



Учреждение “Научно-исследовательский  
институт пожарной безопасности  
и проблем чрезвычайных ситуаций”  
Министерства по чрезвычайным ситуациям  
Республики Беларусь

**Выпуск № 2(30) - 2011**

# **Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация**

**Научно-технический журнал**

ISSN 1994-439X



**Минск  
2011**

# **ЧРЕЗВЫЧАЙНЫЕ СИТУАЦИИ: ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ И ЛИКВИДАЦИЯ № 2(30) – 2011**

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ  
ЖУРНАЛ**

Основан в 1995 году

Учредитель — учреждение «Научно-исследовательский институт пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций» МЧС Республики Беларусь

*Авторы опубликованных материалов несут ответственность за подбор и точность приведенных фактов, экономических, статистических и других данных, а также за использование сведений, не подлежащих открытой публикации. Редакция может публиковать статьи в порядке обсуждения, не разделяя точку зрения автора.*

*Статьи, поступающие для публикации в журнале, рецензируются.*

*При перепечатке материалов ссылка на журнал «Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация» обязательна.*

Журнал зарегистрирован в Министерстве информации Республики Беларусь по печати.

Регистрационное свидетельство № 1081

Журнал включен в список научных изданий для опубликования результатов диссертационных исследований, утвержденный приказом ВАК Республики Беларусь от 4 июля 2005 г. № 101

Подписной индекс в каталоге РУП «Белпочта» — 007922

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

доктор технических наук

**Альгин В.Б.**

доктор технических наук, профессор

**Болодьян И.А.**

кандидат психологических наук

**Герасимчик А.П.**

кандидат химических наук

**Заневская Ю.В.**

доктор физико-математических наук, профессор

**Зуйков И.Е.**

кандидат технических наук

**Иванов Ю.С.** (заместитель  
главного редактора)

кандидат физико-математических наук

**Кицак А.И.**

доктор физико-математических наук

**Ксенофонтов М.А.**

кандидат технических наук

**Кулаковский Б.Л.**

**Уласевич А.Н.** (ответственный  
редактор)

доктор физико-математических наук

**Лешенюк Н.С.**

кандидат биологических наук

**Лупей А.Ю.**

кандидат физико-математических наук

**Сагайдак Д.И.**

доктор технических наук

**Саечников В.А.**

доктор технических наук

**Тычино Н.А.** (главный редактор)

доктор технических наук

**Хасанов И.Р.**

кандидат технических наук

**Черневич О.В.**

**Шиян О.В.** (ответственный  
секретарь)

Журнал рекомендован к изданию решением Редакционно-издательского совета учреждения «Научно-исследовательский институт пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций» МЧС Республики Беларусь.

Адрес редакции:

220046, г. Минск, ул. Солтыса, 183а.

Телефоны:

(017) 246-41-53

(017) 299-96-30

(017) 246-50-84

(017) 246-43-99

Факс: (017) 246-57-31

E-mail: niipb@anitex.by

Ответственный за выпуск — *Малашенко С.М.*

Подписано к печати 22.12.2011. Формат 60×84/8. Бумага офсетная.

Печать офсетная. Усл. печ. л. 20,69.

Тираж 150. Заказ 2246.

Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии УП «Промбытсервис»

Лицензия на право осуществления полиграфической деятельности от 03.04.2009

№ 02330/0494132.

© *Учреждение «Научно-исследовательский институт пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций» МЧС Республики Беларусь, 2011*

УДК 519.8:630

**канд. физ.-мат. наук Баровик Д.В., д-р физ.-мат. наук, проф.,  
чл.-кор. Корзюк В.И., д-р физ.-мат. наук, проф. Таранчук В.Б.**

**Методические и алгоритмические основы  
программного комплекса  
«Расчет и визуализация динамики лесного пожара»**

*Институт математики НАН Беларуси, г. Минск*

**Barovik D.V., Candidate of Science (Physics and Mathematics),  
Korzyuk V.I., Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Prof., corresponding  
member, Taranchuk V.B. Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Prof.**

**Methodological and algorithmic fundamentals of software  
complex «Modeling and visualization of forest fire dynamics»**

*Institute of Mathematics of NAS of Belarus, Minsk*

Описаны алгоритмические основы новой компьютерной модели прогноза распространения лесных пожаров, адаптированной к условиям, преобладающим породам и характерным масштабам лесных массивов, особенностям рельефа и климата Республики Беларусь. Предложенная двумерная модель является обобщением широко применяемой полуэмпирической одномерной модели Ротермела. Модель реализована в программном комплексе.

