УДК 621.3

Тарасенко А.А
Университет гражданской защиты Украины

МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ КРОМКИ ЛАНДШАФТНОГО ПОЖАРА С УЧЕТОМ ПРОСТРАНСТВЕННО-НЕОДНОРОДНОГО ПОЛЯ ВЕТРА

На основании модели нормальной скорости предложена итерационная модель динамики контура природного пожара в условиях пространственно-неоднородного поля ветра. Скорость движения кромки представляет собой векторную сумму нормальной скорости и скорости в направлении ветра. Данное описание может быть использовано в качестве прогноза развития области чрезвычайной ситуации

The iterative model contour dynamics of wildfire in conditions of a spatially - inhomogeneous field of a wind based on model of normal speed is offered. The running speed of an edge is the vector sum of normal speed and speed in a wind direction. The given description can be used for the forecasting of development of area of an extraordinary situation

Постановка проблемы. Для эффективной борьбы с природными пожарами необходимо располагать прогнозом динамики контура области пожара [1], на которую существенным образом влияет ряд факторов, таких как поле ветра, рельеф, пространственное распределение пирологических параметров горючей среды [2]. В свою очередь, поле приповерхностного ветра трансформируется под действием мезорельефа и растительности [3-4] и, таким образом, в общем случае представляет собой пространственно-неоднородное векторное поле. В связи с этим необходимо получить описание эволюции контура пожара в условиях неоднородного поля ветра.

Анализ существующих решений. Существующие модели [5-7] контура лесного пожара не рассматривают случай неоднородного поля ветра, поэтому точность таких описаний не позволяет их практического использования в условиях холмистого либо горного ландшафта.

Кроме того, данные описания строятся на основании задания контура очага в виде явной линии в полярных координатах, либо набора линий в декартовых координатах, что исключает либо существенно сужает возможность описания реального контура очага пожара.

Использование модели нормальной скорости впервые предложено в [5], но не распространено на случай неоднородного поля ветра.

Описание контура очага в виде параметрической линии приведено в [8].

Постановка задачи и ее решение. Целью данной работы является получение математической модели динамики контура ландшафтного пожара в условиях изолированного влияния неоднородного стационарного поля ветра.

Исключим в данном построении влияние прочих факторов, для чего рассмотрим природный пожар в условиях равнинной местности и однородного распределения пирологических свойств растительного горючего материала. При построении модели динамики кромки ландшафтного пожара воспользуемся моделью нормальной скорости [5], которая предполагает движение каждой точки невозмущенной внешними воздействиями кромки пожара по нормали к кромке.

Пусть контур пожара задан в виде параметрически заданной функции, являющейся результатом сплайн-интерполяции узлов контура

$$\tilde{L}(m) = \begin{cases} \tilde{X} = \tilde{X}(m); \\ \tilde{Y} = \tilde{Y}(m), \end{cases} \quad (1)$$

где $m \in [1; M]$ - непрерывное множество номеров узлов.

Прямая, на которой лежит нормаль к контуру (1), в точке контура m_0 $(x_0 = \tilde{X}(m_0); y_0 = \tilde{Y}(m_0))$ задается уравнением [9]

$$\dot{x}_0(x - x_0) + \dot{y}_0(y - y_0) = 0, \quad (2)$$

где $\dot{x}_0 = \dot{\tilde{X}}(m_0) = \left.\frac{d\tilde{X}(m)}{dm}\right|_{m=m_0}$; $\dot{y}_0 = \dot{\tilde{Y}}(m_0) = \left.\frac{d\tilde{Y}(m)}{dm}\right|_{m=m_0}$.

Единичный вектор внешней нормали $\vec{n}$ к контуру (1) в точке контура m_0 имеет координаты $\vec{n}\left(-\frac{\dot{y}_0}{\sqrt{\dot{x}_0^{\,2} + \dot{y}_0^{\,2}}}; \frac{\dot{x}_0}{\sqrt{\dot{x}_0^{\,2} + \dot{y}_0^{\,2}}}\right)$ (при задании исходного контура с отрицательным направлением обхода). Соответственно, вектор нормальной скорости $\vec{v}_n$ в точке контура m_0 задается координатами

$$\vec{v}_n = v_0\left(-\frac{\dot{y}_0}{\sqrt{\dot{x}_0^{\,2} + \dot{y}_0^{\,2}}}; \frac{\dot{x}_0}{\sqrt{\dot{x}_0^{\,2} + \dot{y}_0^{\,2}}}\right), \quad (3)$$

где v_0 - модуль скорости кромки в отсутствие воздействий в виде ветра и склона.

