

На правах рукописи



Фильков Александр Иванович

**ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ И
ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ СУШКИ,
ПИРОЛИЗА И ЗАЖИГАНИЯ
ГОРЮЧИХ МАТЕРИАЛОВ**

01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Томск – 2014

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» на кафедре физической и вычислительной механики и в лаборатории биогеохимических и дистанционных методов мониторинга окружающей среды.

Научный консультант:

Заслуженный деятель науки Российской Федерации, доктор физико-математических наук, профессор **Гришин Анатолий Михайлович**

Официальные оппоненты:

Алексеев Борис Владимирович, Заслуженный деятель науки и техники РСФСР, доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова», кафедра физики, заведующий кафедрой

Доррер Георгий Алексеевич, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский государственный технологический университет», кафедра системотехники, заведующий кафедрой

Рудяк Валерий Яковлевич, доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)», кафедра теоретической механики, заведующий кафедрой

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий» (г. Балашиха, Московской области)

Защита состоится 3 октября 2014 года в 10.30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.267.13, созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина 36 (корпус НИИ ПММ ТГУ, ауд. 239).

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке и на сайте федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» www.tsu.ru.

Материалы по защите диссертации размещены на официальном сайте ТГУ: http://www.tsu.ru/content/news/announcement_of_the_dissertations_in_the_tsu.php.

Автореферат разослан « ____ » июля 2014 г

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук

Христенко Юрий Федорович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В последние годы наблюдается увеличение количества природных пожаров, число которых по всему миру ежегодно достигает около 7 000 000. Только во время катастрофических пожаров 2010 и 2012 гг. в России было уничтожено огнем более 2 миллионов гектаров леса. При этом сгорели частично или полностью десятки населенных пунктов, приводя иногда к несчастным случаям среди населения и пожарных подразделений.

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 учитываются. Несмотря на большое количество научных работ по данной тематике, проблема точного и своевременного прогноза природных пожаров, а также борьбы с ними, до конца не решена. Не до конца разработаны математические модели прогноза лесных, степных и торфяных пожаров, не созданы простые и эффективные математические модели сушки растительных горючих материалов (РГМ), не исследовано образование горящих частиц во время лесных пожаров. Для решения поставленных задач необходимо использовать математические модели возникновения и распространения природных пожаров в сочетании с использованием законов и методов механики многофазных реагирующих сред, современных методов проведения экспериментов, что подтверждает актуальность проводимых исследований.

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

Поэтому основными задачами диссертационного исследования явились:

1. Разработка новых детерминированно-вероятностных методик прогноза лесной, степной и торфяной пожарной опасности.
2. Создание упрощенных математических моделей сушки РГМ.
3. Тестирование методик прогноза возникновения пожаров с помощью ретроспективного анализа.
4. Сбор и создание базы теплофизических данных для новой системы прогноза природной пожарной опасности.
5. Исследование зажигания и горения РГМ в лабораторных и натурных условиях.
6. Определение термокинетических постоянных различных РГМ, в том числе с учетом масштабного эффекта.

7. Обобщение полученных результатов в виде геоинформационного программного комплекса прогноза возникновения и распространения природных пожаров.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования диссертационной работы является конкретная природная катастрофа – возникновение лесных, степных и торфяных пожаров. Предмет исследования – численное и экспериментальное моделирование теплофизических процессов в природе, вызывающих зажигание РГМ и возникновение природных пожаров. Область исследования – теоретические и экспериментальные исследования макросвойств РГМ для более глубокого понимания явлений, протекающих при возникновении и распространении природных пожаров.

Достоверность. Достоверность полученных теоретических и экспериментальных результатов работы доказана на основе их сравнения с экспериментальными данными, результатами наблюдений, путем корректных постановок задач и проведения тестовых расчетов, а также ретроспективного анализа.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Реализован комплексный теоретико-экспериментальный и детерминированно-вероятностный подход к оценке вероятности возникновения природных пожаров с использованием, как детерминированных методов механики сплошных многофазных сред, так и методов теории вероятности и математической статистики.
2. Разработаны методики для определения вероятностей возникновения лесных, степных и торфяных пожаров, в результате воздействия антропогенной и природной нагрузок, и вероятности возникновения лесных пожаров по метеоусловиям, на основе упрощенных математических моделей сушки слоя РГМ.
3. Найден точное аналитическое и упрощенное аналитическое решение задачи о сушке слоя лесных горючих материалов (ЛГМ).
4. Получена простая формула для определения времени лесопожарного созревания лесов.
5. Предложена многофазная математическая модель сушки слоя торфа, учитывающая основные метеорологические параметры, а также теплофизические характеристики торфяного слоя и позволяющая осуществлять мониторинг состояния заболоченных территорий для последующей оценки их пожарной опасности.
6. Установлено, что ни масштаб образца, ни тип торфа не оказывают значительного влияния на кинетику процесса сушки.
7. Доказана допустимость использования осредненной кинетики для прогнозирования динамики влагосодержания рассмотренных типов торфов.
8. Впервые исследовано воспламенение различных видов древесины, влияние начальной температуры и влажности древесины на время воспламенения при воздействии потока лучистой энергии высокой

плотности. Оптическим методом определена температура воспламенения древесины сосны и березы при различных интенсивностях потока лучистой энергии.

9. Впервые проведен натурный эксперимент по изучению генерации горящих частиц в натуральных условиях. Разработаны методики для определения характеристик генерации горящих частиц.
10. Создан геоинформационный программный комплекс прогноза возникновения и распространения природных пожаров, тестирование которого проведено на примере двух районов Томской области.

Теоретическая значимость полученных результатов.

В диссертационной работе впервые в теории природных пожаров, была численно решена задача о прогнозе лесной, степной и торфяной пожарной опасности в результате одновременного расчета влагосодержания слоя РГМ на примере Бакчарского района и Жуковского лесничества Томской области на основе новых постановок задач о сушке этого слоя и формул для вероятности возникновения природных пожаров с учетом антропогенной нагрузки, действия сухих гроз и условий погоды на том же участке. Исследованное влияние начальной температуры образцов древесины и ее влажности на время воспламенения, а также найденные температуры поверхности древесины в момент воспламенения при высоких плотностях тепловых потоков, позволят уточнить имеющиеся математические модели зажигания конденсированных веществ и разработать новые. Исследование процесса сушки образцов торфа различного масштаба показало, что ни размер образца, ни тип торфа не оказывают значительного влияния на кинетику процесса сушки. Протестировано несколько методов для характеристики генерации горящих частиц. Результаты исследований являются первыми в своем роде и открывают перспективы для выяснения механизма образования горящих частиц с последующей разработкой математических моделей этого процесса.

Практическая значимость. Основным прикладным применением результатов диссертационного исследования в экономике является комплекс компьютерных программ для мониторинга и прогноза возникновения, распространения и экологических последствий природных пожаров. Результаты диссертационной работы использованы в виде рекомендаций и программного комплекса отделом охраны и защиты лесного фонда Департамента лесного хозяйства Томской области и областным государственным специализированным бюджетным учреждением «Томская база авиационной охраны лесов», а также в процессе обучения студентов магистрантов на механико-математическом факультете Томского государственного университета. В рамках приоритетного направления «Рациональное природопользование» результаты фактически содействуют развитию критической технологии «Технологии предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера», призванной формировать базовый потенциал для появления широкого спектра новых технологий, преодоления технологической отсталости и расширения перечня высокотехнологичных производств и секторов экономики.

Полученные результаты успешно использовались при выполнении 18 грантов и федеральных целевых программ, в 9 из которых соискатель выступал в качестве руководителя: стипендия Президента Российской Федерации для молодых ученых и аспирантов 2013-2014 гг. «Разработка средств мониторинга и прогнозирования состояния заболоченных территорий Томской области с использованием физического, математического и геоинформационного моделирования с целью рационального использования природных ресурсов»; грант РФФИ №12-01-00142-а «Математическое моделирование прогноза возникновения пожаров на торфяниках с использованием детерминированно-вероятностного подхода»; грант Фулбрайта на проведение научных исследований в Политехническом институте Вустера (США) «Механизмы перехода горения при природных пожарах: воспламенение домов горящими частицами»; грант ФЦП 1.2.2 «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 - 2013 годы соглашение № 14.B37.21.0634 «Физико-математическое и геоинформационное моделирование динамики параметров состояния заболоченных территорий в условиях интенсивной антропогенной нагрузки с использованием данных полевых ландшафтно-геохимических исследований и метеорологической информации для оперативного мониторинга и прогнозирования пожароопасной обстановки»; грант РФФИ №12-08-90802-мол_рф_нр «Исследование теплофизических и термокинетических свойств твердых органических топлив в зависимости от масштабного эффекта и параметров состояния исследуемой среды»; грант ФЦП 1.4 «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 - 2013 годы «Математическое и экспериментальное исследование природных и техногенных пожаров с целью их мониторинга, предупреждения и ликвидации»; грант ФЦП № 1.2.2 Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 годы «Физико-математические исследования возникновения и распространения природных (лесных и степных) пожаров с целью снижения их риска и уменьшения последствий», г/к № П 1109 от 26.08.2009 г.; грант РФФИ № 11-08-90714-моб_ст «Исследование теплофизических и термокинетических свойств твердых органических топлив»; грант №УЗ-МР-16-03 Министерства образования и науки Российской Федерации и Американского фонда гражданских исследований и развития (CRDF) на 2006-2008 гг. на проведение стажировки в научно-образовательном центре «Физика и химия высокоэнергетических систем». Результаты исследований зарегистрированы в качестве Патента Российской Федерации на изобретение (заявка №2008117660/12) и Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ №200961120.

Полученные результаты рекомендуется использовать в Министерстве Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Авиалесоохране, областных управлениях лесами, администрациях городов и поселков для мониторинга и прогноза возникновения, распространения и экологических последствий природных пожаров, а также в учебном процессе ВУЗов.

