

Г.А. Доррер, В.С. Коморовский, С.П. Якимов
(Сибирский государственный технологический университет,
Сибирский филиал Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России;
e-mail: G_A_Dorrer@mail.ru)

ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ КРУПНЫХ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

Предлагается методика оценки динамики и прогнозирования параметров крупных лесных пожаров на основе нейросетевых технологий и данных результатов космического мониторинга лесов. Материалы статьи могут быть полезны при решении проблем техносферной безопасности от крупных лесных пожаров.

Ключевые слова: лесные пожары, нейросетевые технологии, системы космического мониторинга.

G.A. Dorrer, V.S. Komorovsky, S.P. Yakimov ESTIMATION AND PROGNOSIS OF LARGE FOREST FIRES DYNAMICS

The method of the parameters estimation and forecasting of large forest fires on basis of the neural technologies and space information is suggested. Materials of the article can be useful in solving problems technospheric safety from large forest fires.

Key words: forest fires, neural technologies, systems of space monitoring.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 31 января 2011 г.

Введение

Прогнозирование параметров крупных лесных пожаров и оценка их последствий по результатам спутникового мониторинга лесов открывает значительные возможности для управления пожарной ситуацией. Однако имеется ряд трудностей в решении этой проблемы:

- сложный характер и изменчивость крупных многодневных лесных пожаров, которые развиваются на большой площади в изменяющихся погодных условиях;
- недостаточная или неточная информация о характеристиках леса, топографии местности, локальных метеоданных;
- малая разрешающая способность имеющихся космических снимков пожаров;
- не всегда достоверная отчетная информация, поступающая с мест;
- организационная сложность, состоящая в том, что при борьбе лесными пожарами вблизи населенных пунктов и других объектов экономики возникают проблемы взаимодействия противопожарных сил различных ведомств: МЧС, служб охраны леса, муниципальных и сельских образований.

Из сказанного следует, что для эффективного управления борьбой с лесными пожарами представляются актуальными исследование и оценка различных методов прогнозирования параметров пожаров на основе спутниковых данных с привлечением, где это возможно, дополнительной информации.

В статье рассматриваются такие методы для пожаров, находящихся под воздействием противопожарных сил.

Исходной информацией для проведенных исследований явились данные о лесных пожарах, хранящиеся в двух информационных системах: в Региональной системе спутникового мониторинга ГО и ЧС (г. Красноярск) [1] и системе ИСДМ-Рослесхоз, созданной рядом организаций под руководством Института космических исследований РАН [2], которая используется ФГУ "Авиалесоохрана". Кроме того, использовались доступные данные о характеристиках леса в местах пожаров, а также комплексы метео данных.

Ранее авторами были рассмотрены различные методы прогнозирования распространения лесных пожаров на основе спутниковой информации [3, 4]. Были исследованы статистические данные о пожарах, использованы методы OLAP и нейросетевого прогнозирования; разработана программа для преобразования данных, а также ГИС-ориентированное приложение для визуализации результатов прогноза.

Установлено, что при имеющемся уровне информационного обеспечения наиболее эффективным инструментом прогнозирования параметров крупных (свыше 200 га) лесных пожаров являются нейросетевые технологии. Предложены и верифицированы для ряда регионов Восточной Сибири и Дальнего Востока нейросетевые модели прогнозирования суточного прироста площади, пройденной пожаром.

В настоящей статье показано, что, приняв ряд гипотез о динамике и конфигурации пожара, можно осуществить более глубокую обработку имеющейся информации. В частности, рассмотрены методы прогнозирования конфигурации пожара на основе информации о приросте площадей пожаров, полученной путем нейросетевой обработки данных, хранящихся в системах спутникового мониторинга лесов, и карт лесной растительности. На основе анализа динамики прироста площади пожара произведена оценка момента начала борьбы с пожаром и интенсивности этой борьбы.

Следует отметить, что в силу отмеченных выше обстоятельств модели динамики пожаров получаются сравнительно грубыми, ориентированными в основном на получение качественных оценок процесса распространения пожара в наиболее неблагоприятных случаях. Тем не менее, по отзывам специалистов, такая информация оказывается полезной при принятии решений по борьбе с пожарами. Попытки получения более точных прогнозов динамики пожаров предпринятые, например, разработчиками системы Behave (США) [5] при максимально подробном учете доступных данных об условиях горения показали, что даже для небольших пожаров погрешности составляют порядка 30 % по площади и до 50 % по геометрическим размерам. Кроме того, точность прогнозирования сильно зависит от квалификации пожарного аналитика. Аналогичные результаты получены сотрудниками Института леса СО РАН [6]. Указанные погрешности, помимо прочего, обусловлены тем, что невозможно достаточно точно спрогнозировать метеоусловия в районе пожара, а они оказывают решающее влияние на его распространение. Сказанное в особенности касается прогнозов на длительный период.

