

ПРОЕКТ ВЕБ-ОРИЕНТИРОВАННОЙ ГЕОГРАФИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПРОГНОЗА ЛЕСНОЙ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Н.В. Барановский, М.В. Жарикова, Е.Н. Ляшенко

В статье рассматривается концептуальный проект создания веб-ориентированной геоинформационной системы прогноза лесной пожарной опасности. Проведено предпроектное исследование, которое показало значительное научное и технологическое отставание методик, применяемых на территории СНГ, от европейской и североамериканских систем прогноза лесной пожарной опасности. Предложена модель дифференцированной оценки лесной пожарной опасности по антропогенным и природным причинам. Рассматриваются проектные и технологические особенности реализации геоинформационной системы для визуализации посредством всемирной сети Интернет и организации прогнозного мониторинга на базе суперкомпьютеров и параллельных вычислительных технологий.

1. Введение

В последнее время возрастает актуальность тематики лесных пожаров. Достаточно только отметить события 2010 года, когда пожарные происшествия фиксировались на территории всей Центральной России [1]. Пожары наносят ущерб и ряду других государств СНГ, например, Беларуси и Украине [2,3]. В Российской Федерации ведутся работы по развитию Информационной системы дистанционного мониторинга лесных пожаров (ИСДМ-Рослесхоз) [4]. Система доступна только авторизованным пользователям. В тоже время в Южной Европе, США, Канаде прогнозная информация открыто размещается в сети Интернет [5]. Недостатком всех зарубежных систем является использование в качестве оценок уровня лесной пожарной опасности абстрактных индексов [5]. В тоже время в РФ интенсивно развивается детерминированно-вероятностный метод прогнозирования лесной пожарной опасности [6,7]. В РФ 1807 лесхозов, 7851 лесничество, в каждом лесничестве более 100 кварталов, в каждом квартале может быть до 100 выделов (однородных участков). Расчет параметров возгорания для одного участка на однопроцессорной технике требует от 3 до 15 часов затрат вычислительного времени, так как используются пространственные модели зажигания лесных горючих материалов. Представляется целесообразным создание центра прогноза природных пожаров в регионе стран СНГ на базе суперкомпьютеров [8], параллельных вычислительных технологий [9] и веб-ориентированной географической информационной системы детерминированно-вероятностного прогноза лесной пожарной опасности [10].

Цель исследования – создание концептуального проекта веб-ориентированной географической информационной системы детерминированно-вероятностного прогноза лесной пожарной опасности с привлечением технологий распараллеливания вычислений на суперкомпьютерах.

2. 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) [12] 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 [13] 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.

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 1км 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) [15]. Структура американской системы представляет собой абстрактную модель влияния различных факторов и условий на процесс возникновения и распространения пожаров. Система выдает четыре индекса [15]: 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 зажигания. 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 [16]. Все методы представляют численный индекс, который растет с увеличением опасных условий. Южноевропейские методы оценки пожарной опасности [16], 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. 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 [16]. Канадский метод и модифицированный метод Нестерова (Португалия) показали наилучшие общие эксплуатационные качества [16]. 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 [16] и канадский метод [13]. 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) [17]. 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. Преимущества и недостатки Европейской системы подобны североамериканским аналогам, так как наиболее качественный компонент представлен канадским методом. 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) [18]. В 1999 году принят ГОСТ Р 22.1.09-99 “Мониторинг и прогнозирование лесных пожаров. Общие требования” [19], который используется по настоящее время. Данный стандарт основан на приведенном выше комплексном метеорологическом показателе [18]. Основной недостаток настоящего стандарта в том, что игнорируется влияние факторов антропогенной нагрузки и грозовой активности. В этом

отношении методика существенно уступает зарубежным аналогам. Вторым недостатком (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.

