

А.А. Тарасенко, канд. техн. наук, докторант, УГЗУ

МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ КОНТУРА ПРИРОДНОГО ПОЖАРА ПОД ДЕЙСТВИЕМ СОВМЕСТНОГО ВЛИЯНИЯ ЛАНДШАФТНО-МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

(представлено доктором техн. наук Ю.А. Абрамовым)

Предложена итерационная модель динамики контура природного пожара в условиях совместного влияния ландшафтно-метеорологических факторов, которая может быть использована для получения прогноза области ЧС.

Постановка проблемы. Выбор средств пожаротушения, ввод и расстановка сил, определение тактических заданий для каждого из подразделений, задействованных в локализации ландшафтного пожара, зависит от скорости движения и интенсивности тепловыделения кромки пожара. Скорость определяет динамику контура, на основании прогноза которой можно избирать адекватные обстановке тактические приемы локализации [1]. Таким образом, наличие прогноза динамики контура пожара в условиях пространственно-неоднородных ландшафтных и нестационарных метеорологических условий позволяет повышать эффективность проводимых оперативно-тактических мероприятий, уменьшать ущерб от данного вида ЧС и оптимизировать затраты на ее локализацию.

Анализ последних исследований и публикаций. Существующие модели динамики контура природного пожара не рассматривают одновременное влияние ветра, рельефа и макромозаичности распределения растительного горючего вещества [2-5].

Постановка задачи и ее решение. При моделировании динамики контура природного пожара необходимо учесть ряд ландшафтно-метеорологических факторов, существенно влияющих на скорость и направление движения кромки – топографию местности, пространственное распределение пирологических характеристик (картографированную макромозаичность), направление и скорость ветра. Информацию о первых двух факторах содержат физические карты местности, что позволяет получить модель поверхности рельефа [6] и модели объектов – лесных выделов, водоемов, населенных пунктов и т.д., заданных в виде границ полигонов. Значения пирологических характеристик, присущие тем или иным объектам и задаваемые внутри границ полигонов (в первом приближении - в виде постоянных значений), позволяют, используя модель [7], определить значения невозмущенной (в отсутствие ветра и склона) скорости распространения кромки $v_0(x; y)$ (рис. 1).

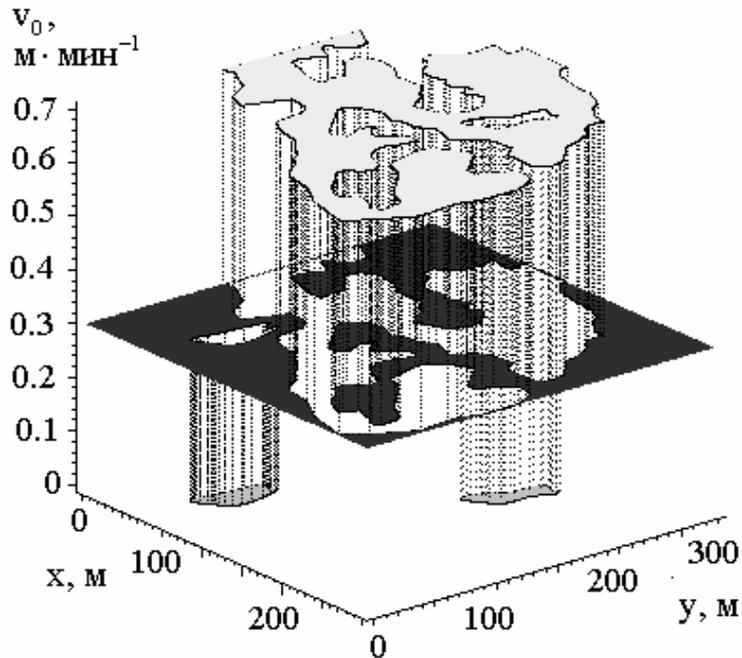


Рисунок 1 – График невозмущенной скорости распространения кромки пожара $v_0(x; y)$

Опираясь на модель поверхности рельефа $Z(x; y)$ и на данные анемометрических замеров либо метеоданные о скорости и направлении геострофического ветра, модель [8] позволяет получить описание векторного поля приповерхностного ветра $\mathfrak{G}(x; y)$. Ветер и рельеф влияют не только на значение скорости ветра, но и на ее направление. Рис. 2 иллюстрирует зависимость скорости (в виде годографа радиус-вектора скорости кромки под действием ветра V_w [9] и рельефа V_r [10]) от параметров ветра и рельефа, соответственно.