Данный вектор образует угол γ с осью OX

$$\gamma = \arctan\left(\frac{\dot{x}_0}{\sqrt{\dot{x}_0^{\,2} + \dot{y}_0^{\,2}}}; -\frac{\dot{y}_0}{\sqrt{\dot{x}_0^{\,2} + \dot{y}_0^{\,2}}}\right). \quad (4)$$

Введем в рассмотрение пространственно-неоднородное векторное поле приповерхностной скорости ветра $\vec{V}_w$, заданное координатами компонент вектора

$$\vec{V}_w = \left(V_{wx}(x, y, z); V_{wy}(x, y, z); V_{wz}(x, y, z)\right). \quad (5)$$

Направление горизонтальной составляющей скорости ветра (угол ψ с осью OX) на высоте h от поверхности земли $Z(x, y)$ (вводя обозначение $\psi(x, y, Z(x, y) + h) = \psi_h$) определим как

$$\psi_h = \arctan\left(V_{wy}(x, y, Z(x, y) + h);\ V_{wx}(x, y, Z(x, y) + h)\right). \quad (6)$$

Величину горизонтальной составляющей скорости ветра на той же высоте (обозначая ее $V_{wh} = V(x, y, Z(x, y) + h)$) зададим как

$$V_{wh} = \sqrt{\left(V_{wx}(x, y, Z(x, y) + h)\right)^2 + \left(V_{wy}(x, y, Z(x, y) + h)\right)^2}\,. \quad (7)$$

В этом случае для каждой точки m контура пожара можно записать выражение для скорости кромки v_w в произвольном азимутальном направлении φ под действием ветра $V_{wh}(x(m), y(m))$, от которой надо отнять скорость v_0, для предотвращения ее двойного учета

$$v_w(v_0, k, V_{wh}, c, \varphi, \psi_h) = V_{fl}(v_0, k, V_{wh}(x(m), y(m))) \cdot R_w((\varphi - \psi_h), \alpha_h) - v_0\,, \quad (8)$$

где $R_w((\varphi - \psi_h), \alpha_h)$ годограф скорости кромки под действием ветра [10]

$$R_w((\varphi - \psi_h), \alpha_h) = \\ = \frac{2\alpha_h \cos(\varphi - \psi_h) + (1 + \alpha_h{}^2)\sqrt{\cos^2(\varphi - \psi_h) + (1 - \alpha_h{}^2)^2 \sin^2(\varphi - \psi_h)}}{\cos^2(\varphi - \psi_h) + (1 + \alpha_h{}^2)^2 \sin^2(\varphi - \psi_h)}\,; \quad (9)$$

коэффициент

$$\alpha_h(x(m), y(m)) = \frac{V_{wh}(x(m), y(m))}{\sqrt{\left[V_{wh}(x(m), y(m))\right]^2 + c^2}}\,; \quad (10)$$

фланговая скорость кромки

$$V_{fl\,h}(x(m), y(m)) = v_0 + kV_{wh}(x(m), y(m))\,; \quad (11)$$

$\varphi \in [0; 2\pi]$ - азимутальный угол;

c и k - эмпирические табулированные коэффициенты [11].

