

ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ РОССИЙСКОЙ СИСТЕМЫ ПРОГНОЗА ЛЕСНОЙ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ НА БАЗЕ СУПЕРКОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Барановский Н.В.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет (г. Томск, Россия)

Аннотация

Представлена информация о технологических разработках мирового уровня в области прогноза лесной пожарной опасности. Рассматривается новая концепция прогноза лесной пожарной опасности для территории России. Представлен подход ландшафтного распараллеливания.

Введение

В современном мире лесные пожары из естественного природного фактора [1] превратились в катастрофическое явление [2]. Как известно [3], возникновение лесных пожаров обусловлено природными и антропогенными причинами. К природным факторам можно отнести воздействие наземных грозных разрядов [4]. Антропогенные причины обусловлены воздействием железных и автомобильных дорог, результатом халатного поведения людей в лесу, умышленным поджогом [3]. В различных странах мира созданы системы оценки лесной пожарной опасности. Например, канадская [5], американская [6], южноевропейская [7] системы. В России в качестве ГОСТа [8] принята методика Нестерова [9], которая уже не отвечает современным требованиям. Основным недостатком методики является игнорирование реальных физико-химических процессов, происходящих при зажигании лесного горючего материала (ЛГМ). Следует разработать методику, которая основана на моделировании процессов теплопереноса, предшествующих воспламенению ЛГМ. Естественно, что программная реализация таких моделей потребует значительных вычислительных ресурсов. В сложившейся ситуации будет логичным использовать в качестве вычислителя суперкомпьютеры с параллельной обработкой данных [10].

Цель исследования – разработка концептуального проекта Российской системы прогноза лесной пожарной опасности на базе суперкомпьютерных технологий. Цель исследования может быть достигнута посредством решения следующих задач: 1) предпроектное исследование предметной области; 2) формулировка новой концепции прогноза лесной пожарной опасности; 3) разработка алгоритмов возникновения лесных пожаров от природных и антропогенных причин; 4) разработка спектра физико-математических моделей зажигания ЛГМ в результате воздействия природного или антропогенного источников; 5) разработка вероятностных критериев оценки лесной пожарной опасности с учетом статистических данных и результатов математического моделирования.

1. Предпроектное исследование

Министерство природных ресурсов Канады в настоящее время оперирует двумя национальными информационными системами для управления лесными пожарами [11]: канадская информационная система по лесным пожарам (Canadian Wildland Fire Information System – CWFIS) и система моделирования, мониторинга и картирования пожаров (Fire M3). Обе системы включают компоненты канадской системы оценки лесной пожарной опасности (Canadian Forest Fire Danger Rating System – CFFDRS) [5] и используют движок системы пространственного управления пожарами (Spatial Fire Management System – sFMS) [11] для получения, управления, моделирования, анализа и презентации данных. Метеорологические параметры с точечных источников измерений (сеть Канады и северной части США насчитывает около 900 метеорологических станций) интерполируются для получения пространственной детализации ячеек в 1 км.

Канадская система CFFDRS состоит из двух основных подсистем (модулей) – Canadian Forest Fire Weather Index (FWI) System [12] и Canadian Forest Fire Behavior Prediction (FBP) System [11]. В рамках первой подсистемы FWI прогнозируется влагосодержание основных лесных горючих материалов (ЛГМ) в зависимости от погодных условий, а в рамках FBP – поведение очага пожара для различных лесных фитоценозов. Два других элемента (Accessory Fuel Moisture System и Canadian Forest Fire Occurrence Prediction (FOP) System) не разработаны для всей территории страны, но существуют региональные версии данных подсистем [11]. Первая предназначена для оценки влагосодержания второстепенных ЛГМ, а вторая для предсказания возгораний от

антропогенной нагрузки и грозовой активности. В последнее время для описания суточного изменения индекса пожарной опасности используется математический аппарат цепей Маркова [13].

Система sFMS разработана для поддержки принятия решений по ликвидации лесных пожаров [11] и может функционировать как самостоятельное приложение или интегрироваться в существующие информационные системы. sFMS преимущественно работает с текущей метеорологической информацией, чтобы подготовить дневные или почасовые карты пожарной опасности, поведения пожаров, вероятности зажигания. Система также используется с кратко- и долгосрочными климатическими прогнозами для предсказания влияния климатических изменений на уровень лесной пожарной опасности, выгоревшую площадь, потребление ЛГМ и эмиссию парниковых газов. Система может использоваться в различных масштабах (от локального до глобального) [11].

Мониторинговый компонент Fire M3 использует спутниковые данные NOAA (AVHRR – advanced very high-resolution radiometer) с пространственным разрешением 1 км для обнаружения активных лесных пожаров. Компонент картирования предназначен для оценки выгоревшей площади. Моделирующие компоненты интегрируют данные системы CWFIS для оценки условий пожарной погоды, лесной пожарной опасности и возможного поведения пожара [11].

Выходные данные канадской национальной системы доступны для заинтересованных лиц и организаций через Интернет (сайт Канадской лесной службы <http://cfs.nrcan.gc.ca>). Канадская методика используется в различном объеме в таких странах, как США, Новая Зеландия, Фиджи, Аргентина, Мексика, Индонезия, Малайзия [14]. Система была успешно использована и в Финляндии, Швеции [14]. Канадская методика прогнозирования лесной пожарной опасности построена с учетом анализа большого количества статистических данных и достаточно точно предсказывает пожарную опасность.

В США в 1972 г. была разработана методика определения пожарной опасности на разных лесных территориях (National Fire Danger Rating System – NFDRS) [6]. Структура американской системы представляет собой абстрактную модель влияния различных факторов и условий на процесс возникновения и распространения пожаров. Система выдает четыре индекса [6]: индекс возникновения пожара по вине человека (Man-caused fire occurrence index – MCOI), индекс возникновения пожара в результате грозовой активности (Lightning-caused fire occurrence index – LOI), индекс горения (Burning index – BI) и индекс пожарной нагрузки (Fire load index – FLI). Индексы MCOI и LOI определяются с учетом компонента воспламенения (Ignition component – IC) и позволяют оценить ожидаемое число лесных пожаров. Все ЛГМ разделены на типичные модели. В системе вводится ряд пирологических характеристик ЛГМ, которые позволяют косвенно учитывать процесс зажигание. Итоговая оценка пожарной опасности (FLI) определяется в зависимости от значений индексов MCOI, LOI и BI по 100-бальной шкале. Таким образом, в системе используется большое количество поправок, полученных на основе эмпирических данных. Результаты, основанные на расчетах в рамках NFDRS, используются в системе оценки лесных пожаров (Wildland Fire Assessment System – WFAS). Некоторые результаты доступны в сети Интернет (официальный сайт <http://www.wfas.net>).

К началу 2000 года было проведено сравнительное исследование различных методов прогноза лесной пожарной опасности, разработанных в Южной Европе [15]. Все методы представляют численный индекс, который растет с увеличением опасных условий. Южноевропейские методы оценки пожарной опасности [15], в основе которых лежат метеорологические факторы, были протестированы, используя статистические данные за период 3-9 лет. Кроме методов, принятых во Франции, Италии, Португалии и Испании, в сравнительный анализ был включен и канадский метод [12]. Для каждой области имелись ежедневные значения числа пожаров и выгоревшей площади, которые зависят не только от метеопараметров. Считалось, что дополнительные факторы (особенно антропогенная нагрузка) не оказывают взаимного влияния [15]. Канадский метод и модифицированный метод Нестерова (Португалия) показали наилучшие общие эксплуатационные качества [15]. Вслед за этим исследованием была разработана так называемая Европейская система – European Forest Fire Risk Forecasting System (EFFRFS), которая применялась на территории Южной Европы. Основу системы составили методы, разработанные в Италии, Франции, Испании, Португалии [15] и канадский метод [12]. Указанные методы применяются в совокупности. В настоящее время применяется модификация Европейской системы, которая дополнительно учитывает данные со спутников и называется European Forest Fire Information System (EFFIS) [7]. Для сравнения все индексы приведены к 100

бальной шкале. В последние годы система стала применяться в некоторых странах Западной Европы. Результаты работы системы доступны в сети Интернет (официальный сайт <http://effis.jrc.ec.europa.eu>). Надо полагать, что несовершенство национальных методов заставило создателей европейской системы включить канадский метод в качестве одного из основных компонентов. Поскольку наиболее качественный компонент представлен канадским методом, то преимущества и недостатки европейской системы аналогичны, что и у североамериканских. Канадская и американская системы похожи друг на друга в своей структуре, в подходах и принципах построения индекса пожарной опасности. Поэтому обе они обладают схожими как достоинствами, так и недостатками. Основной недостаток заключается в том, что явления сушки и зажигания слоя ЛГМ не моделируются с учетом реальных физико-химических процессов. Основное достоинство – учет таких значимых факторов, как антропогенная нагрузка, грозовая активность и долговременная эксплуатация в реальных условиях, которая показала эффективность применения этих систем.

