

## О развитии методики Ротермела и реализации двумерной компьютерной модели прогноза распространения лесных пожаров

Д.В. Баровик, В.Б. Таранчук  
Белорусский государственный университет

*Разработка научно обоснованных компьютерных моделей распространения лесных пожаров необходима для расширения возможностей систем поддержки принятия решений, повышения качества планирования противопожарных мероприятий, эффективности действий по ликвидации чрезвычайных ситуаций в лесах. В работе представлена модель прогноза распространения лесных пожаров, адаптированная применительно 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. Описаны программная реализация компьютерной модели, основы преобразования, классификации и формирования входных данных. Созданный программный комплекс обеспечивает моделирование и визуализацию на электронных картах местности динамики фронта лесного пожара, включая возможности учета неоднородного распределения на пути огня различных типов лесной растительности и преград. Созданные при разработке компьютерной модели программные модули импорта и экспорта графических данных, формирования и использования набора графических шаблонов также применяются в учебном процессе при преподавании дисциплин специализации в Белорусском государственном университете на факультетах прикладной математики и информатики, географическом.*

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

## On Rothermel's model improvement and implementation of two-dimensional computer model of forest fire spread prediction

D.V. Barovik, V.B. Taranchuk  
Belarusian State University

*Development of scientific-based forest fire spread computer models is needed to improve decision-support systems as well as the quality of fire prevention planning and effectiveness of fire extinguishing actions. This paper presents a forest fire prediction computer model adapted to the conditions, dominant forest species, characteristic scales, topography and climate of the Republic of Belarus. The proposed two-dimensional model is a generalization of widely used semi empirical one-dimensional Rothermel's model. Computer model software implementation, basics of input data preprocessing, classification, and formation are described. The developed software complex provides forest fire front dynamics modeling and visualization on electronic maps taking into account heterogeneous distribution of different forest plants and barriers in front of a fire. The software modules for graphics data import and export, and for forming and use of image template sets are also used in the study process while teaching specialization courses in the Belarusian State University at the Department of applied mathematics and computer science as well as the Geographical Department.*

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

Для научно обоснованных, успешных действий, направленных на предупреждение и ликвидацию лесных пожаров, требуется разработка соответствующих компьютерных моделей, их включение в состав систем поддержки принятия решений по предотвращению чрезвычайных ситуаций в лесах и окрестностях. В ряде монографий и научных обзоров принята следующая классификация моделей лесных пожаров [1–4]: 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, описывая развитие лесного пожара на основе общих законов и с учетом большого количества факторов, позволяют отвечать на весьма широкий круг вопросов [2, 4].

В **эмпирических 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 подобных 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 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 моделями.

Модели упомянутых классов создавались начиная со второй половины прошлого столетия для прогноза возникновения и развития лесных пожаров всех типов, но больше всего внимания уделялось проблемам прогноза динамики низовых лесных пожаров. Построены 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 [2, 4], 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), Н. Sekirge (1978, США), N. Fujii и др. (1980, Япония), А.М. Гришин (1981, Россия), С. Huang and Y. Xie (1984, США), F. Albin (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).

**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. 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. 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 [4]. Это эмпирические модели A. McArthur (Австралия), Forestry Canada Fire Danger Group, W. Hargrove (США) и полуэмпирическая модель Ричарда Ротермела (R. Rothermel, США) [5] (библиографические ссылки даны в [4]); теоретических моделей среди них нет.

Наиболее распространенная на сегодняшний день **полуэмпирическая модель** распространения низовых лесных пожаров была создана Ричардом Ротермелом (R. Rothermel) [5] на основе идей, изложенных в работе W. Frandsen. В [1, 6] 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 [2]. Однако, благодаря относительной простоте методики Р. Ротермела, ее программные реализации успешно внедрены в большинстве лесных служб Северной Америки. Позже были выполнены необходимые доработки для условий лесов Европы. Так как модель является полуэмпирической, ее применение в прогнозах распространения пожаров в условиях Средиземноморья не принесло немедленного успеха –

понадобился долгий и трудоемкий процесс по ее калибровке к новым условиям. В итоге модель Р. Ротермела используется на сегодняшний день и в Европе.

Целью данной работы является обобщение и адаптация модели Ротермела применительно к условиям лесов Республики Беларусь, реализация в компьютерном комплексе прогноза распространения лесного пожара. В предлагаемой версии учитываются уровень научно-практической подготовки пользователей программного средства, их возможности анализа решений прикладных задачи, а также в интерфейс пользователя включены возможности задания типов преобладающих пород лесных массивов, характерных масштабов площадей, рельефа и климата, установлены диапазоны изменения параметров модели Ротермела, наполнены соответствующие таблицы исходных данных для модифицированных алгоритмов расчета.