3. Методика прогноза лесной пожарной опасности

В Томском политехническом университете в последнее время интенсивно развивается детерминированно-вероятностный метод прогнозирования лесной пожарной опасности. Спектр событий возникновения лесных пожаров по различным причинам будет следующим [7]: А1 – умышленный поджог, А2 – небрежное обращение с огнем, А3 – сельскохозяйственные палы, А4 – влияние железной дороги, А5 – влияние линий электропередач (ЛЭП), А6 – выжигания разлива нефти, А7 – влияние автомобильных трасс, А8 – падение ступени ракеты, А9 – аварии на технологических объектах, расположенных на лесопокрытых территориях, А10 – пожар в результате воспламенения от сфокусированного стеклянной бутылкой солнечного излучения, А11 – причина не установлена (так как возможны другие неустановленные причины), А12 – пожар от грозовой активности. Согласно теории вероятностей итоговая вероятность возникновения лесного пожара по совокупности причин определится по формуле [7]:

$$P(\text{ЛП}) = 1 - \prod_{i=1}^{12} (1 - P(\text{ЛП}_i)) \quad (1)$$

где $P(\text{ЛП}_i)$ – вероятность возникновения лесного пожара по конкретной причине.

ваным источником солнечного излучения (определяется эмпирически или численно). Вероятность возникновения лесных пожаров по метеоусловиям определяется по детерминированной модели сушки слоя ЛГМ под воздействием внешних условий [20].

4. Описание геоинформационной системы

4.1 Архитектура ГИС оценки лесной пожарной опасности

Архитектура ГИС оценки лесной пожарной опасности основана на классическом шаблоне проектирования MVC (Model-View-Controller) и состоит из трех уровней [21]:

- модель (Model) – предоставляет данные (обычно для представления), а также реагирует на запросы (обычно от контроллера), изменяя свое состояние;
- представление (View) – отвечает за отображение информации (пользовательский интерфейс);
- поведение (Controller) – интерпретирует данные, введенные пользователем, и информирует модель и представление о необходимости соответствующей реакции (управляющая логика).

Логическая часть разрабатываемой ГИС (уровень поведения) состоит из трех основных блоков, посвященных долгосрочному прогнозированию пожароопасности, краткосрочному прогнозированию пожароопасности и расчету общей вероятности возникновения лесного пожара соответственно (рис.1).

Уровень представления – это электронная карта, предоставляемая пользователю. Карта имеет послойную структуру и состоит из статических и динамических слоев.

