

О МЕТОДАХ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НИЗОВЫХ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

Д. В. БАРОВИК, В. Б. ТАРАНЧУК (МИНСК, БЕЛАРУСЬ)

barovik@bsu.by, taranchuk@bsu.by

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.

Самыми распространенными лесными пожарами являются низовые лесные пожары. На сегодняшний день разработано около полусотни моделей низовых лесных пожаров, при этом только четыре из них активно применяются в различных специализированных программных комплексах [1]. Это эмпирические модели А. McArthur [2] (Австралия), Forestry Canada Fire Danger Group (Канада), W. Hargrove (США) и полумпирическая модель Ричарда Ротермела [3] (R. Rothermel, США). Подробный обзор видов лесных пожаров, классификация существующих моделей и библиографические ссылки даны в [1, 4, 5].

Наибольшее применение получила *полумпирическая модель* низовых лесных пожаров Ричарда Ротермела (R. Rothermel) [3]. Ее программные реализации (BehavePlus [6], FARSITE /Fire Area Simulator/ [7], FCCS /Fuel Characteristic Classification System/ [8, 9] и др.) используются в большинстве лесных служб Северной Америки и Европы. Главная причина широкого распространения модели — ее простота. Методика Ротермела на основе арифметических формул [3] отвечает на вопрос, какова прогнозируемая скорость распространения низового лесного пожара в зависимости от характеристик охваченных огнем растительности, угла склона местности и скорости ветра. Перечислим все исходные параметры модели Ротермела. Их немного: ω_0 , кг/м² — запас лесных горючих материалов (ЛГМ) на местности в абсолютно сухом состоянии; δ , м — глубина слоя ЛГМ; σ , м⁻¹ — удельная поверхность ЛГМ; h , Дж/кг — теплотворная способность сухого горючего; ρ_p , кг/м³ — плотность горючего материала в абсолютно сухом состоянии; M_f — влагосодержание ЛГМ; M_x — критическое влагосодержание — минимальное значение влагосодержания ЛГМ, при достижении которого горение прекращается; S_T — массовая доля всех минеральных веществ в ЛГМ; S_e — массовая доля эффективных минеральных веществ; V , м/с — скорость ветра на середине высоты пламени, $\text{tg } \varphi$ — тангенс угла наклона рельефа.

Все параметры, за исключением двух последних (рельеф и скорость ветра), описывают тип горючей растительности. В последние годы в США и Канаде активизированы работы по классификации и картографированию типовых видов растительности; определяются перечисленные выше физико-химические характеристики, необходимые для использования в уравнениях модели Ротермела. Например, в работе [10] приведена классификация 40 типов растительности региона Скалистых гор США, создан соответствующий «альбом» с фотографиями. В США в настоящее время запущен приоритетный проект в рамках системы FCCS [9] по созданию ГИС-совместимых карт типов растительности всей территории с дискретом 30х30 метров (на текущий момент в заархивированном виде размер базы данных с картой [8] уже превышает 2 гигабайта).

Несмотря на такое широкое использование модели Ротермела, следует отметить ее существенные недостатки. Оригинальная модель является одномерной, а результатом ее применения является число – скорость распространения фронта пожара в направлении ветра. Модель вообще не отвечает на вопрос, какова скорость фронта пожара в направлениях флангов (перпендикулярно ветру) и против ветра. В разработанных позднее программных системах реализованы разные подходы, которые часто являются интуитивными и не содержат должных обоснований. Одним из вариантов обобщения модели Ротермела для реальных расчетов является метод, изложенный в [11, 12]. В этих работах приведена адаптация модели Ротермела применительно к условиям лесов Республики Беларусь и ее компьютерная реализация. Программный комплекс (ПК) позволяет моделировать в реальном времени распространение лесных пожаров с учетом неоднородности распределения типов растительности и различных преград (ручьи, минерализованные полосы и др.). В ПК рассчитывается форма контура, периметр и площадь пожара в различные моменты времени. Реализована возможность визуализации результатов на электронных картах местности и экспорт в геоинформационные системы.

Для наполнения базы данных типовых сценариев распространения пожаров наряду с уравнениями Ротермела в ПК используются и результаты расчетов по теоретической модели [13, 14, 15]. Такая необходимость связана с тем, что в методике Р. Ротермела нет явного учета законов сохранения массы и количества движения, использованы различные эмпирические соотношения. Принятый подход упрощает вычисления, но значительно снижает точность и общность прогноза

скорости нормального распространения лесного пожара. Для примера опишем, как в модели Ротермела учитывается влияние ветра. Первоначально вычисляется скорость распространения фронта пожара в условиях однородного распределения ЛГМ на равнинной местности при полном отсутствии ветра. Далее полученная скорость распространения пожара умножается на безразмерный коэффициент, пропорциональный $(1 + \varphi_W + \varphi_S)$, где φ_W – отвечает за влияние ветра, φ_S – за уклон рельефа.