Апробация работы. Результаты диссертации докладывались и обсуждались на 35 Всероссийских и Международных научных конференциях и форумах, в том числе: IV Международная конференция «Лесные и степные пожары: возникновение, распространение, тушение и экологические последствия» (Иркутск, 2001), Международная конференция «Сопряженные задачи механики, информатики и экологии» (Томск, 2002, 2004), Международная конференция «ENVIROMIS» (Томск, 2002, 2004), V Международная конференция «Природные пожары: возникновение, распространение, тушение и экологические последствия» (Красноярск, 2003), Вторая Сибирская конференция «ГИС в науке, природопользовании и образовании» (Новосибирск, 2003), Международная конференция по математике и механике (Томск, 2003), Научно-практическая конференция «Перспективы развития системы мониторинга и прогнозирования ЧС природного и техногенного характера» (Новосибирск, 2003), XIII Симпозиум по горению и взрыву (Черноголовка, 2005), 7-я Международная конференция «Математическое моделирование опасных природных явлений и катастроф» (Томск, 2008), 5-й, 6-й и 7-й Минский международный форумы по тепло- и массообмену (Минск, Беларусь, 2004, 2008, 2012), 8-я Всероссийская конференция «Сопряженные задачи механики реагирующих сред, информатики и экологии» (Томск, 2009), VI Средиземноморский симпозиум по горению (Корсика, Франция, 2009), XVI Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (Томск, 2009), VI Международная конференция по исследованию природных пожаров (Коимбра, Португалия, 2010), X Международная конференция «Забабахинские чтения» (Снежинск, 2010), Всероссийская конференция с участием зарубежных ученых «Математическое и физическое моделирование опасных природных явлений и техногенных катастроф» (Томск, 2010), XVII Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (Томск, 2011), XI Всероссийская конференция с участием иностранных ученых «Проблемы мониторинга окружающей среды» (Кемерово, 2011), Международная конференция по исследованию пожаров и риска (Альегро, Италия, 2011), Всероссийская научная конференция с международным участием «Математическое и физическое моделирование опасных природных явлений и техногенных катастроф» (Томск, 2012), Всероссийская конференция «Горение твердого топлива» (Новосибирск, 2012), IV Международная конференция по исследованию поведения пожаров и топлив (Роли, США и С.-Петербург, 2013).

Публикации по теме диссертации. По теме диссертации соискателем опубликовано 53 работы, в том числе 2 монографии, 18 статей в научных журналах, которые включены в Перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве образования и науки Российской Федерации для опубликования основных научных результатов диссертаций (из них 6 статей в журналах, входящих в международные базы научного цитирования Web of Science и Scopus), 1 патент Российской Федерации, 1 свидетельство на программу для ЭВМ, 2 статьи в научных журналах, 29 публикаций в сборниках трудов всероссийских и

международных конференций (из них 5 публикаций в сборниках трудов зарубежных конференций).

Личный вклад заключается в разработке методики определения всех параметров в формуле прогноза возникновения низовых лесных пожаров; ретроспективной проверке данной методики; постановке задачи о прогнозе торфяной пожарной опасности, сушки слоя торфа, численной реализации математических моделей сушки лесных горючих материалов и слоя торфа; определении термокинетических постоянных РГМ; разработке методик сбора и анализа горящих частиц; определении температуры и времени задержки зажигания древесины; разработке структуры и состава геоинформационного программного комплекса прогноза возникновения и распространения природных пожаров. Все основные результаты диссертационной работы, анализ результатов и выводы получены автором лично. Представление изложенных в работе результатов согласовано с соавторами.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Математические модели определения вероятностей возникновения лесных, степных и торфяных пожаров, с учетом антропогенной и природной нагрузок, через частоты событий и вероятность возникновения лесного пожара по метеоусловиям, на основе упрощенных математических моделей сушки слоя РГМ.
2. Аналитическое решение упрощенной математической модели сушки слоя РГМ и формула для времени лесопожарного созревания лесов.
3. Однотемпературная многофазная математическая модель сушки слоя торфа.
4. Результаты тестирования методик прогноза пожарной опасности с помощью ретроспективного анализа горимости лесов на примере Тимирязевского лесхоза и торфяников Бакчарского района Томской области путем сравнения полученных данных с данными по методике Нестерова.
5. Результаты определения термокинетических постоянных сушки лесных, степных и торфяных горючих материалов.
6. Результаты исследования воспламенения различных видов древесины при воздействии излучения высокой плотности в статических условиях:
 - зависимости времени задержки воспламенения от интенсивности потока лучистой энергии для различных сортов древесины;
 - зависимости влияния начальной температуры и влажности древесины на время воспламенения;
 - температуры воспламенения древесины сосны и березы при различных интенсивностях потока лучистой энергии, определенные оптическим методом.
7. Результаты натурных исследований горящих частиц, образующихся во время низового лесного пожара.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, 8 приложений и списка цитируемой литературы (248 наименований). Общий объем работы – 359 страниц машинописного текста.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проблемы в целом, определены цели и задачи исследования, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, рассмотрена научная новизна работы, ее научная ценность и практическая значимость, представлен личный вклад автора в работу и ее апробация, изложено краткое содержание по главам.

В главе I проведен обзор существующих методик прогноза пожарной опасности, проанализированы работы, посвященные разработке общих методов прогноза катастроф и кинетическим исследованиям растительных горючих материалов. Анализ работ показал, что физико-математическое моделирование природных пожаров является крайне важным инструментом при прогнозировании пожаров, определении параметров их развития и предупреждения катастрофических последствий этого явления. Делается вывод, что 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. Кроме того, 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 физически-обоснованные методики прогноза торфяной пожарной опасности. Согласно работам А.М. Гришина [Гришин А.М. и др., 1981, 1992, 1997, 2002, 2003, 2005, 2006] причины возникновения природных пожаров носят вероятностный характер и поэтому целесообразно разрабатывать детерминированно-вероятностные модели для прогноза природной пожарной опасности. При этом использовать простые математические модели сушки РГМ для прогноза их влагосодержания. Известно, что 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. Поэтому детерминированно-вероятностные модели прогноза природной пожарной опасности должны быть неотделимой частью геоинформационной системы прогноза пожарной опасности.

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

Используя теорию вероятностей и физические соображения, в работах А.М. Гришина [Гришин А.М. и др., 2000-2003] была получена формула для оценки вероятности возникновения лесного пожара. Однако данная модель имела ряд недостатков. Поэтому представляет интерес создания уточненной

вероятностной модели прогноза лесной пожарной опасности. В результате математических исследований была получена следующая модель для прогноза вероятности возникновения лесного пожара в момент времени t на i -ой территории

$$P_i(t) = [P_i(A,t)P_i(\text{ЛП} / A,t) + P_i(B,t)P_i(\text{ЛП} / B,t)]P_i(C,t), \quad (1)$$

где $P_i(A,t)$ – вероятность антропогенной нагрузки, достаточной для зажигания ЛГМ; $P_i(\text{ЛП}/A,t)$ – вероятность возникновения пожара вследствие антропогенной нагрузки на площади F_i ; $P_i(B,t)$ – вероятность возникновения сухих гроз на площади F_i ; $P_i(\text{ЛП}/B,t)$ – вероятность возникновения лесного пожара от молнии при условии, что сухие грозы могут иметь место на площади F_i ; $P_i(C,t)$ – вероятность возникновения лесного пожара по условиям погоды.

Для определения вероятностей возникновения лесных пожаров, за счет действия антропогенной нагрузки и молний в формуле (1), предложено использовать определение вероятностей через частоты событий и воспользоваться статистическими данными для соответствующей территории. 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. Поэтому необходимо ввести величину вероятности того, что влагосодержание растительного горючего материала меньше критического

$$P_i(C,t) = \begin{cases} 0 & \text{при } W_{it} > W_{i*} \text{ или при } m_i = 0 \\ \frac{F_i}{F} \left(1 - \frac{W_{it}}{W_{i*}} \right)^k, & \text{при } 0 \leq W_{it} \leq W_{i*} \end{cases} \quad (2)$$

Здесь W_{it} – влагосодержание на i -ом выделе максимального по массовой концентрации ЛГМ в момент времени t (выдел – участок леса из пород деревьев одного типа); W_{i*} – критическое влагосодержание на i -ом выделе максимального по массовой концентрации ЛГМ; m_i – масса ЛГМ на i -ом выделе; значение $P_i(C,t) = 0$ соответствует случаю, когда на i -ой 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.

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 аналитические решения, полученные на основе строгой физико-математической постановки задачи.

В связи с этим, для расчета текущего влагосодержания слоя ЛГМ за основу взяли упрощенную математическую модель низкотемпературной сушки, предложенную в диссертации Лободы Е.Л. [Лобода Е.Л., 2013]. Были сделаны следующие допущения: напочвенный покров всех выделов рассматриваемой территории можно разбить на пять основных проводников горения (ОПГ): опад хвои, мох, лишайник, опад листвы, травяная ветошь; для каждого типичного выдела температура и объемная доля воды в ОПГ описывается одной системой уравнений. Обозначив временный отрезок, на который дается прогноз, буквой n , приводя систему уравнений к безразмерному виду, осредняя по высоте слоя ЛГМ и ряда математических преобразований, получаем уравнения для определения объемной доли свободной и связанной воды и температуры слоя ЛГМ в функции от безразмерного времени τ на любой прогнозируемый промежуток времени:

$$\varphi_2 = \exp\left(c_n^{(2)}\tau\right)\left\{M_n - R_n\left[\exp\left(-c_n^{(2)}\tau\right) - 1\right] + D_n\left[\exp\left(\tau\left(s_n^{(1)} - c_n^{(2)}\right)\right) - 1\right] + Y_n\left[\exp\left(\tau\left(s_n^{(2)} - c_n^{(2)}\right)\right) - 1\right]\right\}, \quad (3)$$

$$\theta_s = (\theta_{sn} - k_n - h_n) \exp\left[s_n^{(1)}(\tau - \tau_n)\right] + h_n \exp\left[s_n^{(2)}(\tau - \tau_n)\right] + k_n. \quad (4)$$