Description of algorithmic fundamentals of new forest fires spread computer model adapted to the conditions, dominant forest species, characteristic scales, topography and climate of Belarus. The proposed two-dimensional model is a generalization of widely used semi empirical one-dimensional Rothermel's model. The model is implemented in software complex.

*Ключевые слова:* моделирование, лесной пожар, программный комплекс, модель Ротермела.

Из множества природных и антропогенных факторов негативного влияния на состояние и динамику лесных экосистем доминирующими являются пожары, которые наносят значительный материальный и экологический ущерб. Лесные пожары подразделяются на подземные (торфяные), низовые и верховые в зависимости от того,

какие ярусы леса, участки территории вовлечены в процесс распространения огня. Низовые пожары – самые распространенные в природе. Большинство лесных пожаров начинаются как низовые, которые могут перейти в подземные или верховые в зависимости от типа лесных горючих материалов (далее – ЛГМ) и климатических усло-

вий [1, 2]. Для научно обоснованных, успешных действий, направленных на предупреждение, прогноз развития и ликвидацию лесных пожаров, требуется разработка соответствующих компьютерных моделей, их включение в состав систем поддержки принятия решений по предотвращению чрезвычайных ситуаций в лесах. В ряде монографий и научных обзоров принята следующая классификация моделей лесных пожаров [1, 3]: теоретические (математические), эмпирические (статистические), полуэмпирические. Анализ и особенности существующих моделей проведены в работах [3, 4], отметим наиболее часто цитируемые.

**Теоретические модели** базируются на законах газовой динамики, тепломассопереноса и других фундаментальных законах физики, химии и записываются, как правило, в виде системы дифференциальных уравнений в частных производных. Верификация таких моделей весьма затруднительна, однако только они, описывая развитие лесного пожара на основе общих законов и с учетом большого количества факторов, позволяют отвечать на весьма широкий круг вопросов [3, 5, 6]. Основными считаются модели: W. Fons (1946, США), H. Emmons (1964, США), H. Hottel и др. (1965, США), C. Van Wagner (1967, Канада), P. Thomas (1967, Великобритания), H. Anderson (1969, США), J. Pagni and G. Peterson (1973, США), F. Steward

(1974, США), Г.П. Телицин, Н.П. Курбатский (1976, Россия), Э.В. Конев, А.И. Сухинин (1977, Россия), H. Sekirge (1978, США), N. Fujii и др. (1980, Япония), А.М. Гришин (1981, Россия), C. Huang and Y. Xie (1984, США), F. Albini (1985, США), N. De Mestre и др. (1989, Австралия), R. Weber (1989, Австралия), D. Croba и др. (1994, Греция), R. Linn (1997, США), P. Santoni and J. Balbi (1998, Франция), M. Larini и др. (1998, Франция), J. Dupuy (1999, Франция), J. Margerit and O. Guillaume (2002, Франция).

**В эмпирических (статистических) моделях** систематизируется ряд данных о скорости распространения лесного пожара при изменении выбранного количества параметров, определяются коэффициенты корреляции по каждой независимой переменной. При таком подходе не описывается механизм явления, полученные соотношения, строго говоря, не могут быть распространены за пределы применимости использованных статистических данных, в рамках таких моделей дают прогноз с определенной вероятностью. Эмпирические модели: A. McArthur (1966, Австралия), Г.П. Коровин (1969, Россия), Forestry Canada Fire Danger Group (1992, Канада), D. Viegas и др. (1998, Португалия), N. Cheney и др. (1998, Австралия), W. Hargrove и др. (2000, США).