1. Нейросетевое прогнозирование динамики площади лесных пожаров

Как показали проведенные авторами предварительные исследования данных, хранящихся в системе мониторинга лесных пожаров, классические статистические методы не позволяют установить достоверные зависимости между параметрами лесных пожаров. В то же время, использование искусственных нейронных сетей позволило получить обнадеживающие результаты. Для реализации нейросетевого прогнозирования динамики площади лесного пожара был выбран нейроимитатор NeuroPro 0.25 [8]. Выбор данного программного средства связан с его функциональностью, доступностью и удобством в использовании. Программа позволяет создавать, обучать, тестировать, а также производить другие необходимые действия с многослойными нейронными сетями.

Ход типового эксперимента нейросетевого прогнозирования включает в себя следующие шаги.

1. Сбор данных по условиям текущего эксперимента (формирование витрины данных).
2. Структуризация и классификация данных.
3. Формирование обучающей и тестовой выборки для нейронной сети.
4. Рандомизация данных обучающей выборки.
5. Приведение данных в формат, пригодный для обработки нейроимитаторами.
6. Выбор топологии и конфигурации нейронной сети, задание точности прогноза.
7. Обучение нейросети.
8. Тестирование нейросети.
9. Анализ промежуточных результатов.
10. Коррекция конфигурации нейросети, ее изменение (при необходимости).
11. Повторные циклы обучения и тестирования новой нейронной сети (при необходимости).
12. Общий анализ результатов.

Данные по крупным пожарам, собранные в ИСДМ-Рослесхоз, были классифицированы по их возможным значениям. Результаты классификации с указанием всех выделенных классов, названий полей для таблицы базы данных и последовательной нумерации полей сведены в табл. 1. Данные были представлены в формате dBASE IV (*.dbf), необходимом для обработки с помощью нейроимитатора NeuroPro 0.25.

В ходе исследований для улучшения качества прогнозирования были использованы данные гидрометеослужбы о прогнозных характеристиках погоды на 3 и 10 суток. При этом число входных параметров нейросети возросло до 29.

Были обучены и протестированы более 30 нейронных сетей различной конфигурации. Наилучшие результаты показали нейросети с конфигурациями: 8 скрытых слоёв по 10 нейронов и 7 скрытых слоёв по 12 нейронов.

Исследования, в частности, показали, что при обучающей выборке, содержащей данные о 274 крупных пожарах, и установленной погрешности по суточному приросту площади, равной ± 25 га, доля верных ответов находится в пределах от 86 до 94 %.

Номер поля	Имя поля	Наименование поля и его классы
1	VAR1	Номер пожара. Идентификационное поле. В выборке не участвует
2	VAR2	Среднесуточный прирост площади пожара в гектарах. Выходное поле
3	VAR3	Код лесхоза
4	VAR4	Площадь регистрации пожара в гектарах
5	VAR5	Количество дней наблюдения пожара
6	VAR6	Код растительности на местности пожара
7	VAR7	Температура воздуха на дату начала пожара °С
8	VAR8	Точка росы на дату начала пожара °С
9	VAR9	Дефицит точки росы °С, на дату начала пожара
10	VAR10	Осадки за сутки на дату начала пожара, мм
11	VAR11	Комплексный показатель пожарной опасности по местным шкалам (методика Нестерова)
12	VAR12	Класс пожарной опасности по местным шкалам (методика Нестерова)
13	VAR13	Комплексный показатель пожарной опасности по показателю влажности ПВ-1
14	VAR14	Класс пожарной опасности по показателю влажности ПВ-1
15	VAR15	Комплексный показатель пожарной опасности по показателю влажности ПВ-2
16	VAR16	Класс пожарной опасности по показателю влажности ПВ-2
17	VAR17	Признак наличия осадков днём на дату начала пожара
18	VAR18	Признак наличия осадков ночью на дату начала пожара

2. Базовая модель динамики площади лесного пожара

Ниже рассмотрены задачи, связанные с дальнейшей обработкой данных о лесных пожарах.

Используемая модель основана на следующих предпосылках.

По непосредственным данным мониторинга пожаров, либо по вычисленному с помощью нейроимитатора приросту площади пожара [3, 4] строится модель динамики площади пожара. На этой основе производится следующая обработка:

- вычисляется скорость фронта и скорость увеличения длины кромки пожара;
- на основе данных о скорости и направлении ветра в районе пожара оценивается возможная конфигурация пожара;
- определяется момент начала борьбы с пожаром и производительность противопожарных сил.

Были приняты следующие допущения.

1. Динамика изменения площади свободно развивающегося пожара определяется выражением

$$S(t) = k_0(t - t_0)^\alpha, \quad (1)$$

где t – текущее время;

t_0 – момент возникновения пожара, *сутки*;

k_0 – постоянный коэффициент имеющий размерность $га/сут^\alpha$;

α – показатель скорости роста площади.