Степень пожарной опасности, обусловленная пожарной зрелостью лесного участка, в лесной пирологии определяется с помощью индекса горимости Нестерова (комплексного метеорологического показателя – КМП) [9]:

$$\Gamma_j = \Gamma_{j-1} \xi_j + T_j (T_j - T_{pj})$$

Здесь Γ_j – комплексный метеорологический показатель пожарной опасности; T_j, T_{pj} – температуры воздуха и точки росы в 13-15 ч местного времени для текущего дня; ξ – коэффициент учета осадков, который равен нулю, если сумма осадков за прошедшие сутки $f_j > 3$ мм, или 1, если $f_j < 3$ мм; индекс j соответствует текущему дню пожароопасного сезона. Вероятность возникновения лесного пожара и его интенсивность возрастают с увеличением комплексного показателя Γ_j . В 1999 году принят ГОСТ Р 22.1.09-99 “Мониторинг и прогнозирование лесных пожаров. Общие требования” [8], который используется по настоящее время. Данный стандарт основан на приведенном выше комплексном метеорологическом показателе [9]. Основной недостаток настоящего стандарта в том, что игнорируется влияние факторов антропогенной нагрузки и грозовой активности. В этом отношении методика существенно уступает зарубежным аналогам. Второй недостаток (игнорирование реальных физико-химических механизмов сушки и зажигания слоя ЛГМ) характерен как для российской методики, так и для зарубежных систем. Можно сделать вывод, что официально принятая российская методика прогноза лесной пожарной опасности совершенно не соответствует современному уровню развития технологий в данной области.

2. Необходимые требования к современной системе прогноза лесной пожарной опасности

Результаты предпроектного исследования показывают, что создание в обозримой перспективе отечественной системы прогноза лесной пожарной опасности, обладающей конкурентно способными качествами, потребует привлечения современных информационно-вычислительных технологий и физически-содержательных моделей и критериев. Основными требованиями, которые необходимо выполнить на пути создания системы прогноза лесной пожарной опасности, являются [16]: 1) Наличие государственной концепции создания и развития отечественной системы прогноза лесной пожарной опасности; 2) Наличие физико-математических моделей сушки и зажигания ЛГМ источниками природного и антропогенного характера; 3) Наличие сети регистрации наземных грозовых разрядов, а также методик оценки вероятности прохождения грозы на конкретной территории; 4) Наличие физико-математических моделей учета антропогенной нагрузки на лесопокрываемые территории; 5) Наличие физически и математически обоснованного критерия оценки уровня лесной пожарной опасности; 6) Наличие базы исходных данных для моделирования физико-химических процессов, протекающих при возникновении лесных пожаров; 7) Методика должна быть реализована в виде программного комплекса, позволяющего осуществлять прогноз лесной пожарной опасности в режиме, опережающем реальное время развития процесса; 8) Методика прогноза лесной пожарной опасности и ее программная реализация должны обладать возможностью модернизации и обновления отдельных моделей и подсистем; 9) Наличие ГОСТа не на конкретную методику со всеми фиксированными компонентами, а на спецификацию соответствия методики определенным требованиям; 10) Наличие стандартов, спецификаций на файлы входной, промежуточной и выходной информации в системе прогноза лесной пожарной опасности; 11) Наличие технологий, позволяющих потребителям оперативно получать прогнозную информацию; 12) Наличие технологий, позволяющих отслеживать степень достоверности получаемых прогнозов; 13) Наличие

соответствующим образом подготовленных специалистов, способных обслуживать систему; 14) Доступность понимания прогнозной информации для лиц, принимающих управленческие решения (возможно, не имеющих специальной физико-математической подготовки).

3. Современная концепция прогноза лесной пожарной опасности

В рамках настоящего исследования предлагается модельная концепция создания и развития отечественной системы прогноза лесной пожарной опасности. Концепция предполагает создание и развитие отечественной системы прогноза лесной пожарной опасности с целью повышения экологической, экономической безопасности государства посредством мониторинга и управления уровнем пожарной опасности с учетом основных значимых факторов и климатических изменений. Основные задачи концепции естественным образом вытекают из сформулированных выше требований к современной системе прогноза лесной пожарной опасности. Следует отметить, что очень важное значение имеет наличие исходных данных для расчетных моделей. В рамках настоящей концепции предлагается объединить в единую систему (распределенный аппаратно-программный комплекс) как информационно-вычислительное ядро (параллельный программный комплекс (ППК) для многопроцессорной вычислительной системы (МВС), так и необходимые для функционирования инструментальные средства регистрации наземных грозových разрядов. Известно, что развитие сети грозопеленгаторов запланировано Федеральной службой по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Усиление влияния антропогенного фактора обязывает при создании комплексов прогноза лесной пожарной опасности уделить внимание разработке системы усвоения данных об уровне антропогенной нагрузки (С.У.Д.А.Н.) с целью оценки ее пространственно-временной динамики. Технологическая база модельной концепции представлена на рис. 1.