Согласно [16] множитель «учета ветра» φ_W получен эмпирически в лаборатории путем наблюдения за горением опилок, а также с учетом результатов работы [2] по сжиганию травяного покрова в реальных условиях. Коэффициент φ_W вычисляется по формуле [3]:

$$\varphi_W = C \cdot V^B / (\beta')^E, \quad (1)$$

где V – скорость ветра на середине высоты пламени, а C , B и E – функции, зависящие только от удельной поверхности частиц ЛГМ σ м⁻¹ (т. е. отношения площади поверхности горючих частиц к их объему).

В [16] показано, что коэффициент φ_W модели Ротермела очевидно не согласуется с натурными наблюдениями в части зависимости степени B от σ . Например, при σ более 107 см⁻¹ (горение травы) значение B превышает 2. Физически это означает, что скорость распространения фронта горения таких ЛГМ квадратично растет с увеличением скорости ветра. Для ЛГМ со значением $\sigma = 6.3$ см⁻¹ получается линейная зависимость ($B = 1$), а при горении веточек с диаметром тоньше 0.64 см зависимость получается слабее, чем «корень квадратный» ($B < 0.5$). Такое экстремальное влияние характерного размера частиц ЛГМ до сегодняшнего дня не была ни экспериментально, ни теоретически подтверждено [16]. Согласно работам [17, 18] и [19] (среди авторов этой работы есть и сам Ротермел) наблюдения за реальными пожарами указывают на линейную или слегка экспоненциальную зависимость скорости фронта пожара от размеров частиц ЛГМ.

Австралийская система прогнозирования пожаров [18] при реализации модели Ротермела в уравнении (1) вовсе использует константу $B = 1.1$. В экспериментах [20] по сжиганию слоя опада сосновых иголок получено значение $B = 0.8$. Американская система FCCS [8] по умолчанию использует $B = 1.2$, но дает возможность эксперту «поиграть» с этой константой при моделировании.

Таким образом, область применения эмпирических моделей ограничена, а точность прогноза не высока в ситуациях, отличных от тех,

при которых были собраны опытные данные. Поэтому построение теоретических моделей лесных пожаров является актуальным вопросом. *Теоретические модели* базируются на законах газовой динамики, теплопереноса 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 [1, 21].

Как было отмечено в [1], наиболее значимой теоретической моделью распространения лесных пожаров является модель А.М. Гришина [21] базируется на фундаментальных законах физики, теоретически обоснована, частично подтверждена натурными экспериментами. Именно эта модель была принята авторами за основу при создании компьютерного комплекса по моделированию распространения вершинных верховых пожаров. В работах [13, 14, 15] приведена адаптация и компьютерная реализации модели А.М. Гришина. Эффективность модели демонстрируется в основном на примере расчета беглых верховых лесных пожаров, как наиболее быстро распространяющихся и наносящих наибольший материальный ущерб. В настоящей работе рассмотрена возможность применения адаптированной теоретической модели для расчетов распространения низовых лесных пожаров. Приводится зависимость скорости распространения фронта пожара от некоторых параметров задачи.

Адаптированная математическая модель низовых лесных пожаров. В приведенной ниже математической модели распространения лесных пожаров вычисляется эволюция двумерных (на площади) распределений следующих величин: T – осредненная по высоте слоя ЛГМ температура в Кельвинах; φ_j , $j = 1, 2, 3, 4$ – объемные доли многофазной реагирующей среды, где φ_1 соответствует сухому органическому веществу лесных горючих материалов, φ_2 – связанной с ЛГМ воде в жидко-капельном состоянии, φ_3 – коксика (конденсированному продукту пиролиза), φ_4 – минеральной части ЛГМ (золе); c_ν , $\nu = 1, 2, 3$ – массовые концентрации компонентов газовой фазы, где c_1 соответствует кислороду, c_2 – горючим газам (горючим компонентам продуктов пиролиза), c_3 – смеси остальных газов (инертных компонентов воздуха, водяного пара, инертных продуктов реакций пиролиза, горения коксика и окисления горючих газов).

