На правах рукописи

Барановский Николай Викторович

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАИБОЛЕЕ ВЕРОЯТНЫХ СЦЕНАРИЕВ И УСЛОВИЙ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

01.04.17 – Химическая физика, в том числе физика горения и взрыва

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2007

Диссертация выполнена в Томском государственном университете.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор Кузнецов Гений Владимирович

Официальные оппоненты: Архипов Владимир Афанасьевич
доктор физико-математических наук, профессор

Цепелев Владимир Папилович
доктор физико-математических наук, профессор

Ведущая организация: Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН (г. Бийск)

Защита состоится 28 мая 2007 года в 10:00 часов на заседании диссертационного совета ДС 212.024.01 при Томском государственном университете по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, ауд. 141 корпуса НИИ ПММ ТГУ.

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

Автореферат разослан 26 апреля 2007 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д.ф.-м.н., снс Ищенко А.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Лесные пожары играют важную роль в формировании и поддержке лесных биогеоценозов. Известно как положительное, так и отрицательное влияние лесных пожаров на них. Очень важно уметь предвидеть их возникновение. Наибольшее значение имеет прогноз низовых пожаров, поскольку более 80 % всех пожаров растительности – низовые, практически все верховые пожары развиваются из низовых.

Потепление климата вызовет также увеличение лесной пожарной опасности. По результатам прогноза на 2030 год с использованием глобальных климатических моделей и аппарата нейровычислений, показано, что зональная принадлежность многих сибирских метеостанций изменится. Установлено, что наиболее значительные изменения уже сейчас происходят в Западно-Сибирском регионе, что не может в дальнейшем не сказаться на увеличении лесной пожарной опасности. При климатических изменениях возникают экстремальные отклонения в сезонных колебаниях погоды, что может быть причиной крупномасштабных лесных пожаров, которые создают непосредственную угрозу населенным пунктам и наносят им ущерб.

В настоящее время остро встает проблема наиболее рационального использования тех средств, которые выделяются на охрану лесов от пожаров. Важную роль играет создание новых методов прогноза возникновения лесных пожаров. Основой создания такой системы должны быть адекватные реальным процессам математические модели, а также соответствующее методологическое, информационное и программное обеспечение.

На сегодняшний день в мире известны несколько разных методов прогноза лесной пожарной опасности. Следует отметить канадский (B.J. Stocks, M.E. Alexander, R.S. McAlpine), американский методы, а также ряд южноевропейских методов (B. Sol, G. Bovio, A. Nosenzo, D.X. Viegas) и российскую разработку – критерий Нестерова. Все эти методы основаны на метеоданных, использование которых характеризует только лесную опасность по погодным условиям. Однако лесная пожарная опасность зависит и от грозовой активности, антропогенной нагрузки.

Необходимо, чтобы время получения прогноза было существенно меньше, чем период индукции катастрофы. Применение однопроцессорной техники на сегодняшний день и ближайшее будущее, практически малоэффективно. Возникает необходимость применения многопроцессорных вычислительных систем (МВС) и распараллеливания вычислений.

Осложняет получение прогноза и сеть метеостанций, пространственное разрешение которой крайне низко. Надо полагать, что следует ориентироваться на глобальные и региональные модели атмосферы, например.

К настоящему времени разработан ряд математических моделей сушки слоя лесных горючих материалов (ЛГМ) (А.М. Гришин). Из-за большой вычислительной нагрузки система в настоящий момент не в состоянии обеспечить расчет в режиме реального времени и, тем более, в режиме, опережающем реальное время развития. Следует ориентироваться на упрощенные математические постановки задачи о сушке слоя ЛГМ. В литературе отсутствуют простые модели зажигания слоя ЛГМ.

Целью настоящего исследования является создание математической модели для системы прогноза лесной пожарной опасности, учитывающей основные значимые факторы.

Цель исследования может быть достигнута **путем решения следующих взаимосвязанных задач:**

1. Разработка и обоснование новой концепции организации лесопожарного мониторинга.

2. Разработка нового вероятностного критерия лесной пожарной опасности и метода определения вероятности возникновения лесных пожаров с учетом процессов сушки и зажигания слоя ЛГМ, характеристик лесотаксационных описаний, грозовой активности, антропогенной нагрузки.

3. Разработка новой детерминированно-статистической методики прогноза числа лесных пожаров на контролируемой лесопокрытой территории и сравнительный анализ со статистикой лесных пожаров на территории реального лесхоза.

4. Разработка новой математической модели зажигания слоя ЛГМ одиночной нагретой до высоких температур частицей и проведение численного исследования.

5. Разработка нового проблемно-ориентированного подхода ландшафтного распараллеливания в приложении к задачам прогноза лесной пожарной опасности на крупных лесопокрытых территориях.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Получена новая формула для определения вероятности возникновения лесного пожара с учетом процесса сушки слоя ЛГМ под действием сухих гроз и антропогенной нагрузки, с учетом метеоданных. Фактор антропогенной нагрузки моделируется на качественно новом уровне - вероятностный критерий лесной пожарной опасности учитывает изменение антропогенной нагрузки в зависимости от дня недели, величина которой в течение недели может изменяться несколько раз. Разработан новый подход к описанию грозовой активности – учитывается динамика наземных грозовых разрядов. На основе этих результатов разработан новый вероятностный критерий лесной пожарной опасности и новая детерминированно-вероятностная методика определения вероятности возникновения лесных пожаров.

2. Сформулирована и численно реализована новая математическая постановка задачи о зажигании слоя ЛГМ нагретой частицей, отличающаяся газофазным механизмом зажигания, и позволяющая адекватно описывать механизм зажигания ЛГМ.