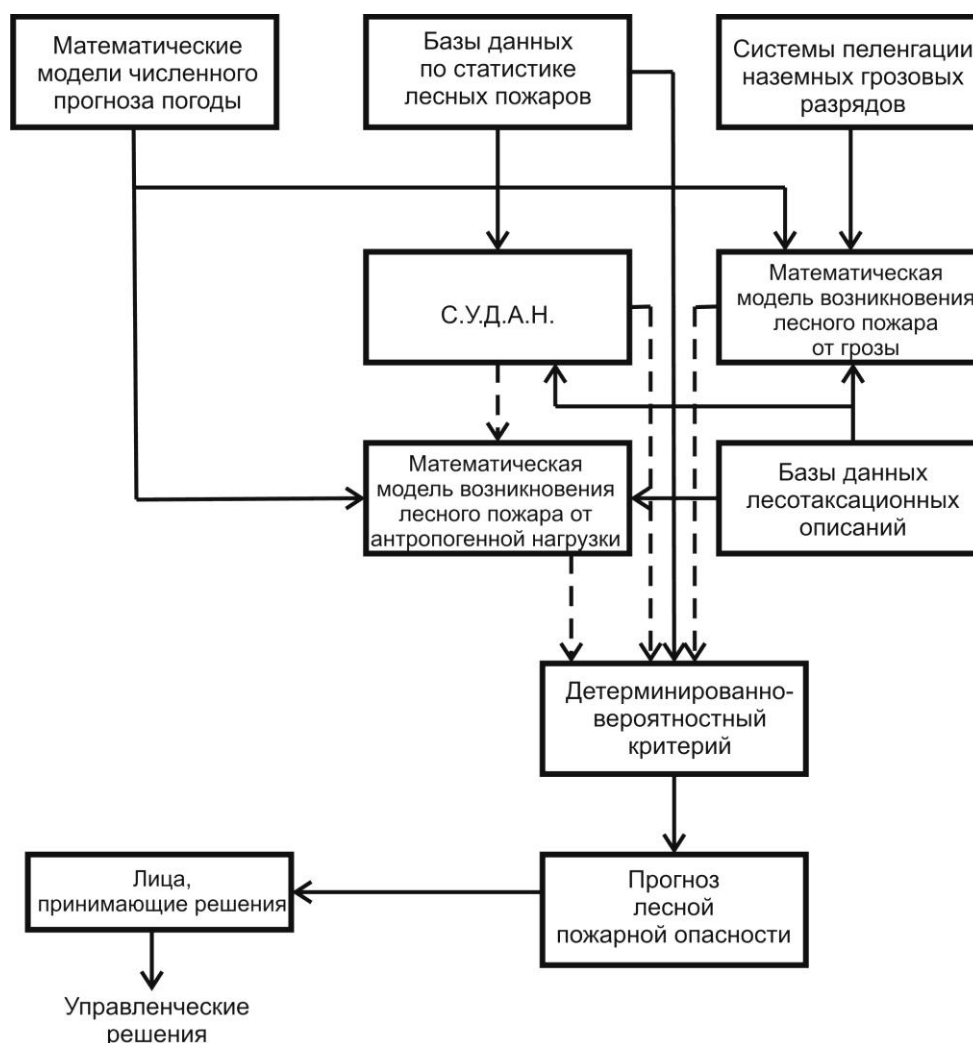


Рис. 1. Технологическая база модельной концепции

Анализ лесопожарных происшествий позволил выделить основные факторы и сформулировать физическую модель лесной пожарной опасности [17]. Следует внести уточнения в эту достаточно общую модель и предложить более подробные механизмы возникновения очагов лесных пожаров. Грозовая активность создает напряженную лесопожарную обстановку в горных и малообжитых регионах. Причиной возгораний являются разряды класса облако-земля. На рис. 2 представлен обобщенный механизм возникновения очага лесного пожара в результате грозовой активности, который учитывает в совокупности первичные и вторичные источники зажигания и режим тления слоя ЛГМ после удара молнии.

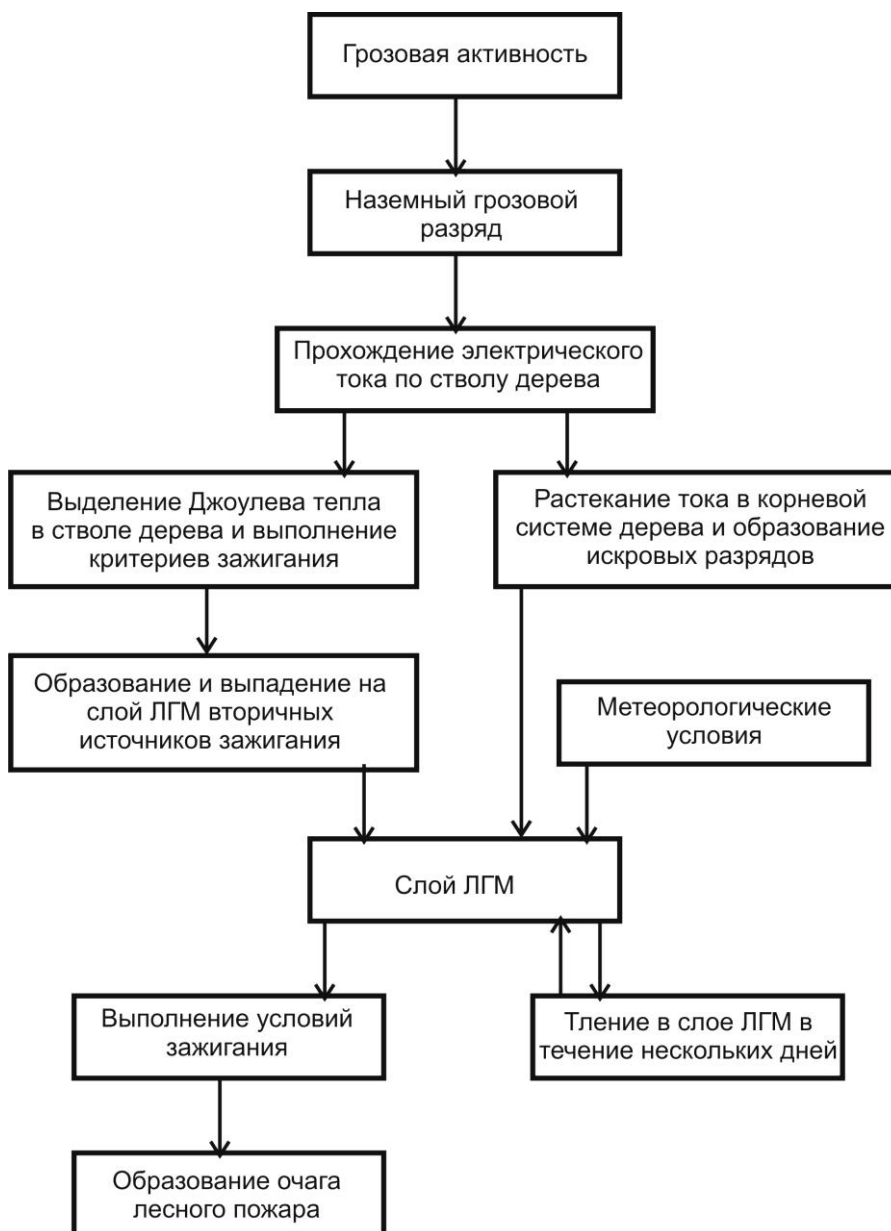


Рис. 2. Обобщенный механизм возникновения лесного пожара в результате грозовой активности

Антропогенная нагрузка в настоящее время является основным фактором, приводящим к возникновению лесных пожаров. Заметим, что антропогенные причины достаточно многообразны. На рис. 3 представлен обобщенный механизм возникновения очага лесного пожара в результате антропогенной нагрузки, который имеет детерминированно-вероятностную природу. Первоначально лесопокрытые территории подвергаются пассивному воздействию с точки зрения возникновения пожаров (если речь идет о населенном пункте, то говорят о посещаемости лесной территории жителями). Следующая фаза имеет вероятностный характер и определяет сценарий выбора причины возникновения на первом этапе, а вероятный источник зажигания на втором. А

вот процесс зажигания ЛГМ конкретным источником с учетом метеорологических условий может быть описан детерминированной математической моделью.