**Материал и методы.** 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. Перечислим исходные параметры полуэмпирической модели Ротермела:

$\omega_0$ , кг/м<sup>2</sup> – запас лесных горючих материалов (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 [5] рассчитывается скорость распространения пожара в фут/мин. В разработанном комплексе приняты размерности единиц системы СИ. Заметим, что использование наборов записанных параметров модели Ротермела не удобно на практике. 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 явно не присутствуют, а вычисляются через другие (доступные) параметры и факторы; предлагается использовать другой «базис» переменных. Разработанная компьютерная модель состоит из программных модулей обеспечения интерактивной работы, приема исходных топографических данных из ГИС, расчета прогнозных положений фронта пожара, графической визуализации фронта на электронной карте, экспорта в ГИС, а также неотъемлемой частью является база данных наборов характеристик для всех типовых климатических условий и параметров ЛГМ.

В работах [2, 7–8] 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;

$a$  – показатель скорости высушивания;

$b$  – минимальное значение влагосодержания данного типа ЛГМ в естественных условиях;

$\Gamma$  – индекс горимости В.Г. Нестерова [7–8], определяемый по формуле:

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

здесь  $T_j$  – температура воздуха в 14 ч в градусах по Цельсию;

$T_{dj}$  – точка росы в 14 ч в градусах по Цельсию;

$n$  – 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 (Г 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, классифицированы, 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 своих опыте и знаниях.

Примеры типов растительности, включенных в базу данных [9] (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 следует 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,

$f – кг/м^3$  – 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 [10]. Доказательством служит «альбом» [11] типов растительности (с фотографиями) региона Скалистых гор США. В созданном нами ПК для различных типов растительности использованы справочные данные, характерные значения.

Таблица

**Перечень исходных данных модели Ротермела для некоторых типов растительности**

Код	$\omega_0, кг/м^2$	$\sigma, м^{-1}$	$h, Дж/кг$	$\rho_p, кг/м^3$	$\delta, м$	$M_x$	$S_T$	$Z_d, м$	$f, кг/м^3$
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

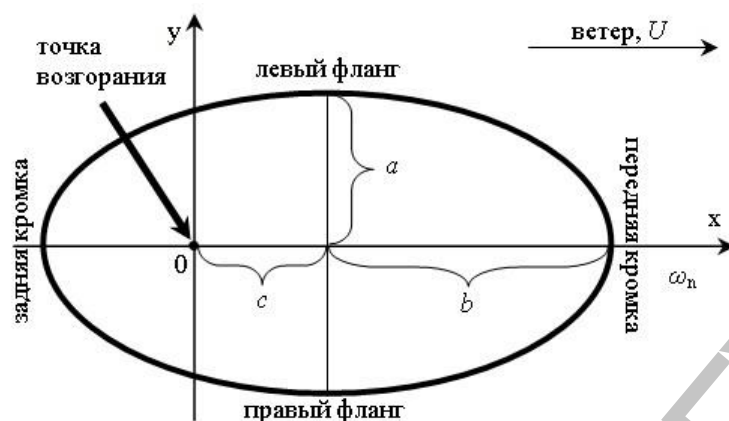


Рис. Эллиптическая форма контура низового лесного пожара.

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

Еще одной особенностью модификации модели Ротермела является вопрос, каким образом рассчитывать скорости фронта пожара в двумерном случае. Оригинальная модель одномерна, а результатом ее применения является число – скорость распространения 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.). С большой точностью подобное приближение подтверждают проведенные расчеты по теоретической модели [3].

В научной литературе нет единого подхода в определении формулы, описывающей величины  $a$ ,  $b$ ,  $c$  эллипса. В [12] приводится сравнительный анализ существующих подходов и предлагается их синтез, используемый в реализованных адаптированном алгоритме и ПК:

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

$$LB = 0,936 \exp(0,2566U) + 0,461 \exp(-0,1548U) - 0,397$$

$$HB = \frac{LB + \sqrt{LB^2 - 1}}{LB - \sqrt{LB^2 - 1}}, \quad (4)$$

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

**Результаты и их обсуждение.** Кратко перечислим алгоритмические основы компьютерной модели, работы оператора. Пользователь программного комплекса («Расчет и визуализация динамики лесного пожара» – ВУ.ФДБИ 00095) выбором из 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 лесных горючих материалов в области моделирования и на участках с другими типами ЛГМ или их отсутствием (водные преграды, дороги, поляны и др.) – на участках «неоднородных включений». Фактически 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 шаб-