**В полуэмпирических моделях** для определения скорости рас-

пространения фронта пожара привлекаются общие законы (сохранения энергии, массы и количества движения), которые записываются в виде упрощенных зависимостей, а соответствующие коэффициенты подбираются путем обобщения экспериментальной информации. Полуэмпирические модели применимы в ситуациях, похожих на те, при которых были собраны и обобщены опытные данные. Такие модели значительно проще в верификации по сравнению с теоретическими, при этом они более адекватны по сравнению эмпирическими (статистическими) моделями. Полуэмпирические модели: W. Frandsen (1972, США), R. Rothermel (1972, США), Г.А. Дорпер (1979, Россия), G. Griffin and G. Allan (1984, Австралия), R. Sneeuwjagt and G. Peet (1985, Австралия), В.Г. Гусев (1986, Россия), J. Marsden-Smedley, W. Catchpole и др. (1995, Австралия), J. Vega (1998, Испания), W. McCaw (1998, Австралия), N. Burgows и др. (1999, Австралия), P. Fernandes (2001, Португалия).

Модели упомянутых классов создавались начиная со второй половины прошлого столетия для прогноза возникновения и развития лесных пожаров всех типов, но больше всего внимания уделяли проблемам прогноза динамики низовых лесных пожаров.

Обобщая заключения из обзоров по проблемам моделирования лесных пожаров, следует отметить,

что кроме создания модели, соответствующего программного средства обязательны сервисные подсистемы, а именно: программное и информационное обеспечение извлечения, использования картографической базы с пирологическими характеристиками и природной зональностью лесной растительности (например, из предметной географической информационной системы); методики и соответствующие средства систематизации типовых наборов параметров климатических условий; программные модули подключения требуемого набора исходных данных.

Несмотря на то, что разработано около полусотни моделей низовых лесных пожаров, только четыре из них применяются в различных специализированных программных комплексах [4]. Это эмпирические модели А. McArthur (Австралия; показатель лесной пожарной опасности рассчитывается на основе температуры, относительной влажности, скорости ветра, запаса ЛГМ, наклона поверхности и фактора сухости; модель позволяет предсказывать вероятность возникновения пожара, скорость его распространения, интенсивность, трудность ликвидации) [7], Forestry Canada Fire Danger Group (модель прогноза лесной пожарной опасности; по погодному индексу, который учитывает температуру, относительную влажность, осадки, скорость ветра и направление, топографии, высоте, широте, дол-

годе и дате прогнозируется точка или линия возгорания; подсистема выдает скорость распространения, расход ЛГМ, интенсивность фронта пожара и другую прогнозную информацию) [8], W. Hargrove (США) [9] и полуэмпирическая модель Ричарда Ротермела (R. Rothermel, США) [10]; теоретических моделей среди них нет.

Наиболее применяемая на сегодняшний день *полуэмпирическая модель* распространения низовых лесных пожаров была создана Ричардом Ротермелом (R. Rothermel) [10] на основе идей, изложенных в работе W. Frandensen [11]. Модель Ротермела положена в основу многих систем прогноза развития пожаров в США и других странах. Входные данные для модели можно разделить на три группы: 1) свойства частиц ЛГМ (удельная теплота сгорания, минеральное содержание, плотность частиц); 2) структура массива частиц ЛГМ (запас ЛГМ, средний размер частиц, средняя высота слоя); 3) параметры окружающей среды (скорость ветра, влагосодержание ЛГМ, наклон поверхности). Следует отметить, что в методике Р. Ротермела из-за отсутствия явного учета законов сохранения массы и количества движения приходится привлекать различные эмпирические соотношения, что снижает точность и общность прогноза скорости нормального распространения лесного пожара. В частности, в рамках этой модели не удается

определять скорость распространения верховых пожаров [3, 12]. Однако благодаря простоте методики Р. Ротермела, ее программные реализации успешно внедрены в большинстве лесных служб Северной Америки. Позже были проведены попытки применения модели в Европе. Данная модель является полуэмпирической и не удивительно, что в условиях Средиземноморья ее применение не принесло немедленного успеха – понадобился долгий и трудоемкий процесс по ее калибровке к новым условиям. В итоге данная модель нашла применение на сегодняшний день и в Европе. В [13, 14] описано, как модель Р. Ротермела была адаптирована для условий распространения низовых лесных пожаров, присутствующих различным регионам СССР.