Как ясно из геометрических соображений, с показателем α связано изменение скорости фронта пожара: при $\alpha = 2$ эта скорость постоянна, при $\alpha < 2$ скорость фронта со временем уменьшается, а при $\alpha > 2$ скорость фронта возрастает.

2. Конфигурация пожара на поверхности земли (при его моделировании – на карте) определяется на основе принципа Гюйгенса для анизотропной среды [7]. Пусть контур пожара представлен замкнутой непрерывной линией, которая в неявном виде задается уравнением $G(x, t) = 0$, где $x = [x^1, x^2]$ – вектор пространственных координат, t – время. Тогда, рассматривая каждую точку контура как источник дальнейшего распространения огня, получаем уравнение движения фронта пожара

$$\frac{\partial G}{\partial t} + v(\varphi, t) \text{grad} G = 0. \quad (2)$$

Скорость фронта пожара представляется как

$$v(\varphi, t) = v_0(t) \xi(\varphi), \quad (3)$$

где $v_0(t)$ – зависящая от времени максимальная скорость распространения фронта пожара (например, в направлении ветра);

$\xi(\varphi)$, ($|\xi| \leq 1$) – индикатриса полной скорости фронта, определяющая конфигурацию пожара в соответствии с принципом Гюйгенса;

φ – направление распространения ($0 \leq \varphi \leq 2\pi$).

3. Индикатриса определяется скоростью ветра w и его направлением. Угол φ в приведенных ниже формулах отсчитывается от направления ветра по часовой стрелке.

Для упрощения формул в данном разделе положим $t_0 = 0$.

Рассмотрим элементарное приращение площади пожара dS . На рис. 1 показана кромка пожара в два близких момента времени t и $t + dt$. Из рисунка следует, что

$$dS = v_n dt dl,$$

где v_n – нормальная скорость фронта;

dl – приращение длины контура, которое вычисляется по формуле [7]

$$dl = \rho d\varphi = d\varphi \sqrt{\xi^2(\varphi) + \xi'^2(\varphi)} \int_0^t v(\varphi, \tau) d\tau, \quad (4)$$

где $v(\varphi, t)$ – полная скорость фронта.

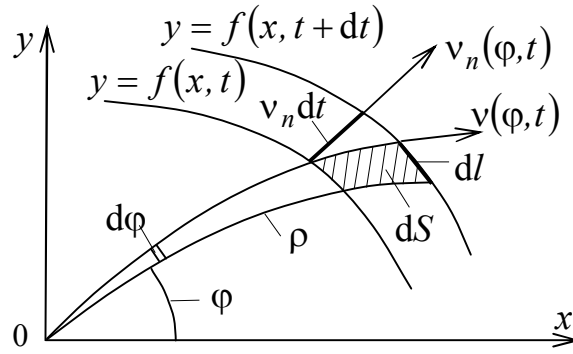


Рис. 1. Кромка лесного пожара в два близких момента времени

В свою очередь, нормальная скорость связана с полной скоростью соотношением

$$v_n(\varphi, t) = \frac{v(\varphi, t)}{\sqrt{1 + \left(\frac{v'(\varphi, t)}{v(\varphi, t)}\right)^2}} = \frac{v_0(t)\xi^2(\varphi)}{\sqrt{\xi^2(\varphi) + \xi'^2(\varphi)}}. \quad (5)$$

Отсюда

$$dS = d\phi dt v_0(t) \xi^2(\varphi) \int_0^t v_0(\tau) d\tau. \quad (6)$$

Приращение площади по всем направлениям распространения:

$$dS_{2\pi} = \int_0^{2\pi} dS d\varphi = 2 dt v_0(t) \int_0^\pi d\varphi \xi^2(\varphi) \int_0^t v_0(\tau) d\tau.$$

Скорость прироста всей площади пожара:

$$\frac{dS}{dt} = 2 v_0(t) \int_0^\pi \xi^2(\varphi) d\varphi \int_0^t v_0(\tau) d\tau,$$

а динамика общей площади примет вид

$$S(t) = 2 \int_0^\pi \xi^2(\varphi) d\varphi \int_0^t v_0(\tau) \int_0^\tau v_0(\theta) d\theta d\tau. \quad (7)$$

Будем искать функцию $v_0(t)$ в виде $v_{0s} t^\beta$, где величины β и v_{0s} подлежат определению. Тогда

$$\int_0^t v_0(\tau) d\tau = \frac{1}{\beta} v_{0s} t^{\beta+1},$$

$$\frac{dS}{dt} = 2 \frac{v_{0s}^2}{\beta + 1} t^{2\beta+1} \int_0^\pi \xi^2(\varphi) d\varphi.$$

С другой стороны, из первоначального предположения $S(t) = k_0 t^\alpha$ следует $\frac{dS}{dt} = k_0 \alpha t^{\alpha-1}$, откуда получаем уравнение

$$2 \frac{v_{0S}^2}{\beta + 1} t^{2\beta+1} \int_0^\pi \xi^2(\phi) d\phi = k_0 \alpha t^{\alpha-1}. \quad (8)$$