При построении модели учитываются следующие физико-химичес-

кие процессы: «подвод» теплоты в результате конвекции, теплопроводности и излучения, прогрев ЛГМ, их сушка и пиролиз, горение газообразных и твердых продуктов пиролиза. Вывод уравнений, обоснование модели, численная схема и особенности организации расчетов приведены в публикациях [13, 14, 15, 22] для беглых верховых лесных пожаров. В данной работе делается «формальный» переход от верховых пожаров к низовым, а именно, используется та же система дифференциальных уравнений, но с новыми значениями физико-химических величин, характерными для низовых лесных пожаров:

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial t} = \Phi_{\varphi_1}(\varphi_1, T), \quad \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = \Phi_{\varphi_2}(\varphi_2, T), \quad \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} = \Phi_{\varphi_3}(\varphi_1, \varphi_3, c_1, c_2, T),$$

$$\frac{\partial \varphi_4}{\partial t} = 0,$$

$$\frac{\partial c_1}{\partial t} + (V, \text{grad } c_1) - \frac{1}{\rho_5} \text{div}(\rho_5 D_T \text{grad } c_1) = \Phi_{c_1}(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, c_1, c_2, T),$$

$$\frac{\partial c_2}{\partial t} + (V, \text{grad } c_2) - \frac{1}{\rho_5} \text{div}(\rho_5 D_T \text{grad } c_2) = \Phi_{c_2}(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, c_1, c_2, T),$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\rho_5 c_{p_5} (V, \text{grad } T) - \text{div}(\lambda_T \text{grad } T)}{\rho_5 c_{p_5} + \sum_{j=1}^4 \rho_j \varphi_j c_{p_j}} = \Phi_T(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, c_1, c_2, T),$$

$$\Phi_{\varphi_1}(\varphi_1, T) = -\frac{R_1}{\rho_1}, \quad \Phi_{\varphi_2}(\varphi_2, T) = -\frac{R_2}{\rho_2},$$

$$\Phi_{\varphi_3}(\varphi_1, \varphi_3, c_1, c_2, T) = \frac{\alpha_c R_1}{\rho_3} - \frac{M_c}{M_1} \frac{R_3}{\rho_3},$$

$$\Phi_{c_1}(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, c_1, c_2, T) = \frac{1}{\rho_5} \left(R_{51} - c_1 Q - \frac{\alpha}{c_{p_5} \Delta h} (c_1 - c_{1\infty}) \right),$$

$$\Phi_{c_2}(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, c_1, c_2, T) = \frac{1}{\rho_5} \left(R_{52} - c_2 Q - \frac{\alpha}{c_{p_5} \Delta h} (c_2 - c_{2\infty}) \right),$$

$$\Phi_T(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, c_1, c_2, T) = \frac{q_5 R_5 - q_2 R_2 + q_3 R_3 - \frac{\alpha}{\Delta h} (T - T_\infty) - 4\kappa_R \sigma T^4}{\rho_5 c_{p_5} + \sum_{j=1}^4 \rho_j \varphi_j c_{p_j}},$$

$$\sum_{\nu=1}^3 c_\nu = 1, \quad \rho_5 = \frac{\rho_\infty T_\infty}{M_\infty T} \left(\sum_{\nu=1}^3 \frac{c_\nu}{M_\nu} \right)^{-1}, \quad Q = (1 - \alpha_c) R_1 + R_2 + \frac{M_C}{M_1} R_3,$$

$$R_1 = k_{01} \rho_1 \varphi_1 \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right), \quad R_2 = k_{02} T^{-1/2} \rho_2 \varphi_2 \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right),$$

$$R_3 = k_{03} s_\sigma \varphi_3 \rho_5 c_1 \exp\left(-\frac{E_3}{RT}\right),$$

$$R_{51} = -R_3 - \frac{R_5 M_1}{2M_2}, R_{52} = (1 - \alpha_c) \nu_T R_1 - R_5,$$

$$R_5 = \rho_5 \min\left(c_2, \frac{M_2}{2M_1} c_1\right) k_{CO} \exp\left(-\frac{E_{CO}}{RT}\right).$$