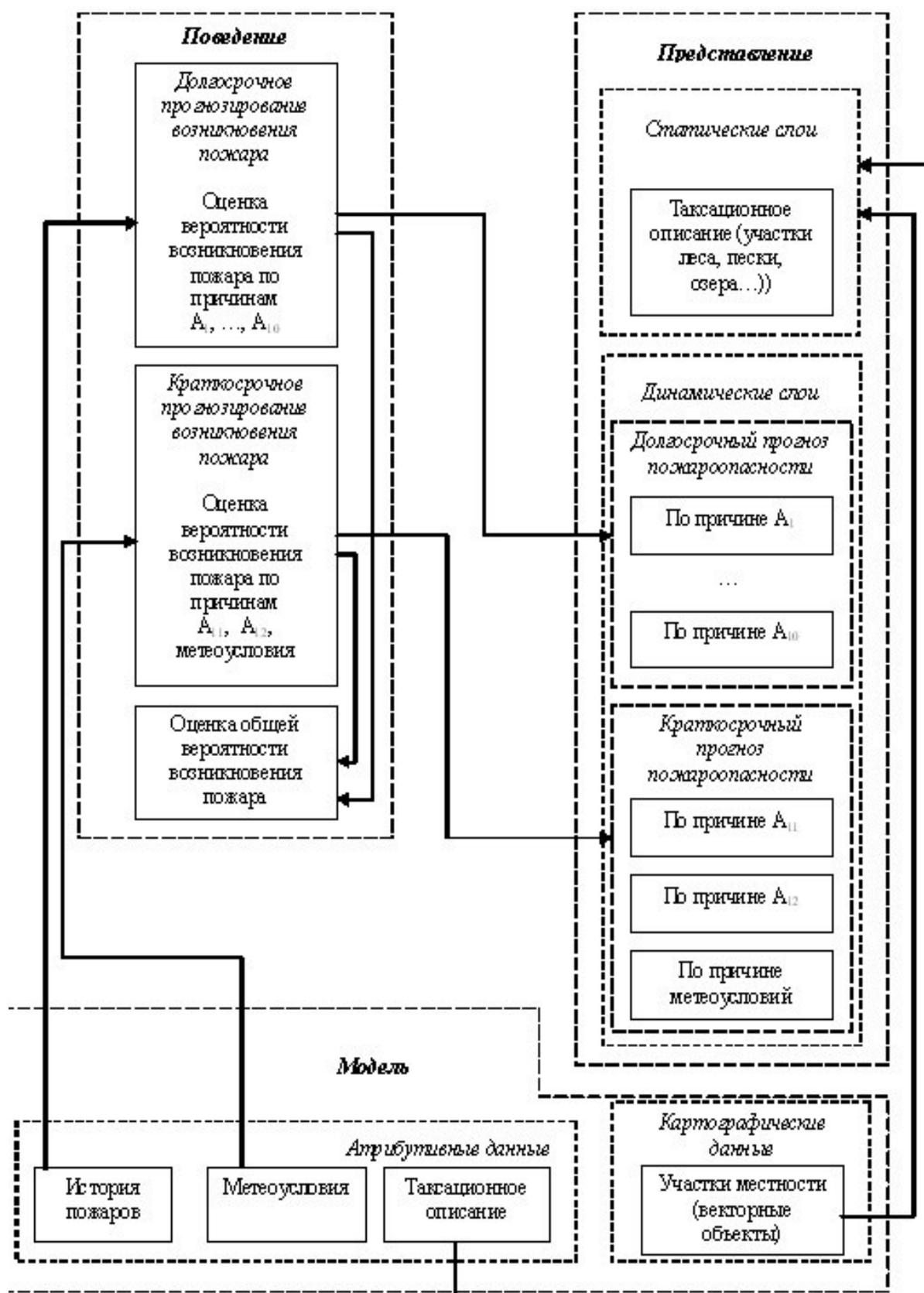


Рис. 1. Архитектура ГИС прогноза лесной пожарной опасности

Уровень данных (модель) описывает пространственные данные, которые состоят из двух взаимосвязанных частей: картографические и фактологические (атрибутивные). Техническое описание системы. Для технической реализации ГИС были использованы следующие программные средства:

MapServer - это многофункциональная платформа для быстрого, легкого и эффективного распространения картографической информации, основанная на Map Guide Open Source [22].

К основным возможностям MapServer можно отнести: доступ к картографическим и проектным данным через Интернет, интуитивно понятные интерактивные карты, простота установки и развертывания, удобство формирования карт и создания картографических Web-приложений, интеграция и возможности взаимодействия с корпоративными системами управления базами данных (СУБД), мощные и гибкие возможности API-интерфейса, оптимизация финансовых затрат благодаря поддержке платформы MapGuide Open Source.

Картографическое ядро веб-ориентированной географической информационной системы состоит из двух основных компонент: CGI-приложения для формирования растрового изображения и JavaScript-модуля для манипулирования полученным изображением и запроса новых частей, в случае необходимости. В качестве CGI-приложения были задействованы UMN Map Server.

С клиентской стороны задействован JavaScript-модуль OpenLayers. OpenLayers предоставляет базовые функции для создания веб-карт.

База данных веб-ориентированной географической информационной системы основана на СУБД PostgreSQL. PostgreSQL это мощная объектно-реляционная СУБД с открытыми исходными текстами. К основным достоинствам PostgreSQL можно отнести: поддержку БД практически неограниченного размера; мощные и надёжные механизмы транзакций и репликации; расширяемую систему встроенных языков программирования: в стандартной поставке поддерживаются PL/pgSQL, PL/Perl, PL/Python и PL/Tcl; дополнительно можно использовать PL/Java, PL/PHP, PL/Py, PL/R, PL/Ruby, PL/Scheme и PL/sh, а также имеется поддержка загрузки C-совместимых модулей; наследование; легкую расширяемость. Архитектура СУБД PostgreSQL основана на модели «клиент-сервер». Всю базу данных веб-ориентированной ГИС можно разделить на структурные подразделы.

5. Взаимодействие ГИС и параллельного программного комплекса

5.1 Ядро информационно-вычислительной системы

Параллельный программный комплекс (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 [20]. 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 (tc) и зажигания антропогенным (tzA) и природным (tzM) 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. 2.