лона 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 программном комплексе 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 размеров «неоднородных включений», 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 [2]. В методике Ротермела ответа на данный вопрос нет, перечисленные факторы не учитываются. В программном комплексе «Расчет и визуализация динамики лесного пожара» при анализе подобных ситуаций предлагаются два варианта подготовки прогноза. По первому варианту, ориентированному на пользователя, владеющего основами математического моделирования, оператор должен учитывать рекомендации, как подобрать временной дискрет, от значения которого зависят размер шаблона расширения и его форма. При таком подходе предварительно следует просмотреть запротоколированные в базе данных результаты вычислительных экспериментов по теоретической модели [3], 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, будет ли преодолено препятствие, при-

нимается 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.

**Заключение.** Создан программный комплекс «Расчет и визуализация динамики лесного пожара», обеспечивающий моделирование в реальном времени распространения лесных пожаров с учетом неоднородного распределения на пути огня различных типов лесной растительности и преград (просек, ручьев). Предложенное развитие модели Ротермела и реализованный на ее основе программный комплекс могут применяться для решения ряда прикладных задач: прогноза динамики развития и последствий лесного пожара, оценки пожарной опасности лесного участка, расчета площадей и периметров участков выгоревшего леса, научного обоснования противопожарных мероприятий, помощи в принятии решений по применению сил и средств тушения, рекомендаций по месту, направлению и характеристикам создаваемых лесопожарных разрывов и заслонов, сбора и хранения статистической информации о лесных пожарах, визуализации чрезвычайных ситуаций в различных геоинформационных системах. Созданные при разработке компьютерной модели модули импорта и экспорта графических данных, формирования и использования набора графических шаблонов формализованы, обобщены и включены для изучения в учебные программы дисциплин специализации в Белорусском государственном университете на факультетах прикладной математики и информатики, географическом.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дорпер, Г.А. Динамика лесных пожаров / Г.А. Дорпер. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. – 404 с.
2. Гришин, А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними / А.М. Гришин. – Новосибирск: Наука, 1992. – 408 с.
3. Barovik, D.V. Mathematical Modelling of Running Crown Forest Fires / D.V. Barovik, V.B. Taranchuk // Mathematical Modelling and Analysis. – 2010. – Vol. 15, № 2. – P. 161–174.
4. Pastor, E. Mathematical models and calculation systems for the study of wildland fire behaviour / E. Pastor [et al.] // Progress in Energy and Combustion Science. – 2003. – Vol. 29. – P. 139–153.
5. Rothermel, R.C. A Mathematical model for Predicting Fire Spread in Wildland Fuels / R.C. Rothermel. – USDA Forest Service. Res. Pap. INT-115, 1972. – 43 p.

6. 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.
7. Нестеров, В.Г. Горимость леса и методы ее определения / В.Г. Нестеров. – М.–Л.: Гослесбумиздат, 1949. – 76 с.
8. Методические указания по прогнозированию пожарной опасности в лесах по условиям погоды. – М.: Гидрометеиздат, 1975. – 15 с.
9. Баровик, Д.В. Базы данных результатов численного моделирования (на примере задачи распространения лесных пожаров) / Д.В. Баровик // Вестн. БГУ. Сер. 1, Физика, Математика, Информатика. – 2010. – № 2. – С. 170–174.
10. Волокитина, А.В. Классификация и картографирование растительных горючих материалов / А.В. Волокитина, М.А. Софронов. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. – 314 с.
11. Scott, J.H. Standard fire behaviour fuel models: a comprehensive set for use with Rothermel's surface fire spread model / J.H. Scott, R.E. Burgan. – USDA Forest Service, General Technical Report RMRS-GTR-153, 2005. – 72 p.
12. Finney, M.A. FARSITE: Fire Area Simulator – model development and evaluation / M.A. Finney. – USDA Forest Service. Res. Pap. RMRS-RP-4, 2004. – 47 p.

*Поступила в редакцию 23.11.2011. Принята в печать 28.12.2011*

*Адрес для корреспонденции:* 220118, г. Минск, ул. Крупской, д. 21, кв. 12, e-mail: BarovikD@gmail.com – Баровик Д.В.

РЕПОЗИТОРИЙ ВГУ