Методика Ротермела на основе достаточно простых формул отвечает на вопрос, какова прогнозируемая скорость распространения низового лесного пожара в зависимости от скорости ветра, типа и влагосодержания растительности, а также рельефа местности. В данной работе описано обобщение, методика адаптирована применительно к условиям Республики Беларусь, реализована в программном комплексе (далее – ПК) прогноза распространения лесного пожара. В версии разработанного ПК пользователю даются возможности задания типов преобладающих пород лесных массивов, характерных масштабов площадей, параметров

рельефа и климата; установлены диапазоны изменения параметров модели Ротермела, наполнены соответствующие таблицы исходных данных для модифицированных алгоритмов расчета.

Перечислим исходные параметры полуэмпирической модели Ротермела:  $\omega_0$ , кг/м<sup>2</sup> – запас ЛГМ на местности в абсолютно сухом состоянии;  $\delta$ , м – глубина слоя ЛГМ;  $\sigma$ , м<sup>-1</sup> – удельная поверхность ЛГМ;  $h$ , Дж/кг – теплотворная способность сухого горючего;  $\rho_p$ , кг/м<sup>3</sup> – плотность горючего материала в абсолютно сухом состоянии;  $M_f$  – влагосодержание ЛГМ;  $S_T$  – массовая доля всех минеральных веществ в ЛГМ;  $S_e$  – массовая доля эффективных минеральных веществ;  $U$ , м/с – скорость ветра на середине высоты пламени;  $\text{tg}\varphi$  – тангенс угла наклона рельефа;  $M_x$  – критическое влагосодержание – минимальное значение влагосодержания ЛГМ, при достижении которого горение прекращается.

В оригинальном виде в модели используется Британская система мер, по формулам модели Ротермела [10] рассчитывается скорость распространения пожара в фут/мин. В разработанном комплексе приняты размерности единиц системы СИ. Заметим, что ис-

пользование наборов записанных параметров модели Ротермела неудобно на практике, ориентированной на специалистов МЧС. Специалисты по чрезвычайным ситуациям ограничены в возможностях оперировать, а тем более определять на местности такие специфические величины, как критическое влагосодержание, удельная поверхность слоя горючих материалов и т.п. В их распоряжении есть карты лесного участка, возможность визуального наблюдения на местности, данные от метеослужб. Поэтому в реализации разработанной компьютерной модели перечисленные параметры модели явно не присутствуют, а вычисляются через другие (доступные) параметры и факторы; предлагается использовать другой «базис» переменных. Неотъемлемой частью является база данных наборов характеристик для всех типовых климатических условий и параметров ЛГМ.

В работах [3, 15] показано, что существует связь между текущим влагосодержанием  $M_f$  конкретного типа ЛГМ и комплексным показателем горимости леса:

$$M_f = a \frac{1}{\Gamma} + b, \quad (1)$$

где  $a$  и  $b$  – эмпирические константы, определяемые для конкретных типов ЛГМ ( $a$  – показывает скорость высушивания;  $b$  – минимальное значение влагосодержания данного типа ЛГМ в естественных условиях);



$\Gamma$  – индекс горимости В.Г. Нестерова [15, 16, 17], определяемый по формуле

$$\Gamma = \sum_{j=1}^n T_j (T_j - T_{dj}), \quad (2)$$

где  $T_j$  – температура воздуха в 14 ч, °С;

$T_{dj}$  – точка росы в 14 ч, °С–;

$n$  – число сухих суток (суток с осадками менее 3 мм). В те сутки, когда температура воздуха  $T_j$  или разность  $(T_j - T_{dj})$  отрицательная, нарастание показателя принимается равным нулю.

В зависимости от вычисленного значения  $\Gamma$  выделяют следующие классы пожарной опасности:

- I класс ( $\Gamma$  до 300) - отсутствие опасности;
- II класс ( $\Gamma$  от 301 до 1000) – малая пожарная опасность;
- III класс ( $\Gamma$  от 1001 до 4000) - средняя пожарная опасность;
- IV класс ( $\Gamma$  от 4001 до 10 000) - высокая пожарная опасность;
- V класс ( $\Gamma$  больше 10 000) - чрезвычайная опасность.