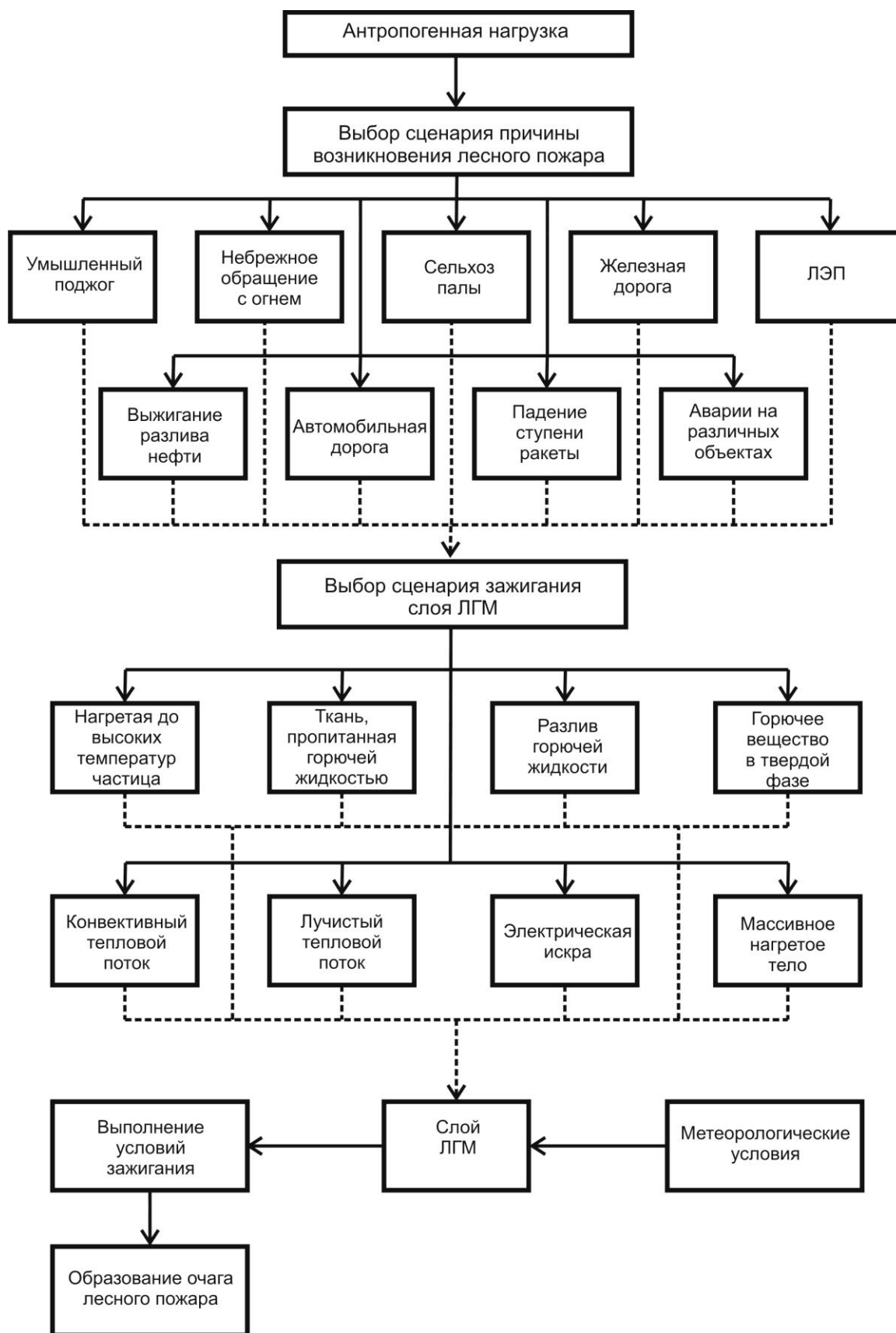


Рис. 3. Обобщенный механизм возникновения лесного пожара от антропогенной нагрузки

В статистике зачастую фигурируют лесопожарные происшествия с указанием, что причина неустановленна. Одним из вариантов может быть воспламенение ЛГМ в результате действия сфокусированного солнечного излучения через природный или антропогенный концентратор. В качестве природного концентратора энергии могут выступать крупные капли смолы хвойных деревьев, а в качестве антропогенного – частично или полностью заполненные жидкостью стеклянные емкости или их осколки [18]. На рис. 4 представлен обобщенный механизм возникновения лесного пожара по неустановленным причинам в предположении воздействия сфокусированного потока солнечного излучения.

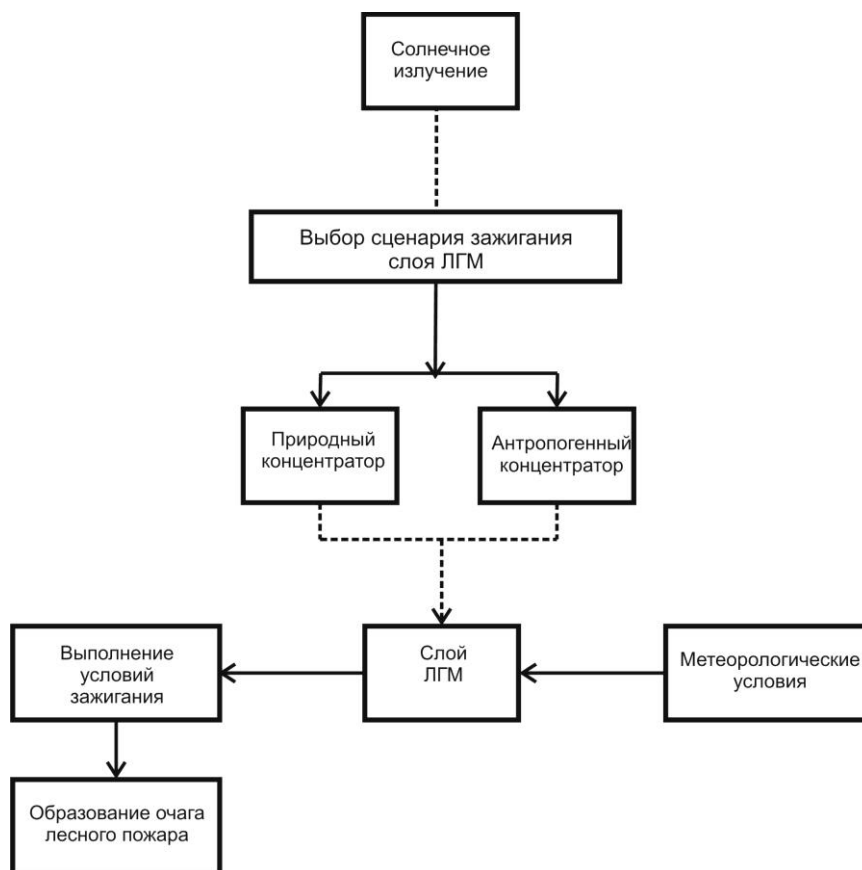


Рис. 4. Механизм возникновения лесного пожара по неустановленной причине

Комбинации ЛГМ в образовании слоев достаточно обширны [19]. Одним из возможных вариантов упрощения множества исходных данных является ввод эталонного слоя ЛГМ. Такой подход уже использован при разработке канадской системы [12] и российских лесопожарных показателей засухи [9]. Основную опасность представляют пожары в хвойных и смешанных лесах. Будет логичным ввести эталонный слой напочвенного ЛГМ из опада хвои. Сосна во многих регионах является преобладающей породой, а ее ареал охватывает практически всю территорию бореальных лесов России [20].

Как было указано выше, зарубежные индексы и критерий Нестерова в качестве результата выдают числовое значение в пределах какой-либо шкалы (которая не всегда имеет четкие верхние границы) и не являются физически содержательными. Последнее время автором интенсивно развивается детерминированно-вероятностный подход к прогнозу лесной пожарной опасности. Выходные значения в результате такой оценки являются вероятностью возникновения лесных пожаров, а не абстрактным числовым значением. Факторы антропогенная нагрузки и грозовая активность с точки зрения теории вероятностей могут быть как несовместными, так и совместными событиями. Первый случай соответствует следующему сценарию поведения человека в лесу: с наступлением грозы человек стремится покинуть лесную территорию или укрыться (то есть антропогенная нагрузка в соответствии с этим сценарием отсутствует в момент грозовой активности). Для учета различных сценариев было разработано три поколения детерминированно-вероятностных критериев оценки лесной пожарной опасности [21-23].

Анализ статистики возникновения лесных пожаров в результате антропогенной нагрузки позволил выделить основные причины и создать модель дифференцированной оценки лесной пожарной опасности. Считается, что возникновения лесных пожаров по различным причинам есть совместные и независимые события. В этом случае можно записать вероятность возникновения лесных пожаров по антропогенным причинам через противоположное событие. В итоге вероятность возникновения лесных пожаров по совокупности антропогенных причин определится по следующей формуле:

$$P(\text{ЛП}) = 1 - \prod_{i=1}^{10} (1 - P(\text{ЛП}_i)),$$

где ЛП_i – возникновение лесного пожара по i -ой антропогенной причине, ЛП – возникновение лесных пожаров по всей совокупности антропогенных причин. Вероятность лесного пожара по конкретной антропогенной причине определится по формуле:

$$P(\text{ЛП}_i) = P(A)P(A_{j,i}/A)P(\text{ЛП}/A, A_{j,i}),$$

где $P(A)$ – вероятность антропогенной нагрузки, $P(A_{j,i}/A)$ – вероятность i -ой антропогенной причины при условии посещения лесной территории в j -ый день недели, $P(\text{ЛП}/A, A_{j,i})$ – вероятность лесного пожара в j -ый день по i -ой антропогенной причине. Последняя вероятность определяется по формуле:

$$P(\text{ЛП}/A, A_{j,i}) = P(C)P(Z_i/C),$$

где $P(C)$ – вероятность того, что ЛГМ достаточно сухой, $P(Z_i/C)$ – вероятность зажигания ЛГМ в результате действия i -ой причины антропогенной нагрузки при условии, что ЛГМ достаточно сухой.