3. Разработана новая методика прогноза лесопожарных возгораний, отличающаяся учетом антропогенной нагрузки и грозовой активности, и позволяющая более точно определять вероятность лесопожарных возгораний.

4. Разработана новая методика прогноза числа лесных пожаров, отличающаяся учетом антропогенной нагрузки, грозовой активности и сушки слоя ЛГМ, и позволяющая более точно прогнозировать число лесных пожаров.

5. Разработан новый проблемно-ориентированный подход ландшафтного распараллеливания. Как показал анализ результатов проведенного исследования, данный подход очень эффективен при решение задач лесопожарного созревания

слоя ЛГМ, определения вероятности возникновения лесных пожаров, оценки экологических последствий лесных пожаров.

6. Разработана информационно–прогностическая система прогноза лесных пожаров.

Достоверность исследований подтверждается использованием обоснованных численных методов и алгоритмов, в ряде случаев сравнением с данными экспериментов и натурных наблюдений, в предельных случаях с результатами других исследователей.

Теоретическая значимость. Разработан новый детерминированно-статистический метод прогноза лесной пожарной опасности. Данный метод может быть применен и для прогнозирования различных других природных и техногенных катастроф. Разработана и численно реализована новая постановка задачи о зажигании слоя ЛГМ нагретой частицей. На базе данной модели могут быть построены новые математические модели зажигания других пожароопасных материалов, а также методики прогноза, например, пожарной безопасности промышленных объектов.

Разработан новый подход ландшафтного распараллеливания, который уже сейчас позволяет решать сложные задачи лесопожарного мониторинга в режиме, опережающем реальное время развития процесса. Применение данного подхода позволяет решить многие проблемы, которые возникают при решении задач прогнозирования лесной пожарной опасности: большие объемы вычислительной нагрузки и требуемой оперативной памяти, необходимость расчета в режиме, опережающем реальное время развития процесса. Подход является проблемно-ориентированным, но в пределах области своего приложения является достаточно гибким и универсальным. Может быть применен не только к прогнозу лесной пожарной опасности, но и к оценке экологических последствий и развития лесных пожаров.

Практическая ценность. Практическая значимость разработанных методов значительна, так как впервые, в отличие от методик, применяемых в США, Канаде, Южной Европе и России, разработан вероятностный критерий лесной пожарной опасности, который учитывает не только метеоданные, но и грозовую активность, уровень антропогенной нагрузки на качественно новом уровне.

Применение новых методов позволит более точно и оперативно отслеживать лесную пожарную опасность. Соответственно, своевременное принятие профилактических, упреждающих мер создаст условия для предотвращения уничтожения лесного фонда.

Положения, выносимые на защиту:

1. Новая концепция организации лесопожарного мониторинга.

2. Новая математическая модель зажигания слоя ЛГМ нагретой частицей.

3. Новые детерминированно-статистические методики определения вероятности возникновения лесных пожаров и лесопожарных возгораний с учетом процессов сушки и зажигания слоя ЛГМ, грозовой активности и уровня антропогенной нагрузки.

4. Новая детерминированно-статистическая методика прогноза числа лесных пожаров.

5. Новый подход ландшафтного распараллеливания (параллельный программный комплекс, методическое обеспечение) для лесопожарного мониторинга крупных лесопокрытых территорий.

6. Информационно-прогностическая система определения вероятности возникновения лесных пожаров.

7. Результаты математического моделирования зажигания слоя ЛГМ и сценариев возникновения лесных пожаров.

Публикации и апробация работы. Результаты, представленные в настоящей диссертационной работе, обсуждались на следующих конференциях: школа-семинар молодых ученых "Современные проблемы физики и технологии" (г. Томск, 2002, 2003), Сибирская школа-семинар по параллельным вычислениям (г. Томск, 2001), Всероссийская конференция молодых ученых "Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики" (г. Новосибирск, 2002, 2006), международная конференция "Сопряженные задачи механики, информатики и экологии" (г. Томск, 2002), международная конференция молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям (г. Новосибирск, 2002), всероссийская конференция молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям (г. Кемерово, 2005, г. Красноярск, 2006), международная школа-семинар молодых ученых “Актуальные проблемы физики, технологий и инновационного развития” (г. Томск, 2005), третья сибирская школа-семинар по параллельным вычислениям (г. Томск, 2005), международная конференция ENVIROMIS-2006 (г. Томск, 2006), XIII международный симпозиум “Оптика атмосферы и океана” (г. Томск, 2006), международная конференция “Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании” (г. Павлодар, Казахстан, 2006), всероссийская конференция аспирантов и студентов по приоритетному направлению “Рациональное природопользование” (г. Ярославль, 2006), международная конференция “Современное состояние лесной растительности и ее рациональное использование” (г. Хабаровск, 2006), XIII Рабочая группа “Аэрозоли Сибири” (г. Томск, 2006). Материалы диссертационного исследования опубликованы в 26-и научных трудах, в том числе в 9-ти рецензируемых журналах из списка ВАК.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Написана на 153 листах, содержит 5 таблиц и 53 рисунка. Список литературы содержит 152 наименования.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введение представлена цель и задачи исследования, методы их решения, кратко освещается круг исследуемых проблем и результатов, полученных в данной области ранее. Представлены основные положения, выносимые на защиту, научно-практическая значимость и результаты апробации работы.

Глава 1 освещает круг вопросов, связанных с созданием новой методики определения вероятности возникновения лесных пожаров, лесной пожарной опасности. Также рассматриваются процессы сушки и зажигания ЛГМ. Рассматриваются работы, посвященные разработке параллельных программ.

Глава 2 посвящена разработке и тестированию нового детерминированно-вероятностного метода определения вероятности возникновения лесных пожаров, основанного на новой математической постановке задачи о сушке слоя ЛГМ и но-

вом вероятностном критерии определения лесной пожарной опасности, а также новой методике прогноза числа лесных пожаров. Представлены результаты математического моделирования различных сценариев пожарной опасности.

