лесной пожарной опасности, включающая упомянутую выше методику, с использованием которой удается определить вероятность, время и место возникновения лесных пожаров с учетом влияния структуры слоя напочвенного покрова и типа РГМ, осадков, действия ветра и излучения от Солнца, динамики сушки РГМ, антропогенной нагрузки и молний на лесные фитоценозы.

7. На основе проведенного ретроспективного анализа 202 возгораний в Тимирязевском лесхозе с учетом конкретных метеоусловий и антропогенной нагрузки на леса в 2000-2004 годах, 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.

8. В рамках предлагаемой методики получена формула для времени лесопожарного созревания лесов, которая согласуется с данными наблюдений.

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гришин А.М. Математические модели лесных пожаров. - Томск: Изд-во ТГУ, 1981. - 278 с.

2. Гришин А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. - Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1992. - 408 с.

3. Гришин А.М. Физика лесных пожаров. - Томск: Изд-во Том. ун-та, 1999. – 207 с.

4. Гришин А.М. Моделирование и прогноз техногенных и экологических катастроф // Избранные доклады международной конф. «Математическое и

физическое моделирование сопряженных задач механики реагирующих сред и экологии»:. Томск, Изд-во Том. ун-та, 2000. - С. 64 - 88.
5. Катаева Л.Ю. Применение понятий и методов механики жидкости и газа для решения некоторых актуальных задач экологии: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. / Томский гос. ун-т. - Томск, 2000. – 180 с.
6. Гришин А.М. Моделирование и прогноз экологических катастроф // Экологические системы и приборы. - 2001. - №2. - С. 12 - 21.
7. Лобода Е.Л. Физико-математическое моделирование сушки и зажигания слоя лесных горючих материалов // Дис. ... канд. физ.-мат. наук. / Томский гос. ун-т. - Томск, 2002. – 125 с.
8. Гришин А.М. Моделирование и прогноз катастроф // Ч.1. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2003. - 524 с.
9. Canadian Forest Fire Danger Rating System / B.J. Stocks, M.E. Alexander, R.S. Mc.Alpine a.o. - Canadian Forestry service, 1987. - 500 p.
10. J.E. Deeming, G.W. Lancaster, M.A. Fosberg a.o. The National Fire-Danger Rating System. - N.Y.; London; Toronto; USDA: Forest Service, 1972. - 165 p.
11. Нестеров В.Г. Горимость леса и методы ее определения. - М.: Гослесбумиздат, 1949. - 76 с.
12. Сверлова Л.И. Метод оценки пожарной опасности в лесах по условиям погоды с учетом поясов атмосферной засушливости и сезонов года. - Хабаровск, 2000. – 46 с.
13. Иванова Г.А. Лесопожарная роль доминантов напочвенного покрова в сосняках разнотравно-брусничных: Автореф. дисс. … канд. с.-х. наук. - Красноярск, 1985.
14. Захаров А.И. Динамика влажности лесных горючих материалов и возникновение пожаров от гроз (В условиях Тюменской области): Автореф. дисс. … канд. с.-х. наук / ЛенНИИЛХ. - Лен., 1983. - 18 с.
15. Коровин Г.Н., Покрывайло В.Д., Гришман З.М., Латыпин В.М., Самусенко И.Ф. Основные направления развития и совершенствования системы оценки и прогноза пожарной опасности // Лесные пожары и борьба с ними. - Л.: ЛенНИЛХ, 1986. С. 18 - 31.
16. Коровин Г.Н., Андреев Н.А. Авиационная охрана лесов. - М.: Агропромиздат, 1988. - 220 с.
17. Доррер Г.А. Модель суточной динамики влагосодержания проводников горения // Лесные пожары и их последствия. Красноярск: ИЛ и ДСОАН СССР, 1985. - С. 110 - 124.
18. Мухин А.С. Совершенствование информационного обеспечения в охране лесов от пожаров: Автореф. дисс. … канд. с.-х. наук. - Моск. гос. ун-т леса. - М., 1996. - 24 с.
19. Иванов В.А., Матвеев П.М., Коршунов Н.А. Оценка возможности возникновения лесных пожаров от гроз // Международная научно-практическая конференция. Хабаровск, 2002. - С. 58 - 61.