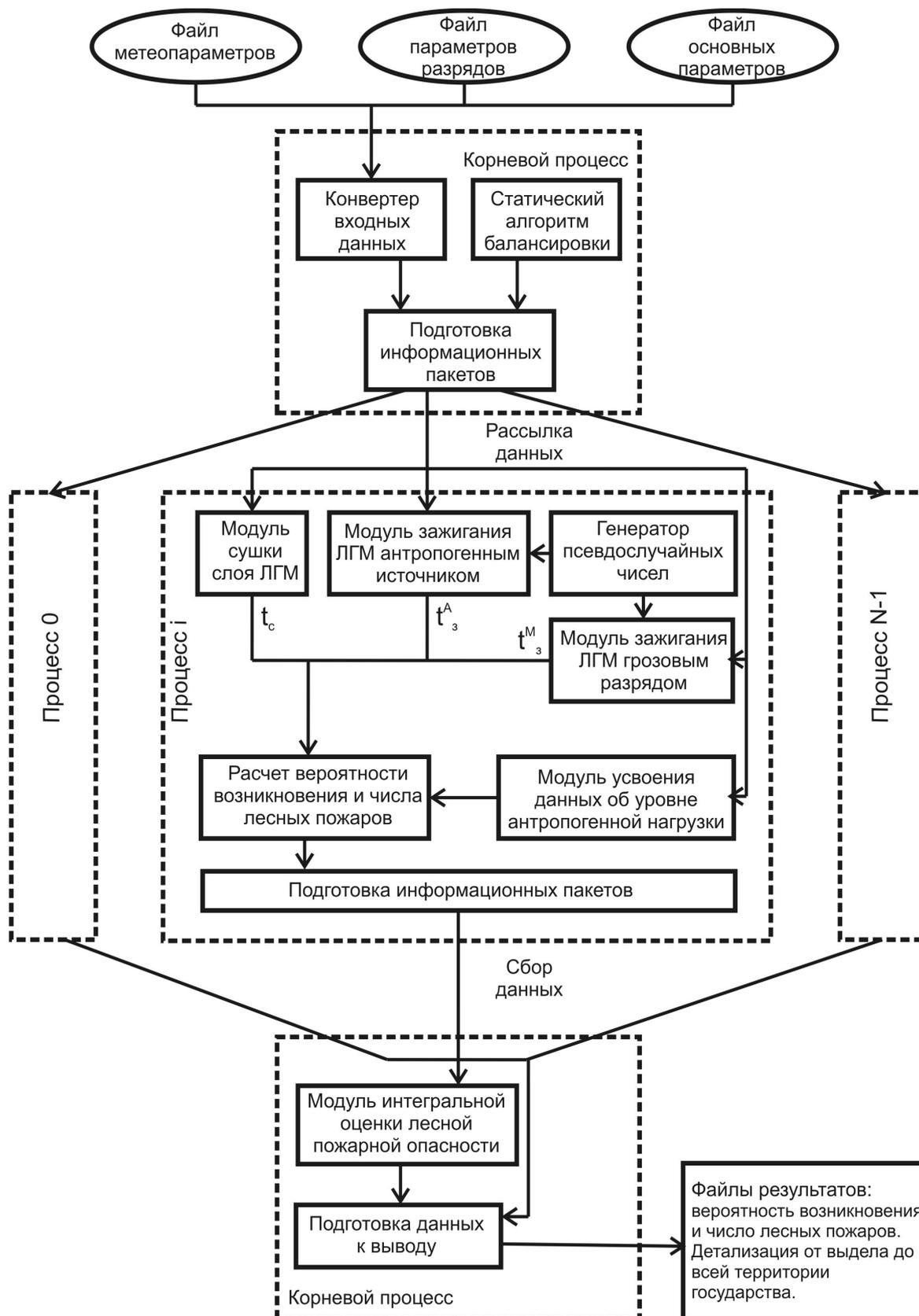


Рис. 2. Алгоритм работы параллельного программного комплекса [23]

Параллельная реализация расчетно-вычислительного ядра планируется с применением библиотеки передачи сообщений Message Passing Interface (MPI). После считывания данных необходимо организовать трансляцию входной информации по ветвям параллельной программы. Отсутствие взаимодействий типа точка-точка в процессе выполнения параллельной программы обеспечивает достижение практически теоретически максимальной эффективности и ускорения распараллеливания. Перед рассылкой информационных пакетов предполагается организовать упаковку данных.