Методика прогноза лесной пожарной опасности базируется на математической постановке задачи о сушке слоя ЛГМ. Рассмотрим результаты моделирования. В результате интегрирования уравнений в безразмерном виде по вертикальной координате с учетом граничных условий получены обыкновенные дифференциальные уравнения для средней по слою ЛГМ безразмерной температуры и безразмерного объемного влагосодержания слоя. Получены результаты сравнения численных расчетов с экспериментальными данными и данными натурных наблюдений. Показано хорошее соответствие.

Используя основные положения теории вероятностей и модель лесной пожарной опасности автором получена формула для оценки вероятности возникновения лесного пожара для j-го временного интервала лесопожарного сезона:

$$P_j = \left[P(A)P(A_j / A)P_j(ЛП / A, A_j) + P(M)P(M_j / M)P_j(ЛП / M, M_j) \right] P_j(C), \qquad (1)$$

Здесь P_j – вероятность возникновения лесного пожара для j-го интервала на контролируемой лесной территории; $P(A)$ – вероятность антропогенной нагрузки; $P(A_j/A)$ – вероятность наличия источников огня в j-ый день; $P_j(ЛП/A,A_j)$ -вероятность возникновения пожара вследствие антропогенной нагрузки на территории выдела; $P(M)$ - вероятность возникновения сухих гроз на территории выдела; $P(M_j/M)$ – вероятность наземного грозового разряда; $P_j(ЛП/M,M_j)$ - вероятность возникновения лесного пожара от молнии при условии, что сухие грозы могут иметь место на территории выдела; $P_j(C)$ – вероятность возникновения пожара по метеоусловиям лесопожарного созревания (вероятность того, что слой ЛГМ будет сухой); индекс j соответствует дню пожароопасного сезона.

Для определения величины $P_j(C)$ следует принять во внимание, что, как правило, загорания происходят в дневное время. Очевидно, что $P_j(C)$ принимает максимальное значение тогда, когда промежуток времени до часа прогноза (как правило, возникновение большинства пожаров приходится на середину дня) совпадает со временем сушки j-го временного интервала пожароопасного сезона. Значение величины лесопожарного сезона в днях, как правило, известны из статистических данных по архивам лесхозов. В результате для величины $P_j(C)$ автор получил формулу:

$$P_j(C) = \begin{cases} 0 \\ k_h \exp[-(\Delta \overline{t}_j)^2] \end{cases}, \quad \Delta \overline{t}_j = \frac{t_j - t_j^*}{t_j^*}, \qquad (2)$$

где k_h - поправочный коэффициент учета осадков (В.А. Жданко, М.В. Гриценко), 0 в (2) соответствует случаю, когда на площади лесной территории нет ЛГМ (поверхность дорог, рек, озер и водонасыщенных болот).

Для определения всех сомножителей в формуле (1) автор предлагает использовать определение вероятностей через частоту событий и воспользоваться статистическими данными для конкретного лесхоза.

Ниже представлены типичные результаты анализа с использованием модели (1) – (2). Рассмотрим влияние температуры окружающей среды. На рис. 1 представлены, полученные автором, зависимости вероятности лесной пожарной опасности для июля. Кривые 1, 2, 3 отражают соответственно сценарии низкой, средней и высокой пожарной опасности.

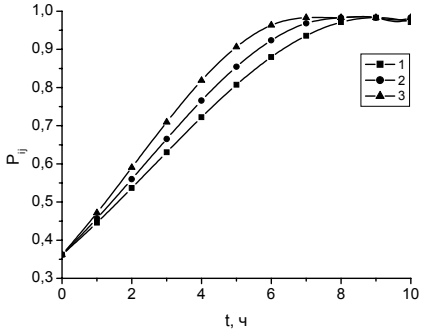


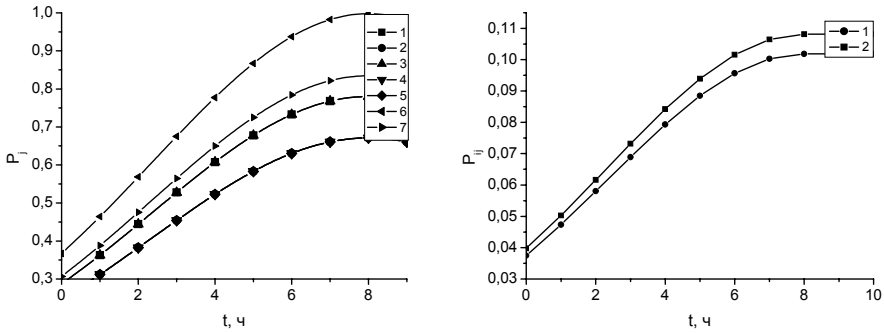
Рис. 1. Вероятность лесной пожарной опасности (июль)

Анализ результатов, представленных на рис. 1 показывает, что более высокие температуры окружающей среды обеспечивают и более быстрое наступление лесной пожарной опасности. Закономерным результатом является и более быстрое достижение условий лесной пожарной опасности при сценарии высокой пожарной опасности и более медленное при сценариях средней и низкой пожарной опасности.

Рассмотрено влияние антропогенной нагрузки, грозовой активности на вероятность возникновения лесного пожара на примере Тимирязевского лесхоза Томской области. На рис. 2.а представлены зависимости лесной пожарной опасности для различных дней недели. Изменение вероятности наличия источников огня отражает изменение уровня антропогенной нагрузки в течение недели.

