

УДК 630*432(470.331):519.86

ЛЕСНЫЕ ПОЖАРЫ И ФРАКТАЛЬНАЯ РАЗМЕРНОСТЬ ЛЕСОВ ТВЕРСКОЙ ОБЛАСТИ

А.Н. Кудинов, И.В. Цветков

Тверской государственной университет, г. Тверь
Лаборатория математического моделирования

В работе построена математическая модель лесного пожара, учитывающая фрактальный характер фронта горения. Найдены аналитические зависимости скорости распространения лесного пожара и размеров сгоревшего участка от фрактальной размерности, времени и параметров лесного массива. Проведены числовые оценки интересующих нас величин V и h при конкретных значениях фрактальной размерности D .

Ключевые слова: *математическая модель лесных пожаров, скорость распространения пожаров, длина фрактальной кривой.*

FOREST FIRES AND FRACTAL DIMENSION OF WOODS IN THE TVER REGION

A. N. Kudinov, I. V. Tsvetkov

Tver State University mathematical modeling laboratory

In this work the mathematical model of forest fire considering fractal character of front of burning is constructed. Analytical associations of a velocity of distribution of forest fire and sizes of the burnt down site on fractal dimension, time and large forest parameters are discovered. Numerical estimations of magnitudes interesting us V and h are spent at concrete values of fractal dimension D .

Keywords: *mathematical model of forest fires, the rate of fire spread, the length of fractal curve.*

В последние годы наука существенно продвинулась в разработке математических моделей лесных пожаров [1]. Лесные пожары возникают сегодня на планете как никогда ранее. Леса занимают более 74% территории Российской Федерации, и каждый лесной пожар наносит существенный вред ее экономике. Так в 2008 году количество лесных пожаров на территории РФ составило по данным МЧС РФ более 30 тыс. [2]. Общая площадь лесных массивов, охваченных огнем, составила более 1 млн. га. Крайне актуален вопрос о лесных пожарах и в других странах. Растет количество лесных пожаров и на территории

США. Так за последние 10 лет на борьбу с огнем американским правительством ежегодно тратится более миллиарда долларов. В 2005 году горело 3,5 млн. га американских лесов, и это казалось пределом, но уже в 2006 году пожарами были охвачены 3,7 млн. га.

Наиболее часто в лесных массивах возникают низовые лесные пожары, при которых выгорает лесная подстилка, подрост и подлесок, травянистый и кустарниковый покров, валежник, корневища деревьев и т.п.

В засушливый период при ветре могут возникать верховые пожары, при которых огонь распространяется по кронам деревьев, преимущественно хвойных пород. При горении торфа могут возникать подземные пожары.

Одной из главных характеристик лесного пожара является скорость его распространения V . Характерная скорость низового пожара V_n составляет 0,1–3 м/мин. Для верховых лесных пожаров температура в очаге составляет 1100 °С, а скорость их распространения V_b при ветре достигает 100 м/мин. При безветрии скорость распространения лесного пожара ниже $V_b \approx 2 - 3$ км/час.

Целью настоящей работы является построение математической модели лесных пожаров, учитывающие фрактальные свойства этих явлений. Фрактальные свойства лесных пожаров очевидны из тесной аналогии фронта горения и береговой линии. Фрактальный характер свойства береговой линии рассмотрен подробно Б.Мандельбротом в [3].

Нормальная скорость пламени лесного пожара, если фронт горения представляет гладкую кривую, может быть оценен как $V_b \approx \frac{\delta}{\tau}$.

Здесь τ – характерное время горения, δ – ширина зоны горения [4].

Фрактальный характер кривой фронта горения эффективно будет увеличивать значение δ по сравнению с гладким фронтом.

Длина фрактальной кривой L существенно зависит от масштаба [3]:

$$L = L_0 \left(\frac{1}{\varepsilon} \right)^{D-1} \quad (1)$$

где D – значение фрактальной размерности, L_0 – значение L для гладкой кривой $D = 1$. В нашем случае $\varepsilon = \frac{h}{h_{min}}$, h – размер зоны горения, а

h_{min} – минимальное расстояние между фрагментами в зоне горения.

