УДК 533.6.011

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ ОЧАГОВ ВОЗГОРАНИЯ В УСЛОВИЯХ ЛИКВИДАЦИИ БЕГЛЫХ ВЕРХОВЫХ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

Кумицкий Б.М.[1], Саврасова Н.А.[2], Саврасова Е.Е.[1]

[1]Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный технический университет»

[2]Всероссийский учебный научный центр военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»

E-mail: savrasova-nataly@mail.ru

Аннотация: Предложена математическая модель, описывающая с помощью обыкновенных дифференциальных уравнений баланс между исчезающими и возникающими вновь локальными очагами возгорания в процессе ликвидации беглых верховых пожаров в лесных массивах. Характерной особенностью предлагаемой модели является то, что при этом неизвестная функция (число мест возгорания) характеризуется только временем эволюции очагов возгорания с коэффициентами, зависящими от природных факторов и качества технологий пожаротушения. В основу расчета положена нелинейная (квадратичная) зависимость скорости изменения числа очагов возгорания от их числа. Проведенный анализ полученных результатов показывает, что, несмотря на упрощенность, предлагаемая модель в ряде случаев соответствует действительности и может быть полезной при планировании противопожарных мероприятий.

Ключевые слова: дифференциальная модель, беглые лесные пожары, эволюция очагов возгорания.

DIFFERENTIAL MODELING OF THE EVOLUTION OF FIRES IN THE CONDITIONS OF RUNNING UPPER FOREST FIRES

Kumitsky B.M.[1], Savrasova N.A.[2], Savrasova E.E.[1]

[1]Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Voronezh State Technical University»

[2] Military Educational and Scientific Center of the Air Force «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy»

E-mail: savrasova-nataly@mail.ru

Summary: A mathematical model is proposed that, using ordinary differential equations, describes the balance between disappearing and emerging local fires in the process of eliminating runaway, supreme fires in forests. A characteristic feature of the proposed model is that in this case, an unknown function (the number has a fire) is characterized only by the evolution time of the fire sources with coefficients depending on natural factors and the quality of fire fighting technologies. The calculation is based on a non-linear (quadratic) dependence of the rate of change of the number of fire sources on their number. The analysis of the obtained results shows that despite the simplification, the proposed model in some cases is in fact valid and can be useful in planning fire-fighting measures.

Keywords: Differential model, runaway forest fires, evolution of fires.

Во всем мире лесные пожары относятся к числу стихийных бедствий, приносящих большой ущерб экономике и экосистеме, приводящих к гибели людей и животных [1].

Лесные пожары повреждают ценную древесину и пагубно влияют на возобновление её ресурсов. В результате пожаров снижаются защитные, водоохранные и другие полезные свойства лесных насаждений, уничтожаются флора и фауна, наносится ущерб близлежащим сооружениям, населенным пунктам [2-6]. Причины возникновения лесных пожаров носят природный, техногенный и человеческий характер.

Ежедневно в России возникают десятки тысяч лесных пожаров, в результате которых уничтожается более 1 миллиона гектаров леса; ещё большее количество при этом повреждается, а затем гибнет. Кроме того, за счет передачи избыточного высокотемпературного тепла в почву, изменяется её химический состав и структура, повреждаются корни деревьев [1].

Естественно, что борьба с пожарами в лесных массивах является актуальной сложной мировой проблемой.

Трудность борьбы с лесными пожарами определяется сложностью процессов возникновения и развития очагов возгорания, зависящих от запаса и влагосодержания лесных горючих материалов, метеорологических условий, рельефа местности и других факторов.

Особую опасность представляют верховные беглые пожары, наблюдающиеся при сильном ветре. Огонь обычно распространяется по пологому древостою скачками (пятнами), иногда значительно опережая фронт низового пожара. При движении пожара по кронам ветер разносит искры, горящие ветви, которые создают новые очаги низовых пожаров на сотни метров впереди основного очага. Во время скачка пламя распространяется по кронам со скоростью 100 м/мин и выше [1-7]. В целях создания эффективных методов борьбы со стихией огня разрабатываются новые и усовершенствуются существующие средства пожаротушения с привлечением авиации и взрывных технологий. Кроме того, для этих же целей создаются математические модели, позволяющие прогнозировать возникновение лесных пожаров и их поведение в зависимости от климатических и рельефных условий [8, 9], методические рекомендации ликвидации пожаров [10]. Предложена интегральная математическая модель, описывающая суммарный баланс площадей, и вновь образующихся гарей, учитывающая различие между низовыми и верховыми пожарами [11]. Однако, все перечисленные математические модели не содержат информационного обеспечения о характеристиках горючих материалов, погоды, топографии местности, необходимого при ликвидации беглых, верховых пожаров в лесных массивах.