Дополняя данную информацию описанием контура очага пожара [11], частными моделями динамики контура под действием ветра и склона [9-10], необходимо построить модель динамики природного пожара под действием совместного влияния ландшафтно-метеорологических факторов.

Определим в параметрическом виде неоднородное поле годографов радиус-вектора перемещения точки кромки под действием ветра $G_w(x; y; \varphi; v_0(x; y); \mathfrak{G}(x; y))$ как

$$G_{wx}(x; y; \varphi; v_0(x; y); \mathfrak{G}(x; y)) = x + V_{wx}(x; y; \varphi; v_0(x; y); \mathfrak{G}(x; y)) \cdot \check{t}; \quad (1)$$

$$G_{wy}(x; y; \varphi; v_0(x; y); \mathfrak{G}(x; y)) = y + V_{wy}(x; y; \varphi; v_0(x; y); \mathfrak{G}(x; y)) \cdot \check{t}. \quad (2)$$

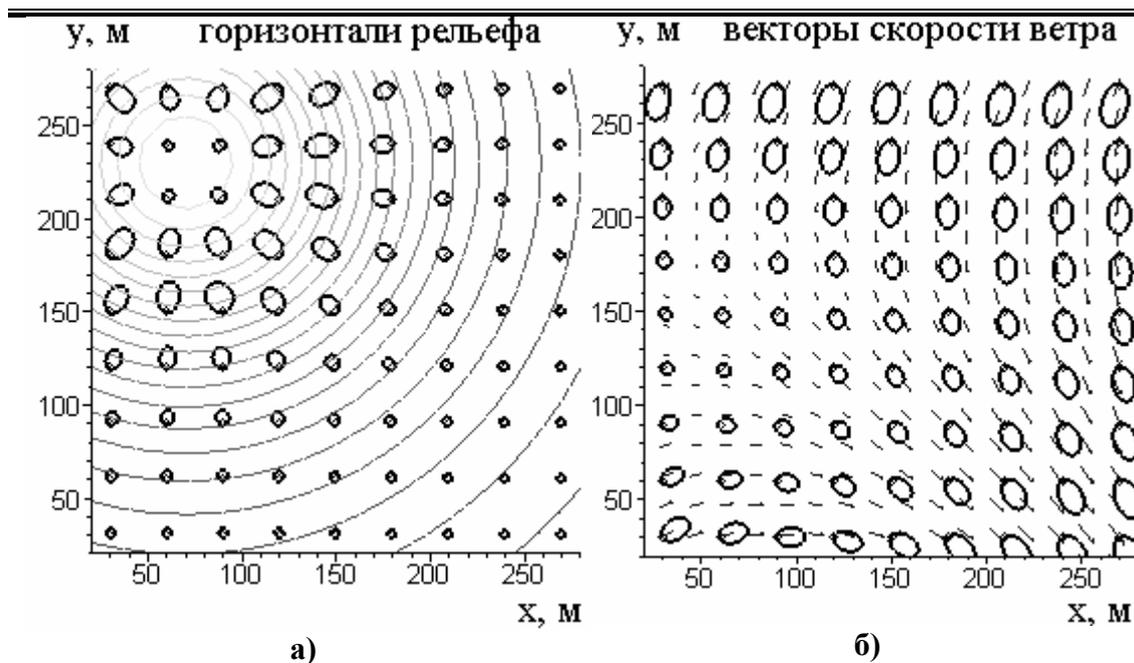


Рисунок 2 – Поля годографов радиус-векторов скорости кромки пожара под действием: а) неоднородного рельефа; б) неоднородного поля ветра

Аналогично для рельефа

$$G_{rx}(x; y; \varphi; v_0(x; y); Z(x; y)) = x + V_{rx}(x; y; \varphi; v_0(x; y); Z(x; y)) \cdot \check{t}; \quad (3)$$

$$G_{ry}(x; y; \varphi; v_0(x; y); Z(x; y)) = y + V_{ry}(x; y; \varphi; v_0(x; y); Z(x; y)) \cdot \check{t}. \quad (4)$$

В (1)-(4) φ - азимутальный угол (рад), $\varphi \in [0; 2\pi]$; \check{t} - единичный интервал времени.