20. Smeyer, Frank1in R. Моде1 for the prediction of lightning-consed forest fires // Milwankee Symp. Autamat Contr. Milwaukes. Wiac, 1974. New Jork, 1974. – P.p. 203 - 208.
21. Андреев Ю.А. Влияние антропогенных и природных факторов на возникновение пожаров в лесах и населенных пунктах: Автореф. дисс. на соискание ученой степени док. тех. наук / ФГУ ВНИИПО МЧС России. - М., 2003. - 45 с.
22. Потапов Б.В., Радаев Н.Н. Экономика природного и техногенного рисков. - М.: ЗАО ФИД “Деловой экспресс”, 2001. - 514 с.
23. Андреев Ю.А., Ларченко Г.Ф. Социально-психологические аспекты рекреационных посещений леса и возникновение пожаров // Лесные пожары и борьба с ними. - Москва, 1987. - С. 251 - 263.
24. Павлов А.В. Энергообмен в ландшафтной среде Земли. - Новосибирск, Наука, 1984. - 256 с.
25. 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.
26. Курбатский Н.П. Исследование количества и свойств лесных горючих материалов // Вопросы лесной пирологии / ИлиД СО АН СССР. - Красноярск, 1970. - С. 5 - 58.
27. Волокитина А.В., Софронов М.А. Классификация и картографирование растительных горючих материалов. - Новосибирск: Издательство СО РАН, 2002. - 314 с.
28. Гришин А.М., Кузин А.Я., Алексеенко Е.М. Определение кинетических характеристик процесса сушки лесных горючих материалов // ИФЖ. – 2003. - Т.76. - №5. - С. 170 – 174.
29. Шешуков М.А. К вопросу составления пожарных карт // Сб. трудов ДальНИИЛХ. - 1966. - Вып. 8. - С. 407 - 416.
30. Шешуков М.А. Исследование природы лесных пожаров в основных лесных формациях Нижнего Приамурья. – Красноярск: Институт леса и древесины, 1970. – 204 с.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Гришин А.М., Катаева Л.Ю., Фильков А.И. Использование ГИС для оценки пожарной опасности Белоярского лесхоза Томской области // Материалы 4-й международной конференции «Лесные и степные пожары: возникновение, распространение, тушение и экологические последствия». - Томск: Изд-во Томского университета, 2001. - С. 68 - 69.
2. Гришин А.М., Барановский Н.В., Лобода Е.Л., Фильков А.И. Проведение работ по программно-информационному обеспечению прогноза лесопожарной опасности для Томской области: Отчет по х/д (за 2001 г.) /. Том. гос. ун-т; Центр