Целью настоящей работы является разработка математической модели, которая бы с помощью обыкновенных дифференциальных уравнений описывала эволюцию локальных очагов возгорания в условиях беглых верховых пожаров. При этом конкурирующими факторами в предлагаемой дифференциальной модели являются практические технологии ликвидации возгорания и «благоприятные» климатические условия, соответствующие размножению мест возгорания.

В качестве методики исследования воспользуемся частным случаем модели, используемой в экологии, построенную Вольтерра [12, 13].

Пусть $z(t)$ – число локальных очагов возгорания в лесном массиве в условиях беглого верхового пожара в момент времени t.

При этом если N – число очагов возгорания, появляющихся в единицу времени, а G – их число, исчезающее в процессе пожаротушения, то можно предположить, что скорость изменения z со временем определяется формулой

$$-\frac{dz}{dt} = N - G. \qquad (1)$$

Предположим линейную зависимость N и G от z:

$$N = nz,\ G = gz, \qquad (2)$$

где n и g – коэффициенты, определяющие конкурентную способность «благоприятных» климатических условий и противопожарных технологий соответственно.

С учетом (2) дифференциальное уравнение (1) перепишется в виде:

$$\frac{dz}{dt} = (g - n)z. \qquad (3)$$

Если в момент времени $t = t_0$ число очагов возгорания есть $z = z_0$, то решение дифференциального уравнения с разделяющимися переменными (3) будет иметь вид

$$z(t) = z_0 e^{(g-n)(t-t_0)}, \qquad (4)$$

из которого видно, что если $q > n$, то при $t \to \infty$, число возгораний увеличивается ($z \to \infty$). Это соответствует случаю, когда эффективность борьбы с пожаром недостаточна. С другой стороны, если $q < n$, то при $t \to \infty$ число возгораний носит затухающий характер.

Несмотря на упрощенность представленной дифференциальной модели, она достаточно часто соответствует действительности.

Модели же, описывающие реальные процессы и явления, практически все нелинейны, поэтому вместо уравнения (3) необходимо использовать дифференциальное уравнение типа

$$\frac{dz}{dt} = \varphi(z), \qquad (5)$$

где $\varphi(z)$ – некоторая нелинейная функция.

В качестве примера рассмотрим случай квадратичной зависимости:

$$\varphi(z) = nz - gz^2, \qquad (6)$$

в которой $n > 0$, $g < 0$ – уже известные коэффициенты. При этом уравнение (5) записывается в виде

$$\frac{dz}{dt} = nz - gz^2. \qquad (7)$$

Полагая, как и ранее, $z = z_0$ при $t = t_0$, интегрирование (7) приводит к выражению:

$$z(t) = \frac{z_0 \, {}^{n}\!/_{g}}{z_0 + \left[{}^{n}\!/_{g} - z_0\right] e^{=n(t-t_0)}}. \qquad (8)$$

Из анализа решения (8) видно, что с течением времени число очагов возгорания стабилизируется (при $t \to \infty$, $z(t) \to {}^{n}\!/_{g}$). При этом возможны два варианта стабилизации. Случаю ${}^{n}\!/_{g} > z_0$ соответствует активизации числа мест возгорания, а ситуация, когда ${}^{n}\!/_{g} < z_0$ – наоборот, соответствует ликвидации возгораний. На рисунке 1 представлена динамика данного процесса.