Модель может быть достаточно просто распространена на общий случай учета грозовой активности – введением события A_{11} – грозовая активность.

$$P(\text{ЛП}_{11}) = P(M)P(M_k/M)P(\text{ЛП}/M, M_k),$$

где $P(M)$ – вероятность сухих гроз, $P(M_k/M)$ – вероятность наземного грозового разряда на k -ый час суток при условии прохождения грозы, $P(\text{ЛП}/M, M_k)$ – вероятность лесного пожара на k -ый час суток при условии прохождения грозы, которая определяется по формуле:

$$P(\text{ЛП}/M, M_k) = P(C)P(Z_M/C),$$

где $P(C)$ – вероятность того, что ЛГМ достаточно сухой, $P(Z_M/C)$ – вероятность зажигания ЛГМ наземным грозовым разрядом при условии, что ЛГМ достаточно сухой.

Детерминированно-вероятностный подход позволяет учитывать не только статистические данные, но и результаты экспериментов и численных расчетов по зажиганию ЛГМ. Разработаны базовые физико-математические модели зажигания дерева наземным грозовым разрядом [24] и напочвенного покрова горячими частицами [25]. Для оценки лесной пожарной опасности в различных масштабах от минимальной лесотаксационной единицы до глобального разработана модель интегральной оценки вероятности возникновения лесных пожаров на контролируемой лесопокрытой территории [26]. В соответствии с требованиями к современной системе прогноза лесной пожарной опасности разработан проблемно-ориентированный подход ландшафтного распараллеливания [27], в рамках которого развивается комплекс прогноза лесной пожарной опасности.

Задачу совместного учета данных наблюдений и прогностической модели для наиболее точного описания пространственно-временного распределения метеополей называют задачей усвоения данных (в зарубежной литературе data assimilation) [28]. При разработке системы прогноза лесной пожарной опасности первостепенное значение имеют исследования в области создания С.У.Д.А.Н. Следует заметить, что детали реализации такой системы для целей прогноза лесной пожарной опасности могут отличаться от реализации систем усвоения данных в метеорологии. Предполагается, что на первом этапе осуществляется сбор и анализ статистической информации о возникновении лесных пожаров по вине человека. Фаза анализа осуществляет пространственную детализацию исходных данных с помощью сплайнов в рамках модели компандер-экспандер [29]. В качестве сравнения могут быть приведены системы усвоения данных на базе оптимальной интерполяции [30]. Завершающий этап предполагает получение прогнозной информации о пространственно-временной динамике антропогенной нагрузки на контролируемые лесопокрытые территории с помощью детерминированной математической модели [31]. Процессы принятия решений и поведения, несмотря на влияние многообразных факторов, не являются случайными [32], так как всем людям присущи общие реакции на информацию о структуре и

качествах пространства, общие механизмы восприятия этой информации для принятия решения. Люди со сходными полями информации проявляют сходные предпочтения мест отдыха, то есть ведут себя в географическом пространстве почти одинаково.

ППК является ядром информационно-вычислительной системы прогноза лесной пожарной опасности. Работу начинает корневой процесс параллельной программы, который считывает информацию из файлов, содержащих исходные данные. Прогностические поля метеоданных Гидрометцентра РФ представлены в коде GRIB и необходимо конвертирование входных данных во внутренний формат ППК. Для балансировки вычислительной нагрузки между ветвями параллельной программы в настоящее время используется статический алгоритм. Показано, что основное влияние на время сушки слоя ЛГМ (и соответственно на время расчета) оказывает его начальное влагосодержание. Этот факт также может быть положен в основу эвристики алгоритма балансировки. На следующем этапе корневой процесс осуществляет подготовку и рассылку информационных пакетов с исходными данными по всем ветвям параллельной программы. В каждой такой ветви для каждого лесотаксационного выдела определяются времена сушки (t_c) и загорания антропогенным (t_3^A) и природным (t_3^M) источниками, которые используются для определения вероятности возникновения пожара. Для задания некоторых параметров следует использовать генератор псевдослучайных чисел. На завершающем этапе корневой процесс собирает информационные пакеты со всех ветвей параллельной программы, проводит интегральную оценку лесной пожарной опасности и выводит данные в файлы результатов. Алгоритм функционирования ППК представлен на рис. 6. Разработка этого комплекса идет поэтапно. В настоящее время определены следующие этапы развития (рис. 5).

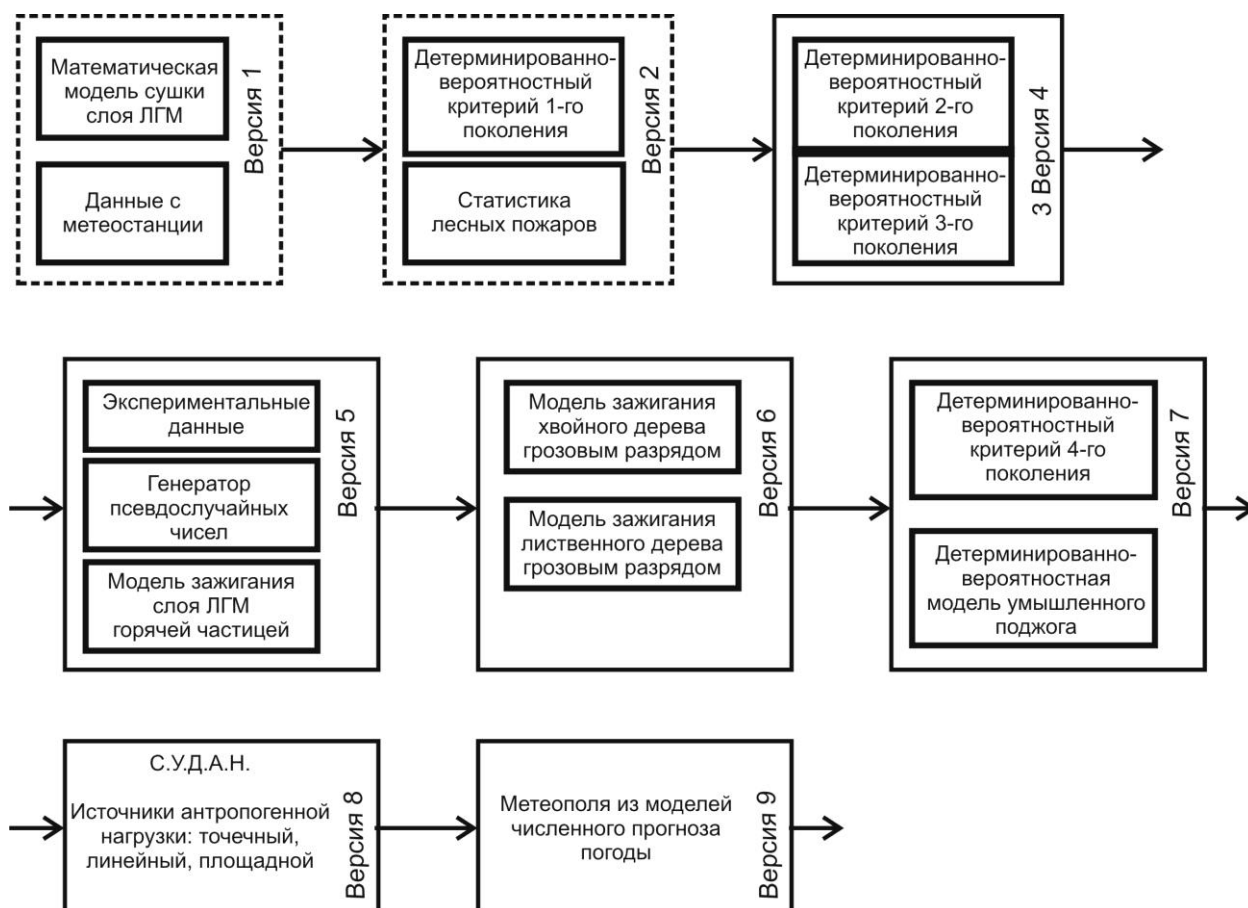


Рис. 5. Этапы разработки параллельного программного комплекса прогноза лесной пожарной опасности