Физический смысл введенных таким образом годографов - местоположение, которое примет точка $(x; y)$ за время \check{t} двигаясь в направлении φ под действием ветра (рельефа).

В случае совместного влияния ветра и рельефа суммирование данных годографов осуществляется следующим образом

$$G_{\Sigma}(x; y; \varphi; v_0(x; y); \vartheta(x; y); Z(x; y)) = \begin{cases} G_{wx}(x; y; \varphi; v_0; \vartheta) + G_{rx}(x; y; \varphi; v_0; Z) - v_0 \cdot \check{t} \cdot \cos \varphi - x; \\ G_{wy}(x; y; \varphi; v_0; \vartheta) + G_{ry}(x; y; \varphi; v_0; Z) - v_0 \cdot \check{t} \cdot \sin \varphi - y, \end{cases} \quad (5)$$

где $G_{\Sigma}(x; y; \varphi; v_0(x; y); \vartheta(x; y); Z(x; y))$ - годограф радиус-вектора перемещения точки кромки под действием совместного влияния ветра и рельефа.

Два последних слагаемых в (5) вычитаются с целью предотвращения их двойного учета, поскольку они входят в оба годографа G_w и G_r .

Проверка для предельных случаев показывает правильность такого суммирования: в случае отсутствия ветра ($\vartheta(x; y) = 0$) получаем [9] $V_w(x; y; \varphi; 0) = v_0(x; y) \forall \varphi$, $G_\Sigma = G_r$; в случае отсутствия склона ($Z(x; y) = \text{const}$) получаем [10] $V_r(x; y; \varphi; 0) = v_0(x; y) \forall \varphi$, $G_\Sigma = G_w$; в случае отсутствия и ветра и склона получаем окружность

$$G_\Sigma(x; y; \varphi; v_0(x; y); 0; \text{const}) = \begin{cases} x + v_0 \cdot \check{t} \cdot \cos \varphi; \\ y + v_0 \cdot \check{t} \cdot \sin \varphi. \end{cases} \quad (6)$$

Дополним модель информацией о контуре очага $L_0(x; y) = L(x; y; t_0)$ [11], где t_0 - время фиксации очага.

Модель динамики контура пожара строим на основе принципа нормальной скорости [5], используя итерационный подход [12], который позволяет учитывать локальные значения влияющих факторов.

В качестве входных параметров модели введем:

- $v_0(x; y)$ - скорость ($\text{м} \cdot \text{мин}^{-1}$) кромки пожара в отсутствие склона и ветра;

- $Z(x; y)$ - уравнение поверхности рельефа (м);

- $\vartheta(x; y) = [\vartheta_x(x; y); \vartheta_y(x; y); \vartheta_z(x; y)]$ - векторное поле приповерхностного ветра ($\text{м} \cdot \text{мин}^{-1}$);

- $\tilde{L}_0(m) = \begin{cases} \tilde{X}_0(m); \\ \tilde{Y}_0(m); \end{cases}$ - параметрическую сплайн-интерполяцию

проекции контура очага на плоскость XOY в момент времени t_0 , $m \in [1; M_0]$ - параметр, M_0 - количество узлов интерполяции контура очага, $\tilde{L}_0(m) = \tilde{L}(m; t_0)$;

- Δt - временной шаг (мин).

Контур пожара на i -ом временном шаге (т.е. в момент времени $t_0 + i \cdot \Delta t$) будем обозначать как $\tilde{L}_i(m)$.