Автором проведено численное исследование влияния антропогенной нагрузки на вероятность возникновения лесных пожаров. Рис. 2,*а* показывает, что вероятность заметно зависит от уровня антропогенной нагрузки в разные дни недели, что отражает неравномерность посещения леса жителями населенного пункта в течение недели. На рис. 2,*б* представлены, полученные автором, зависимости вероятности лесной пожарной опасности при различных значениях вероятности наземных грозовых разрядов.

На рис. 2,*б* представлены результаты для лесхоза, где преобладают лесные пожары, возникшие в результаты грозовой активности. Здесь уже прогнозы по данным, полученным в 4 и 6 часов утра различны. Таким образом, опираясь на результаты проведенных расчетов можно рекомендовать в качестве начальных данных метеоданные, полученные в 5–6 часов утра, так как это позволит принимать во внимание большинство наземных грозовых разрядов, которые произошли ночью и ранним утром и потенциально могли привести к возникновению очагов лесных пожаров.



а) *б*)

Рис. 2. Зависимость вероятности возникновения лесного пожара в течение недели (*а*) и вероятность лесной пожарной опасности с учетом наземных грозовых разрядов, когда преобладает грозовая активность (*б*)

Помимо количественного описания вероятности возникновения лесных пожаров для практических целей введена качественная характеристика лесной пожарной опасности в виде шкал лесной пожарной опасности. Предлагается разбить интервал изменения вероятности [0,1] на пять подынтервалов и поставить им в соответствие качественную характеристику данного уровня лесной пожарной опасности и соответствующие предписания для служб охраны лесов.

Были проведены сценарные расчеты вероятности возникновения лесных пожаров для различного уровня солнечного излучения в условиях ясного неба и средней облачности, для различного начального влагосодержания слоя ЛГМ. Построена детерминированно-вероятностная модель перехода лесного пожара на населенный пункт. Параметрическое исследование показало адекватное влияние входных данных на результаты моделирования.

Число прогнозируемых лесных пожаров автор предлагает определять по формуле:

$$PNF(d) = \frac{RNF(d-1)P_j^0(d)}{P_j^0(d-1)},$$

где PNF(d) - число прогнозируемых пожаров на конкретный день, RNF(d-1) - число зарегистрированных пожаров в предыдущий день, $P^0_j(d)$, $P^0_j(d-1)$ - вероятности возникновения лесных пожаров в текущий и предшествующий дни.

Представляет интерес ретроспективный анализ предлагаемой методики. На рис. 4 представлены статистические данные и данные прогноза по числу лесных пожаров (получены автором) в течение недели на территории Тимирязевского лесничества Тимирязевского лесхоза Томской области для одного лесопожарного сезона.

На рис. 3 цифрами обозначены: 1 - статистические данные по числу лесных пожаров за неделю по Тимирязевскому лесничеству, 2 - прогнозируемое число лесных пожаров за неделю по Тимирязевскому лесничеству. Хорошо видно, что наи-

большее количество пожаров возникает в субботу, воскресенье и как следствие продолжается в понедельник. Средняя относительная погрешность прогнозирования составила 10,4 %, что является хорошим показателем для моделирования такого сложного случайного процесса.

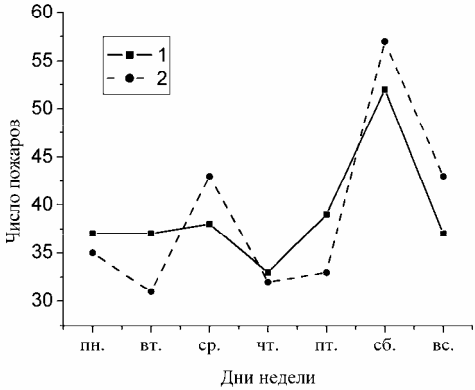


Рис. 3. Сравнительный анализ статистики и прогноза по числу лесных пожаров на территории Тимирязевского лесничества Тимирязевского лесхоза

Глава 3 посвящена разработке новой математической модели зажигания слоя ЛГМ нагретой до высоких температур частицей, а также разработке детерминированно-статистического прогноза лесопожарных возгораний.

Автором разработана математическая постановка задачи о газофазном зажигании слоя ЛГМ. Система нестационарных дифференциальных уравнений энергии и диффузии для системы “газовая смесь-частица-ЛГМ”, соответствующая сформулированной физической модели, имеет следующий вид:

Уравнение энергии для слоя ЛГМ:

$$\rho_3 c_3 \frac{\partial T_3}{\partial t} = \lambda_3 \frac{\partial^2 T_3}{\partial x^2} + q_p \cdot k_1 \cdot \rho_3 \cdot \varphi_1 \cdot \exp\left(-\frac{E_1}{RT_3}\right) \tag{3}$$

Уравнение энергии для углеродистой (или стальной) частицы:

$$\rho_2 c_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} \tag{4}$$

Уравнение энергии для газовой смеси:

$$\rho_1 c_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + q_5 (1 - \nu_5) \cdot R_5 \tag{5}$$

Граничные условия для уравнений (3–5):

$x=0,$ $\alpha_1(T-T_e)=\lambda_1\frac{\partial T_1}{\partial x}$,

$x=\Gamma_2$, $\lambda_1\frac{\partial T_1}{\partial x}=\lambda_2\frac{\partial T_2}{\partial x}$, $T_1=T_2$,

$x=\Gamma_1$, $\lambda_2\frac{\partial T_2}{\partial x}=\lambda_3\frac{\partial T_3}{\partial x}$, $T_2=T_3$

$x=L,$ $\alpha_2(T-T_e)=\lambda_3\frac{\partial T_3}{\partial x}$

Начальные условия для уравнений (3–5):

$$t=0,\ T_1=T_{10},\ T_2=T_{20},\ T_3=T_{30}$$

Кинетическое уравнение и соответствующееначальное условие:

$$\rho_3\frac{\partial\varphi}{\partial t}=-k_1\rho_3\varphi\exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right),\ t=0,\quad \varphi=\varphi_0$$