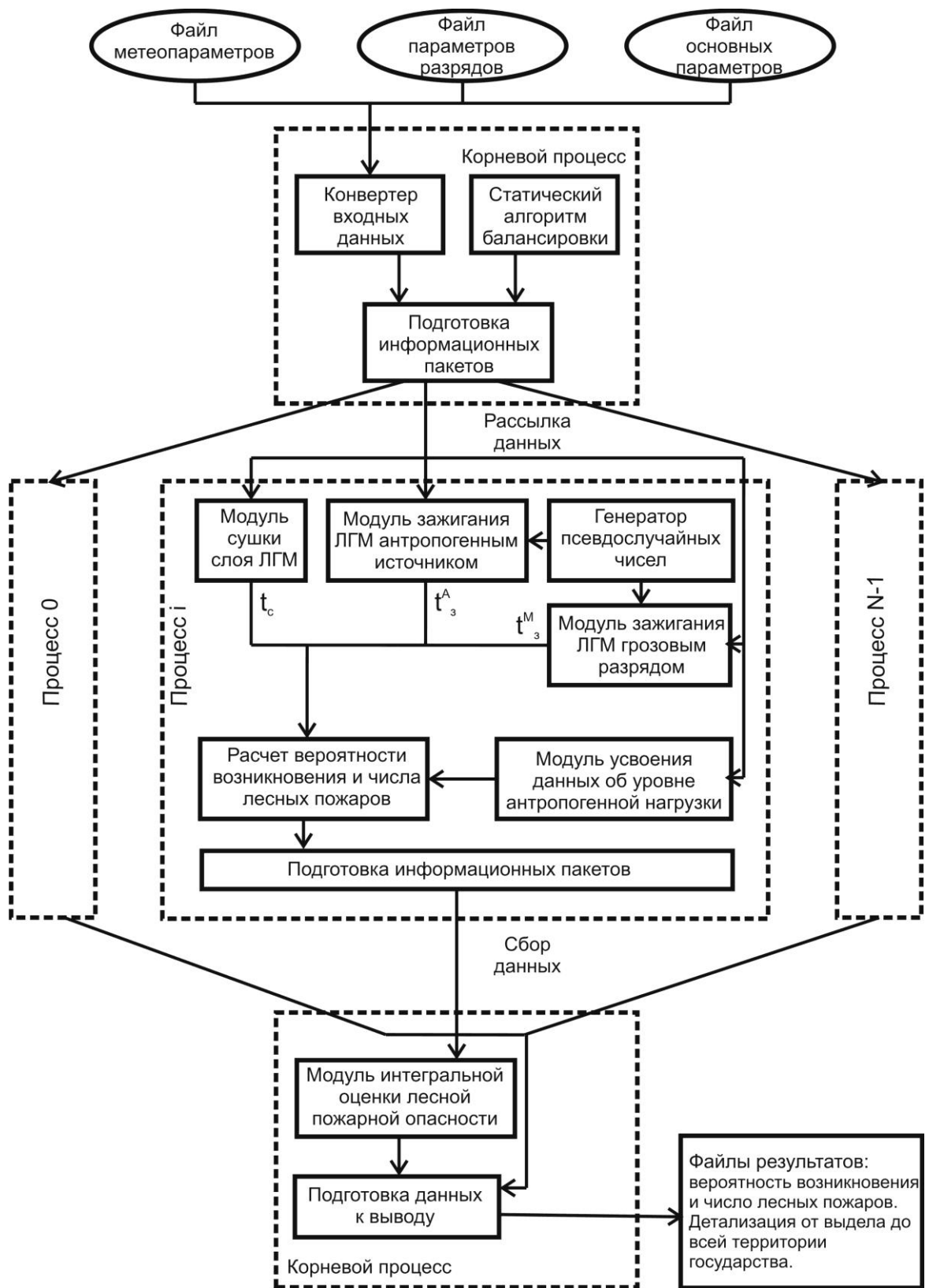


Рис. 6. Алгоритм функционирования параллельного программного комплекса оценки лесной пожарной опасности

4. Прогноз распространения лесных пожаров на базе суперкомпьютерных технологий

Рассматриваемые задачи теории лесных пожаров в настоящее время распараллелить средствами мелкозернистого распараллеливания не представляется целесообразным, т.к. в этом случае в работе параллельной программы доля времени, соответствующая межпроцессорным обменам будет сравнима, а может быть и превысит, время расчетов, что повлечет за собой крайне низкую эффективность. Более того, применение в качестве вычислителя кластерных систем станет невозможным, т.к. потребуются вычислительная система с очень высокими показателями работы коммуникационной подсистемы. Поэтому в настоящей работе рассматривается крупнозернистое распараллеливание.

Проблемы численной реализации рассматриваемых задач теории лесных пожаров связаны с обеспечением точности и устойчивости решений систем нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных. С одной стороны, это требует уменьшения размеров шагов дискретизации и увеличения разрядности, что в свою очередь усложняет алгоритм и требует больших вычислительных ресурсов и, как следствие, распараллеливания вычислительных операций. С другой стороны, применяются неявные численные методы (например, итерационно-интерполяционный метод), что в свою очередь затрудняет распараллеливание.

4.1 Физико-математическая декомпозиция задачи по составляющим подпроцессам

Одним из подходов является декомпозиция исследуемого сложного физического явления лесного пожара по составляющим его подпроцессам. Физическая декомпозиция может быть применена для решения задачи моделирования сложного лесного пожара, когда задача решается в сопряженной постановке. Примерами таких задач может служить сложный верховой пожар, когда снизу идет его подпитка низовым лесным пожаром, а вверху осуществляется сопряженный тепло- и массообмен с приземным слоем атмосферы.

В каждом отдельном блоке может использоваться более глубокий уровень распараллеливания уже каждого отдельно взятого подпроцесса, отвечающего какому-либо физико-математическому процессу. Следует заметить, что очень важным является попытка отыскать в самой задаче так называемый "естественный параллелизм" и результат этого поиска во многом зависит от того, какие стороны физического процесса (лесного пожара) выделяет исследователь.

4.2 Геометрическая декомпозиция области решения

Вторым подходом к организации распараллеливания задач теории лесных пожаров является метод геометрической декомпозиции области решения задачи. Это позволяет существенно снизить временные затраты на получение результата, а так же решить проблему с разделением и рассылкой всего объема данных на различные узлы МВС. Данный вид декомпозиции заключается в разделении всей области интегрирования на ряд подобластей и одновременном расчете в каждой такой подобласти с последующей сшивкой решений.

Очень важным фактом является то, что геометрическая декомпозиция существенно зависит от математической постановки задачи, вида систем уравнений, используемых численных методов. Наиболее полный перечень требований представлен в работах [33,34]. Отметим, что ключевым моментом является однородность математической модели, однородность постановки задачи, однородность алгоритма, однородность информационной среды.

В общем случае лесной пожар представляет собой трехмерный объект, однако для понимания сути физического явления, а также принятия конкретных решений по результатам математического моделирования достаточно иметь представления о его распространении, рассмотрев два частных 2D-случая: распространение в пространственно однородном по координате u лесном массиве в плоскости Oxz , а также в плоскости Oxy , когда по координате z проводится усреднение.

1) 2D-случай в плоскости Oxz . Предполагается, что ось x связана с направлением ветра, тогда имеется преобладание распространения фронта лесного пожара в данном направлении и может быть применена следующая геометрическая декомпозиция - в плоскости Oxz параллельно направлению ветра разрежем лесной массив по высоте древостоя на одинаковые по толщине полосы и в каждой такой полосе организуем свой вычислительный процесс [35,36] (следует заметить, что в общем случае толщина полос может быть и неодинаковой, так как разные ярусы

леса могут иметь различные толщины [37]). Схема декомпозиции области решения представлена на рисунке 7.а.