Введем обозначения значений производных компонент i -ого параметрического контура по параметру m в произвольной m_0 -ой точке данного контура ($m_0 \in [1; M_i]$) как

$$\dot{x}_{i0} = \dot{\tilde{X}}_i(m_0) = \left. \frac{d\tilde{X}_i(m)}{dm} \right|_{m=m_0}; \quad \dot{y}_{i0} = \dot{\tilde{Y}}_i(m_0) = \left. \frac{d\tilde{Y}_i(m)}{dm} \right|_{m=m_0}. \quad (7)$$

Единичный вектор внешней нормали \vec{n} к контуру очага в точке контура m_{i0} имеет координаты $\vec{n} \left(-\frac{\dot{y}_{i0}}{\sqrt{\dot{x}_{i0}^2 + \dot{y}_{i0}^2}}; \frac{\dot{x}_{i0}}{\sqrt{\dot{x}_{i0}^2 + \dot{y}_{i0}^2}} \right)$ (при задании исходного контура с отрицательным направлением обхода). Соответственно, вектор нормальной скорости \vec{v}_n в точке контура m_{i0} задается координатами

$$\vec{v}_n = v_0(x(m); y(m)) \cdot \left(-\frac{\dot{y}_{i0}}{\sqrt{\dot{x}_{i0}^2 + \dot{y}_{i0}^2}}; \frac{\dot{x}_{i0}}{\sqrt{\dot{x}_{i0}^2 + \dot{y}_{i0}^2}} \right), \quad (8)$$

В точке m_{i0} вектор нормали \vec{n} образует угол γ_i (рад) с осью OX

$$\gamma_i = \arctan \left(\frac{\dot{x}_{i0}}{\sqrt{\dot{x}_{i0}^2 + \dot{y}_{i0}^2}}; -\frac{\dot{y}_{i0}}{\sqrt{\dot{x}_{i0}^2 + \dot{y}_{i0}^2}} \right). \quad (9)$$

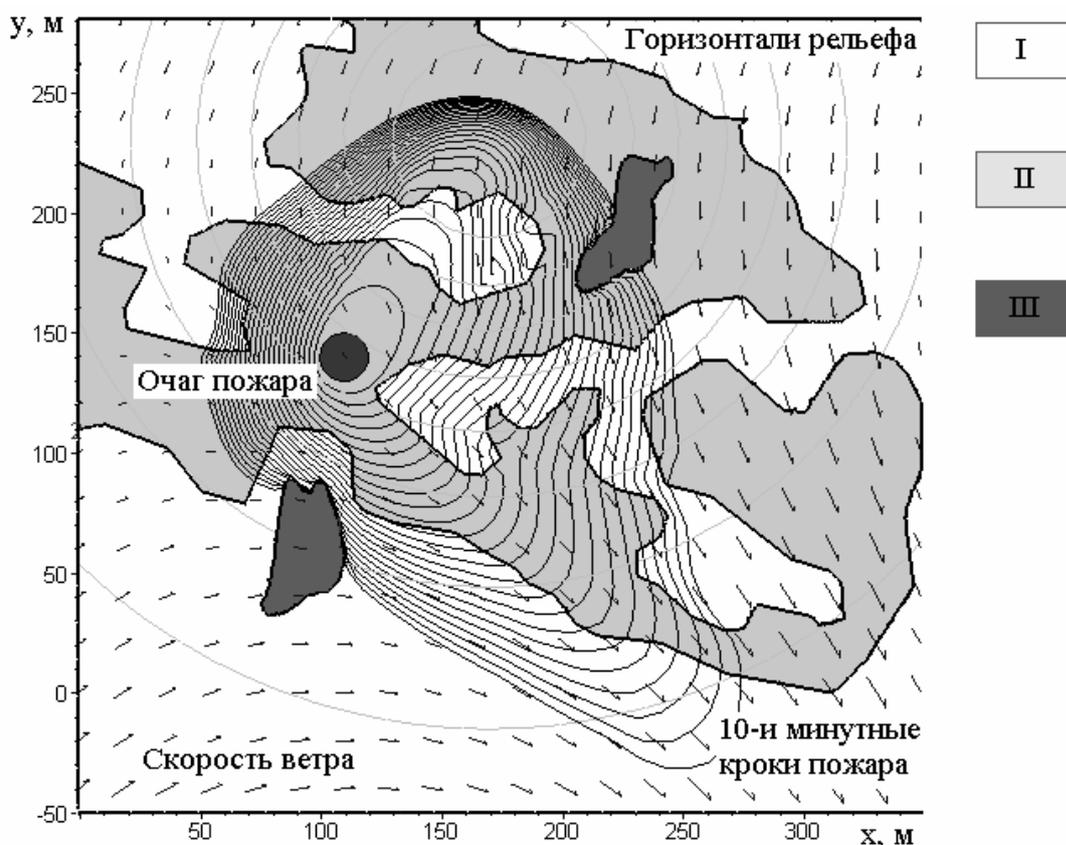


Рисунок 3 – 4-х часовой прогноз распространения кромки пожара в неоднородных ландшафтно-метеорологических условиях. Выделы: I - $v_0 = 0.3 \text{ м} \cdot \text{мин}^{-1}$; II - $v_0 = 0.7 \text{ м} \cdot \text{мин}^{-1}$; III - $v_0 = 0 \text{ м} \cdot \text{мин}^{-1}$