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

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

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

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

$$\begin{aligned}
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), \quad f_2 = -\frac{\gamma_n \varphi_2}{\sqrt{1 + \beta_n \theta_s}} [\exp[\theta_s / (1 + \beta_n \theta_s)] - \pi_{en}], \quad \tau = t / t_*, \\
f_1 &= [(\varphi_{1H} + \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_{1H} - \varphi_2) [L_n - G_n (1 + \beta_n \theta_s)^4] - \\
&- \delta_n^2 \bar{\alpha}_{vn} \theta_s + A_n] / (1 + a \varphi_2), \quad \beta_n = RT_* / E, \quad L_n = \frac{k_1 \rho_1 \sqrt{T_*} \exp(E / RT_*)}{q_2 \rho_2 k_{02}^{\otimes}} [(1 - A) q_R(h) + J_w] \cos \alpha, \quad k_{02}^{\otimes} = k_{02} s, \\
\theta_s &= \frac{(T_s - T_*) E}{RT_*^2}, \quad \theta_e = \frac{(T_e - T_*) E}{RT_*^2}, \quad \theta_0 = \frac{(T_0 - T_*) E}{RT_*^2}, \quad a_n = \frac{\rho_2 C_{p2}}{\rho_1 \varphi_{1H} C_{p1}}, \quad \pi_{en} = \frac{P_{2e}}{P_{02}} \exp\left(\frac{E}{RT_*}\right), \\
\gamma_n &= \frac{\rho_1 \varphi_{1H} C_{p1} RT_*^2}{q_2 E \rho_2}, \quad \bar{\alpha}_{vn} = \frac{\alpha_v RT_*^2 \sqrt{T_*}}{q_2 E \rho_2 k_{02}^{\otimes}} \exp\left(\frac{E}{RT_*}\right), \quad \delta_n^2 = \frac{q_2 E \rho_2 k_{02}^{\otimes} h^2}{\lambda_1 \varphi_{1H} \sqrt{T_*} RT_*^2} \exp\left(-\frac{E}{RT_*}\right), \\
c_n &= \frac{E h [(1 - A) q_R(h) + J_w] \cos \alpha}{\lambda_1 \varphi_{1H} RT_*^2}, \quad d_n = \frac{\varepsilon_s \sigma T_*^2 h E}{\lambda_1 \varphi_{1H} R}, \quad b_n = \frac{E q_2 \rho_2 k_{02}^{\otimes} h}{\lambda_1 \varphi_{1H} RT_*^2 \sqrt{T_*}} \exp\left(-\frac{E}{RT_*}\right), \quad Bi_0 = \frac{\alpha_0 h}{\lambda_1 \varphi_{1H}}, \\
Bi_e &= \frac{\alpha_e h}{\lambda_1 \varphi_{1H}}, \quad G_n = \frac{k_1 \rho_1 \sqrt{T_*} \exp(E / RT_*) \varepsilon \sigma T_*^4}{q_2 \rho_2 k_{02}^{\otimes}}. \quad \text{В качестве размерных величин}
\end{aligned}$$

использовались следующие параметры: t_* - характерное время; t - время; T_s - температура конденсированной фазы; λ_s - 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; α_v - коэффициент объемного конвективного теплообмена; λ - коэффициент теплопроводности газовой фазы; ρ_r , C_{pr} - плотности и теплоемкости сухого органического вещества ($r=1$), и свободной и связанной с сухим органическим веществом воды ($r=2$); φ_1 - объемная доля сухого органического вещества; φ_2 - осредненная объемная доля свободной и связанной с сухим органическим веществом воды; E - энергия активации, характеризующая испарение связанной воды; R - универсальная газовая постоянная; Q_{Rw} и Q_{Rz} - плотности потока результирующего излучения, на границе раздела сред и потока излучения, проникающего в слой РГМ; Q_2 - теплота испарения единицы массы воды; A - альбеда слоя РГМ; $q_R(h)$ - плотность потока излучения от Солнца на верхней границе слоя РГМ; P_{2e} - парциальное давление паров воды, $P_{2*} = P_{02} \exp\left(-\frac{E}{RT_s}\right)$ -

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, h - высота напочвенного покрова; k_{02} - постоянная величина.

На основе найденного аналитического решения было 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. $\theta_s = \theta_e$. Тогда в качестве характерной температуры будем выбирать температуру воздуха в начале каждого n -го временного интервала. В результате на $n+1$ временном интервале уравнение (3) примет вид

$$\varphi_2 = \varphi_{2n} \exp \left[-\gamma_n (1 - \pi_{en}) (\tau - \tau_n) \right]. \quad (5)$$

В работе 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.

Для проверки предложенной детерминированно-вероятностной методики воспользовались базами метеорологических, экспедиционных данных, термокинетических постоянных для ОПГ, базой статистических данных о месте и времени пожаров в Тимирязевском лесхозе за 2000 – 2004 годы. Результаты расчетов вероятности возникновения лесных пожаров сравнивались с классами пожарной опасности (КПО), определяемыми по комплексному показателю В.Г. Нестерова, которые используются на практике (ГОСТ Р 22.1.09-99) и рассчитываются при тех же самых условиях. Для этого был 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 реального пожара, чем по методике Нестерова, в 41 % случаев равный КПО с методикой Нестерова и только в 3,5 % случаев ниже. Этот результат свидетельствует о том, что новая методика прогноза лесной пожарной опасности более точно указывает на день возникновения пожара.

Третья III посвящена созданию детерминированно-вероятностной системы прогноза торфяной пожарной опасности.

Согласно проведенному обзору 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 сигарет; непогашенные костры; преднамеренные поджоги и т.д. Несмотря на то, что самовозгорание и происходит в результате жизнедеятельности микроорганизмов, что является природной причиной, с другой стороны 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.

Исходя из этого, а также с учетом физической модели возникновения природных пожаров [Гришин, 2003], и теоремы умножения вероятностей получаем следующую модель для определения вероятности возникновения торфяных пожаров на i -ом выделе в момент времени t

$$P_i(t) = \sum_{n=1}^2 P_{in}(A_n, t) P_{in}(PF / A_n, t) P_i(C, t), \quad (6)$$

$$P_i(C, t) = \begin{cases} 0 & \text{при } W_{it} \geq W_{i*} \\ \frac{F_i}{F} (1 - W_{it} / W_{i*}), & \text{при } 0 < W_{it} < W_{i*} \end{cases} \quad (7)$$

Здесь $P_{in}(A_n, t)$ – вероятность появления конкретной n -ой 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 -ого типа в тот же момент времени t ; $P_i(C, t)$ – вероятность готовности воспламенения.

Для нахождения величин $P_{in}(A_n, t)$, $P_{in}(PF / A_n, t)$ воспользовались определением вероятности появления событий через соответствующие частоты:

$$P_{in}(A_n, t) \approx N_{A_{ni}} / N_{FSi}, \quad P_{in}(PF / A_n, t) \approx N_{FA_{ni}} / N_{FQi}, \quad n=1,2 \quad (8)$$

Здесь $N_{A_{ni}}$ – 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; $N_{FA_{ni}}$ – количество пожаров вследствие молний ($n=1$) или антропогенных причин ($n=2$) соответственно; N_{FSi} – общее число дней пожароопасных сезонов для i -го выдела за рассматриваемый период времени; N_{FQi} – общее количество пожаров для i -го выдела за рассматриваемый период времени.

Вероятность возникновения пожара вследствие самовозгорания будет рассчитываться только для тех выделов, которые находятся на территории торфяных разработок.

Таким образом, зная текущее значение влагосодержания W_{it} и статистическую информацию о выделе можно рассчитать вероятность возникновения торфяного пожара для прогнозируемого промежутка времени.

Для расчета текущего влагосодержания была предложена математическая модель низкотемпературной сушки слоя торфа.

Постановка задачи. Будем считать, что сушка слоя торфа происходит в результате воздействия внешней среды. 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. 1.

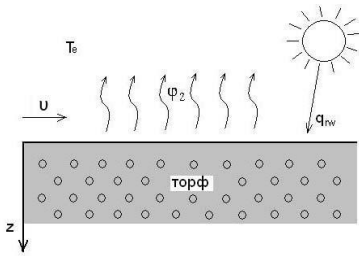


Рис. 1. Физическая модель сушки слоя торфа: v – скорость ветра, T_e – температура окружающей среды, φ_2 – объемная доля воды, q_{rw} – плотность потока результирующего излучения от Солнца

Математическая модель сушки слоя торфа является однотемпературной. Т.к. 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 .

Математически сформулированная выше задача с учетом сделанных допущений сводится к решению следующей системы уравнений:

$$\frac{\partial \rho_3 \varphi_3}{\partial t} + \frac{\partial \rho_3 \varphi_3 v}{\partial z} = Q, \quad (9)$$

$$v = -\frac{\xi}{\mu} \frac{\partial P}{\partial z}, \quad P = \frac{\rho_3 R T}{M_3}, \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^2 c_{pis} \rho_{is} \varphi_i \frac{\partial T}{\partial t} + c_{p3} \rho_3 \varphi_3 \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) - q_{2s} R_{2s}, \quad (11)$$

$$\varphi_1 = \varphi_{1in}, \quad \varphi_3 = 1 - \varphi_1 - \varphi_2, \quad (12)$$

$$\rho_{2s} \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = -R_{2s}, \quad (13)$$

$$Q = R_{2s}, \quad R_{2s} = \frac{\rho_{2s} \varphi_2 k_{2s} \exp(-E_{2s}/RT)(1-RH)}{\sqrt{T}}. \quad (14)$$

Для решения системы уравнений (9)-(14) используются следующие начальные и граничные условия:

$$T|_{t=0} = T_{in}, \quad \rho_3|_{t=0} = \rho_{3in}, \quad \varphi_i|_{t=0} = \varphi_{iin}, \quad i = 1, 2. \quad (15)$$

$$P|_{z=0} = P_e, \quad \frac{\partial P}{\partial z}|_{z=L} = 0, \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial z}|_{z=0} = \alpha_e (T_e - T_w) + \varphi_{sw} q_{rw} - q_{2s} R_{2s}, \quad T|_{z=L} = T_{in}, \quad (16)$$

$$q_{rw} = (1-A)q_R(h) \cos \alpha - \varepsilon_s \sigma T_w^4 + J_w \cos \alpha, \quad (17)$$

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; $\xi = \xi_* \varphi_3^3 / (1 - \varphi_3)^2$ – 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 $z=0$.