2) 2D-случай в плоскости Oxy . В целом распараллеливание производится аналогичным образом вышеописанному случаю. В плоскости Oxy параллельно направлению ветра лесной массив разрезается на одинаковые по ширине полосы и в каждой такой полосе организуем свой вычислительный процесс [35,36]. На рисунке 7.б представлена схема декомпозиции области решения. Геометрическая декомпозиция может быть использована как распараллеливание более глубокого уровня на следующем этапе после декомпозиции по физико-математическим процессам явления.

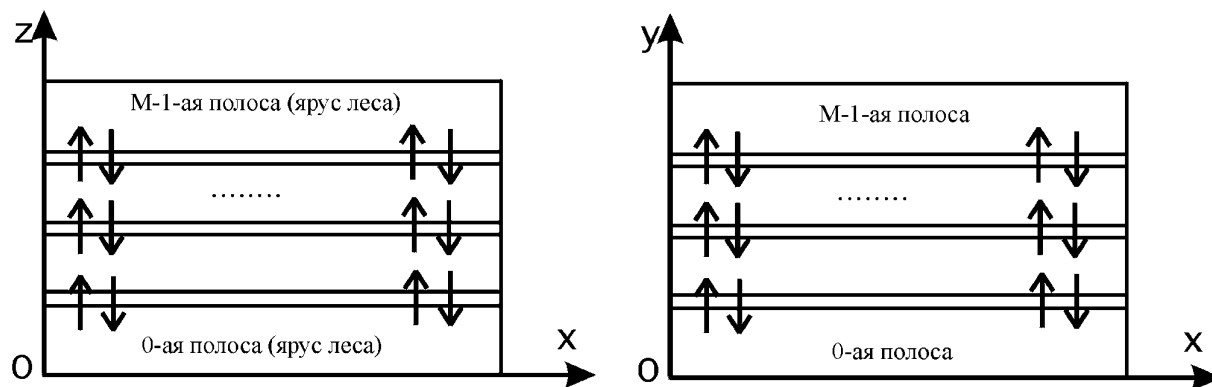


Рис. 7. Геометрическая декомпозиция области расчета

4.3 Конвейерный алгоритм распараллеливания

В случае преобладания распространения фронта лесного пожара в каком-либо направлении возможен еще один способ геометрической декомпозиции. В данном случае область решения разбивается на несколько крупных подобластей. Разделение ведется полосами, перпендикулярными направлению движения фронта лесного пожара. Например, в рассматриваемой области решения могут быть естественным образом выделены участки леса, соответствующие различным типам леса, дорогам, просекам, зонам лесного массива, по которым фронт лесного пожара еще не прошел. Кроме того, сам фронт лесного пожара имеет сложную структуру, в которой могут быть выделены зоны нагрева, сушки и пиролиза ЛГМ, горения газообразных и догорания конденсированных продуктов пиролиза ЛГМ [37]. В этом случае на первом этапе вычислений рассчитывается решение на первом временном шаге в зоне 1, на втором этапе рассчитывается решение на втором временном шаге в зоне 1 и на первом в зоне 2, и т.д. То есть выполняется конвейерный вариант расчета. На заключительных этапах процесс идет как бы в обратном направлении - сначала вычисления выполняются на всех процессорах, а на самом последнем этапе один процессор обрабатывает последний временной шаг в последней зоне. На рисунке 8 представлена, например, декомпозиция области решения при конвейерной параллельной реализации для области Oxz , на первом (8.а) и четвертом (8.б) этапах для случая, когда МВС содержит 4 процессора (либо задействовано в расчетах только 4 процессора)

Ступени вычислительного конвейера могут быть построены таким образом, что каждая ступень будет обладать своей вычислительной нагрузкой, либо конвейерные ступени будут равны по вычислительной нагрузке. Заметим, что не следует в таком случае выделять много геометрических зон, так как увеличится время простаивания процессоров МВС, которые не задействованы на первых и заключительных этапах вычислительного процесса. Данный алгоритм распараллеливания будет более эффективен на МВС с малым числом процессоров.

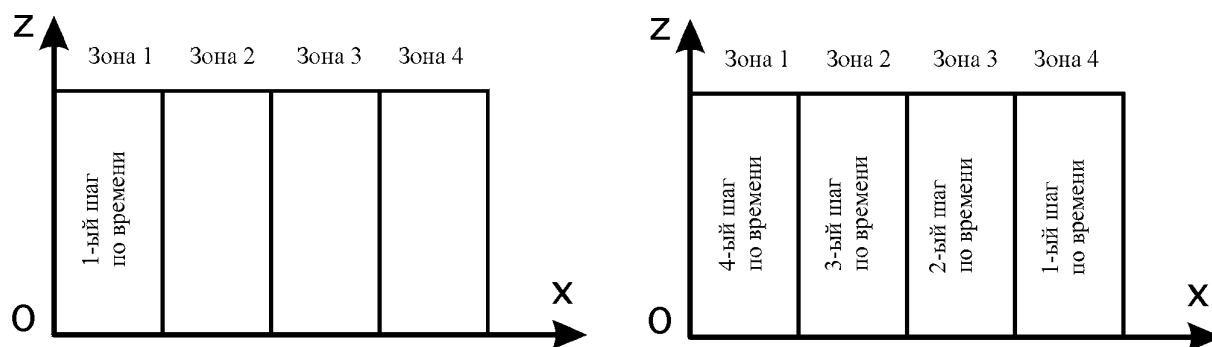


Рис. 8. Декомпозиция области решения при конвейерной обработке

5. Оценки времени исполнения, ускорения и эффективности параллельных программ

Может быть произведена оценка общего времени, которое необходимо затратить на реализацию комплексного математического вычислительного эксперимента

$$T_M^{CE} \approx n_i n_e n_p n_t n_0 T_M + T'_M.$$

Множители, которые присутствуют в данной формуле, соответствуют следующим операциям [38]: 1) проведение n_i "внутренних" итераций для решения линейных подсистем в сеточных подобластях (полосах); 2) проведение n_e "внешних" итераций между подобластями (ярусы либо полосы лесного массива) для решения полной алгебраической системы в сеточной области решения; 3) проведение n_p итераций по различным физическим процессам (например, в нашем случае когда рассматривается распространение верхового лесного пожара по нескольким ярусам лесного массива, либо по однородным полосам лесного массива); 4) проведение n_t "нелинейных" итераций, так как свойства коэффициентов уравнений зависят от искомых функций процесса; 5) расчет n_t временных шагов; 6) реализация n_0 вариантов расчетов, которые соответствуют различным сценариям распространения верхового пожара (многовариантный расчет по входным данным и параметрам задачи), 7) множитель T_M - время реализации базового элемента вычислительного алгоритма на МВС, содержащей M процессоров.

Время, которое необходимо на выполнение рассылки исходных данных и сбора результатов, обозначено через T'_M . Если при распределении данных по узлам была использована некоторая звистика, то на часть узлов попадут "лишние" данные [39], время обработки которых тоже присоединим к T'_M . Ускорение в свою очередь определяется по формуле [40]:

$S_M^{CE} = T_0^{CE} / T_M^{CE} = M / (1 + \alpha_M^{CE})$, где T_0^{CE} - время последовательной реализации комплексного математического вычислительного эксперимента на однопроцессорной вычислительной технике, α_M^{CE} - потери на коммуникации и дополнительные итерации, M - число процессоров МВС.

Эффективность определится как [40]:

$$E_M^{CE} = T_0^{CE} / (M T_M^{CE}).$$

Заключение

Таким образом, в настоящей работе описаны технологии прогноза лесной пожарной опасности, которые могут быть эффективно реализованы на базе суперкомпьютерных разработок. Как показало предпроектное исследование, современный уровень развития области прогноза в Российской Федерации не соответствует мировому уровню науки и техники. Необходимо нивелировать или сократить отставание отечественных технологий прогноза лесной пожарной опасности от мировых разработок. Наибольшие перспективы открываются в случае реализации методов прогноза лесной пожарной опасности на базе суперкомпьютерных технологий.