Таким образом, можно обойтись без необходимости каждый раз на местности экспериментально определять  $M_f$ . Его можно выразить для конкретного преобладающего типа растительности через известный класс пожарной опасности. Как и  $M_f$ , большинство других параметров модели Ротермела относятся непосредственно к характеристикам ЛГМ. Если их числовые значения для наиболее часто встречающихся типов растительности в конкретном регионе экспериментально определены, классифициро-

ваны, сведены в таблицы, сохранены в базе данных, тогда можно оперативно использовать готовые наборы в расчетах по адаптированной модели и прогнозировать скорость распространения лесного пожара в конкретных условиях. Принимая такой подход за основу, в программном комплексе для расчета прогнозных положений фронта пожара пользователю необходимо выбрать (задавать) лишь следующие параметры:

- тип растительности (выбор варианта из базы данных).
- класс пожарной опасности (I, II, III, IV, V).
- скорость ветра (и его направление).
- тангенс угла склона (учет особенностей рельефа, для равнинной местности не требуется).

Выбор из базы данных типов растительности, наиболее близкий к конкретным условиям, выполняет оператор (пользователь ПК), основываясь на своем опыте и знаниях. На данный момент в ПК учтено 65 видов типов растительности [18]. Приведем примеры (с кодами

из базы данных): 303 – лишайники, сосновый лес редкий, деревья молодые и средневозрастные; 406 – зеленые мхи, еловый лес густой, деревья спелые и перестойные; 507 – опад хвои, еловый лес редкий, деревья молодые и средневозрастные; 710 – кустарники, лиственный лес густой, деревья спелые и перестойные; 802 – отходы лесозаготовок, сосновый лес густой, деревья спелые и перестойные; 901 – минерализованная полоса, поляна без растительности; 903 – водная преграда (река озеро и т.п.). Название (описание) типа растительности включает в себя преобладающий тип горючих материалов нижнего яруса леса (мхи, кустарники, опад и др.), преобладающую породу деревьев, их возраст и степень сомкнутости крон.

Поясним, зачем при моделировании низового лесного пожара указывать тип верхнего яруса леса. Это необходимо по двум причинам.

Во-первых, в модели Ротермела необходимо задавать скорость ветра  $U$  на высоте середины пламени. Как правило, известны данные с метеостанции, рассчитанные на определенной высоте (10–15 м) над равнинной поверхностью. Какова будет скорость ветра в нижнем ярусе леса, зависит от густоты крон деревьев, сортов деревьев (есть ли

продуваемый просвет в нижнем ярусе леса или нет). Для оценки скорости ветра в созданном программном комплексе учитываются два числовых параметра:  $Z_d$ , м – средняя высота древостоя;  $f$ , кг/м<sup>3</sup> – объемная плотность полога леса.

Во-вторых, знание типа леса и его возраста дает дополнительную информацию о нижнем ярусе леса. В спелых и перестойных хвойных лесах в нижнем ярусе леса неизбежно накапливается слой определенной толщины опада иголок; в лиственных лесах – опада листьев. В зависимости от климатической полосы, степени сомкнутости крон можно с некоторой точностью априори определить и их состояние – влажный перегной (слабогоримый) или хорошо высушенный опад.

Классификация типов растительности и определение их характеристик – это весьма трудозатратная процедура, однако это реально [19]. Доказательством служит «альбом» [20] типов растительности (с фотографиями) региона Скалистых гор США. В созданном ПК для различных типов растительности использованы справочные данные, характерные значения. Примеры значений приведены в таблице 1.

Таблица 1

Перечень исходных данных модели Ротермела для некоторых типов растительности

Код	$\omega_0$ , кг/м <sup>2</sup>	$\sigma$ , м <sup>-1</sup>	$h$ , Дж/кг	$\rho_p$ , кг/м <sup>3</sup>	$\delta$ , м	$M_x$	$S_T$	$Z_d$ , м	$f$ , кг/м <sup>3</sup>
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
303	1,7	2000	17991200	300	0,12	0,3	0,02	15	0,07
406	1,0	2500	19664800	300	0,10	0,5	0,02	15	0,24
507	0,3	6000	18828000	512	0,10	0,3	0,02	10	0,09
710	0,225	6560	18409600	512	0,60	0,2	0,02	20	0,08
802	0,9	4920	18409600	512	0,70	0,2	0,02	20	0,08
901	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Для типа 901 в таблице 1 указаны нулевые значения характеристик ЛГМ, что соответствует отсутствию горючих веществ, пожар непосредственно по ним не распространяется.