Уравнение диффузии для окислителя:

$$\frac{\partial C_4}{\partial t}=D\frac{\partial^2 C_4}{\partial x^2}-\frac{M_4}{M_5}R_5 \tag{6}$$

Граничные и начальные условия для уравнения (6):

$x=0,$ $\rho D\frac{\partial C_4}{\partial x}=0$,

$x=\Gamma_2$, $\rho D\frac{\partial C_4}{\partial x}=0$,

$t=0,$ $C_4=C_{40}$

Уравнение диффузии для газообразных горючих продуктов пиролиза:

$$\frac{\partial C_5}{\partial t}=D\frac{\partial^2 C_5}{\partial x^2}-R_5 \tag{7}$$

Граничные и начальные условия для уравнения (7):

$x=0,$ $\rho D\frac{\partial C_5}{\partial x}=0$,

$x=\Gamma_2$, $\rho D\frac{\partial C_5}{\partial x}=Y_5$,

$t=0,$ $C_5=C_{50}$

Уравнение баланса массы:

$$C_{N_2}=1-C_{O_2}-C_{CO},$$

Выражение для массовой скорости реакции R_5:

$$R_5 = k_5 M_5 T^{-2,25} \exp\left(-\frac{E_5}{RT}\right) \cdot \begin{cases} x_1^{0,25} x_2, x_1 > 0,05 \\ x_1 x_2, x_1 < 0,05 \end{cases}$$

$$x_i = \frac{C_i}{\sum_{k=4}^{6} \frac{C_k}{M_k} M_i},$$

где T – температура (1 – воздуха, 2 – частицы, 3 – слоя ЛГМ); С – концентрация (4 – окислителя, 5 – горючего газа, 6 – инертных компонентов воздуха); ρ_i, c_i, λ_i – плотность, теплоемкость и теплопроводность (1 – воздуха, 2 – частицы, 3 – слоя ЛГМ); q_p – тепловой эффект реакции пиролиза ЛГМ; k_1 – предэкспонент реакции пиролиза ЛГМ; E_1 – энергия активации реакции пиролиза ЛГМ; R – универсальная газовая постоянная; φ – объемная доля сухого органического вещества ЛГМ; q_5 – тепловой эффект реакции окисления оксида углерода; ν_5 – доля теплоты поглощенная слоем ЛГМ; R_5 – массовая скорость реакции окисления оксида углерода; α_1 – коэффициент теплоотдачи; α_2 – коэффициент теплопередачи; M_i – молекулярная масса компонент газовой фазы (4 – кислород, 5 – оксид углерода, 6 – азот); k_5 – предэкспонент реакции окисления оксида углерода; E_5 – энергия активации реакции окисления оксида углерода; D – коэффициент диффузии; Y_5 – поток массы; Γ_1, Γ_2 – границы “ЛГМ-частица” и “частица-газовая смесь” соответственно.

Сформулированная система дифференциальных уравнений с соответствующими краевыми и начальными условиями решена методом конечных разностей. Для решения разностных аналогов одномерных нелинейных уравнений использовался метод прогонки в сочетании с методом итераций. Алгоритм программы был протестирован на задаче зажигания тонкой пластины при продолжительном действии источника тепла (В.Н. Вилюнов. Теория зажигания конденсированных веществ).

В настоящем разделе представлены результаты математического моделирования зажигания слоя ЛГМ, полученные автором. В общем случае температура горячих углеродистых или стальных частиц может изменяться в диапазоне от 330 К до 1800 К. Рассматривались относительно низкие значения начальной температуры частиц, представляющие наибольший интерес для практики. Принимается, что в начальный момент времени частица имеет температуру от 900 К до 1800 К. На рис. 4 показано типичное температурное распределение системы “газовая смесь-частица-ЛГМ” в различные моменты времени до начала воспламенения. Зажигание наступает тогда, когда теплоприход от реакции окисления газообразных продуктов пиролиза превысит теплоприход от горячей частицы.

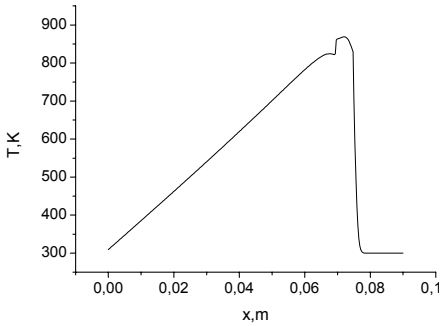


Рис. 4. Температура системы “газовая смесь-частица-ЛГМ” до момента зажигания слоя ЛГМ (углеродистая частица), начальная температура частицы 900 К: 2.63 с

В табл. 1 представлены времена задержки воспламенения для различных температур углеродистой частицы.

Таблица 1. Время задержки зажигания для углеродистой частицы

Температура частицы	Время задержки зажигания
900 К	2,63 с
1000 К	0,46 с
1100 К	0,19 с
1200 К	0,099 с

Нижний предел зажигания – температура частицы 900 К. При температурах меньше 900 К зажигания не происходит. Выделенный диапазон температур, в котором происходит зажигание сухого ЛГМ, соответствует реальным температурам, достигаемым в практически значимых пожароопасных ситуациях. К таким, например, можно отнести раздувание непогашенных костров ветром и разлет отдельных частиц недогоревшей древесины (углей) на расстояния 1-3 м от источника открытого огня. Наличие предельного значения температуры, при котором еще происходит зажигание ЛГМ, в рассматриваемом случае обусловлено не только кинетикой процессов термического разложения и газофазного воспламенения смеси горючего и окислителя. Важным фактором является также то, что частица, в отличие от массивного нагретого тела имеет конечный запас тепла.