Литература

1. Софронов М.А., Вакуров А.Д. Огонь в лесу. Новосибирск: Наука. 1981. 128 С.
2. Кузнецов Г.В., Барановский Н.В. Прогноз возникновения лесных пожаров и их экологических последствий. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. 301 С.
3. Янко И.В. Пирологическая оценка территории Томской области. Дисс. ... канд. геог. наук. Томск: Томский государственный педагогический университет, 2005. 174 С.
4. Latham D., Williams E. Lightning and forest fires // Forest fires: Behavior and Ecological Effects. Netherlands, Amsterdam: Elsevier. 2001. P. 375 – 418.

5. Canadian Forest Fire Danger Rating System / B.J. Stocks, M.E. Alexander, R.S. McAlpine et al. – Canadian Forestry service, 1987. – 500 P.
6. Deeming J.E., Burgan K.E., Cohen J.D. The national fire danger rating system. Ogden, Utah: USDA Forest Service, General Technical report. INT-39. 1978. 66 P.
7. Camia A., Barbosa P., Amatulli G., San-Miguel-Ayanz J. Fire Danger Rating in the European Forest Fire Information System (EFFIS): Current developments // *Forest Ecology and Management*. 2006. Vol. 234. Supplement 1. P. S20.
8. ГОСТ Р 22.1.09-99 “Мониторинг и прогнозирование лесных пожаров. Общие требования”
9. Нестеров В.Г. Горимость леса и методы ее определения. М.; Л.: Гослесбуиздат, 1949. 76 С.
10. Богданов А.В., Корхов В.В., Мареев В.В., Станкова Е.Н. Архитектуры и топологии многопроцессорных вычислительных систем. Курс лекций. Учебное пособие. – М.: ИНТУИТ.РУ “Интернет-Университет Информационных Технологий”, 2004. 176 С.
11. Lee B.S., Alexander M.E., Hawkes B.C., Lynham T.J., Stocks B.J., Englefield P. Information systems in support of wildland fire management decision making in Canada // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2002. Vol. 37. N 1-2. P. 185 – 198.
12. Van Wagner C.E. Development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System / Petawawa. Canadian Forest Service. Technical report 35. – Ontario, 1987. 37 P.
13. Martell D.L. A Markov Chain Model of Day to Day Changes in the Canadian Forest Fire Weather Index // *International Journal of Wildland Fire*. 1999. Vol. 9. N 4. P. 265 – 273.
14. Taylor S.W., Alexander M.E. Science, technology and human factors in fire danger rating: the Canadian experience // *International Journal of Wildland Fire*. 2006. Vol. 15. N 1. P. 121 – 135.
15. Viegas D. X., Bovio G., Ferreira A., Nosenzo A., Sol B. Comparative Study of Various Methods of Fire Danger Evaluation in Southern Europe // *International Journal of Wildland Fire*. 1999. Vol. 9. N 4. P. 235 – 246
16. Барановский Н.В. Концептуальная база российской системы прогноза лесной пожарной опасности // *Безопасность в техносфере*. 2010. № 6. С. 34 – 42.
17. Гришин А.М. Математическое моделирование и прогноз катастроф: Методическое пособие. Томск: Центр образования и исследований по механике реагирующих сред и экологии Томского государственного университета, 1999. 24 с.
18. Барановский Н.В. Математическое моделирование зажигания слоя лесного горючего материала сфокусированным потоком солнечного излучения // *Пожаровзрывобезопасность*. 2011. Т. 20. № 8. С. 34 – 37.
19. Волокитина А.В., Софронов М.А. Классификация и картографирование растительных горючих материалов. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. 314 С.
20. Абаимов В.Ф. Дендрология: учеб. Пособие для студентов ВУЗов. 3-е изд., перераб. М.: Издательский центр “Академия”, 2009. 368 С.
21. Барановский Н.В. Математическое моделирование наиболее вероятных сценариев и условий возникновения лесных пожаров. Дисс. ... канд. физ.-мат. наук. Томск: Томский государственный университет. 2007. 153 С.
22. Барановский Н.В. Оценка вероятности возникновения лесных пожаров с учетом метеоусловий, антропогенной нагрузки и грозовой активности // *Пожарная безопасность*. 2009. № 1. С. 93 – 99.
23. Барановский Н.В. Модель прогноза и мониторинга лесной пожарной опасности // *Экология и промышленность России*. 2008. № 9. С. 59 – 61.
24. Кузнецов Г.В., Барановский Н.В. Математическое моделирование зажигания дерева хвойной породы наземным грозовым разрядом // *Пожаровзрывобезопасность*. 2008. Т. 17. № 3. С. 41 – 45.
25. 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.
26. Барановский Н.В. Интегральная по пространству оценка лесной пожарной опасности // *Пожаровзрывобезопасность*. 2008. Т. 17. № 6. С. 38 – 42.
27. Барановский Н.В. Ландшафтное распараллеливание и прогноз лесной пожарной опасности // *Сибирский журнал вычислительной математики*. 2007. Том 10, № 2. С. 141 – 152.
28. Климова Е.Г. Восстановление метеорологических полей по данным наблюдений. Дисс. ... д-ра физ.-мат. наук. Новосибирск: ИВТ СО РАН. 2005. 233 С.

29. Барановский Н.В. Модель компандер-экспандер для системы усвоения данных об уровне антропогенной нагрузки на контролируемой лесопокрытой территории. // Современные проблемы информатизации в моделировании и анализе сложных систем: Сб. трудов. Вып. 12. Воронеж: "Научная книга", 2007. С. 149 – 152.
30. Flemming J., Reimer E., Stern R. Data assimilation for CT-Modelling based on optimum interpolation // Preprints of 25th NATO/CCMS International Technical Meeting on Air Pollution Modelling and its Application. Belgium, Louvain-la-Neuve: Catholic University of Louvain. 2001. P. 173 – 1180.
31. Барановский Н.В. Прогностическая математическая модель для системы усвоения данных об уровне антропогенной нагрузки на лесопокрытые территории // Современные проблемы информатизации в моделировании и социальных технологиях: Сб. трудов. Вып. 13. Воронеж: Научная книга, 2008. С. 202 – 207.
32. Андреев Ю.А., Ларченко Г.Ф. Социально-психологические аспекты рекреационных посещений леса и возникновение пожаров // Лесные пожары и борьба с ними. М.: ВНИИЛМ, 1987. С. 251-263.
33. Ковеня В.М., Тарнавский Г.А., Черный С.Г. Применение метода расщепления в задачах аэродинамики, 1990. 245 С.
34. Хмельнов Д.Е Улучшенные алгоритмы решения разностных и $\$q\$$ -разностных уравнений // Программирование. № 2. С.70-78.
35. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Аддитивные схемы для задач математической физики. М.: Наука. 2001. 320 С.
36. Ngiamsoongnirn K., Juntasaro E., Juntasaro V., Uthayopas P. A parallel semi-coarsening multigrid algorithm for solving the Reynolds-averaged Navier-Stokes equations // Proceedings of International Conference HPCAsia-04. IEEE Computer Society, 2004. P. 258 – 266.
37. Гришин А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск: Наука, 1992. 407 с.
38. Ильин В.П. О стратегиях распараллеливания в математическом моделировании // Программирование. 1999. № 1. С. 41-46.
39. Аветисян А.И., Гайсарян С.С., Самоваров О.И. Возможности оптимального выполнения параллельных программ, содержащих простые и итерированные циклы, на неоднородных параллельных вычислительных системах с распределенной памятью // Программирование, № 1, 2002, С. 38-54.
40. Барановский Н.В. Ландшафтное распараллеливание и прогноз лесной пожарной опасности // Сибирский журнал вычислительной математики. 2007. Том 10, № 2. С. 141 – 152.