УДК 519.8:630*43

Д.В. Баровик, В.Б. Таранчук (Беларусь)
(Институт математики НАН Беларуси; e-mail: barovikD@gmail.com)

АДАПТАЦИЯ МОДЕЛИ РОТЕРМЕЛА ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ ПРОГНОЗА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

В статье приведены особенности использования модели Ротермела в разработанном авторами программном комплексе прогноза распространения лесных пожаров.

Ключевые слова: низовой лесной пожар, модель Ротермела, программный комплекс.

D.V. Barovik, V.B. Taranchuk (Belarus)

ROTHERMEL'S MODEL ADAPTATION FOR IMPLEMENTATION IN FOREST FIRES FORECAST SOFTWARE

We describe the peculiarities of use of Rothermel's model in software developed for forest fires forecast.

Key words: surface forest fire, Rothermel's model, software complex.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 13 июля 2011 г.

Компьютерные модели лесных пожаров являются обязательной компонентой систем поддержки принятия решений по предотвращению чрезвычайных ситуаций в лесах.

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 потом перейти в подземные или верховые в зависимости от типа ***лесных горючих материалов (ЛГМ)*** и климатических условий [1, 2]. Характерная скорость распространения фронта низового лесного пожара 1 *см*/*с*.

В ряде монографий и научных обзоров принята следующая классификация моделей лесных пожаров [1, 3]: теоретические (математические), эмпирические (статистические), полуэмпирические.

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 описывают развитие лесного пожара с учетом общих и территориальных факторов и позволяют отвечать на весьма широкий круг вопросов [4, 5].

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.

В **полуэмпирических моделях** для определения скорости распространения 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 адекватны 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.

Проблемам моделирования низовых лесных пожаров было уделено много внимания по всему миру, начиная со второй половины прошлого столетия. Построен ряд моделей, состоящих из систем уравнений, включающих параметры окружающей среды, рельефа местности и климатических условий, лесного горючего материала и позволяющих оценить скорость распространения пожара, интенсивность тепловыделения в зоне фронта горения, геометрию выгоревшей площади. Анализ и особенности существующих моделей, литературные ссылки проведены в работах [3, 6], отметим основные.

Теоретические 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. Cekirge (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 and 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).

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).

Полуэмпирические модели: W. Frandsen (1972, США), R. Rothermel (1972, США), Г.А. Доррер (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. Burrows и др. (1999, Австралия), P. Fernandes (2001, Португалия).

Несмотря на то, что разработано около полусотни моделей низовых лесных пожаров, только четыре из них применяются в различных специализированных программных комплексах [6]. Это эмпирические модели A. McArthur (Австралия) [7], Forestry Canada Fire Danger Group [8], W. Hargrove (США) [9] и полуэмпирическая модель Ричарда Ротермела (R. Rothermel, США) [10]; теоретических моделей среди них нет.

Наиболее распространенная 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]. В работах [12, 13] модель Р. Ротермела была адаптирована для условий распространения низовых лесных пожаров, присущих различным регионам СССР. Недостаток методики Р. Ротермела заключается в отсутствии явного учета законов сохранения массы и количества движения, в результате чего 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, 14]. Однако благодаря простоте методики Р. Ротермела, её программные реализации успешно внедрены в большинстве лесных служб Северной Америки. Позже были сделаны попытки применения модели в Европе. Данная модель является полуэмпирической и не удивительно, что в условиях Средиземноморья её применение не принесло немедленного успеха – понадобился долгий и трудоемкий процесс по её "адаптации" к новым условиям. В итоге данная модель нашла применение на сегодняшний день и в Европе.

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. Авторами методика адаптирована применительно к условиям Беларуси, реализована в компьютерном комплексе прогноза распространения лесного пожара. В предлагаемой версии учитываются квалификационный аспект потенциальных пользователей программного средства, типы и характерные масштабы преобладающих пород лесных массивов, рельефа и климата, установлены диапазоны изменений параметров модели Ротермела, наполнены соответствующие таблицы исходных данных для модифицированных алгоритмов расчёта. Реализация в программном комплексе будет описана в следующей статье.