В табл. 2 представлены времена задержки воспламенения для различных температур стальной частицы.

Таблица 2. Время задержки зажигания для стальной частицы

Температура частицы	Время задержки зажигания
900 К	0,3 с
1000 К	0,07 с
1100 К	0,05 с
1200 К	0,02 с

Нижний предел зажигания – температура частицы 900 К.

Рассмотрим сценарные расчеты по определению вероятности зажигания ЛГМ (горячие частицы). Для типичных времен задержки зажигания вычислим распределение вероятностей возникновения лесопожарных возгораний. Типичные результаты представлены на рис. 5. Цифрами 1, 2, 3 обозначены кривые вероятностей для времен задержки зажигания 0,22 с, 1,48 с, 4,78 с соответственно.

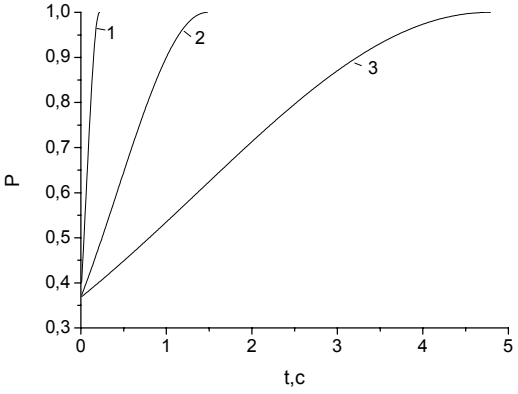


Рис. 5. Вероятность возникновения лесопожарных возгораний

Анализ, полученных автором результатов, показывает, что чем выше температура нагретой частицы, выпадающей на слой ЛГМ, тем вероятность лесопожарных возгараний больше и достигает единицы за меньший временной промежуток. Это заключение позволяет сделать вывод, что лесопожарные возгорания имеют большую вероятность возникновения, если нагретые частицы разлетаются на малое расстояние от источника открытого огня или электросварки. Этот теоретический результат является обоснованием известного положения о том, что необходимо понижать запас ЛГМ вокруг источника открытого огня при разведении костров и проведение электросварочных работ. Можно, например, рекомендовать предварительный отжиг ЛГМ на рассматриваемой территории, либо организация минерализованных полос.

Помимо количественного описания вероятности возникновения лесопожарных возгораний для практических целей автор считает целесообразным ввести качественную характеристику лесной пожарной опасности в виде шкал лесной пожарной опасности. Шкалы построены по принципу – достижение вероятности равной единице. Если вероятность достигает значения единицы за одну секунду и менее, то это пятый класс пожарной опасности. Если же данное значение достигается за пять секунд, то это первый класс пожарной опасности.

В главе 4 рассматривается новый подход к решению проблемы прогноза вероятности возникновения очагов многочисленных лесных пожаров на крупных лесопокрытых территориях – подход ландшафтного распараллеливания. Рассматриваются основные идеи и положения данного подхода, технические аспекты параллельной реализации программ, результаты и анализ работы параллельных программ, разработанных в рамках данного подхода. Приводится анализ границ применимости данного подхода и возможности его применения к решению других задач.

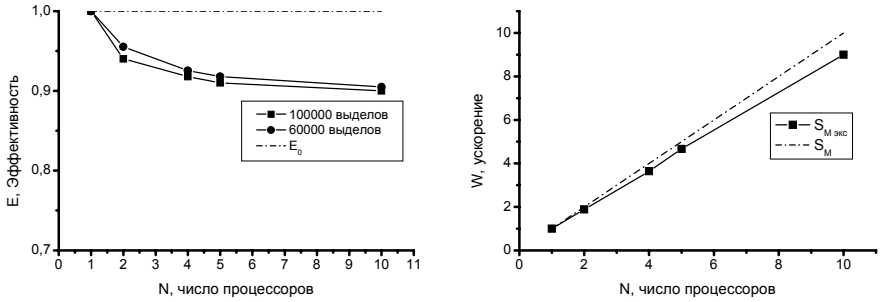
Необходимо применять МВС и необходима разработка соответствующего проблемно-ориентированного подхода ландшафтного распараллеливания для прогноза лесной пожарной опасности на крупных лесопокрытых территориях, который бы базировался на трех основах: физически обоснованная методика определения вероятности лесопожарного происшествия (в данном случае возникновение лесного

пожара), использование достаточно дешевых МВС, существующая структура устройства лесного хозяйства.

Реализация параллельной MPI-программы осуществляется автором на языке программирования "Си" с применением функций библиотеки передачи сообщений MPI. Алгоритм параллельной программы: исходные данные разрезаются и рассылаются корневым процессом параллельной программы. По окончанию вычислений корневой процесс собирает результаты со всех процессорных узлов и сохраняет их в файле.

Численное исследование проводилось автором на вычислительном кластере Томского государственного университета. Узлы кластера установлены в стойки. Общие технические характеристики: 18 процессоров Pentium III 650 MHz, 2.5 Гб ОЗУ, 36 Гб дискового пространства, Fast Ethernet. Программное обеспечение: операционная система FreeBSD 4.2, кластерный пакет LAM MPI v 6.3.2.

На рис. 6,*а* представлена зависимость эффективности работы параллельной программы от числа процессоров. На рис. 6,*б* представлена зависимость ускорения работы параллельной программы от числа процессоров.



а) *б*)

Рис. 6. Эффективность распараллеливания в зависимости от числа процессоров для 100000 и 60000 выделов (*а*) и ускорение работы параллельной программы в зависимости от числа процессоров для 100000 выделов (*б*)

Разработан прототип аппаратно-программного комплекса для лесопожарного мониторинга крупных лесопокрытых территорий и параллельный программный комплекс прогноза возникновения лесных пожаров на крупных лесопокрытых территориях.