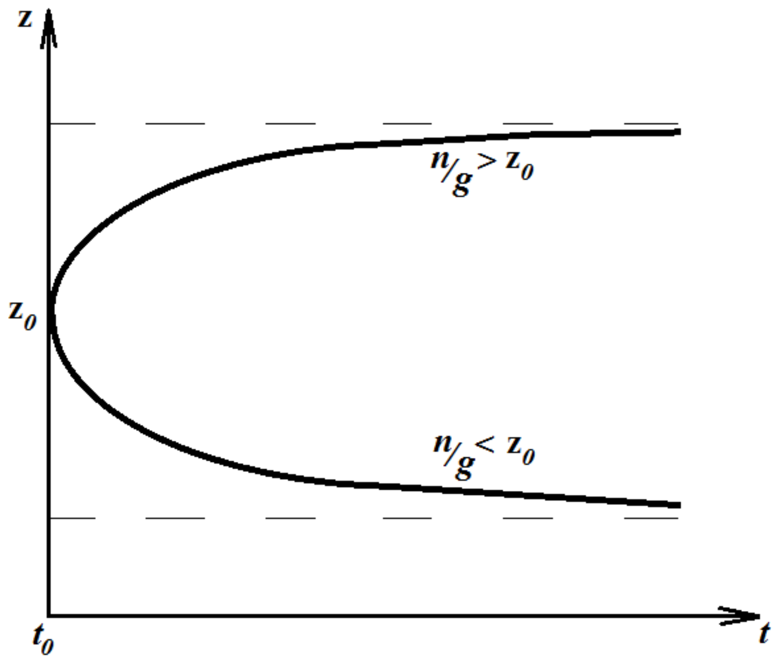

Рисунок 1 – Эволюция очагов возгорания в процессе ликвидации беглого верхового лесного пожара

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы. Рассмотрение очагов возгорания с течением времени, по крайней мере качественно, определяется конкурирующими процессами: средствами пожаротушения и климатическими условиями.

Для конкретизации дифференциальной модели необходим набор статистических данных техногенных и метеорологических сведений региона.

Предлагаемая модель может быть использована, например, для описания популяций некоторых видов древесных вредителей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Нехорошев, С. Н. Методика оценки последствий крупных лесных пожаров / С. Н. Нехорошев, В. С. Рыжиков, В. В. Рощина, А. С. Шевченко. – Москва : ВНИИ ГОЧС, 1996. – 13 с.

2 Коровин, Г. Н. Охрана лесов от пожаров как важнейший элемент национальной безопасности России / Г. Н. Коровин, А. С. Исаев // Лесной бюллетень. 2000. – № 8-9. – С. 7-15.

3 Зайцев, А. П. Стихийные бедствия, аварии, катастрофы. Правила поведения и действия населения / А. П. Зайцев. – Москва : Военные знания, 2000. – 79 с.

4 Зайцев, А. П. Чрезвычайные ситуации / А. П. Зайцев. – Москва : Военные знания, 2000. – 80 с.

5 Куликов, Г. Б. Безопасность жизнедеятельности : учебник для инженерных направлений / Г. Б. Куликов. – Москва : Мир книги, 2008. – 269 с.

6 Воронцов, А. Л. Охрана природы / А. Л. Воронцов, Е. Л., Щетикский, И. Д. Никодимов – Москва : Агропромиздат, 1989. – 298 с.

7 Валендик, Э. Н. Идентификация скоростей распространения лесных пожаров по их инфракрасным снимкам / Э. Н. Валендик, Г. А. Доррер, М. А. Калинина, А. И. Сухинин, Б. А. Хрептов // Исследование Земли из космоса. 1982. – № 5. – С. 46-53.

8 Гришин, А. М. Моделирование и прогноз экологических катастроф / А. М. Гришин // Экологические системы и пробоы. 2001. – № 2. – С. 12-21.

9 Гришин, А. М. О математическом моделировании природных пожаров и катастроф / А. М. Гришин // Вестник Томского государственного университета. 2008. – № 2 (3). – С. 105-114.

10 Вонский, С. М. Определение природной пожарной опасности в лесу : методические рекомендации / С. М. Вонский, В. А. Жданко, В. И. Корбут. – Ленинград : ЛенНИИЛХ, 1981. – 52 с.

11 Бутусов, О. Б. Балансовая математическая модель динамики лесных гарей / О. Б. Бутусов, Н. И. Редикульцева, О. П. Никифорова // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. – № 5. – С. 75-79.

12 Murray, J. D. Some simple mathematical models in ecology / J. D. Murray // Math Spectrum. – 1983-1984. – Vol. 16, № 2. – P. 48-54.

13 Амелькин, В. В. Дифференциальные уравнения в приложениях / В. В. Амелькин – Москва : Наука, 1987. – 160 с.