Численное решение данной системы уравнений осуществлялось итерационно-интерполяционным методом с постоянным по времени шагом. По результатам численных расчетов анализировалось изменение начальных объемных долей, давления и температуры для различных временных интервалов.

Параметрический анализ. В результате численного решения математической модели (9)-(14) с учетом реальных метеоусловий для временного промежутка в одну неделю были проведены тестовые расчеты и

получены зависимости температуры слоя торфа (рис. 2), давления и параметров состояния среды на верхней границе торфа, влагосодержания (рис. 3) от времени.

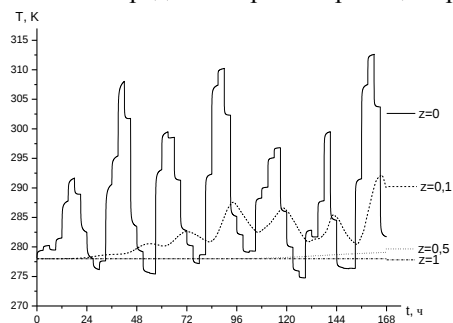


Рис. 2. Распределение температуры слоя торфа в различные моменты времени для различных значений глубины z

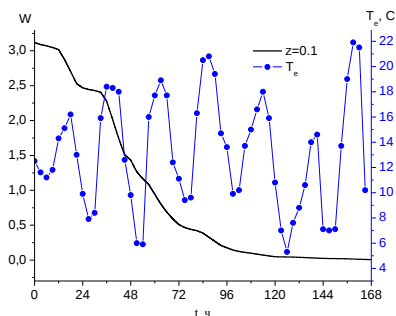


Рис. 3. Изменение температуры окружающей среды и влагосодержания слоя торфа в течение недели на глубине 0.1 м

Из рис. 2 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. При этом тепловая волна доходит до глубины 0.5 м только на 5 суток.

Анализ кривых на рис. 3 показывает, 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. Видно, что при отсутствии осадков и положительных температурах воздуха уже на пятые сутки верхний слой торфа толщиной 0.1 м высыхает до влагосодержания, меньше критического. В результате может иметь место воспламенения от любого источника зажигания.

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, то можно сделать вывод, что предложенная математическая постановка задачи (9)-(14) может быть использована для прогнозирования поведения влагосодержания и температуры в слое торфа для последующего прогноза пожарной опасности на торфяниках.

В работе 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.

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 2000-2003 года, а так же база теплофизических постоянных различных типов торфа.

Для проверки получаемых результатов сравнивались классы пожарной опасности, определяемые по комплексному показателю В.Г. Нестерова и по предложенной методике. На рис. 4 представлено сравнение изменения индекса Нестерова и вероятности пожарной опасности на временных интервалах от времени последнего выпадения осадков до момента возникновения пожара.

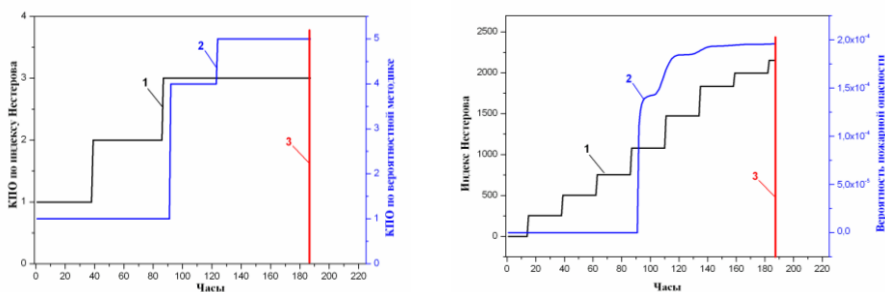


Рис. 4. Сравнение индекса Нестерова и значений вероятности возникновения торфяного пожара, а также КПО рассчитанных по обеим методикам на примере одного выдела Бакcharского лесничества: 1 -методика Нестерова, 2 – детерминировано-вероятностная методика, 3- обнаруженный пожар

Из анализа кривых на рис. 4 видно, что в некоторые дни пожароопасного 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. В эти дни текущее значение влагосодержания торфа было больше критического и вероятность возникновения пожара равнялась нулю. И соответственно был нулевой класс пожарной опасности.

Анализ полученных результатов показывает, что прогноз по детерминировано-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.

Четвертая глава посвящена кинетическим исследованиям процессов сушки и пиролиза растительных горючих материалов.

Используя формально-кинетический подход, скорость испарения воды из некоторого фиксированного элемента ЛГМ с массой m_1 и скорость образования продуктов пиролиза можно описать следующими математическими моделями:

$$\frac{dm_1}{dt} = - \frac{k_1 P_* (m_1 - m_{1\infty}) (1 - \varphi)}{\sqrt{T}}, \quad P_* = P_0 \exp\left(-\frac{L_1}{RT}\right) \quad (18)$$

$$m_1|_{t=t_{in}} = m_{1in}, \quad (19)$$

$$\frac{dm_2}{dt} = -(m_2 - m_{2\infty}) k_{20} \exp\left(-\frac{L_2}{RT}\right), \quad (20)$$

$$m_2|_{t=t_{in}} = m_{2in} = m_{1\infty}, \quad (21)$$

где m – масса; t – время; $\varphi = P/P_*$ – относительная влажность воздуха; P – парциальное давление пара во внешней среде; T – абсолютная температура; P_0 – постоянный множитель; $k_1 P_0$ – предэкспоненциальный множитель процесса сушки; k_{20} – предэкспоненциальный множитель процесса пиролиза; L_1 – теплота испарения воды; L_2 – энергия активации процесса пиролиза; индексы: in – начальный, dr – сухой, ∞ – равновесное состояние, 1 – испарение, 2 – пиролиз.

Апробация данного метода на модельной и реальной задачах была проведена в работе [Гришин А.М. и др., 2003], где показано, что данный метод является устойчивым, а погрешность определения термокинетических постоянных (ТКП) пропорциональна погрешности исходных экспериментальных данных.

Для исследования процесса сушки были взяты степные горючие материалы (СГМ), собранные в результате экспедиции с 5 по 7 мая 2010 г в районе г. Карасук Новосибирской области. Сушка СГМ проводилась в изотермических условиях при температурах 50, 80 и 100 °С с помощью анализатора влажности МХ-50 фирмы А&D. Анализатор влажности имел встроенные весы, что давало возможность автоматически с заданной точностью достигать абсолютно сухого состояния образцов. Начальная масса образцов составляла 1 г.

В результате исследования процесса сушки при температурах 50, 80 и 100 °С для каждого образца растительности были получены экспериментальные зависимости относительной массы от времени (рис. 5).

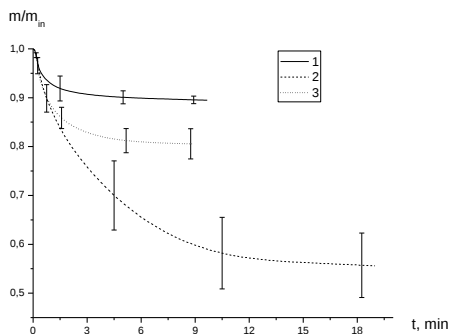


Рис. 5. Сравнение относительных масс трех различных образцов СГМ при температуре сушки 80 °С

Из рис. 5 видно, что для всех трех видов СГМ кривые сушки 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 следующие значения термокинетических постоянных процесса сушки (табл. 1):

Таблица 1. Термокинетические постоянные процесса сушки трех образцов СГМ

№ образца	L , Дж/моль	$k_1 P_0$, $K^{0.5} \cdot c^{-1}$
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. 1 видно, что термокинетические постоянные процесса сушки второго и третьего образца СГМ имеют близкие значения и существенно отличаются от первого образца. Это можно объяснить различием во внутреннем и внешнем строении образцов. Так образец 1 имеет относительно большой объем (размеры) и значительную листовую поверхность, что повышает интенсивность испарения. Образцы 2 и 3, наоборот, имеют ряд приспособлений, которые препятствуют испарению влаги и повышают теплоту испарения воды более чем в 3 раза, в отличие от образца 1.

Для оценки точности полученных значений термокинетических постоянных были решены прямые задачи химической кинетики с использованием математической модели (18) и (19) на основе полученных термокинетических постоянных L и $k_1 P_0$. Полученные расчетные зависимости относительной массы образцов от времени сравнивались с экспериментальными (рис. 6).

Из рис. 6 следует удовлетворительное согласование расчетных и экспериментальных зависимостей, что говорит о достоверности полученных термокинетических постоянных.

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 исследования процессов сушки и пиролиза торфа были взяты залежь верхового типа, собранная в районе г. Эдинбург (Шотландия) – образец 1 (рис. 7а), торфяная залежь верхового типа - образец 2 (рис. 7б) и торфяная залежь переходного типа - образец 3 (рис. 7с), собранные в районе Томской области.

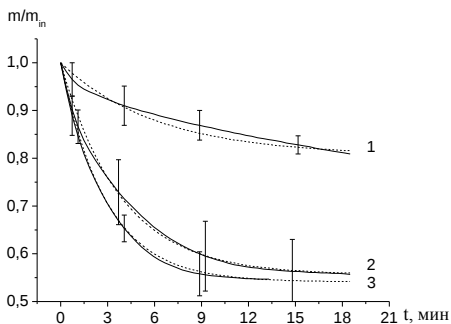


Рис. 6. Экспериментальные (сплошные) и расчетные (штриховые линии) зависимости убыли относительной массы образца 2 от времени, полученные при температурах сушки: 50 (1), 80 (2) и 100 (3) °C

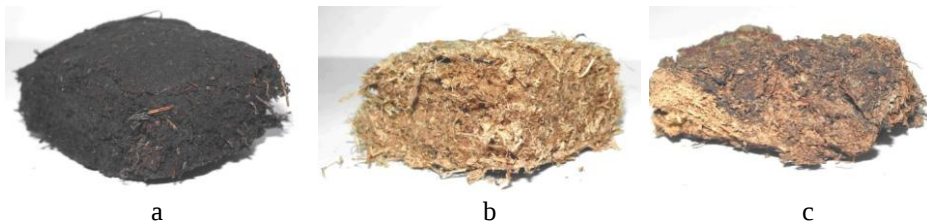


Рис. 7. Исследуемые образцы: а – образец 1, б – образец 2, с – образец 3

Для исследования влияния масштаба образцов, а также их свойств на кинетику процесса сушки и пиролиза были проведены эксперименты в динамических и изотермических условиях. Экспериментальные исследования процесса сушки торфа в изотермических условиях проводились при температурах 50, 80 и 100 °C, а пиролиза – при температурах 205 и 265 °C для макро масштаба (несколько г). Динамические эксперименты процесса сушки проводились в диапазоне 27-223 °C, а процесса пиролиза в диапазоне 223-627 °C для микро масштаба (несколько мг). Перед тем, как исследовать пиролиз, все образцы предварительно высушивались при температуре 100 °C до абсолютно сухого состояния с целью удаления свободной воды.