При реализации модели Ротермела в программном комплексе возникает вопрос, каким образом рассчитывать скорости фронта пожара в двумерном случае. Оригинальная модель является одномерной, а результатом ее применения является число – скорость распро-

странения фронта пожара в направлении ветра  $\omega_n$ .

В предлагаемой модификации компьютерной модели распространение фронта пожара прогнозируется на площади, расчеты производятся согласно приведенным ниже уравнениям. Обоснованием такого алгоритма служат наблюдения, что низовой пожар в однородной среде распространяется эллипсом (рис. 1). С большой точностью такое приближение подтверждают проведенные расчеты по теоретической модели [5].

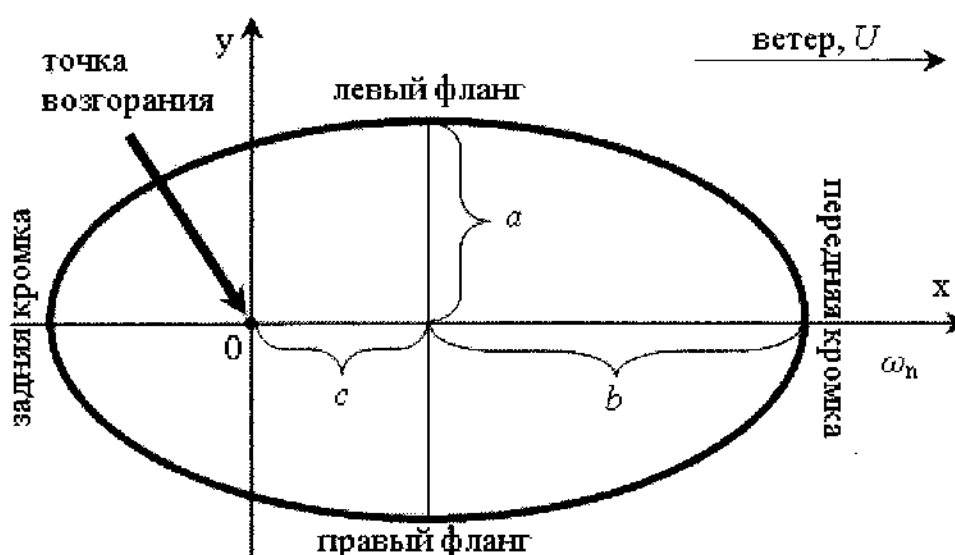


Рис. 1. Эллиптическая форма контура низового лесного пожара

В научной литературе нет единого подхода в определении формулы, описывающей величины  $a$ ,  $b$ ,  $c$  эллипса. В [21] приводится сравнительный анализ существую-

щих подходов и предлагается их синтез, используемый в реализованном адаптированном алгоритме и ПК:

$$a = \frac{b}{LB} \quad b = \frac{\omega_n}{2} \frac{1+HB}{HB} \quad c = b - \frac{\omega_n}{HB} \quad (3)$$

$$LB = 0,936 \exp(0,2566U) + 0,461 \exp(-0,1548U) - 0,397, \quad HB = \frac{LB + \sqrt{LB^2 - 1}}{LB - \sqrt{LB^2 - 1}}, \quad (4)$$

где  $\omega_n$  – рассчитанная по модели Ротермела скорость распространения фронта пожара в направлении ветра  $U$ .

Кратко перечислим алгоритмические основы компьютерной модели, работы оператора программного комплекса «Расчет и визуализация динамики лесного пожара» (ПК «РиВДЛП». ВУ.ФДБИ 00095). Основой комплекса является интеграция систем математического моделирования, интеллектуальных вычислений, географических информационных систем (ГИС), СУБД. ПК позволяет на основе разработанной методики, созданных баз данных исходных параметров и подготовленных типовых сценариев развития лесных пожаров рассчитывать параметры лесного пожара (скорость и направление распространения фронта, площадь пожара, периметр фронта), визуализировать результаты расчета на электронной карте, экспортировать результаты в ГИС. Средствами ПК рассчитываются и отображаются последовательные кадры с конфигурацией фронта лесного пожара, осуществляется построение границ зон выжженной

и горения ЛГМ, можно наносить контура этих зон на цифровые карты и передавать графические изображения в эксплуатируемые ГИС.