Перечислим исходные параметры полуэмпирической модели Ротермела:

ω_0, *фунт*/*фут*^{2} – запас ***лесных горючих материалов (ЛГМ)*** на местности в абсолютно сухом состоянии;

δ, *фут* – глубина слоя ЛГМ;

σ, *фут*$^{-1}$ – удельная поверхность ЛГМ;

h, *БТЕ/фунт* – теплотворная способность сухого горючего;

ρ_p, *фунт/фут*^{3} – 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, *фут/мин* – скорость ветра на середине высоты пламени;

tg φ – 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, осуществляется необходимый пересчёт.

Перечисленных параметров достаточно для расчётов по модели Ротермела, однако их использование в таком виде неудобно на практике, ориентированной на специалистов МЧС. Более того, специалисты по чрезвычайным ситуациям ограничены в возможностях оперировать, а тем более определять на местности специфические величины, такие 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 выражены через другие (доступные) параметры и предлагается использовать новый "базис" переменных.

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

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

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);

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

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

где T_j – температура воздуха в 14.00 в градусах Цельсия;

T_{dj} – точка росы в 14.00 в градусах Цельсия;

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 Г выделяют следующие классы пожарной опасности:

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

Таким образом, нет 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. Чтобы оперативно прогнозировать скорость распространения лесного пожара, предлагается заранее классифицировать наиболее часто встречающиеся типы растительности в конкретном регионе, экспериментально (или из справочников) определять характеристики, необходимые для расчёта по модели Ротермела – они табулируются и используются в расчётах по запросам из базы данных.

Если за основу принять такой подход, в программном комплексе для расчёта необходимо выбрать (задать):

- тип растительности;
- класс пожарной опасности (I, II, III, IV, V);
- скорость ветра (и его направление);
- тангенс угла склона (учёт особенностей рельефа, для равнинной местности не требуется).

Выбор из базы данных типов растительности, наиболее близких к реальным, осуществляет при моделировании оператор (пользователь ПК) экспертным способом, основываясь на своём опыте и знаниях.

Примеры типов растительности, включенных в базу данных [18] (на данный момент в созданном ПК учтено 65 видов):

- 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*^{3} – объёмная 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 нами ПК для различных типов растительности использованы справочные данные, характерные значения (табл. 1).

Таблица 1

Перечень исходных данных модели Ротермела для некоторых типов растительности

Код типа раст.	ω_0, *кг/м*^{2}	σ, *м*$^{-1}$	*h*, *ккал/кг*	ρ_p, *кг/м*^{3}	δ, *м*	M_x	S_T	Z_d, *м*	*f*, *кг/м*$_3$
303	1,7	2000	4300	300	0,12	0,3	0,02	15	0,07
406	1,0	2500	4700	300	0,10	0,5	0,02	15	0,24
507	0,3	6000	4500	512	0,10	0,3	0,02	10	0,09
710	0,225	6560	4400	512	0,60	0,2	0,02	20	0,08
802	0,9	4920	4400	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 указаны нулевые значения характеристик ЛГМ, что соответствует отсутствию горючих веществ, пожар непосредственно по ним не распространяется.

Еще одной особенностью использования модели Ротермела является вопрос, каким образом рассчитывать скорости фронта пожара на плоскости. Сама модель является одномерной, а результатом её применения является число – скорость распространения фронта пожара в направлении ветра ω_n.

Наблюдения показывают, что низовой пожар в однородной среде распространяется эллипсом (рис. 1).