Динамические эксперименты были проведены на термогравиметрическом анализаторе Perkin-Elmer TGA Pyris 1 для микро масштаба со скоростями нагрева 10, 20 и 30 К/мин. 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. Масса образцов, используемых для исследования процесса сушки составляла 5 ± 0.02 г (сухой образец) для измерителя влажности и 5 ± 0.005 мг для термогравиметрического анализатора. Для пиролиза - 1 ± 0.02 г (сухой образец) для разработанной установки и 10 ± 0.005 мг для термогравиметрического анализатора.

В результате исследования процесса сушки образцов в изотермических и динамических условиях для каждого образца торфа были получены экспериментальные зависимости относительной массы образцов от времени (рис. 8).

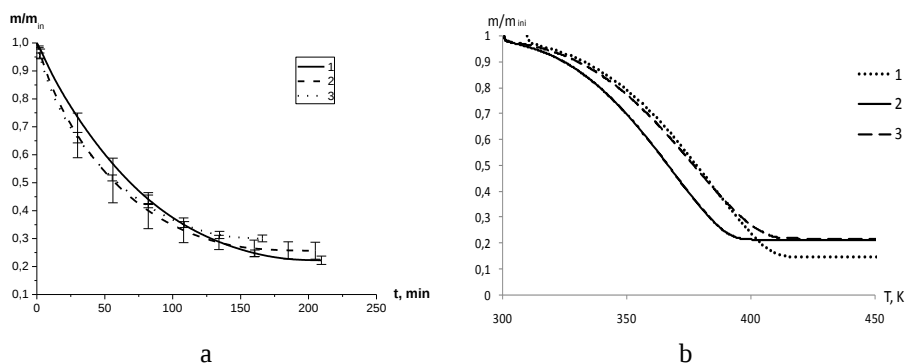


Рис. 8. Сравнение относительных масс трех различных образцов торфа: а - при температуре сушки 353 К, б - при скорости нагрева 10 К/мин

Анализ данных показал, что в температурном диапазоне от 300 до 550 К, вода испаряется с потерей массы около 80 %. Эти результаты согласуются с найденным влагосодержанием.

В результате обработки экспериментальных данных и расчета по модели (18)-(19) для изотермических условий и применения изоконверсионного метода Kissinger-Akahira-Sunose (KAS) [Kissinger H.E., 1957] для динамических условий были получены следующие значения ТКП процессов сушки (табл. 2):

Таблица 2. Термокинетические константы для процесса сушки трех торфяных образцов

№ образца	L (Дж/моль) ОКЗ	L (Дж/моль) KAS средние значения
1	36762	36120
2	36029	38010
3	42346	42260

Таблица 2 показывает, что средние значения, полученные методом KAS находятся в хорошем согласовании со значениями, полученными с помощью метода решения обратных кинетических задач (ОКЗ) для процесса сушки. Эти результаты подтверждают метод решения ОКЗ, несмотря на разные масштабы образцов и массы (несколько мг для ТГА и несколько г для метода решения ОКЗ).

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 338 и 363 К и динамических условиях при скоростях сушки 15 К/мин и 25 К/мин. Полученные экспериментальные зависимости относительной массы образцов от времени сравнивались с расчетными данными, полученными двумя методами (рис. 9).

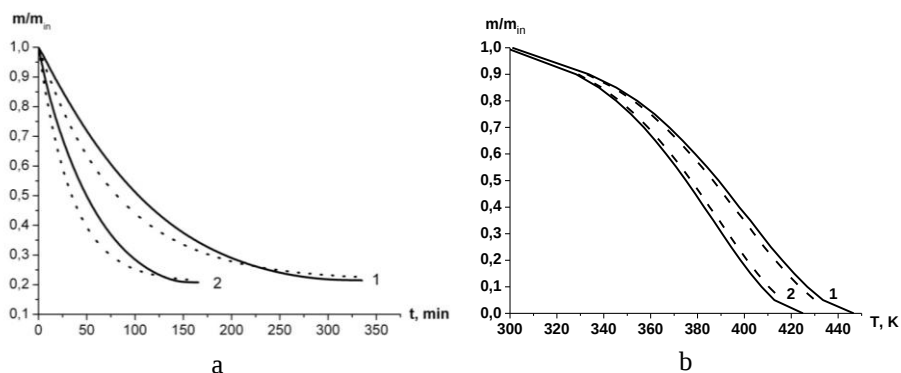


Рис. 9. Экспериментальные (сплошные) и расчетные (штриховые линии) зависимости убыли относительной массы образца 2 от времени: а - для изотермических условий (338 (1) и 363 К (2)) и б - для динамических условий (15 К/мин (1) и 25 К/мин (2))

Как видно из рис. 9, полученные расчеты показывают хорошее совпадение с экспериментальными данными, что свидетельствуют о точности найденных ТКП. Из удовлетворительной близости теоретических и экспериментальных кривых следует вывод о возможности использования полученных ТКП для моделирования процесса сушки 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 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 мг),

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.

В результате исследования процесса пиролиза торфа в изотермических условиях на термогравиметрическом анализаторе Perkin-Elmer TGA Pyris 1 (несколько мг) и специально разработанной установке (несколько г) для каждого образца торфа были получены экспериментальные зависимости относительной массы образцов от времени и температуры.

Анализ данных показал, что приблизительно половина убыли массы происходит в течение 5 минут для температуры стабилизации 478 К и 2 минут для 538 К. В этот промежуток происходит интенсивное выделение газов и продуктов пиролиза. Также обнаружено, что скорость пиролиза возрастает от первого образца к третьему. Здесь прослеживается обратная зависимость со степенью разложения, чем меньше степень разложения, тем быстрее скорость пиролиза. При этом не все вещество в образцах прореагировало. Так при температуре 478 К остаточная масса составила около 15 %, а при температуре 538 К – 10 %.

Термокинетические параметры для изотермических условий определяли используя формально-кинетический подход на основе модели (20)-(21). В результате обработки экспериментальных данных были получены значения ТКП процесса пиролиза. Анализ ТКП показал, что отличие энергий активации для образцов с разными масштабами хоть и небольшое, но присутствует. При этом максимальная относительная погрешность энергий активации не превышает 11 %.

Исследование процесса пиролиза различных видов торфа показало, что масштаб образца торфа влияет на кинетику пиролиза, в частности для больших образцов замедляет их прогрев и соответственно приводит к увеличению энергии активации. Имеющиеся отличия в значениях ТКП процесса пиролиза подтверждают сделанный ранее вывод о существовании влияния на ТКП типа торфа. Показано, что для неизотермических данных, расчетная энергия активации сильно зависит от кинетической модели, к которой подгоняются данные, что согласуется с результатами других авторов [Deliang Zhou и др., 2004].

Глава V посвящена исследованию свойств природных горючих материалов и особенностям их горения.

В работе изучено влияние плотности и неоднородности напочвенного покрова на скорость распространения низового лесного пожара. Экспериментальные исследования проводились на комплексе для физического моделирования низовых лесных и степных пожаров. Толщина слоя ЛГМ менялась в зависимости от условий эксперимента и не превышала 0,015 м. В качестве образцов ЛГМ брали хвою сосны, кедра, опад листвы березы и тополя. В опытах слой ЛГМ представлял собой совокупность хвоинок или листвы, равномерно разложенных на поверхности слоя почвы, которые моделируют

реальную подстилающую поверхность в лесу: высота слоя $h=0,01-0,015$ м, запас слоя $m_3=\rho_{\text{сл}}h=0,2-0,6$ кг/м², влагосодержание слоя $W=4-11$ %. В качестве источника зажигания использовался эталонный источник (ЭИ) зажигания, выполненный в виде спирали плотной намотки, которую изготавливали из нихромовой проволоки диаметром 0,5 мм. 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.

В результате проведенных экспериментов, для однородных составов с плотностями 15, 30, 40, 49 и 60 кг/м³, были получены следующие данные. 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. При плотности слоя из хвои сосны 60 кг/м³, скорость распространения падает. Согласно [Конев Э.В., 1977], 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 можно сказать, что наибольшая скорость распространения фронта пламени наблюдается по слою состоящему из хвои кедра. При плотностях до 40 кг/м³ скорость распространения для всех ЛГМ носит квазилинейный характер.

Из анализа данных, полученных для смесей из хвои сосны, кедра, листвы березы и тополя с различным процентным соотношением, высотой слоя 0,01 м и плотностью 30 кг/м³, следует, что увеличение в слое опада листвы приводит к уменьшению скорости распространения фронта пожара, а при доведении ее до 90 %, слой ЛГМ погасал независимо от сорта хвои и влагосодержания. 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 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 если хвои менее 50 % от общего состава слоя, то пламя распространяется медленно и в конечном итоге затухает.

Для исследования влияния плотности светового потока на время зажигания различных образцов древесины в качестве источника потока лучистой энергии использовалась оптическая печь «Уран - 1». 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 дублировали 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. Плотность теплового потока изменяли в пределах 360-1520 кВт/м². В качестве исследуемых образцов использовалась древесина сосны, березы, кедра, лиственницы и осины. Образцы представляли собой цилиндры диаметром $1,6 \cdot 10^{-2}$ м и высотой $1 \cdot 10^{-2}$ м. Для исследования влияния начальной температуры образца на время воспламенения высушенные сосновые образцы предварительно нагревали в сушильном шкафу около 1 часа при температуре 373 К.