Приравняв показатели степени при t , получим $2\beta + 1 = \alpha - 1$, откуда

$$\beta = \frac{\alpha}{2} - 1. \quad (9)$$

Далее, приравняв множители при t , определим величину v_{0S} :

$$v_{0S} = \left(\frac{\alpha k_0 (\beta + 1)}{2 \int_0^\pi \xi^2(\phi) d\phi} \right)^{1/2} = \frac{\alpha \sqrt{k_0}}{2 \int_0^\pi \xi^2(\phi) d\phi} = \frac{\alpha \sqrt{k_0}}{2P}, \quad (10)$$

где $P(w) = \int_0^\pi \xi^2(\phi) d\phi$.

На основе формулы (3) можно вычислить также периметр кромки пожара. В частном случае, когда пожар развивается из кругового очага малого радиуса,

$$L(t) = 2 \int_0^\pi \rho d\phi = 2 \int_0^t v_0(\tau) d\tau \int_0^\pi \sqrt{\xi^2(\phi) + \xi'^2(\phi)} d\phi.$$

Формула для скорости прироста периметра пожара примет вид

$$\frac{dL(t)}{dt} = 2v_0(t)Q(w), \quad (11)$$

где $Q(w) = \int_0^\pi \sqrt{\xi^2(\phi) + \xi'^2(\phi)} d\phi$.

В частном случае, при $\alpha = 2$ и $\beta = 0$, скорость фронта постоянна:

$$v_{0S} = \frac{\sqrt{k_0}}{P}. \quad (12)$$

При круговом распространении $\xi(\phi) \equiv 1$, $\int_0^\pi \xi^2(\phi) d\phi = \pi$ и $v_{0S} = \sqrt{\frac{k_0}{\pi}}$, что непосредственно вытекает из формулы, определяющей площадь расширяющегося круга: $S = \pi(v_{0S}t)^2 = k_0 t^2$.

Рассмотрим конкретные выражения для индикатрис [7].

1. Экспоненциальная индикатриса

$$\xi(\phi) = \exp(a(w)(\cos(\phi) - 1)), \quad (13)$$

где коэффициент $a(w)$ зависит от скорости ветра и оценивается формулой:

$$a(w) = 0,785w - 0,06w^2,$$

которая справедлива при условиях: $0 \leq w \leq 3$ м/с.

Тогда интегралы, стоящие в выражениях (10) и (11), примут вид

$$P(w) = \int_0^{\pi} \xi^2(\varphi) d\varphi = \exp(-2a(w)) \int_0^{\pi} \exp(2a(w) \cos(\varphi)) d\varphi, \quad (14)$$

$$Q(w) = \int_0^{\pi} \sqrt{\xi^2(\varphi) + \xi'^2(\varphi)} d\varphi = \int_0^{\pi} \xi(\varphi) \sqrt{1 + \frac{a^4(w)}{4} \sin^2(2\varphi)} d\varphi. \quad (15)$$

Вычисленные величины этих интегралов для некоторых значений скорости ветра приведены в табл. 2.

Таблица 2

$w, \text{ м/сек}$	0	0,1	0,2	0,5	1,0	2,0	3,0
$a(w)$	0	0,078	0,155	0,378	0,725	1,33	1,815
$P(w)$	3,142	2,705	2,361	1,1695	1,178	0,818	0,636
$Q(w)$	3,142	2,911	2,708	2,234	1,758	1,455	1,535

2. Эллиптическая индикатриса

$$\xi(\varphi) = \frac{1 - e(w)}{1 - e(w) \cos(\varphi)}, \quad (16)$$

где $e(w)$ – эксцентриситет эллипса, зависящий от скорости ветра.

Для оценки зависимости эксцентриситета эллиптической индикатрисы от скорости ветра были аппроксимированы эллипсами графики индикатрис, приведенные в работе Ф. Альбини [8] для большого диапазона скоростей ветра, указанных в первой строке табл. 2, и вычислены соответствующие эксцентриситеты.

Была получена следующая аппроксимация зависимости индикатрисы от скорости ветра:

$$e(w) = 1 - \exp(-0,4w). \quad (17)$$

Затем были вычислены значения интегралов $P(w)$ и $Q(w)$, которые приведены в таблице 3.

Таблица 3

$w, \text{ м/сек}$	0	1,25	2,5	5	10	15
$e(w)$	0	0,393	0,632	0,865	0,982	0,998
$P(w)$	3,142	1,469	0,782	0,588	0,539	0,193
$Q(w)$	3,142	2,151	1,60	1,424	1,379	1,194

Сравнивая табл. 2 и 3, можно увидеть, что значения функции $P(w)$ и $Q(w)$ для обеих индикатрис заметно различаются при близких скоростях ветра. Здесь следует учитывать, что в первом случае скорость ветра вычислялась на высоте 2 метров от земли, а во втором – на высоте 10 метров, и этим также объясняется более вытянутая форма эллиптической индикатрисы.