5.2 Визуализация прогноза в ГИС

Для визуализации результатов прогноза предлагается организовать взаимодействие ППК, работающего на многопроцессорной вычислительной системе (МВС), с веб-ориентированной географической информационной системой. Алгоритм взаимодействия представлен на рис. 3. Корневой процесс параллельной программы считывает входные данные и распределяет их по узлам многопроцессорной вычислительной системы. Затем происходит параллельная обработка исходных данных и вычисление параметров возгорания для отдельных участков лесопокрытой территории. Данная информация в качестве входных параметров поступает в детерминированно-вероятностный блок расчета прогнозной информации (вычисление вероятности возникновения лесных пожаров по широкому спектру причин и определение прогнозируемого числа лесных пожаров на контролируемой территории с детализацией - лесничество). Веб-ориентированная геоинформационная система послойно отображает прогнозную информацию на электронной карте и использует подсистему управления базами данных (СУБД) для хранения лесотаксационных характеристик и описания различных объектов и населенных пунктов на контролируемой лесопокрытой территории.

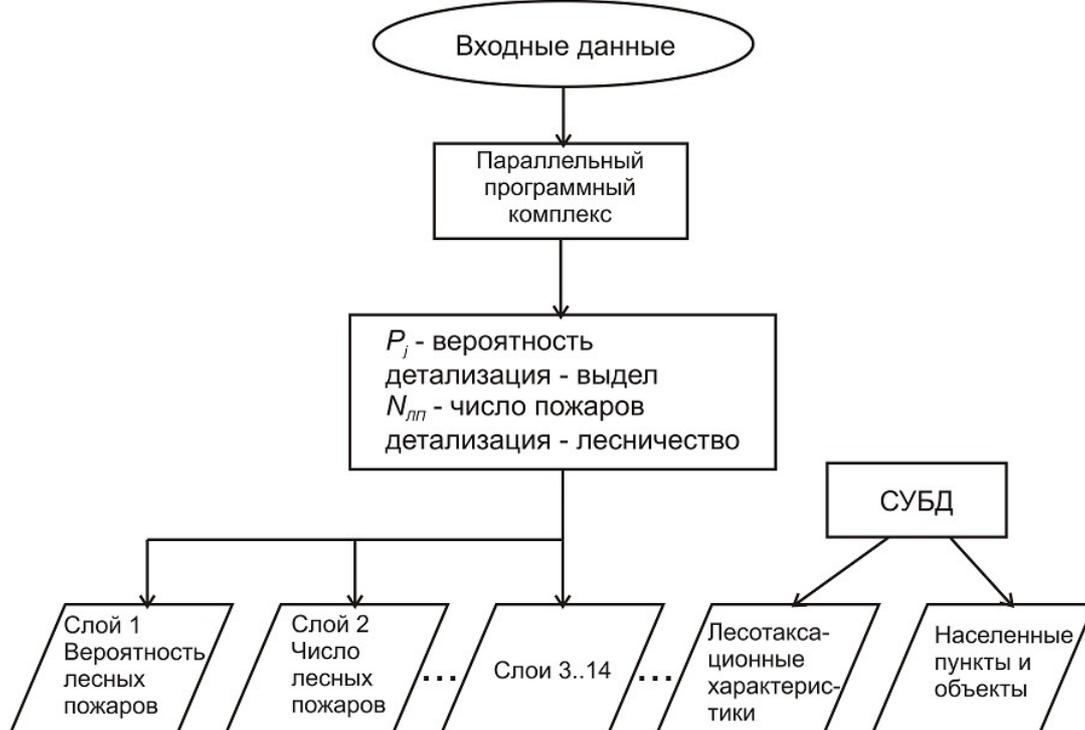


Рис. 3. Взаимодействие ППК и ГИС

В ГИС планируется организовать тематические слои по визуализации расчетной информации по вероятности возникновения лесных пожаров по конкретной причине антропогенного характера, из-за грозовой активности или по неустановленным причинам (слои 3..14).