Глава 5 освещает проблемы создания новой концепции и центра лесопожарного мониторинга (на глобальном, государственном и региональном уровнях). Рассматриваются структура, возможности, характеристики информационно-прогностической системы определения вероятности возникновения лесных пожаров.

Рассматриваемая в настоящей работе методика прогноза лесной пожарной опасности была реализована в виде информационно-прогностической системы, используя интегрированную среду разработки Delphi. Информационно-прогности-

ческая система разработана для различных версий операционной системы MS Windows.

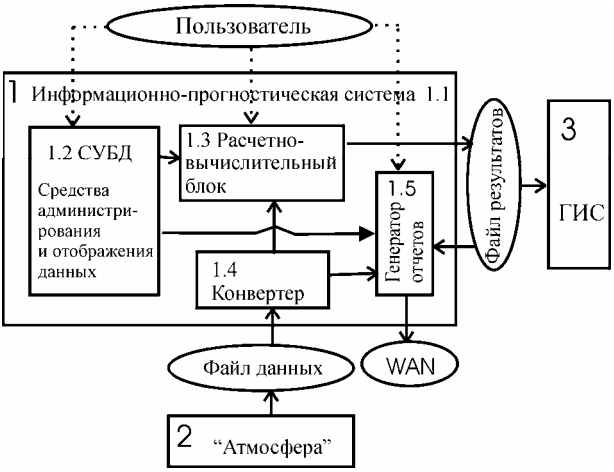


Рис. 7. Структура информационно-прогностической системы

В разделе **Заключение** представлен краткий анализ полученных результатов, рассматриваются перспективы дальнейшего развития новой методики определения вероятности возникновения лесных пожаров, ППК и ИПС.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

На основании результатов, полученных автором можно сделать **следующие выводы:**

1. Применение на практике новой концепции лесопожарного мониторинга создает объективные условия для централизованной обработки информации о лесопожарном состоянии и получения прогноза в режиме, опережающем реальное время развития процесса. Кроме того, новый подход к определению вероятности возникновения лесных пожаров по метеоусловиям, а именно организация интерактивного взаимодействия с программами, реализующими математические модели атмосферы, позволит получать прогноз со значительно более точным пространственным разрешением. Кроме того, имея прогнозную информацию по метеоусловиям на несколько дней вперед, можно получить прогноз вероятности возникновения лесных пожаров на этот период.

2. Численно реализована математическая постановка задачи о сушке слоя ЛГМ.

3. Разработана и численно реализована математическая постановка задачи о зажигании слоя ЛГМ нагретой до высоких температур частицей. Показана достоверность результатов математического моделирования путем сравнения с известными экспериментальными данными.

4. Сравнительный анализ используемых математических моделей сушки слоя ЛГМ показал, что их применение при создании ИПС, ППК для определения лесопожарного созревания слоя ЛГМ и вероятности возникновения лесных пожаров, а также другого программного обеспечения, приводит к ускорению получения

прогнозной информации относительно одномерной постановки почти в 30 раз при использовании нульмерной математической постановки. В свою очередь использование в программном обеспечении приближенной аналитической формулы для определения времени сушки время получения прогноза почти в 20 раз меньше, чем при использование нульмерной постановки.

5. Новая формула вероятностного критерия лесной пожарной опасности позволяет учитывать антропогенную нагрузку и грозовую активность на качественно новом уровне. Учитывается динамика лесных пожаров в течение недели и динамика наземных грозовых разрядов. Новые детерминированно-вероятностные методики определения вероятности возникновения лесного пожара и прогноза лесопожарных возгораний, которые в отличие от других известных методик учитывает метеорологические условия, лесопожарное созревание слоя ЛГМ, грозовую активность, антропогенную нагрузку. Методика имеет единую шкалу измерения вероятности возникновения лесных пожаров, которой в соответствие поставлена система предписаний для служб охраны лесов.

6. На основе представленной в диссертации детерминированно-вероятностной методики определения вероятности возникновения лесного пожара разработана ИПС для определения вероятности возникновения лесных пожаров.

7. Разработана и протестирована детерминированно-вероятностная методика прогноза числа лесных пожаров на контролируемой лесопокрытой территории. Применение новой методики позволит прогнозировать число лесных пожаров и более точно учитывать пожарную опасность на контролируемой лесопокрытой территории, а также прогнозировать необходимые мероприятия по их ликвидации.

8. Установлено, что разработанный в рамках данной работы проблемно-ориентированный подход ландшафтного распараллеливания успешно может применяться для осуществления лесопожарного мониторинга крупных лесопокрытых территорий. Благодаря отсутствию межпроцессорных обменов в процессе выполнения параллельной программы на суперкомпьютере достигается очень высокий уровень ускорения работы параллельной программы, практически пропорциональный числу задействованных процессоров. Программа автоматически масштабируется на необходимое число процессоров. Кроме того, отсутствуют проблемы с динамической перебалансировкой вычислительной нагрузки по узлам суперкомпьютера.

9. В рамках подхода ландшафтного распараллеливания на основе детерминированно-вероятностной методики определения вероятности возникновения лесных пожаров разработаны параллельные программные комплексы, прототип аппаратно-программного комплекса для лесопожарного мониторинга на крупных лесопокрытых территориях, который был использован в 2002 году в учебном и научно-исследовательском процессах на кафедре физической и вычислительной механики ТГУ.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Барановский Н.В., Гришин А.М., Лоскутникова Т.П. Информационно-прогностическая система определения вероятности возникновения лесных пожаров // Вычислительные технологии, 2003, № 2. С. 16–26.