Пример. Зарегистрированный в системе ИСДМ-Рослесхоз пожар К-1491 действовал в Долгомостовском лесничестве Красноярского края с 15.05.2008 г. по 18.05.2008 г. Пожар был зарегистрирован на площади 27 га, площадь ликвидации 1526 га. Температура воздуха была 16,7 °С, скорость ветра по данным ближайшей метеостанции – 4 м/с, ветер северный.

Примем, что погрешность определения площади составляет $\delta S = 25 \text{ га}$.

Вычислим коэффициент k_0 и его погрешность в модели:

$$k_0 = \Delta S / \Delta t^2 = 1499 / 9 = 166,5 \text{ га/сут}^2, \quad \delta k_0 = 25 / 9 = 2,78 \text{ га/сут}^2.$$

Принимаем показатель скорости роста площади пожара $\alpha = 2$, то есть предполагаем, что скорость фронта пожара постоянна. Поскольку скорость ветра достаточно велика, воспользуемся эллиптической индикатрисой. Для скорости ветра $w = 4 \text{ м/с}$ определяем эксцентриситет $e = 0,798$ и множители $P(w) = 0,585$, $Q = 1,422$.

В соответствии с формулой (12), переводя гектары в квадратные метры, получим:

$$v_{0S} = \frac{\sqrt{k_0}}{P} = \frac{\sqrt{166,5 \cdot 10^4}}{0,585} = 2206 \text{ м/сут}. \quad (18)$$

С учётом возможной погрешности δk величина скорости фронта будет находиться в следующем диапазоне: $2187 \leq v_{0S} \leq 2224 \text{ м/сут}$.

По формуле (11) можно оценить скорость прироста периметра пожара:

$$\frac{dL(t)}{dt} = 2v_0(t)Q(w) = 2 \cdot 2206 \cdot 1,422 = 6273 \pm 7,96 \text{ м/сут}.$$

Полученная оценка скорости фронта пожара в сочетании с выбранной индикатрисой распространения позволяет строить прогнозные оценки контура пожара через заданные промежутки времени. Для этой цели удобно использовать метод подвижных сеток [7]. Пример построенного таким образом прогноза контура пожара приведен на рис. 2.

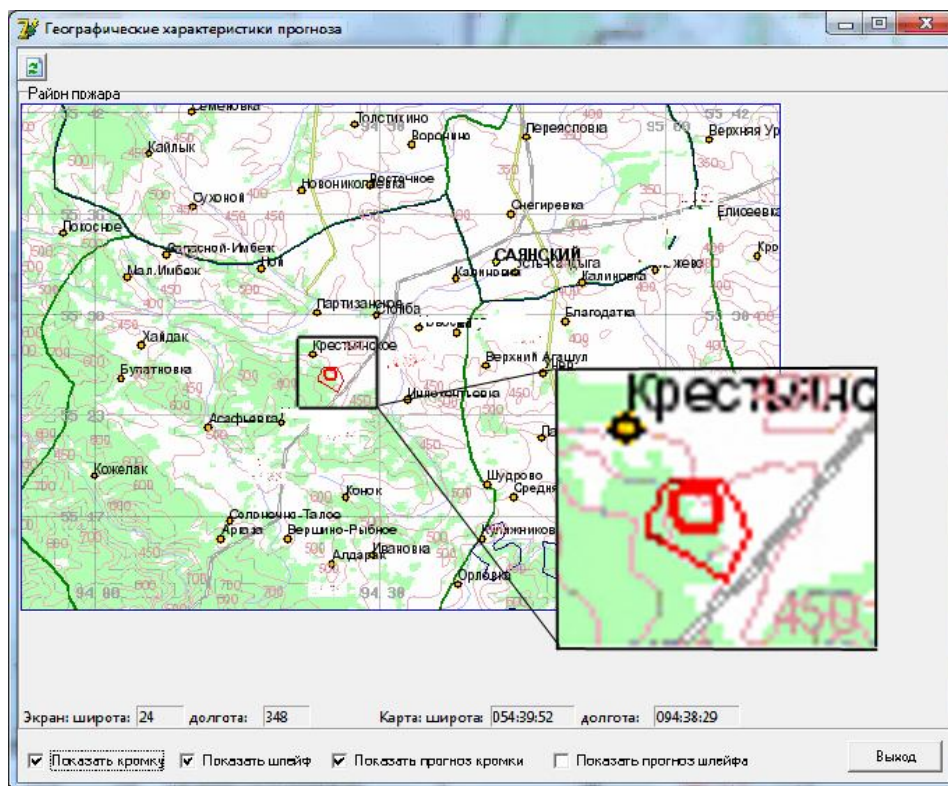


Рис. 2. Прогноз распространения лесного пожара, нанесенный на карту местности. Жирная линия – зафиксированный со спутника контур пожара, тонкая линия – прогноз конфигурации пожара на 1 сутки

Расчёты проводились с помощью разработанной авторами программы Fires Behaviour, предназначенной для ведения мониторинга параметров лесного пожара, а также их прогнозирования. Программа выполняет следующие основные функции.