5.3 Конфигурация библиотеки OpenLayers

Ниже представлена конфигурация библиотеки OpenLayers:

```

<script type="text/javascript">
    function init(){
        var lon = 32.72;
        var lat = 46.56;
        var zoom = 12;
        var options = {
            projection: new OpenLayers.Projection("EPSG:900913"),
            //displayProjection: new OpenLayers.Projection("EPSG:4326"),
            maxExtent: new OpenLayers.Bounds(-20037508.34, -20037508.34,
            20037508.34, 20037508.34)
        };
        map = new OpenLayers.Map('map', options);
        map.addControl(new OpenLayers.Control.LayerSwitcher());

        var gsat = new OpenLayers.Layer.Google(
            "Google Satellite",
            {type: G_SATELLITE_MAP, numZoomLevels: 20, sphericalMercator: true}
        );
  
```

```

var polygon_layer = new OpenLayers.Layer.WMS(
    'Области',
    "http://hntu.com.ua/cgi-bin/mapserv",
    {
        layers: 'polygons',
    },
    {
        url: '/var/www/hntu/data/projects/hntu.com.ua/data/gis_data/hntu_main.map',
        transparent: 'TRUE'
    },
    {'reproject': true}
);
var polygonLayer = new OpenLayers.Layer.Vector("Polygon Layer");
map.addLayers([ polygon_layer, gsat, polygonLayer]);
    drawControls = {
        polygon: new
OpenLayers.Control.DrawFeature(polygonLayer,
                                OpenLayers.Handler.Polygon)
    };
    for(var key in drawControls) {
        map.addControl(drawControls[key]);
    }
    document.getElementById('noneToggle').checked = true;

var proj = new OpenLayers.Projection("EPSG:4326");
var point = new OpenLayers.LonLat(lon, lat);
map.setCenter(point.transform(proj, map.getProjectionObject()), zoom);
map.addControl(new OpenLayers.Control.MousePosition());
map.addControl(new OpenLayers.Control.LayerSwitcher());
    var panel = new
OpenLayers.Control.NavToolbar({'div':OpenLayers.Util.getElement('paneldiv')});
    map.addControl(panel);
    function polygon_report(event) {
        OpenLayers.Util.getElement('status-message').innerHTML =
"Сохранение... ждите...";
        $('#edit_bar_indicator').show();
        $('#edit_bar_inner').hide();
        //alert('sssss');
        var url =
'http://hntu.com.ua/map_api/insert_polygon.php';
        var url_get_form =
'http://hntu.com.ua/index.php/map_api/set_type_polygon';
        var pParams = '?';
        var arr_points = event.feature.geometry.getVertices();
        for(var i=0; i<arr_points.length; ++i) {
            pParams += arr_points[i];
        }
        //alert(pParams);
        var responseObj = new OpenLayers.Ajax.Request(url,
            { method: 'get',
              parameters: {
                par_line : pParams
              },
              onSuccess: function(transport) {
              },
              onComplete: function(transport) {
                OpenLayers.Util.getElement('status-
message').innerHTML = "Объект сохранен";
                $('#edit_bar_indicator').hide();

```

```

var request =
OpenLayers.Request.GET({
    url: url_get_form,
    params: {reg_id:
transport.responseText},
    callback: handler_form
});
}
}
);
// console.log(event.feature.geometry.getVertices());
}
polygonLayer.events.on({
    "sketchcomplete": polygon_report
}
}
////Выводим форму в div
function handler_form(request) {
    OpenLayers.Util.getElement('edit_bar_inner').innerHTML =
request.responseText;
    $('#edit_bar_inner').show();
}
function toggleControl(element) {
    for(key in drawControls) {
        var control = drawControls[key];
        if(element.value == key && element.checked) {
            control.activate();
        } else </script>

```

Заключение

Таким образом, в настоящей работе представлен концептуальный проект веб-ориентированной геоинформационной системы детерминированно-вероятностного прогноза лесной пожарной опасности.