Величина h имеет порядок размера участка выгоревшего леса, а h_{min} –

характерного расстояния между деревьями и кустарниками горящего леса.

Из (1) следует, что фрактальный характер зоны горения эффективно увеличивает ширину зоны горения, а именно

$$\delta = \delta_0 \left(\frac{1}{\varepsilon} \right)^{D-1} \quad (2)$$

где δ_0 – ширина зоны горения для гладкого фронта зоны горения.

В результате скорость распространения лесного пожара v с учетом фрактальности фронта горения имеет вид:

$$v = v_0 \left(\frac{h}{h_{min}} \right)^{D-1} \quad (3)$$

Значение D можно оценить по измерению фрактальной размерности участка леса до возгорания по данным аэрофотосъемки. Как фрактальная размерность фронта горения, так и фрактальная размерность изображения участка леса на снимке определяются геометрией расположения его деревьев и кустов. Поэтому вполне разумно считать их значения достаточно близкими.

В работе [5] проводилось вычисление фрактальной размерности ряда участков леса в Тверской области. Для этого использовалась компьютерная программа по обработке данных аэрофотосъемки. В ходе исследований были получены значения в диапазоне $D=1,44 - 1,53$.

Из (3) следует, что на первых этапах возгорания $h \approx h_{min}$ и, т.е. скорость распространения огня будет минимальной. Само значение v_0 будет определяться конечным состоянием леса в зоне возгорания. Погодными условиями, состоянием и структурой подлеска, леса и характером ветра.

При $h \gg h_{min}$ величина v будет уже существенно больше v_0 .

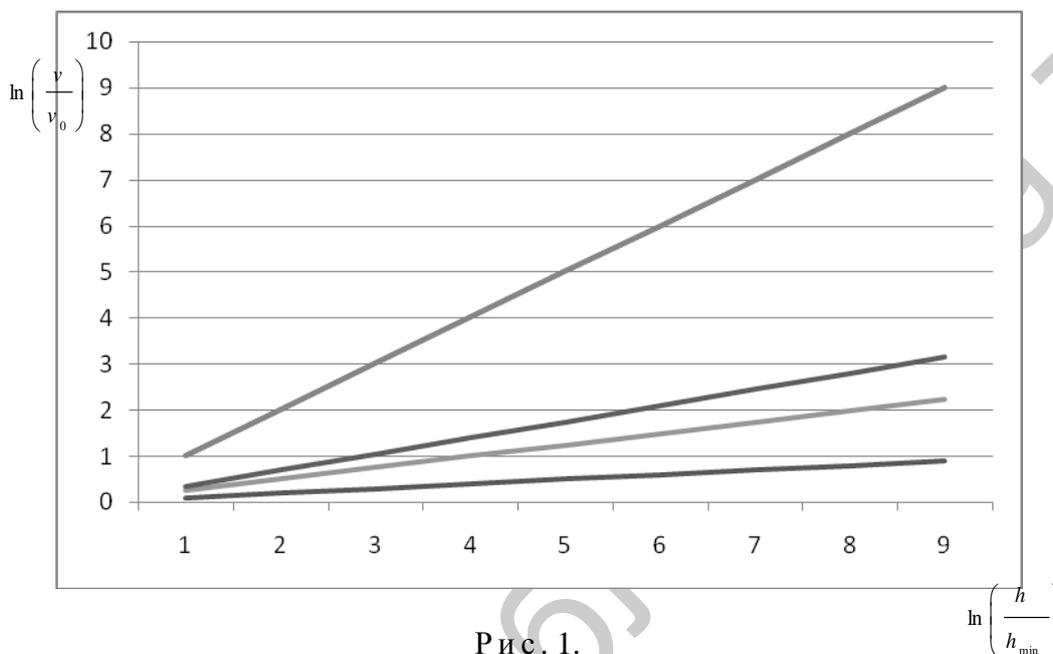
Так при $h = 1$ км и $h_{min}=10$ м и $D=1,5$ имеем $v = 10v_0$, т.е. скорость v возрастает на порядок. На основе формулы (3) получаем интересную закономерность:

$$\frac{v_1(h_1)}{v_2(h_2)} = \left(\frac{h_1}{h_2} \right)^{D-1} \quad (4)$$

$$\text{где } v_1(h_1) = v_0 \left(\frac{h_1}{h_{min}} \right)^{D-1}, \quad v_2(h_2) = v_0 \left(\frac{h_2}{h_{min}} \right)^{D-1}$$