1. Ведение сведений о регистрации пожара и оперативных сводках.

2. Ведение картографического реестра. Вся картографическая информация (карты, космические снимки и пр.) о пожарах, сведения о которых хранятся в базах данных системы, содержится в централизованном картографическом реестре. Функциональность данного блока в программе ограничена потребностями системы мониторинга собственно лесного пожара и не затрагивает вопросов технологии обработки дистанционной информации.

3. Ведение реестра объектов защиты. Сведения об объектах защиты от пожаров, сведения о которых хранятся в базах данных системы, содержится в централизованном реестре объектов защиты. Функциональность данного блока в программе ограничена потребностями системы мониторинга собственно лесного пожара.

4. Администрирование справочников системы. Для обеспечения функциональности системы мониторинга, прогнозирования параметров лесного пожара и удобства интерфейса с пользователем в программе предусмотрена возможность ведения справочников.

3. Оценка времени начала тушения пожара и скорости тушения по данным мониторинга

Идея изложенного ниже метода состоит в том, что на графике роста площади пожара обнаруживается точка перегиба и по изменению наклона кривой оценивается момент начала и интенсивность противопожарных мероприятий.

Предположим, что по данным мониторинга зарегистрирована площадь пожара в n последовательных моментах времени:

$$S_1 = S(t_1), S_2 = S(t_2), \dots, S_n = S(t_n), t_1 < t_2 < \dots < t_n.$$

Вычислим приращение площади пожара за каждый промежуток времени (первую разность):

$$\Delta S(t_i) = S(t_i) - S(t_{i-1}), i = 2, 3, \dots, n, \text{ га/сут}, \quad (19)$$

а также приращение приращения (вторую разность):

$$\Delta^2 S(t_i) = \Delta S(t_i) - \Delta S(t_{i-1}), i = 3, 4, \dots, n, \text{ га/сут}. \quad (20)$$

Анализ величин $\Delta S(t_i)$ и $\Delta^2 S(t_i)$ позволяет сделать следующие выводы.

- Величины $\Delta S(t_i)$ всегда положительны (или равны нулю, когда пожар локализован).

- Величины $\Delta^2 S(t_i)$ положительны при свободном распространении пожара, становятся отрицательными при тушении пожара и обращаются в нуль при завершении его локализации.

Проиллюстрируем эти выводы на примере.

Пример. По данным Красноярской базы охраны лесов, лесной пожар в Туранском лесничестве был зарегистрирован 21.04.08 г. и развивался следующим образом (в табл. 4 месяц и год не указаны).

Таблица 4

Дата t_i	Площадь пожара $S(t_i), га$	Приращение площади $\Delta S(t_i), га/сут$	Вторая разность $\Delta^2 S(t_i), ,га/сут^2$	Состояние пожара
21	60	-	-	Свободно распр.
22	75	15	-	Свободно распр.
23	220	145	130	Свободно распр.
24	275	55	-90	Тушение
25	320	45	-10	Тушение
26	320	0	-45	Тушение
27	320	0	0	Локализован

Анализ таблицы свидетельствует о том, что с 21 по 23 апреля пожар развивался свободно, а с 24 по 26 апреля производилось тушение, причём наибольшие усилия по тушению пришлось на 24 апреля. 27 апреля пожар локализован.

4. Динамика пожара, находящегося под воздействием противопожарных сил и средств

Следует подчеркнуть, что в данном разделе речь идет о локализации пожара, а не о его ликвидации. Согласно принятым методикам расчета необходимой производительности противопожарных сил, борьба с пожаром идет путем уменьшения длины горячей кромки пожара. Однако для крупных многодневных пожаров характерна сложная конфигурация горячей кромки, ее разорванность и переменчивость во времени. Поэтому для оценки эффективности борьбы с пожаром можно принять более общий показатель снижения скорости прироста площади, пройденной пожаром, со временем,

Будем считать, что противопожарные силы, начиная с момента начала тушения, уменьшают скорость прироста площади пожара, то есть уменьшают значение коэффициента k_0 в формуле (1). В простейшем случае можно принять линейный закон изменения k_0 :

$$k_0 = k_0(t) = k_1 - u(t - t_S), \quad t \geq t_S, \quad (21)$$

где t_S – время начала тушения пожара;

u – скорость изменения коэффициента k_0 , ($га/сут^{\alpha+1}$), при $t = t_S$ коэффициент $k_0 = k_1$.

Коэффициент u можно рассматривать как показатель интенсивности борьбы с пожаром, как интегральное управляющее воздействие со стороны противопожарных сил и средств.