Здесь t — время; V — вектор равновесной скорости ветра; T_∞ — невозмущенная температура окружающей среды в Кельвинах; ρ_j , $j = 1, 2, 3, 4$ — истинные плотности j -ой фазы; ρ_5 — плотность газовой фазы (смеси газов); ρ_∞ — невозмущенная плотность смеси газов (плотность воздуха); $c_{1\infty}$ и $c_{2\infty}$ — массовые концентрации кислорода и горючих газов в невозмущенной атмосфере; M_ν , $\nu = 1, 2, 3$ — молекулярные массы компонентов газовой фазы; M_C — молекулярная масса углерода, M_∞ — молекулярная масса (невозмущенная) воздуха; c_{p_j} , $j = 1, 2, 3, 4$ — теплоемкости j -й фазы; c_{p_5} — теплоемкость газовой фазы; Q — массовая скорость образования газовой фазы; λ_T — коэффициент турбулентной теплопроводности; D_T — коэффициент диффузии; q_2 , q_3 и q_5 — тепловые эффекты процессов испарения, горения конденсированного горючего и газообразного горючего продукта пиролиза соответственно; Δh — высота слоя ЛГМ ($\Delta h = h_2 - h_1$, где h_2 и h_1 — высоты верхней и нижней границ слоя соответственно); α — коэффициент теплообмена, между окружающим воздухом и моделируемым слоем ЛГМ; κ_R — интегральный коэффициент поглощения; σ — постоянная Стефана-Больцмана; R_1 — массовая скорость реакции пиролиза (разложения под действием высокой температуры с выделением горючих газов) сухого органического вещества ЛГМ; R_2 — массовая скорость испарения воды из ЛГМ (сушки ЛГМ); R_3 — массовая скорость реакции горения коксового остатка; R_{51} , R_{52} — массовые скорости образования кислорода, горючих газов; R_5 — массовая скорость реакции горения (окисления) горючих газов; k_{01} , k_{02} , k_{03} — предэкспоненты химических реакций, E_1 , E_2 , E_3 — энергии активации химических реакций, R — универсальная газовая постоянная, s_σ — удельная поверхность конденсированного продукта пиролиза (кокшика), α_C — коксовое число ЛГМ, ν_T — доля газообразных горючих продуктов пиролиза ЛГМ.

В модели не рассчитывается динамика возгорания леса, а моделируется процесс распространения пожара, уже вышедшего на режим устойчивого распространения. Поэтому в начальном распределении вычисляемых параметров присутствуют все три зоны пожара:

выжженная, горения и невыжженная. Граничные значения в невыжженной зоне характеризуются следующими невозмущенными пожаром величинами:

$$\varphi_{1H} = \frac{\rho_0}{\rho_1}, \quad \varphi_{2H} = \frac{\rho_0}{\rho_2}(1 - \zeta)W, \quad \varphi_{3H} = 0, \quad \varphi_4 \equiv 0.$$

В предположении, что на выжженном участке ЛГМ полностью сгорели, соотношения для конечных объемных долей описываются формулами:

$$\varphi_{1K} = 0, \quad \varphi_{2K} = 0, \quad \varphi_{3K} = \frac{\rho_1}{\rho_3}\alpha_c\varphi_{1H},$$

где ρ_0 – плотность типичного слоя ЛГМ, W – его влагосодержание, ζ – зольность лесных горючих материалов.

Результаты расчетов и их обсуждение. Приведем примеры расчетов по сжиганию равномерно распределенного сильно высушенного слоя опада и мхов. При моделировании использовались следующие значения: $V = 2$ м/с, $W = 10\%$, $\zeta = 0$, $\rho_0 = 10$ кг/м³, $\Delta h = 0.1$ м, $T_\infty = 25$ С, $\rho_1 = 500$ кг/м³, $\rho_2 = 1000$ кг/м³, $\rho_3 = 200$ кг/м³, $\rho_4 = 200$ кг/м³, $\rho_\infty = 1.15$ кг/м³, $c_{1\infty} = 0.23$, $c_{2\infty} = 0$, $M_1 = 32$, $M_2 = 28$, $M_3 = 29$, $M_C = 12$, $M_\infty = 29$, $c_{p1} = 2000$ Дж/(кг·К), $c_{p2} = 4180$ Дж/(кг·К), $c_{p3} = 900$ Дж/(кг·К), $c_{p4} = 1000$ Дж/(кг·К), $c_{p5} = 1000$ Дж/(кг·К), $q_2 = 3 \cdot 10^6$ Дж/кг, $q_3 = 1.2 \cdot 10^7$ Дж/кг, $q_5 = 10^7$ Дж/кг, $\lambda_T = 1000$ Дж/(м·с·К), $D_T = 1$ м²/с, $\alpha = 300$ Вт/(м²·К), $\alpha_c = 0.1$, $\nu_T = 0.8$, $\kappa_R = 0.3$, $s_\sigma = 1000$ м⁻¹, $E_1/R = 9400$ К, $E_2/R = 6000$ К, $E_3/R = 10000$ К, $k_{01} = 3.63 \cdot 10^4$ с⁻¹, $k_{02} = 6 \cdot 10^5$ К^{0.5}с⁻¹, $k_{03} = 1000 \cdot$ с⁻¹.