Анализ результатов показал, что при увеличении плотности потока излучения, время задержки зажигания опытных образцов уменьшается. Время воспламенения древесины увеличивается по следующему ряду: кедр, лиственница, осина, сосна, береза.

На рис. 10 представлены графические результаты сравнения времени воспламенения образца древесины сосны с различными начальной влажностью и температурой.

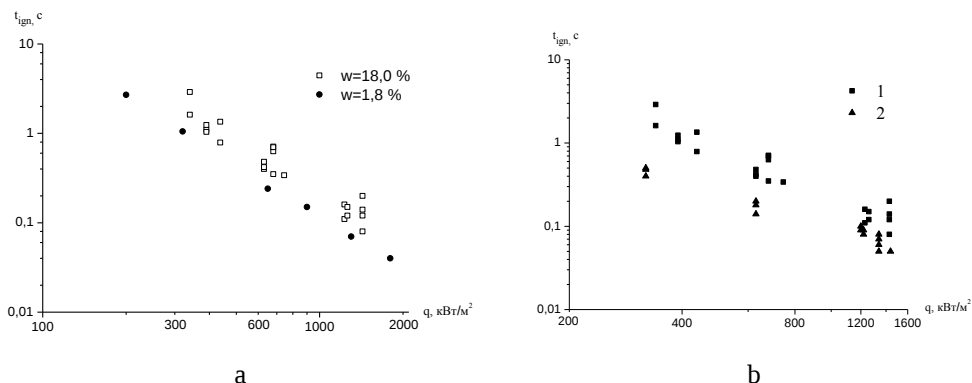


Рис. 10. Зависимость времени воспламенения от плотности потока лучистой энергии для образца сосны при различных: а - влажностях w ; б - начальных температурах 1 – $T_{in} = 297$ К и 2 – 373 К

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 % (рис. 10а). Согласно данным на рис. 10б видно, что 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 К 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.

В таблице 3 приведены температуры поверхности воспламенения образцов сосны и березы с влажностью $\approx 1,5$ % при различных плотностях потока лучистой энергии.

Таблица 3. Температуры поверхности образцов сосны и березы в момент воспламенения потоком лучистой энергии

q, кВт/м ²	T _{ign} , К	
	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 кВт/м² до 1420 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 [Fangrat J. И др., 1996], где отмечено, что температура

поверхности воспламенения мягких пород древесины на 50 градусов выше, чем твердых. Объясняется это различным строением древесины.

В результате сравнения температур поверхности образцов древесины сосны и березы в момент воспламенения с данными работы [Заболотный А.Е. и др., 1995] при различных плотностях потока лучистой энергии, установлено, что результаты не противоречат численным значениям, полученным авторами в рамках тепловой модели.

Для исследования природных пожаров была проведена серия натурных экспериментов. Первая часть экспериментов 2008, 2009 и 2011 гг. по исследованию полевых пожаров проводилась на территории Базового экспериментального комплекса (БЭК) ИОА СО РАН, г. Томск. 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.

Для определения вероятности зажигания площадок от различных источников (горящая спичка, тлеющие угли, горящие частицы) был проведен ряд экспериментов. Было установлено, что 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. Увеличение его на 37 % (до 0,254 г/м²) 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 [Kim D.H. и др, 2010].

Возникновение степного пожара от тлеющих углей массой до 3,5 г и максимальной энергией 118,6 кДж маловероятно. Можно предположить, что причиной этому является малая плотность растительного покрова и тлеющий уголек не соприкасается с достаточным количеством элементов СГМ.

Дополнительно были проведены эксперименты с использованием имитатора «огненного дождя» (совокупности горящих частиц), 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 было 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.

Для более детального изучения характеристик образования горящих частиц был проведен натурный эксперимент. Данный эксперимент представлял собой интенсивный пожар в результате преднамеренного отжига на сосновом участке леса в штате Нью-Джерси, США в марте 2013 года.

Для сбора частиц использовали следующую методику. На трех площадках расставляли по 20 алюминиевых поддонов. Площадь поддонов составила 1,4 м². В поддоны наливали воду для тушения горящих частиц, попавших в них. Только на площадке 2 поддоны были накрыты тонкой пластиковой пленкой. Предварительные лабораторные эксперименты показали, что пленка позволяет определить местоположение и ориентировочные размеры упавшей частицы, а также понять в каком энергетическом состоянии находилась частица в момент падения.

Собранные частицы высушивались в печи при температуре 80°С 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. На рис. 11 приведены частицы собранные в результате эксперимента.

Следует отметить, что большинство частиц составляли чешуйки коры (70-89 % для площадок 1-3 соответственно), остальные это веточки сосны и кустарника. Наибольшее количество 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 $(0-20) \times 10^{-5} \text{ м}^2$.

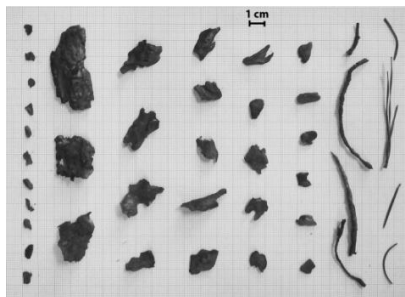


Рис. 11. Образцы горящих частиц

Было обнаружено, что имеются схожие результаты для Площадки 1 (без пленки) и Площадки 2 (с пленкой). Площадка 1 была около границы участка 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 содержала примерно в 6 раз больше частиц, чем Площадка 1 и 2. Если разделить количество частиц на Площадке 3 на шесть, то получим следующие результаты (рис. 12 и 13):

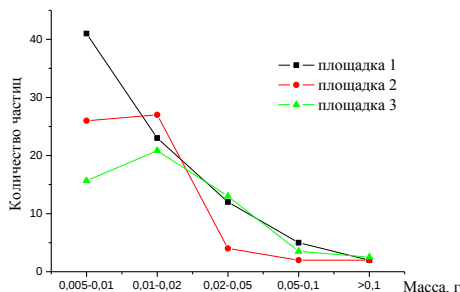


Рис. 12. Распределение частиц по массе

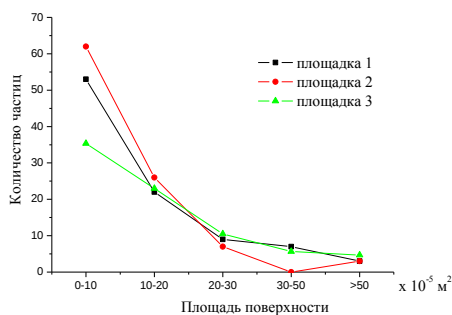


Рис. 13. Распределение частиц по площади поверхности

Из рис. 12 и 13 видно, что наблюдается один и тот же тренд для частиц больше 10^{-4} м^2 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.

В главе VI представлен программный комплекс для визуализации результатов прогноза возникновения и распространения природных пожаров в геоинформационной системе на примере Бакчарского района и Жуковского лесничества Томской области. Показан состав и структура геоинформационного обеспечения программного комплекса прогноза лесной пожарной опасности и приводится описание создания крупномасштабных векторных карт для прогноза возникновения и распространения пожаров.

Комплекс выполнен на базе геоинформационной системы ArcView и 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. 14.

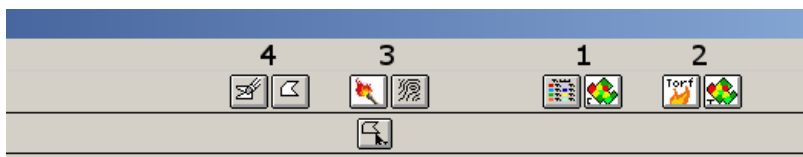


Рис. 14. Основные инструменты управления вводом данных, прогнозом и способами представления результатов

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 так же для восстановления результата последнего прогноза.

Прогноз лесной и степной пожарной опасности. В качестве топографической основы в пакете прикладных программ используется карта Томской области. Для представления результатов численного моделирования использовали электронную карту Жуковского лесничества Тимирязевского лесхоза Томской области, которая позволяет получать детальную информацию о лесорастительных условиях территории. На первом шаге оператор включает соответствующий инструмент и в открывшемся диалоговом окне вводит метеоданные: текущую температуру воздуха и почвы, относительную влажность воздуха, скорость ветра, количество выпавших осадков и суммарную солнечную радиацию. Затем ArcView обращается к программе для расчета вероятности возникновения пожара по разработанной методике и представляет результата прогноза в виде цветовой шкалы (рис. 15).

Каждый выдел имеет свою цветовую заливку, цвет которой соответствует значению вероятности возникновения пожара. Цвет заливки меняется от зеленого к красному, соответствующему максимальной вероятности 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.

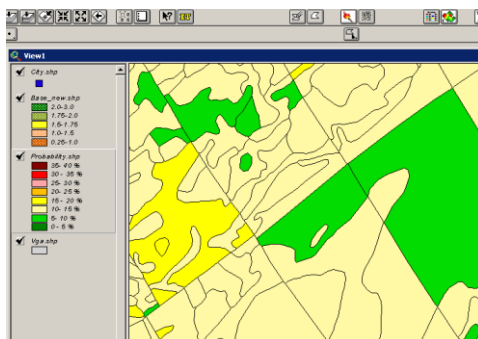


Рис. 15. Результат прогноза лесной пожарной опасности

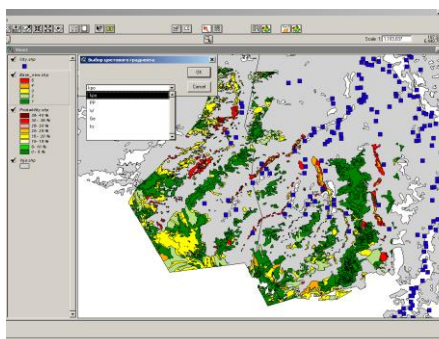


Рис. 16. Результат прогноза лесной пожарной опасности

Прогноз торфяной пожарной опасности. В качестве топографической основы использовались карта торфяников Бакчарского района и карта населенных пунктов Томской области. При выборе темы торфяников Бакчарского района становится активной панель инструментов для работы с данной темой. После выбора нужного инструмента активизируется панель ввода данных. Пользователю необходимо ввести значения температуры воздуха, атмосферного давления, атмосферной влажности, облачности и время прогноза.