Сравнение (4) с опытными данными позволит сделать оценку D непосредственно по наблюдению за зависимостью скорости лесного пожара от его размеров. График зависимости логарифма отношения

$\left(\frac{v}{v_0}\right)$ от логарифма отношения $\left(\frac{h}{h_{min}}\right)$ при различных значениях D приводится на рисунке 1 в дважды логарифмических координатах.



Прямая 1 – D=1, 1, 2 – D=1,1, 3 – D=1,3, 4 – D=1,5, 5 – D=1,7.

На основании (3) составили дифференциальное уравнение, определяющее зависимость диаметра области пожара от времени.

Используя соотношение $h = v$ и (3) получаем

$$h = v_0 \left(\frac{h}{h_{min}}\right)^{D-1} \quad (5)$$

Обезразмерим (5), введя переменную $y = \frac{h}{h_{min}}$ и будем считать

$$h(t = 0) = h_{min}, \text{ т.е. } y(t = 0) = 1.$$

Тогда из (5) следует:

$$y = \frac{v_0}{h_{\min}} y^{D-1}, y(t=0) = 1 \quad (6)$$

Интегрируя (6) находим:

$$y = \left(1 + \frac{v_0 H t}{h_{\min}} \right)^{\left(\frac{1}{H} - 1 \right)} \quad (7)$$

$H = 2 - D$ – постоянная Херста.
 Нам удобнее представить (7) в виде

$$h = h_{\min} \left(1 + \frac{v_0 H t}{h_{\min}} \right)^{\left(\frac{1}{H} - 1 \right)} \quad (8)$$

Рассмотрим несколько характерных значений H и D . $H=1, D=1$:

$$h = h_{\min} v_0 t \quad (9)$$

Формула (9) соответствует гладкому фронту горения и описывает линейный характер роста размера области горения лесного массива.

При $H=0,5$ и $D=1,5$:

$$h = h_{\min} \left(1 + \frac{3}{2} \frac{v_0}{h_{\min}} t \right)^2 \quad (10)$$

В данном случае мы имеем параболический нелинейный рост h с ростом времени.

Отсюда очевидно, что тушение такого лесного пожара надо проводить в кратчайшее время.

И, наконец, если $H=0$ и $D=2$ то

$$h = h_{\min} e^{\frac{v_0}{h_{\min}} t} \quad (11)$$

Этот случай на наш взгляд описывает наиболее быстрый, почти мгновенный характер горения лесного массива.

Из построенной нами математической модели лесного пожара, учитывающей фрактальный характер фронта горения, следуют два важных вывода. Скорость распространения лесного пожара v можно существенно уменьшить, увеличивая h_{\min} и уменьшения D . Этого можно достичь проведением санитарной рубки деревьев и кустов и соблюдением геометрического порядка при высадке лесонасаждений.

Необходима систематическая аэро- или космическая съемка лесных массивов всего Тверского региона с целью анализа с целью

определения их фрактальной размерности D , как основного фактора, влияющего на характер и течение лесного пожара.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 10-01-97508-р\центр_а).

-
1. Эндрюс П., Финни М. Новый взгляд на лесные пожары // В мире науки. №10, 2007.
 2. www.mchs.gov.ru
 3. Б.Мандельброт. Фрактальная геометрия природы. М. Наука. 1992
 4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. Т.6, изд.4. М. Наука. 1988
 5. Тищенко А.П., Цветков И.В.. Фрактальная размерность текстур природных объектов и их идентификация методом фрактального анализа // Тематический сборник Моделирование сложных систем. Вып.1 Тверь. 1998.

Об авторах:

КУДИНОВ Алексей Никифорович – зав. кафедрой математического моделирования Тверского государственного университета, доктор физико-математических наук, профессор; e-mail: d002059@tversu.ru

ЦВЕТКОВ Илья Викторович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математического моделирования Тверского государственного университета, e-mail: d002059@tversu.ru