Тогда скорость прироста площади в соответствии с (1) и (21) определится формулой

$$R(t) = \frac{dS(t)}{dt} = \begin{cases} \alpha k_1 t^{\alpha-1}, & t \leq t_S, \\ \alpha(k_1 - u(t - t_S))t^{\alpha-1}, & t_F \geq t \geq t_S, \\ 0, & t \geq t_F. \end{cases} \quad (22)$$

При значении времени $t_F = t_S + \frac{k_1}{u}$ и $t \geq t_F$ скорость прироста площади $R(t_F) = 0$, что означает локализацию (остановку распространения) пожара. При этом $S(t) = S(t_F)$ при $t \geq t_F$.

Общая площадь, пройденная огнем к моменту $t_F \geq t \geq t_S$:

$$S(t) = k_1 \alpha \int_0^{t_S} t^{\alpha-1} dt + \alpha \int_{t_S}^t (k_1 - u(t - t_S)) t^{\alpha-1} dt = k_1 t_S^\alpha + \alpha k_1 \int_{t_S}^t t^{\alpha-1} dt - \alpha k_2 \int_{t_S}^t (t - t_S) t^{\alpha-1} dt = k_1 t^\alpha - \frac{\alpha}{\alpha+1} u (t^{\alpha+1} - t_S^{\alpha+1}) + u t_S (t^\alpha - t_S^\alpha). \quad (23)$$

В случае, когда известны коэффициент k_1 , моменты начала и окончания локализации t_S и t_F , а также $S(t_F)$, можно оценить коэффициент u , характеризующий интенсивность тушения:

$$u = \frac{k_1 t_F^\alpha - S(t_F)}{\frac{\alpha}{\alpha+1} (t_F^{\alpha+1} - t_S^{\alpha+1}) - t_S (t_F^\alpha - t_S^\alpha)} \text{ га/сут}^{\alpha+1} \quad (24)$$

Пример. Подсчитаем площадь рассмотренного пожара в момент его локализации.

Положим $t_S - t_0 = 3 \text{ сут}$; $t_F - t_0 = 7 \text{ сут}$; $\alpha = 2,15$; $k_1 = 10,23 \text{ га/сут}^{2,15}$; $S(7) = 320 \text{ га}$, тогда по формуле (24) получаем $u = 2,771 \text{ га/сут}^{3,15}$.

Отметим, что непосредственно по формуле (21), положив $k_0 = 0$, получим несколько другое значение этого коэффициента:

$$u = \frac{k_1}{t_F - t_S} = 2,56 \text{ га/сут}^{3,15}.$$

Разница значений объясняется влиянием погрешности величины t_0 – момента возникновения пожара и нелинейным характером роста площади пожара во времени.

Модель (21)-(24) позволяет оценить динамику параметров пожаров в зависимости от величины управляющего воздействия u . На рис. 3-7 показано изменение параметров рассмотренного выше пожара при различных значениях величин u и t_F . Наглядную картину динамики параметров пожара при различных u можно представить в виде графиков изменения во времени величин S , dS/dt и d^2S/dt^2 , а также фазовых портретов, построенных в координатах $S - dS/dt$ и $dS/dt - d^2S/dt^2$.

На рисунках приведены семейства кривых, полученных при ряде значений параметров модели. Номера кривых соответствуют следующим значениям (размерность этих величин указана выше):

1 – $t_F \rightarrow \infty$, $u = 0$ – свободно распространяющийся пожар;

2 – $t_F - t_S = 6$, $u = 1,705$;

3 – $t_F - t_S = 5$, $u = 2,046$;

4 – $t_F - t_S = 4$, $u = 2,56$ – рассмотренный случай;

5 – $t_F - t_S = 3$, $u = 3,41$;

6 – $t_F - t_S = 2$, $u = 5,12$.