Вводя в (9) вместо φ угол γ, найдем значение скорости кромки в направлении вектора скорости ветра. После этого можно найти результирующий вектор $\vec{V}$ скорости перемещения каждой точки контура как векторную сумму (рис. 1)

$$\vec{V}(x(m), y(m)) = \vec{v}_n(x(m), y(m)) + \vec{v}_w(x(m), y(m))\,. \quad (12)$$

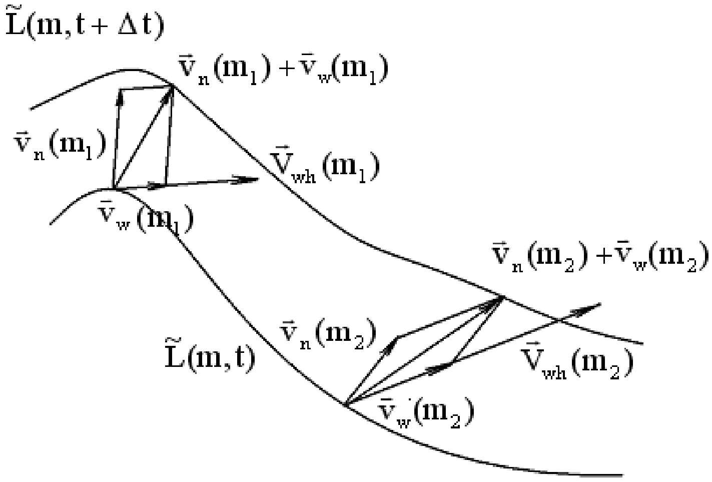

Рис. 1. Схема итерационного построения нового контура области природного пожара в условиях неоднородного поля ветра

Для перехода от скорости точки контура непосредственно к самому контуру введем временной шаг Δt. Умножая на него выражение (12), получим перемещение каждой точки старого контура, т.е. новый параметрически заданный контур

$$\tilde{L}(m, t + \Delta t) = \begin{cases} \tilde{X}(m, t + \Delta t) = \tilde{X}(m, t) + V_x \cdot \Delta t; \\ \tilde{Y}(m, t + \Delta t) = \tilde{Y}(m, t) + V_y \cdot \Delta t, \end{cases} \qquad (13)$$

где

$$V_x = v_0 \cdot n_x + v_w \cos\varphi; \quad V_y = v_0 \cdot n_y + v_w \sin\varphi. \qquad (14)$$