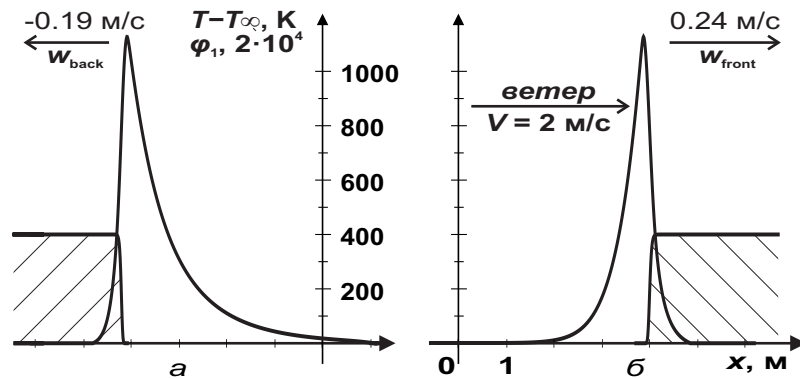


Рисунок 1 — Графики распределения температуры и объемной доли сухих ЛГМ. Распространение пожара: а) против ветра, б) по направлению ветра

На рисунке 1 приведены графики распределений температуры T и объемной доли сухих ЛГМ φ_1 на линии, ориентированной по направ-

лению ветра, иллюстрирующие рассчитанные распределения. Профили решений приняли фиксированную форму, пожар распространяется во всех направлениях от центра возгорания. При величине скорости ветра $V = 2$ м/с рассчитанная скорость фронта пожара по направлению ветра равна $\omega_{\text{front}} = 0.24$ м/с, против ветра (задняя кромка): $\omega_{\text{back}} = -0.19$ м/с.

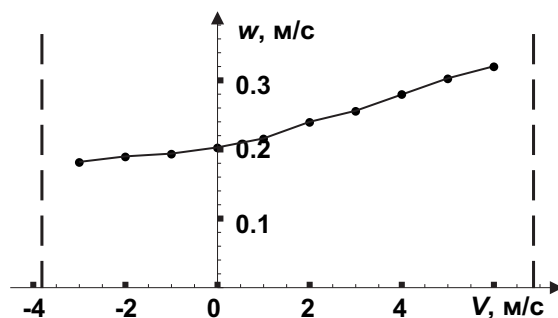


Рисунок 2 – График зависимости скорости распространения фронта пожара от скорости ветра

На рисунке 2 приведена зависимость скорости распространения пожара в зависимости от равновесной скорости ветра V при остальных фиксированных переменных.

На графике положительные значения скорости ветра V соответствуют распространению передней кромки пожара (по ветру), а отрицательные — задней кромки (против ветра). Из графика видно, что зависимость скорости распространения фронта пожара от скорости ветра близка к линейной; количественно зависимости различны для передней и задней кромки. Расчеты и анализ результатов показывают, что в заданных условиях существуют предельные значения скорости ветра, при превышении которых происходит качественное изменение режима пожара, в частности, прекращается распространение задней кромки пожара против сильного встречного ветра.

Система дифференциальных уравнений теоретической модели является нелинейной, коэффициенты и правые части уравнений зависят от всех искомым переменных. Физико-химические процессы имеют «взрывной» характер протекания, описывающие их функции выражаются экспоненциальными зависимостями от температуры. Профиль температуры в узкой зоне горения изменяется от невозмущенного значения до температуры более тысячи градусов Кельвина. Подобным образом в зоне пожара скачкообразно изменяются массовые концентрации горючих газов и окислителя, объемные доли компонент

ЛГМ. Чтобы корректно отобразить динамику профилей, а также для обеспечения устойчивости и сходимости разностной схемы неизбежным становится использование достаточно мелкой сетки по пространству и времени. При характерных размерах пожара в десятки, а иногда и сотни метров требуются значительные вычислительные мощности. Все вычисления авторами проведены на «обычных» компьютерах. Расчет каждого варианта по времени занимает от нескольких часов до нескольких суток. Для упрощения расчетов разработаны специальные модули автоматизации проведения серий вычислительных экспериментов с изменением параметров моделирования в заданных диапазонах и сохранением результатов в базе данных [22]. Однако ввиду вычислительной сложности задачи очевидным становится необходимость разработки и исследования методов распараллеливания вычислительного алгоритма задачи, проведение соответствующих расчетов на суперкомпьютере.