После ввода метеоданных автоматически запускается вычислительный модуль, определяющий текущее влагосодержание слоя торфа для каждого выдела. При этом вызывается ряд подпрограмм, вычисляющих зависимые от метеоданных характеристики среды, такие как точка росы, зенитный угол, склонение, суммарное солнечное излучение с учетом облачности. Визуализация результатов моделирования вызывается автоматически после завершения работы вычислительного модуля. При этом тема, содержащая карту торфяников, автоматически становится активной.

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 критерия (рис. 16).

Прогноз распространения пожара относительно начального контура. В качестве расчетной модели была использована упрощенная математическая модель и методика расчета выбросов от низовых лесных пожаров, предложенная Коневым Э.В. [Конев Э.В., 1977]. Данная модель является полуэмпирической и ее использование обусловлено простотой и точностью прогноза. При использовании данного инструмента в системе прогноза пользователем сначала выбирается начальный контур, с которого будет моделироваться распространения 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. 17).

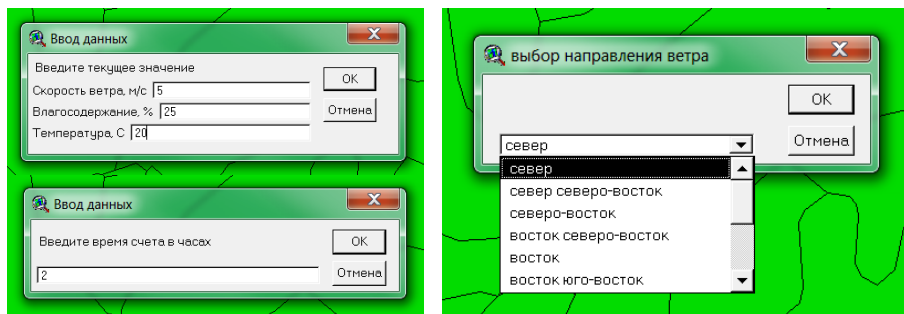


Рис.17. Панели ввода начальных параметров для моделирования распространения контура пожара

После ввода начальных параметров начинается моделирование распространения пожара из начального контура. При этом, характеристики точек контура обновляются с ходом распространения. На рис. 18 представлен пример распространения контура пожара.

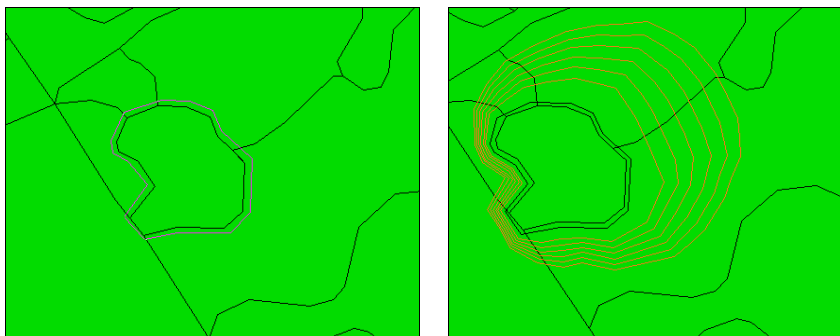


Рис. 18. Развитие контура низового лесного пожара

На основании полученных расчетов оператор имеет возможность принять необходимые решения при возникновении чрезвычайной ситуации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИИ

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. 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 годах.

4. Разработана физически обоснованная детерминировано-вероятностная система прогноза пожаров на торфяниках, учитывающая все известные причины, вызывающие возникновение торфяных пожаров, а также метеорологическую информацию и характеристики почвенного покрова.

5. 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, а время прогноза - одну неделю.

6. Проведена ретроспективная проверка методики прогноза торфяной пожарной опасности с использованием реальных метеорологических данных, статистических данных о месте и времени возникновения торфяных пожаров, базы теплофизических постоянных типов торфа за период с 2000 по 2003 гг. на примере Бакcharского района Томской области. Полученный результат свидетельствует о том, что новая методика прогноза торфяной пожарной опасности более точно указывает на день возникновения пожара.

7. Показано, что внутреннее и внешнее строение рассмотренных СГМ является доминирующим параметром, влияющим на процессы испарения.

8. На примере исследования 3 основных типов торфа показано, что ни масштаб, ни тип торфа не оказывают сильного влияния на кинетику процесса сушки.

9. Установлено, что 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.

10. 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, 80 % - площадь поверхности в диапазоне $(0-20) \times 10^{-5} \text{ м}^2$. Количество частиц уменьшалось с увеличением их площади поверхности.

11. Создан геоинформационный программный комплекс прогноза возникновения и распространения природных пожаров на примере двух районов Томской области.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве образования и науки Российской Федерации для опубликования основных научных результатов диссертаций:

1. Гришин А.М., **Фильков А.И.** О геоинформационной системе прогноза лесной пожарной опасности // Экологические системы и приборы. – 2004. – № 8. – С. 26-28. – 0,35 / 0,20 п.л.

2. Гришин А.М., **Фильков А.И.** Ретроспективный анализ системы прогноза лесной пожарной опасности // Экологические системы и приборы. – 2005. – № 8. – С. 23-25. – 0,46 / 0,30 п.л.

3. Гришин А.М., Кузин А.Я., **Фильков А.И.** Определение термокинетических постоянных процессов сушки и пиролиза растительных горючих материалов и торфа // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2009. – № 2/2. – С. 107-112. – 0,32 / 0,20 п.л.

4. **Фильков А.И.** Создание крупномасштабных векторных карт для прогноза пожарной опасности // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2009. – № 2/2. – С. 156-160. – 0,18 п.л.

5. **Фильков А.И.**, Горина И.А., Сладкова Т.Е. О влиянии плотности и неоднородности напочвенного покрова на скорость распространения низового лесного пожара // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2009. – № 2/2. – С. 160-165. – 0,35 / 0,20 п.л.

6. Гришин А.М., Зима В.П., Кузнецов В.Т., Лобода Е.Л., **Фильков А.И.** Комплекс установок для исследования природных пожаров // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2009. – № 2/2. – С. 84-90. – 0,37 / 0,10 п.л.

7. Гришин А.М., **Фильков А.И.**, Лобода Е.Л., Кузнецов В.Т., Рейно В.В., Руди Ю.А. Физическое моделирование полевых и степных пожаров в натуральных условиях // Пожарная безопасность. – 2010. – № 2. – С. 100-105. – 0,37 / 0,20 п.л.

8. Гришин А.М., **Фильков А.И.**, Лобода Е.Л., Рейно В.В., Руди Ю.А., Кузнецов В.Т., Караваев В.В. Экспериментальные исследования возникновения и распространения степного пожара в натуральных условиях // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2011. – № 2(14). – С. 91-102. – 0,69 / 0,30 п.л.

9. Grishin A.M., **Filkov A.I.** A Deterministic-probabilistic System for Predicting Forest Fire Hazard // Fire Safety Journal. – 2011. – № 46. – Pp. 56-62. – 0,82 / 0,60 п.л.

10. **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. – 0,54 / 0,30 п.л.

11. Кузнецов В.Т., **Фильков А.И.** Воспламенение различных видов древесины потоком лучистой энергии // Физика горения и взрыва. – 2011. – Т. 47. – № 1. – С. 74-79. – 0,45 / 0,30 п.л.

12. **Фильков А.И.**, Гладкий Д.А. Математическое моделирование низкотемпературной сушки слоя торфа // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2012. – № 3(19). – С. 93-106. – 0,71 / 0,40 п.л.

13. Cancellieri D., Leroy-Cancellieri V., Leoni E., Simeoni A., Kuzin A.Ya., **Filkov A.I.**, Rein G. Kinetic Investigation on the Smouldering Combustion of Boreal Peat // Fuel. – 2012. – Vol.93. – Pp. 479-485. – 0,79 / 0,20 п.л.

14. **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. – Vol. 26. – № 1. – Pp. 349-356. – 0,63 / 0,4 п.л.

15. **Фильков А.И.** Определение термокинетических постоянных процесса сушки степных горючих материалов // Теплофизика и аэромеханика. – 2012. – Т. 19. – № 6. – С. 731-738. – 0,45 п.л.

16. Гришин А.М., **Фильков А.И.**, Лобода Е.Л., Рейно В.В., Кузнецов В.Т. и др. Натурные экспериментальные исследования воздействия полевого пожара на деревянные ограждения и слой торфа // Пожарная безопасность. – 2013. – № 3. – С. 52-58. – 0,57 / 0,20 п.л.

17. **Фильков А.И.** О создании системы торфяной пожарной опасности // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2013. – № 1. – С. 18-24. – 0,53 п.л.

18. Grishin A.M., **Filkov A.I.**, Loboda E.L., Reyno V.V., Kozlov A.V., Kuznetsov V.T., Kasymov D.P., Andreyuk S.M., Ivanov A.I., Stolyarchuk N.D. A Field Experiment on Grass Fire Effects on Wooden Constructions and Peat Layer Ignition // International Journal of Wildland Fire. – 2014. – Vol. 23(3). – P. 445-449. – 0,64 / 0,30 п.л.

Монографии:

19. Гришин А.М., **Фильков А.И.** Прогноз возникновения и распространения лесных пожаров. – Кемерово: Изд-во Практика, 2005. – 197 с. – 11,94 / 8,10 п.л.

20. Гришин А.М., Голованов А.Н., Лобода Е.Л., **Фильков А.И.**, Якимов А.С. Физическое и математическое моделирование возникновения и распространения торфяных пожаров. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2012. – 124 с. – 7,52 / 1,20 п.л.

Статьи в других научных изданиях:

21. 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. – 0,36 / 0,20 п.л.

22. Гришин А.М., **Фильков А.И.** Об одной модели прогноза лесной пожарной опасности // Инженерно-физический журнал. – 2003. – Т. 76. – № 5. – С. 154-158. – 0,30 / 0,20 п.л.

23. **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. – 0,36 п.л.