образования и исследований по механике реагирующих сред и экологии (ЦОИМЭК ТГУ); рук. А.М. Гришин. – Томск, 2001. - 221 с. - № 488.
3. Фильков А.И., Гришин А.М. Определение вероятности пожарной опасности, запасов лесных горючих материалов и использование ГИС для нанесения на электронную карту Белоярского лесхоза Томской области // Тезисы международной конференции «ENVIROMIS-2002». - Томск: Изд-во Томского ЦНТИ, 2002. - С. 52 - 53.
4. 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. - С. 83 - 88.
5. Гришин А.М., Фильков А.И. Детерминированно-вероятностная модель прогноза лесной пожарной опасности с использованием геоинформационной системы ArcView // Материалы международной конференции «Сопряженные задачи механики, информатики и экологии». - Томск: Изд-во Томского университета, 2002. - С. 62 - 63.
6. Гришин А.М., Фильков А.И. Применение ARCVIEW GIS для решения задачи прогноза лесной пожарной опасности // Сборник тезисов «Sites-2003». - Томск: Изд-во Томского ЦНТИ, 2003. - С. 38.
7. Гришин А.М., Фильков А.И. Параметрический анализ упрощенной математической модели сушки слоя лесного горючего материала // Материалы международной конференции «Сопряженные задачи механики, информатики и экологии». - Томск: Изд-во Томского университета, 2002. - С. 62 - 63.
8. Гришин А.М., Фильков А.И. Об одной модели прогноза лесной пожарной опасности // ИФЖ. - 2003. - Т.76. - №5. - С. 154 - 158.
9. Гришин А.М., Фильков А.И. Геоинформационная система прогноза лесной пожарной опасности // Материалы 5-й международной конференции «Природные пожары: возникновение, распространение, тушение и экологические последствия». - Томск: Изд-во Томского университета, 2003. - С. 94 - 95.
10. Фильков А.И. Геоинформационное обеспечение для системы прогноза лесной пожарной опасности // Международная конференция по математике и механике. Тезисы докладов. – Томск: Изд-во Томского университета, 2003. - С. 161 - 162.
11. Фильков А.И. Геоинформационное обеспечение для системы прогноза лесных пожаров // Международная конференция по математике и механике: Избранные доклады. - Томск: Изд-во Томского университета, 2003. - С. 235- 240.
12. Гришин А.М., Фильков А.И. Проведение работ по программно-информационному обеспечению прогноза лесопожарной опасности: Отчет по х/д (за 2003 г.) / Региональная общественная организация «Томское Общество Ученых Механиков и Теплофизиков»; рук. Гришин А.М. - Томск, 2003. - 76 С. - №1/9-14/02.

13. Гришин А.М., Фильков А.И. Применение ARCVIEW GIS для решения задачи прогноза лесной пожарной опасности // Sites-2003. Сборник тезисов. – Томск: Изд-во Томского ЦНТИ, 2003. - С. 38.
14. Гришин А.М., Фильков А.И. Геоинформационная система прогноза лесной пожарной опасности // Сборник избранных докладов международной конференции «Информационные технологии и системы: наука и практика». – Владикавказ, 2003. - С. 248 - 253.
15. Фильков А.И. Геоинформационный комплекс прогноза лесной пожарной опасности для Тимирязевского лесхоза Томской области // Тезисы международной конференции ENVIROMIS-2004. - Томск: Изд-во Томского ЦНТИ, 2004. - С. 45.
16. Фильков А.И. Геоинформационная система прогноза лесной пожарной опасности // Материалы Научной сессии молодых ученых научно-образовательного центра «Физика и химия высокоэнергетических систем». - Томск: ИФПМ СО РАН, 2004. - С. 64 - 66.
17. Фильков А.И. Создание базы данных типичных лесных горючих материалов для новой системы прогноза лесной пожарной опасности // Материалы XLI международной научной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс»: Математика / Новосиб. гос. университет. - Новосибирск, 2004. - С. 148 - 149.
18. 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.p. 175 - 185.
19. Гришин А.М., Фильков А.И. Геоинформационная система прогноза лесной пожарной опасности // V Минский международный форум по тепло- и массообмену: Тезисы докладов и сообщений. – Минск: Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, 2004. - С. 168 - 169.
20. Гришин А.М., Кузин А.Я., Фильков А.И. Определение термокинетических постоянных процесса сушки типичных лесных горючих материалов // Материалы международной конференции «Сопряженные задачи механики, информатики и экологии». – Томск: Изд-во Томского ун-та, 2004. - С. 72 - 73.
21. Гришин А.М., Фильков А.И. О геоинформационной системе прогноза лесной пожарной опасности // Экологические системы и приборы. – 2004. - №8. - С. 26 - 28.
22. Гришин А.М., Фильков А.И. Новая система прогноза лесной пожарной опасности для Тимирязевского лесхоза Томской области // Материалы научно-практической конференции «Дальнейшее совершенствование природной, техногенной и пожарной безопасности населения и территорий – устойчивое развитие Сибирского региона». Новосибирск: Сибпринт, 2004, С. 74-75.
23. Фильков А.И. Ретроспективный анализ детерминированно-вероятностной методики прогноза лесной пожарной опасности // Сборник материалов I Всероссийской конференции молодых ученых (26-29 апреля 2005 г., Томск). – Томск: Томский государственный университет, 2005. – С. 230 – 231.