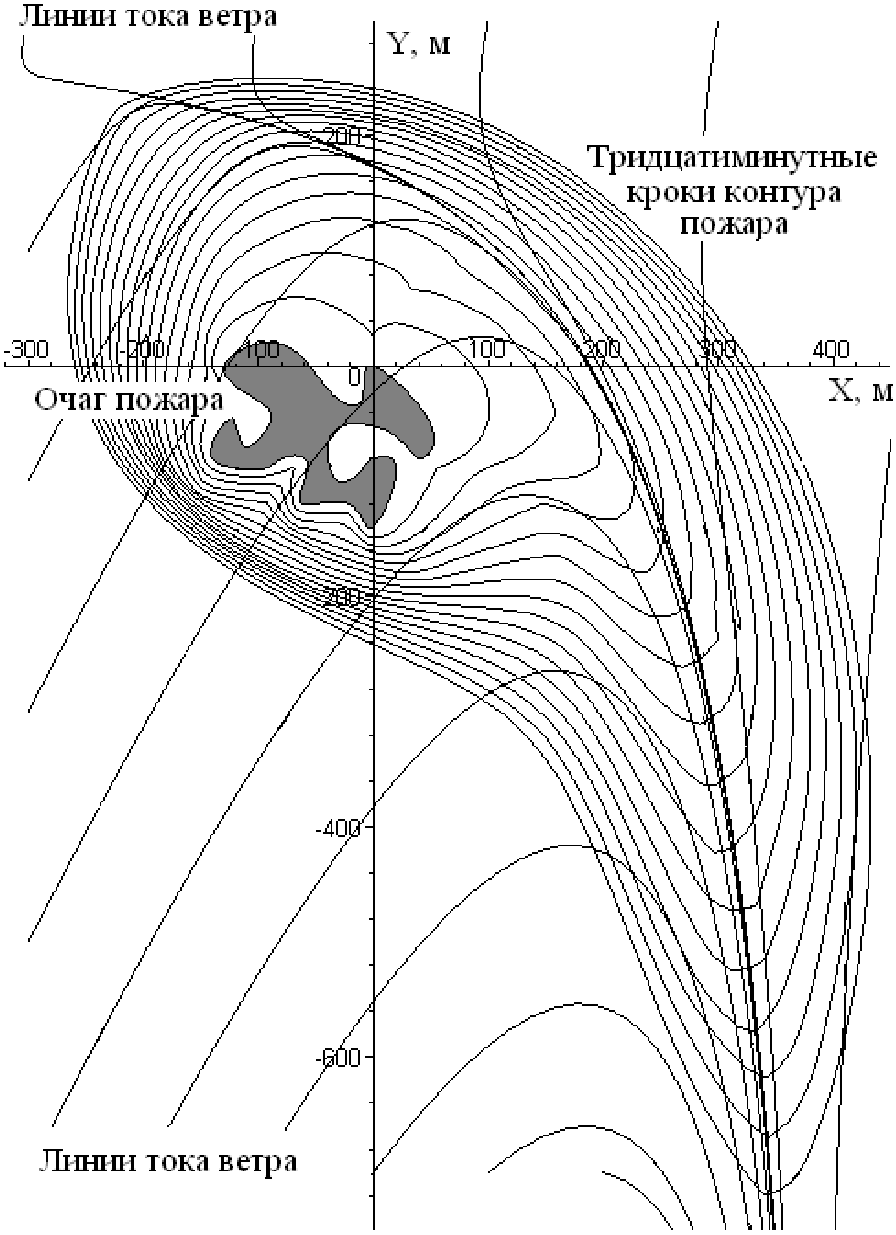

Рис. 2. Пример эволюции контура ландшафтного пожара в условиях пространственно неоднородного поля ветра

Повторяя итерации, можно получить контур на k-ом временном шаге как

$$\widetilde{L}(m, t + k \cdot \Delta t) = \begin{cases} \widetilde{X}(m, t + \Delta t) = \widetilde{X}(m, t) + V_x \cdot (k - 1) \cdot \Delta t; \\ \widetilde{Y}(m, t + \Delta t) = \widetilde{Y}(m, t) + V_y \cdot (k - 1) \cdot \Delta t. \end{cases} \quad (15)$$

Следует отметить, что при проведении итерационной процедуры возникают технические трудности в связи с разрастанием объема символьных вычислений. Поэтому представляется целесообразным после получения нового контура проводить повторно его интерполяцию для получения уравнения контура в том же виде, что и исходный.

На рис. 2 приведен пример развития контура пожара в условиях неоднородного поля ветра.

Выводы. Получена математическая модель динамики кромки ландшафтного пожара в условиях пространственно-неоднородного поля ветра.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Подрезов Ю.В., Шахраманьян М.А. Методологические основы прогнозирования динамики чрезвычайных лесопожарных ситуаций. – М.: ВНИИ ГОЧС, 2001. – 266с.
2. Курбатский Н.П. Техника и тактика тушения лесных пожаров. М.: Гослесбумиздат, 1962.- 154 с.
3. Дородицын А.А. Влияние рельефа земной поверхности на воздушные течения // Труды Центрального института прогнозов. Вып. 21. - М.: ЦИП, 1950. – С. 3-25.
4. Валендик Э.Н. Ветер и лесной пожар. М.: Наука, 1968. – 118 с.
5. Доррер Г.А. Математические модели динамики лесных пожаров. – М.: Лесная промышленность, 1979. – 161 с.
6. Finney M. “FARSITE: Fire Area Simulator-Model Development and Evalution”. Res. Pap. RMRS-RP-4. Ogden. UT: U.S. Department of Agriculture. Forest Service. Rocky Mountain Research Station, 1998. - 47 p.
7. Калиновский А.Я., Созник А.П. Модель распространения ландшафтного пожара с учетом изменения влажности горючего материала. Науковий вісник будівництва: Сб. науч. тр. – Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 2005. – Вип. 31. – С. 291-295.
8. Абрамов Ю.А., Тарасенко А.В. Оценка точности интерполяции параметрическими сплайнами контуров объектов ландшафта // Коммунальное хозяйство городов. Выпуск 79. Серия: Технические науки и архитектура. Киев: "Техника", - 2007. - С. 363-369.
9. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. М.: Наука, 1981. – 720 с.
10. 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.

11. Телицын Г.П. О распространении горения в лесу // Горение и пожары в лесу. Красноярск: НИИ леса и древесины, 1973. - С. 164-176.