Предполагается, что метеорологические данные системы получают не со станций учета метеорологических параметров (пространственное разрешение сети метеостанций особенно низко в районах Дальнего Востока и Севера), а путем интерактивного взаимодействия программного обеспечения прогноза лесной пожарной опасности и математического обеспечения, реализующего глобальные или мезомасштабные модели атмосферы. Например, полулагранжева модель атмосферы [24]. Это позволяет используя предсказанные поля метеопараметров прогнозировать уровень лесной пожарной опасности на определенный период. Информация о количестве наземных грозových разрядов поступает из систем пеленгации разрядов класса облако-земля. Обработка входной информации происходит на многопроцессорной вычислительной системе. Предлагается организовать глобальный центр прогнозирования природных пожаров в регионе СНГ, в который бы поступала входящая информация и на выходе была бы прогнозная информация по уровню лесной пожарной опасности. В связи с тем, что многие ВУЗы (в том числе и Томский политехнический университет) и учреждения РАН обладают суперкомпьютерами, возможна организация такого центра на территории России. Будет необходимым организовать взаимодействие сотрудников центра и лесхозов с целью обновления статистической информации по лесным пожарам. Это может быть реализовано путем использования Интернет-технологий.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Девисиллов В.А. Русский лес просит пощады и защиты! // Безопасность в техносфере. 2010. № 6. С. 3 – 7.
2. Гоман П.Н., Людко А.А. Сравнительный анализ деятельности по охране лесов от пожаров в Республике Беларусь и Республике Греция // Чрезвычайные ситуации: образование и наука. 2009. № 2. С. 13 – 17.
3. Головне управління статистики України. Статистичний щорічник України: Видавництво «Консультант», 2010 р. - 576 с.
4. Котельников Р.В., Сементин В.Л., Щетинский В.Е., Барталев С.А., Галеев А.А., Ефремов В.Ю., Козочкина А.А., Крашенинникова Ю.С., Лупян Е.А., Мазуров А.А., Прошин А.А., Толпин В.А., Флитман Е.В., Ершов Д.В. Применение информационной системы дистанционного мониторинга "ИСДМ-Рослесхоз" для определения пожарной опасности в лесах Российской Федерации: Учебное пособие. г. Пушкино (МО): ФГУ "Авиалесоохрана", 2009-2010. – 140 с.
5. Кузнецов Г.В., Барановский Н.В. Прогноз возникновения лесных пожаров и их экологических последствий. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. 301 С.

6. Барановский Н.В. Модель дифференцированной оценки лесной пожарной опасности по антропогенным причинам // Безопасность жизнедеятельности. 2009. № 7. С. 49 – 53.
7. Барановский Н.В., Кузнецов Г.В. Конкретизация неустановленных причин в детерминированно-вероятностной модели прогноза лесной пожарной опасности // Пожаровзрывобезопасность. 2011. Т. 20, № 6. С. 24 – 27.
8. Богданов А.В., Корхов В.В., Мареев В.В., Станкова Е.Н. Архитектуры и топологии многопроцессорных вычислительных систем. М.: ИНТУИТ.РУ, 2004. 176 С.
9. Барский А.Б. Параллельные информационные технологии. М.: ИНТУИТ.РУ, 2007. 503 С.
10. Барановский Н.В., Жарикова М.В., Ляшенко Е.Н. Концептуальный проект веб-ориентированной географической информационной системы прогноза лесной пожарной опасности. URL: <http://conf.nsc.ru/intercarto17/reportview/88910> (дата обращения 29.11.2011)
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. Canadian Forest Fire Danger Rating System / B.J. Stocks, M.E. Alexander, R.S. McAlpine at all. – Canadian Forestry service, 1987. – 500 P.
13. 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.
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. 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.
16. 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
17. 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.
18. Нестеров В.Г. Горимость леса и методы ее определения. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1949. 76 С.
19. ГОСТ Р 22.1.09-99 “Мониторинг и прогнозирование лесных пожаров. Общие требования”
20. Гришин А.М., Барановский Н.В. Сравнительный анализ простых моделей сушки слоя ЛГМ, включая данные экспериментов и натурных наблюдений // Инженерно-физический журнал, 2003, Т. 76. № 5, С. 166-169.
21. Chandler C. Fire in Forestry, Vol. 1: Forest Fire Behavior and Effects / Chandler C., Cheney P., Thomas P., Trabaud L., Williams D. // John Wiley & Sons, New York, NY. 1983. 450 p.
22. Kropla B. Beginning MapServer. Open Source GIS Development. Apress. 2005. 400 P.
23. Барановский Н.В. Концептуальная база российской системы прогноза лесной пожарной опасности // Безопасность в техносфере. 2010. № 6. С. 34 – 42.
24. Толстых М.А. Полулагранжева модель атмосферы с высоким разрешением для численного прогноза погоды // Метеорология и гидрология, 2001, № 4, с. 5-15.