24. Гришин А.М., **Фильков А.И.** Геоинформационная система прогноза лесной пожарной опасности // Природные пожары: возникновение, распространение, тушение и экологические последствия. Материалы 5-й международной конференции. – Томск: Изд-во Томского университета, 2004. – С. 175-185. – 0,67 / 0,40 п.л.

25. **Фильков А.И.** Анализ детерминированно-вероятностной модели прогноза лесной пожарной опасности и ее проверка на достоверность // Физика и химия наноматериалов: сборник материалов международной школы-конференции молодых ученых (13–16 декабря 2005 г., Томск). – Томск: Томский государственный университет, 2005. – С. 469-474. – 0,30 п.л.

26. **Фильков А.И.** Использование аналитических решений для прогноза лесной пожарной опасности и ее проверка в ретроспективе // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2006. – № 3. Приложение. – С. 266-267. – 0,12 п.л.

27. **Фильков А.И.**, Гришин А.М. Детерминированно-вероятностная модель и ее применение для прогноза лесной пожарной опасности // Международная конференция «ПКИ 2006», Баку, Азербайджан. – Баку: Издательский дом «Информационные технологии», 2006. – С. 71-74. – 0,24 / 0,15 п.л.

28. **Фильков А.И.** Упрощенная математическая модель низкотемпературной сушки слоя растительных горючих материалов // Физика и химия высокоэнергетических систем: Сборник материалов II Всероссийской конференции молодых ученых. – Томск: Томский государственный университет, 2006. – С. 315-320. – 0,30 п.л.

29. **Фильков А.И.**, Руди Ю.А. База данных для экспертной системы прогноза лесной пожарной опасности // Сборник материалов III Всероссийской конференции молодых ученых. – Томск, 2007. – С. 225-228. – 0,24 / 0,12 п.л.

30. Гришин А.М., **Фильков А.И.**, Борисова Ю.Ю. Детерминированно-вероятностные модели прогноза природной пожарной опасности // Пожары в лесных экосистемах Сибири: материалы Всероссийской конференции с международным участием. – Красноярск: Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, 2008. – С.48-50. – 0,18 / 0,10 п.л.

31. **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. – 0,18 / 0,10 п.л.

32. Гришин А.М., **Фильков А.И.**, Кузнецов В.Т., Лобода Е.Л., Рейно В.В. Физическое моделирование полевых и степных пожаров в натурных условиях // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: материалы XVI Международного объединенного симпозиума. – Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2009. – С. 249-252. – 0,24 / 0,10 п.л.

33. Кузнецов В.Т., **Фильков А.И.** Зажигание различных видов древесины световым потоком // Сборник материалов Международной школы-конференции молодых ученых (12–16 октября 2009 г., г. Томск). – Томск: Томский государственный университет, 2009. – С. 252-257. – 0,36 / 0,20 п.л.

34. Гришин А.М., Зима В.П., Кузнецов В.Т., **Фильков А.И.** Испытательный комплекс для моделирования лесных, степных и торфяных пожаров // Патент Российской Федерации № 2371220 С1. 2009. Бюл. № 30.

35. Гришин А.М., Кузин А.Я., **Фильков А.И.** Определение кинетических характеристик процесса сушки лесных и степных горючих материалов. РОСПАТЕНТ. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №200961120 от 19.02.2009.

36. **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 Всероссийской конференции молодых ученых (14–17 апреля 2010 г., г. Томск). – Томск: ТМЛ-Пресс, 2010. – С. 181-184. – 0,24 / 0,15 п.л.

37. **Фильков А.И.**, Майоров И.Н. Уточнение детерминировано-вероятностной методики прогноза лесной пожарной опасности // Физика и химия высокоэнергетических систем: сборник материалов VI Всероссийской конференции молодых ученых (14–17 апреля 2010 г., г. Томск). – Томск: ТМЛ-Пресс, 2010. – С. 175-177. – 0,18 / 0,10 п.л.

38. 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 Всероссийской молодежной научной конференции Томского государственного университета (13–15 октября 2010 г.). – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2010. – С. 39-44. – 0,36 / 0,20 п.л.

39. **Фильков А.И.** Термокинетические постоянные процесса сушки степных горючих материалов // Современные проблемы математики и механики: материалы Всероссийской молодежной научной конференции Томского государственного университета (13–15 октября 2010 г.). – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2010. – С. 227-232. – 0,36 п.л.

40. **Filkov A.I.**, Gladkiy D.A. Updating of Deterministic-probabilistic Technique for Predicting Forest Fire Hazard: Fire Prevention and Management [Электронный ресурс] // VI International Conference on Forest Fire Research: Conference Proceedings, November, 15–18, 2010. – Coimbra, Portugal, ADAI/CEIF, 2010. – 1 электр. опт. диск CD-ROM. – 0,21 / 0,15 п.л.

41. Cancellieri D., Leroy-Cancellieri V., Leoni E., Simeoni A., Kuzin A.Ya., **Filkov A.I.**, Rein G. Kinetic Study of Thermal Degradation of Peats by TGA: Fire Behaviour [Электронный ресурс] // VI International Conference on Forest Fire Research: Conference Proceedings, November, 15–18, 2010. – Coimbra, Portugal, ADAI/CEIF, 2010. – 1 электр. опт. диск CD-ROM. – 0,59 / 0,20 п.л.

42. Kuznetsov V.T., **Filkov A.I.** Ignition of Various Wood by a Radiant Energy Flux: Fire Behaviour [Электронный ресурс] // VI International Conference on Forest Fire Research: Conference Proceedings, November, 15–18, 2010. – Coimbra, Portugal, ADAI/CEIF, 2010. – 1 электр. опт. диск CD-ROM. – 0,52 / 0,30 п.л.

43. Kuzin A.Ya., **Filkov A.I.**, Leroy V., Cancellieri D., Leoni E., Simeoni A., Rein G. Determination of Drying and Pyrolysis Kinetics for Various Kinds of Peat: Fire Behaviour [Электронный ресурс] // VI International Conference on Forest Fire Research: Conference Proceedings, November, 15–18, 2010. – Coimbra, Portugal, ADAI/CEIF, 2010. – 1 электр. опт. диск CD-ROM. – 0,53 / 0,35 п.л.

44. Гришин А.М., **Фильков А.И.**, Лобода Е.Л., Рейно В.В., Руди Ю.А., Кузнецов В.Т., Караваев В.В. Экспериментальные исследования возникновения и распространения степного пожара в природных условиях // Современные проблемы математики и механики: материалы Всероссийской молодежной научной конференции Томского государственного университета (13–15 октября 2010 г.). – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2010. – С. 55-59. – 0,30 / 0,15 п.л.

45. Гришин А.М., **Фильков А.И.**, Лобода Е.Л., Рейно В.В., Козлов А.В., Кузнецов В.Т., Андреюк С.М., Иванов А.И., Столярчук Н.Д. Среднемасштабные экспериментальные исследования распространения полевого пожара и его воздействие на деревянные конструкции и слой торфа // Проблемы мониторинга окружающей среды: Сборник трудов XI Всероссийской конференции с участием иностранных ученых (24-28 октября 2011 г.). – Кемерово: КемГУ, 2011. – С. 38-43. – 0,36 / 0,15 п.л.

46. **Filkov A.I.**, Grishin A.M., Gladky D.A. Mathematical research into moisture evaporation in a peat layer [Электронный ресурс] // MCS 7: материалы конференции, 11-15 сентября 2011. – Sardinia, Italy, 2011. – 1 электр. опт. диск CD-ROM. – 0,19 / 0,10 п.л.

47. Гришин А.М., **Фильков А.И.**, Лобода Е.Л., Рейно В.В., Козлов А.В., Кузнецов В.Т., Андреюк С.М., Иванов А.И., Столярчук Н.Д., Руди Ю.А. Исследование горения полевой растительности в природных условиях и оценка компонентного состава продуктов пиролиза и горения [Электронный ресурс] // XVII Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы»: сборник трудов. – Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2011. – С. 292-295. – 1 электр. опт. диск CD-ROM. – 0,25 / 0,10 п.л.

48. Гладкий Д.А., Гришин А.М., **Фильков А.И.** Математическое моделирование низкотемпературной сушки слоя торфа // Современные проблемы математики и механики: материалы II Всероссийской молодежной научной конференции / Под ред. А.И. Филькова. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2011. – С. 45-54. – 0,61 / 0,40 п.л.

49. **Фильков А.И.**, Гришин А.М., Гладкий Д.А. О математическом моделировании испарения свободной и связанной воды в слое торфа [Электронный ресурс] // Фундаментальные и прикладные вопросы механики и процессов управления. Всероссийская научная конференция, посвященная 75-летию со дня рождения акад. В.П. Мясникова. – Владивосток: ИАПУ ДВО РАН, 2011. – С. 391-394. – 1 электр. опт. диск CD-ROM. – 0,24 / 0,15 п.л.

50. 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: Изд-во Том. ун-та, 2012. – С. 199-203. – 0,30 / 0,25 п.л.

51. **Фильков А.И.**, Кузнецов В.Т., Новиков Д.В., Шарыпов О.В., Лерой В., Кансильери Д., Леони Э., Симеони А., Рейн Г. Кинетические исследования процесса пиролиза торфа [Электронный ресурс] // Горение твердого топлива: Доклады VIII Всерос. конф. с междунар. участием, Новосибирск, 13-16 ноября 2012 г. – Новосибирск: Изд-во Института теплофизики СО РАН, 2012. – С. 99.1-99.8. – 1 электр. опт. диск CD-ROM. – 0,49 / 0,30 п.л.

52. **Фильков А.И.**, Гладкий Д.А. О математическом моделировании испарения влаги в слое торфа // Современные проблемы математики и механики: Материалы III Всероссийской молодежной научной конференции / Под. ред. А.И. Филькова. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2012. – С. 231-235. – 0,30 / 0,15 п.л.

53. Mueller E., **Filkov A.**, Butler B., Hom J., Houssami M., Thomas J., Skowronski N., Simeoni A., Kremens R., Clark K., Gallagher M., Mell W. Fuel Treatment Effectiveness in Reducing Wildfire Intensity and Spread Rate – An Experimental Review [Электронный ресурс] // 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. – Pp. 360-362. – 1 электр. опт. диск CD-ROM. – 0,18 / 0,1 п.л.