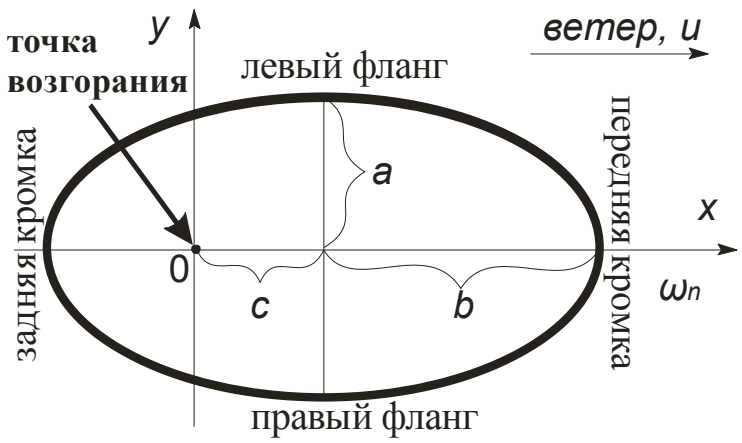

Рис. 1. Эллиптическая форма контура низового лесного пожара

В научной литературе нет единого подхода в определении формулы, описывающей параметры *a, b, c* эллипса. В [21] приводится сравнительный анализ существующих подходов и предлагается их синтез, используемый в адаптированном алгоритме и в ПК:

$$a = \frac{b}{LB}; \qquad b = \frac{\omega_n}{2}\frac{1+HB}{HB}; \qquad c = b - \frac{\omega_n}{HB}; \tag{3}$$

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

где ω_n – рассчитанная по модели Ротермела скорость распространения фронта пожара в направлении ветра U.

Обязательным требованием к программному комплексу прогноза распространения лесного пожара является модель преодоления препятствий на пути пожара (ручьи, дороги, минерализованные полосы) на площади. Методика Ротермела никоим образом не дает ответа на данный вопрос. Необходимо разрабатывать и обосновывать методику и алгоритмы. Авторы также оставляют за рамками данной статьи технические вопросы реализации разработанного программного комплекса, эргономику интерфейса, связь с ГИС-системами. Эти вопросы будут изложены при описании компьютерной реализации.

Литература

1. ***Валендик Э.Н., Матвеев П.М., Софронов М.А.*** Крупные лесные пожары и борьба с ними. М.: Наука, 1979. 198 с.

2. ***Доррер Г.А.*** Динамика лесных пожаров. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. 404 с.

3. ***Гришин А.М.*** Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск: Наука, 1992. 408 с.

4. ***Barovik D.V., Taranchuk V.B.*** Mathematical Modelling of Running Crown Forest Fires // Mathematical Modelling and Analysis, 2010. Vol. 15. № 2. P. 161-174.

5. ***Баровик Д.В, Таранчук В.Б.*** Численная реализация математической модели верховых лесных пожаров // Весці БДПУ. Сер 3, Физика, математика, информатика, 2010. № 2. С. 40-44.

6. ***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.

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. № 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. № 1. P. 17-24.

12. ***Гусев В.Г., Корчунова И.Ю.*** О методе расчёта скорости распространения лесного низового пожара // Лесные пожары и борьба с ними: сб. науч. тр. Л.: ЛенНИИЛХ, 1986. С. 31-50.

13. ***Доррер Г.А.*** Математические модели динамики лесных пожаров. М.: Лесн. промышленность, 1979. 161 с.

14. ***Баровик Д.В., Таранчук В.Б.*** Об особенностях адаптации математических моделей вершинных верховых лесных пожаров // Вестник БГУ. Сер. 1, Физика, математика, информатика, 2010. № 1. С. 138-143.

15. ***Нестеров В.Г., Гриценко М.В., Шабунина Т.А.*** Использование температуры точки росы при расчёте показателя горимости леса // Метеорология и гидрология, 1968. № 9. С. 102-104.

16. ***Нестеров В.Г.*** Горимость леса и методы её определения. М., Л.: Гослесбумиздат, 1949, 76 с.

17. ***Методические*** указания по прогнозированию пожарной опасности в лесах по условиям погоды. М: Гидрометеоиздат, 1975. 15 с.

18. ***Баровик Д.В.*** Базы данных результатов численного моделирования (на примере задачи распространения лесных пожаров) // Вестник БГУ. Сер. 1, Физика, математика, информатика, 2010. № 2. С. 170-174.

19. ***Волокитина А.В., Софронов М.А.*** Классификация и картографирование растительных горючих материалов. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. 314 с.

20. ***Scott J.H., Burgan R.E.*** Standard fire behaviour fuel models: a comprehansive 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 Sevice. Res. Pap. RMRS-RP-4, 2004. 47 p.