2. Кузнецов Г.В., Барановский Н.В. Математическое моделирование зажигания слоя лесных горючих материалов нагретой до высоких температур частицей. // Пожаровзрывобезопасность. 2006. Т. 15. № 4. С. 42–46.
3. Кузнецов Г.В., Барановский Н.В. Детерминированно-вероятностный прогноз лесопожарных возгораний. // Пожаровзрывобезопасность. 2006. Т. 15. № 5. С. 56–59.
4. Барановский Н.В. Влияние антропогенной нагрузки и грозовой активности на вероятность возникновения лесных пожаров // Сибирский экологический журнал, 2004. № 6. С. 835–842
5. Барановский Н.В. Вероятность лесной пожарной опасности и прогноз числа лесных пожаров // Известия ВУЗов. Физика. 2006. Т. 49. № 3 (Пр.). С. 212 - 213.
6. Барановский Н.В. Прогнозирование количества лесных пожаров // Пожарная безопасность. 2007. № 1. С. 123 – 127.
7. Барановский Н.В. Математическое обеспечение прогноза степной пожарной опасности // Экологические системы и приборы, 2007. № 2. С. 41 – 45.
8. Барановский Н.В. Прогноз степной пожарной опасности. // Экологические системы и приборы. 2006. № 11, С. 42 – 46.
9. Барановский Н.В. Детерминированно-вероятностная модель перехода лесного пожара на населенный пункт // Экологические системы и приборы. 2007. № 3. С. 59 – 63.
10. Барановский Н.В. Аппаратное и программное обеспечение параллельных вычислений: Методическое пособие. – Томск: Изд-во Том. ун-та. 2001. – 29 С.
11. Барановский Н.В. Кластерный пакет LAM/MPI. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2002. – 22 С.
12. Барановский Н.В. Технология ландшафтного распараллеливания и ее применение к прогнозу лесной пожарной опасности: Учебно-методическое пособие. – Томск: ТГУ, 2002. – 34 С.
13. Барановский Н.В. Параллельные вычислительные технологии в задачах оперативного прогноза времени сушки слоя лесных горючих материалов. // Сибирская школа-семинар по параллельным вычислениям / Под ред. проф. А.В. Старченко. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2002, С. 113–117.
14. Барановский Н.В. Анализ влияния метеорологических, ландшафтных факторов на время сушки слоя лесных горючих материалов, используя распараллеливание вычислительных операций // Тезисы докладов VII Всероссийской конференции молодых ученых "Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики". – Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 2002. С. 6–7.
15. Барановский Н.В. Прогнозирование количества лесных пожаров и ландшафтное распараллеливание // Программа и тезисы Третьей сибирской школы-семинара по параллельным вычислениям. – Томск: ТГУ. 2005. С. 30–32.
16. Барановский Н.В. Прогнозирование количества лесных пожаров и ландшафтное распараллеливание. // Третья Сибирская школа-семинар по параллельным вычислениям / Под ред. проф. А.В. Старченко. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2006. С. 86–94.

17. Кузнецов Г.В., Барановский Н.В. Численное моделирование зажигания слоя лесных горючих материалов нагретой до высоких температур частицей // Труды международной конференции “Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании”. Том I. – Павлодар: ТОО НПФ “Эко”. 2006. С. 673–680.
18. Барановский Н.В. Математическое моделирование зажигания слоя лесного горючего материала кристаллизующейся нагретой до высоких температур частицей // Тезисы докладов IX Всероссийской школы-конференции молодых ученых “Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики”. – Новосибирск: ИТ СО РАН. 2006. С. 16–17.
19. Baranovsky N.V., Kuznetsov G. V. System of predicting the forest fire inflammations taking into account anthropogenic load and thunder activity // Program & Abstracts of International conference ENVIROMIS-2006. – Tomsk: Publishing House of Tomsk CNTI., 2006. P. 88–88.
20. Baranovsky N.V., Kuznetsov G.V. Predicting of the forest fire inflammations taking into account anthropogenic load and thunder activity // Program & Abstracts of XIII International symposium Atmospheric and ocean optics. Atmospheric physics 2006. – Tomsk: Institute of atmospheric optics SB RAS, 2006. P. 109–109.
21. Барановский Н.В. Зажигание слоя лесного горючего материала частицами и прогноз лесной пожарной опасности // Программа и тезисы VII Всероссийской конференции молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям (с участием иностранных ученых). – Красноярск: ИВТ СО РАН. 2006. С. 36–37
22. Барановский Н.В., Лоскутникова Т.П. Программа прогноза возникновения лесных пожаров // Сопряженные задачи механики, информатики и экологии: Материалы международной конференции. – Томск: Изд-во Том. ун-та. 2002. С. 29–29.
23. Барановский Н.В., Лоскутникова Т.П. Информационно-прогностическая система определения вероятности возникновения лесных пожаров // Программа и тезисы докладов Международной конференции молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям. – Новосибирск: ИВТ СО РАН, 2002. С. 73–73.
24. Барановский Н.В. Применение технологии параллельных вычислений для решения и анализа задачи о сушке слоя лесных горючих материалов // Современные проблемы физики и технологии. Сборник статей молодых ученых – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2002. С.178–180.
25. Кузнецов Г.В., Барановский Н.В. Зажигание слоя лесных горючих материалов одиночной нагретой до высоких температур частицей // Аэрозоли Сибири. XIII Рабочая группа: Тезисы докладов. – Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2006. С. 20–20.
26. Барановский Н.В. Влияние антропогенной нагрузки, грозовой активности и метеорологических условий на вероятность возникновения лесного пожара // Программа и тезисы VII Всероссийской конференции молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям (с участием иностранных ученых). – Красноярск: ИВТ СО РАН. 2006. С.37–37.