Список литературы

- [1] 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.
- [2] McArthur A. G. *Weather and grassland fire behaviour*. Commonwealth of Australia: Forestry Research Institute, Leaflet. No. 100. 1966. 23 p.
- [3] Rothermel R. C. *A Mathematical model for Predicting Fire Spread in Wildland Fuels*. USDA Forest Service. Res. Pap. INT-115, 1972. 43 p.
- [4] Баровик Д. В., Таранчук В. Б. *Состояние проблемы и результаты компьютерного прогнозирования распространения лесных пожаров* // Вестник БГУ. Сер. 1. 2011. № 3. С. 78–84.
- [5] Баровик Д. В., Таранчук В. Б. *О развитии методики Ротермела и реализации двумерной компьютерной модели прогноза распространения лесных пожаров* // Веснік Віцебскага дзяржаўнага ўніверсітэта. 2011. № 6 (66). С. 5–11.
- [6] Andrews P. L. *BehavePlus fire modeling system, version 5.0: Variables*. USDA Forest Service. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-213WWW Revised, 2009. 112 p.
- [7] Finney M. A. *FARSITE: Fire Area Simulator – model development and evaluation*. USDA Forest Service. Res. Pap. RMRS-RP-4, 2004. 47 p.
- [8] Ottmar R. D. et al. *An overview of the Fuel Characteristic Classification System Qualifying, classifying, and creating fuelbeds for resource planning* // Can. J. For. Res. 2007. № 37. P. 2383–2393.
- [9] US Forest Service. *The Fuel Characteristic Classification System*. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.fs.fed.us/pnw/fera/fccs/index.shtml>.
- [10] 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, Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-153, 2005. 72 p.
- [11] Баровик Д. В., Корзюк В. И., Таранчук В. Б. *Методические и алгоритмические основы программного комплекса «Расчет и визуализация динамики лесного пожара»* // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. 2011. № 2 (30). С. 22–33.

- [12] Баровик Д. В., Таранчук В. Б. *Адаптация модели Ротермела для реализации в программном комплексе прогноза распространения лесных пожаров* // Научный интернет журнал «Технологии техносферной безопасности» 2011. № 6 (40). <http://ipb.mos.ru/ttb/2011-6/2011-6.html>.
- [13] Barovik D. V., Taranchuk V. B. *Mathematical Modelling of Running Crown Forest Fires* // *Mathematical Modelling and Analysis*. 2010. Vol. 15, no 2. P. 161–174.
- [14] Баровик Д. В., Таранчук В. Б. *Об особенностях адаптации математических моделей вершинных верховых лесных пожаров* // Вестник БГУ. Сер. 1. 2010. № 1. С. 138–143.
- [15] Баровик Д.В., Таранчук В.Б. *Численная реализация математической модели верховых лесных пожаров* // Весті БДПУ. Сер. 3. 2010. № 2. С. 40–44.
- [16] Sandenberg D. V et al. *Reformulation of Rothermel's wildland fire behavior model for heterogeneous fuelbeds* // *Can. J. For. Res.* 2007. № 37. P. 2438–2455.
- [17] Nelson R. M., Adkins C. W. *Flame characteristics of wind-driven surface fires* // *Can. J. For. Res.* 1986. № 16. P. 1293–1300.
- [18] McCaw W. L. *Predicting fire spread in Western Australian mallee-heath shrubland* (Ph.D. thesis). University of New South Wales, Australia, 1997. 256 p.
- [19] Catchpole W. R. et al. *Rate of spread of free-burning fires in woody fuels in a wind tunnel* // *Combust. Sci. Technol.* 1998. № 131. P. 1–37.
- [20] Pagni T. J., Peterson T. G. *Flame spread through porous fuels* // *Proceedings of the 14th (International) Symposium on Combustion*. The Combustion Institute, Pittsburgh, Penn. 1973. P. 1099–1107.
- [21] Гришин А. М. *Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними*. Новосибирск: Наука, 1992. 408 с.
- [22] Баровик, Д. В. *Базы данных результатов численного моделирования (на примере задачи распространения лесных пожаров)* // Вестник БГУ. Сер. 1. 2010. № 2. С. 170–174.