Непосредственная подстановка в выражения (1)-(4), а затем в (5) значения данного угла вместо φ , подстановка вместо x и y , соответственно, значений $\tilde{X}_0(m)$ и $\tilde{Y}_0(m)$, вместо \check{t} - значения Δt , позволяет найти местоположение каждой точки контура спустя время Δt . Повторяя данную процедуру, получим кроки пожара на каждом i -ом шаге.

Пример моделирования динамики контура пожара на основе данной итерационной процедуры в условиях совместного воздействия факторов представлен на рис. 3.

На основании полученного прогноза руководитель тушения пожара может находить интегральные характеристики области - величину периметра контура и площадь, пройденную огнем, осуществлять выбор средств пожаротушения, расстановку сил и избрание тактических приемов по локализации области пожара.

Выводы. Получена итерационная модель динамики контура природного пожара, учитывающая совместное влияние комплекса ландшафтно-метеорологических факторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Курбатский Н.П. Техника и тактика тушения лесных пожаров. М.: Гослесбумиздат, 1962.- 154 с.
2. Покровский Р.Л. Раннее обнаружение очагов ландшафтных пожаров и прогноз динамики их распространения: Дис... канд. техн. наук: 21.06.02. – Харьков, 2002. – 221 с.
3. Кузик А.Д., Карабин О.О. Моделювання процесу поширення лісової пожежі в умовах гірської місцевості // Пожежна безпека. Зб. наук. пр. Вип. 6, Львів: СПОЛОМ, 2005. - С. 49-53.
4. Калиновский А.Я., Созник А.П. Модель распространения ландшафтного пожара с учетом изменения влажности горючего материала // Науковий вісник будівництва: Зб. наук. пр. – Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 2005. – Вип. 31. – С. 291-295.
5. Доррер Г.А. Математические модели динамики лесных пожаров. – М.: Лесная промышленность, 1979. – 161 с.
6. Абрамов Ю.А., Тарасенко А.А. Синтез аналитической модели поверхности по линиям уровня // Проблеми надзвичайних ситуацій. Зб. наук. пр. УЦЗ України. Вип. 6. – Харків: УЦЗУ, 2007.- С. 11-22.
7. Rothmel R.C. A mathematical model for fire spread predictions in wildland fuels. USDA Forest Service Res. Paper INT-115. Ogden, 1972.

8. Абрамов Ю.А., Тарасенко А.А. Математическая модель локальных воздушных течений над поверхностью рельефа // Науковий вісник будівництва: Зб. наук. пр. – Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 2008. – Вип. 45. – С. 132-139.

9. Басманов А.Е., Созник А.П., Тарасенко А.А. Экспериментально-аналитическая модель скорости распространения низового лесного пожара // Проблемы пожарной безопасности. - Выпуск 11. - Харьков: Фолио, 2002. - С. 17-25.

10. Тарасенко А.А. Модель скорости распространения кромки ландшафтного пожара по поверхности рельефа // Науковий вісник будівництва: Зб. наук. пр. – Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 2008. – Вип. 47. – С. 112-118.

11. Абрамов Ю.А., Тарасенко А.А. Аналитическая математическая модель контура зоны локальной чрезвычайной ситуации // Науковий вісник будівництва: Зб. наук. пр. – Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 2007. – Вип. 42. – С. 171-174.

12. Абрамов Ю.А., Тарасенко А.А. Моделирование пространственной динамики природной чрезвычайной ситуации // Проблеми надзвичайних ситуацій. Зб. наук. пр. УЦЗ України. Вип. 5. – Харків: УЦЗУ, 2007.- С. 241-245.

nuczu.edu.ua

Статья поступила в редакцию 17.09.2008 г.