ПК состоит из двух подсистем:

- подсистема прогноза и запоминания характеристик развития пожара: модуль обработки и наполнения базы исходных данных, модуль расчета характеристик пожара и динамики его развития, модуль контроля корректности входных данных; модуль дополнения базы знаний компьютерной модели прогнозными результатами динамики лесного пожара;

- вторая - подсистема обработки и визуализации прогнозных характеристик развития пожара.

Пользователь ПК «РиВДЛП» в меню задает параметры метеорологической обстановки (класс пожарной опасности, скорость и направление ветра), загружает из ГИС электронную карту лесного участка, выбирает из базы данных основной тип ЛГМ в области моде-

лирования и на участках с другими типами ЛГМ или их отсутствием (водные преграды, дороги, поляны и др.) – на участках «неоднородных включений». Задание конфигураций подобластей сводится к «обрисовке» их границ мышкой на электронной карте. Далее отмечаются зафиксированные формы очагов возгорания лесного пожара. Для расчетов прогнозной формы фронта пожара используется схема «конечных автоматов». Область моделирования покрывается равномерной сеткой, ячейки которой могут принимать значения «сгорела», «горит», «не горела». В каждый момент времени контур пожара определяется совокупностью «горящих» ячеек. По аналогии с волновым принципом Гюйгенса (Huygens) принято, что каждая ячейка фронта пожара за выбранный дискрет времени порождает свой «шаблон расширения» (аппроксимация эллипса, рассчитываемого по записанным формулам), форма шаблона определяется в зависимости от конкретных типов ЛГМ в разных ячейках. В результате расчета на введенной сетке площади леса ячейки категории «не горела» вблизи фронта меняют статус. Фиксируются новые коды состояния ячеек (совокупность «сгорела», «горит», «не горела»); определяется результирующий периметр прогнозируемого очага (или нескольких очагов) пожара для продолжения расчетов.

Дополнительно в настоящем ПК реализована возможность сопоставления вариантов прогноза распространения лесного пожара вблизи препятствий и «преодоления» их фронтом. Применяемая схема «клеточного автомата» позволяет без отдельных уточнений моделировать «огибание» препятствий относительно большой площади (например, полян). Более сложным является вопрос прогноза преодоления узких протяженных участков площади, таких как ручьи, дороги, минерализованные полосы. В зависимости от их ширины, погодных условий и рельефа местности пожар может прекратиться или продолжаться. ЛГМ на противоположной стороне препятствия могут загореться за счет радиационного теплового воздействия фронта пожара (достаточно продолжительного по времени для высушивания и нагревания ЛГМ до температуры самовоспламенения) или вследствие конвективного переноса по воздуху горящих частиц [3].

В методике Ротермела ответа на данный вопрос нет, перечисленные факторы не учитываются. В ПК «РиВДЛП» при анализе подобных ситуаций предлагается два варианта подготовки прогноза. По первому варианту, ориентированному на пользователя, владеющего основами математического моделирования, оператор должен учитывать рекомендации, как подобрать временной дискрет. При таком подходе предварительно

следует просмотреть запроотолированные в базе данных результаты вычислительных экспериментов по теоретической модели [5, 6], в сопроводительной документации и электронном руководстве приведены пояснения. Во втором варианте («натурное наблюдение») предлагается проводить расчет в два шага: с базовыми значениями временного дискрета только до момента подхода фронта пожара к «неоднородному включению», далее с уточнениями эксперта или по реальному развитию ситуации на территории. Экспертное заключение о том, бу-

дет ли преодолено препятствие, принимается специалистом, который учитывает конфигурацию фронта, ширину и форму «неоднородного включения», «угол атаки» пожара на препятствие, направление и силу ветра, тип ЛГМ. В случае «натурное наблюдение» эксперт вводит на схеме лесного массива новое ожидаемое положение фронта (а это может быть и уже наблюдаемое по реальному развитию ЧС), принимает его за «зафиксированный» очаг пожара и продолжает расчет прогноза его распространения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Валендик, Э.Н. Крупные лесные пожары и борьба с ними / Э.Н. Валендик, П.М. Матвеев, М.А. Софронов. – М.: Наука, 1979. – 198 с.
2. Доррер, Г.А. Динамика лесных пожаров / Г.А. Доррер. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. – 404 с.
3. Гришин, А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними / А.М. Гришин. – Новосибирск: Наука, 1992. – 408 с.
4. Pastor E [et al]. Mathematical models and calculation systems for the study of wildland fire behaviour // Progress in Energy and Combustion Science. – 2003. – Vol. 29. – P. 139–153.
5. Barovik D.V., Taranchuk V.B. Mathematical Modelling of Running Crown Forest Fires // Mathematical Modelling and Analysis. – 2010. – Vol. 15. № 2. – P. 161–174.
6. Баровик, Д.В. Численная реализация математической модели верховых лесных пожаров / Д.В. Баровик, В.Б. Таранчук // Весці БДПУ. Сер 3, Фізика, Математика, Інформатика. – 2010. – № 2. – С. 40–44.
7. McArthur A.G. Fire behaviour in eucalypt forests. – Commonwealth of Australia: Forestry Research Institute, Leaflet No. 107, 1967. – 36 p.
8. Forestry Canada Fire Danger Group. Development and structure of the Canadian Forest Fire Behavior Prediction System. Information Report ST-X-3. – Ottawa: Canadian Department of Forestry, 1992. – 63 p.

9. *Hargrove W.W. [et al].* Simulating fire patterns in heterogeneous landscapes // *Ecological Modelling*. – 2000. – Vol. 135, N 2/3. – P. 243–263.
10. *Rothermel R.C.* A Mathematical model for Predicting Fire Spread in Wildland Fuels. – USDA Forest Service. Res. Pap. INT-115, 1972. – 43 p.
11. *Frandsen W.H.* Fire spread through porous fuels from the conservation of energy // *Combustion and Flame*. – 1972. – Vol. 19, N 1. – P. 17–24.
12. *Баровик, Д.В.* Об особенностях адаптации математических моделей вершинных верховых лесных пожаров / Д.В. Баровик, В.Б. Таранчук // *Вестник БГУ. Сер. 1, Физика, Математика, Информатика*. – 2010. – № 1. – С. 138–143.
13. *Гусев, В.Г.* О методе расчета скорости распространения лесного низового пожара / В.Г. Гусев, И.Ю. Корчунова // *Лесные пожары и борьба с ними: сб. науч. тр.* – Л.: ЛенНИИЛХ, 1986. – С. 31–50.
14. *Дорпер, Г.А.* Математические модели динамики лесных пожаров / Г.А. Дорпер. – М.: Лесн. промышленность, 1979. – 161 с.
15. *Нестеров, В.Г.* Использование температуры точки росы при расчете показателя горимости леса / В.Г. Нестеров, М.В. Гриценко, Т.А. Шабунина // *Метеорология и гидрология*. – 1968. – № 9. – С. 102–104.
16. *Нестеров, В.Г.* Горимость леса и методы ее определения / В.Г. Нестеров – М.; Л.: Гослесбумиздат, 1949. – 76 с.
17. *Методические указания по прогнозированию пожарной опасности в лесах по условиям погоды.* – М: Гидрометеиздат, 1975. – 15 с.
18. *Баровик, Д.В.* Базы данных результатов численного моделирования (на примере задачи распространения лесных пожаров) / Д.В. Баровик // *Вестник БГУ. Сер. 1, Физика, Математика, Информатика*. – 2010. – № 2. – С. 170–174.
19. *Волокитина, А.В.* Классификация и картографирование растительных горючих материалов / А.В. Волокитина, М.А. Софронов. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. – 314 с.
20. *Scott J.H., Burgan R.E.* Standard fire behaviour fuel models: a comprehensive set for use with Rothermel's surface fire spread model. – USDA Forest Service, General Technical Report RMRS-GTR-153, 2005. – 72 p.
21. *Finney M.A.* FARSITE: Fire Area Simulator – model development and evaluation. – USDA Forest Service. Res. Pap. RMRS-RP-4, 2004. – 47 p.