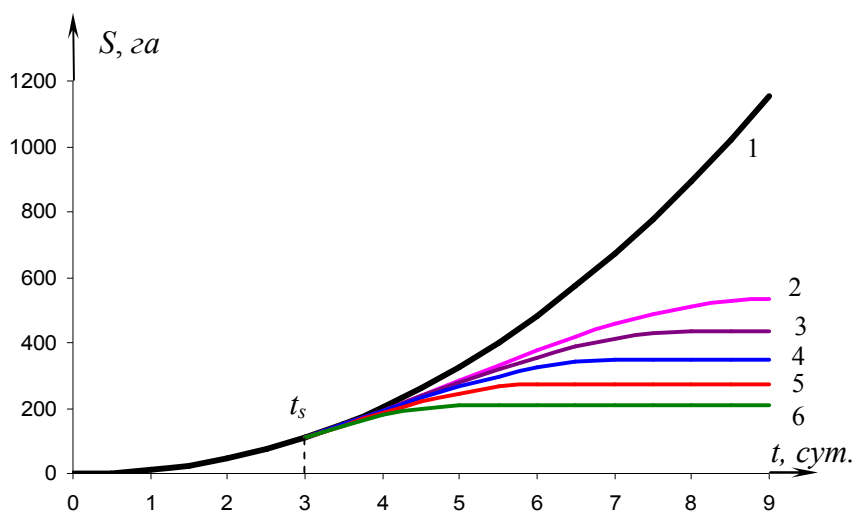


Рис. 3. Графики изменения площади, пройденной пожаром

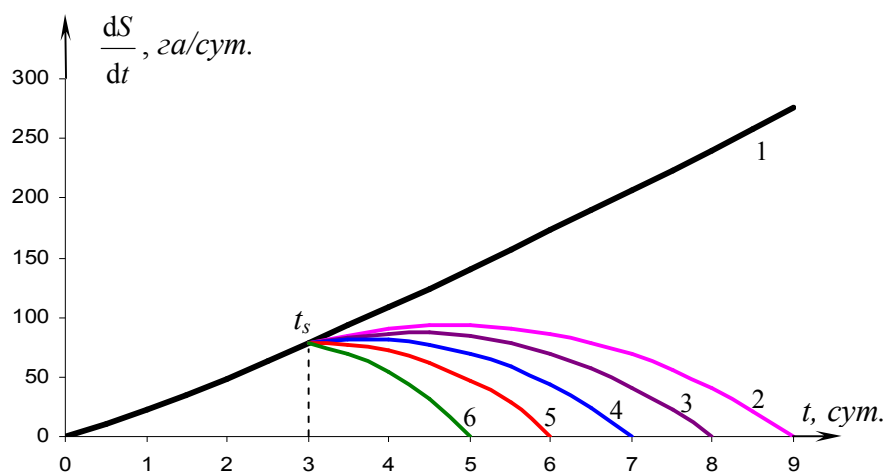


Рис. 4. Графики скорости прироста площади пожара

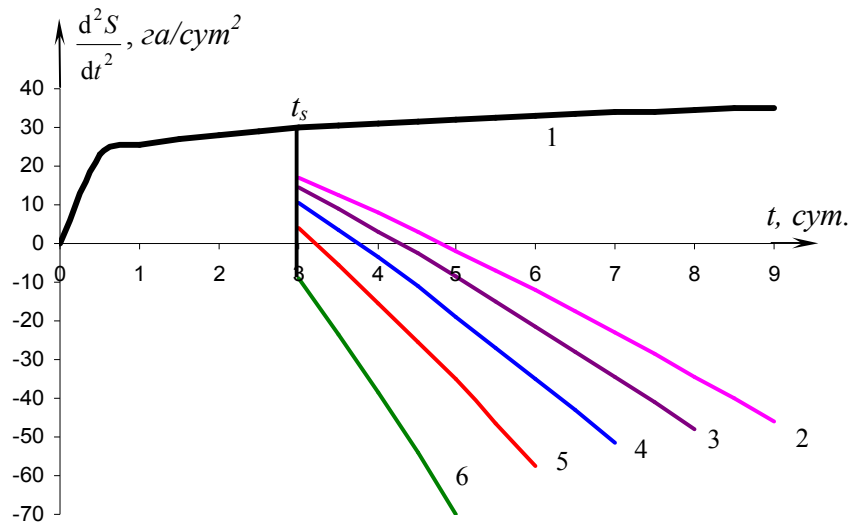


Рис. 5. Графики ускорения прироста площади пожара

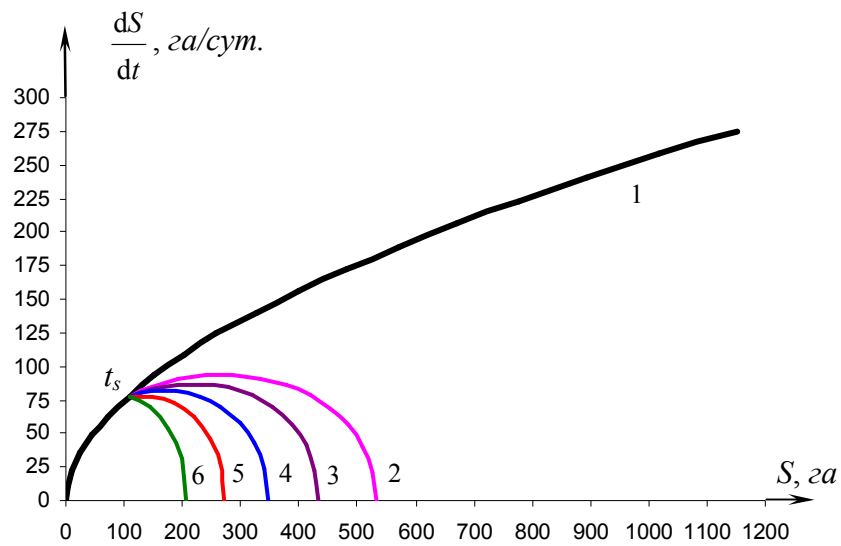


Рис. 6. Фазовый портрет динамики пожара в координатах $S - dS/dt$

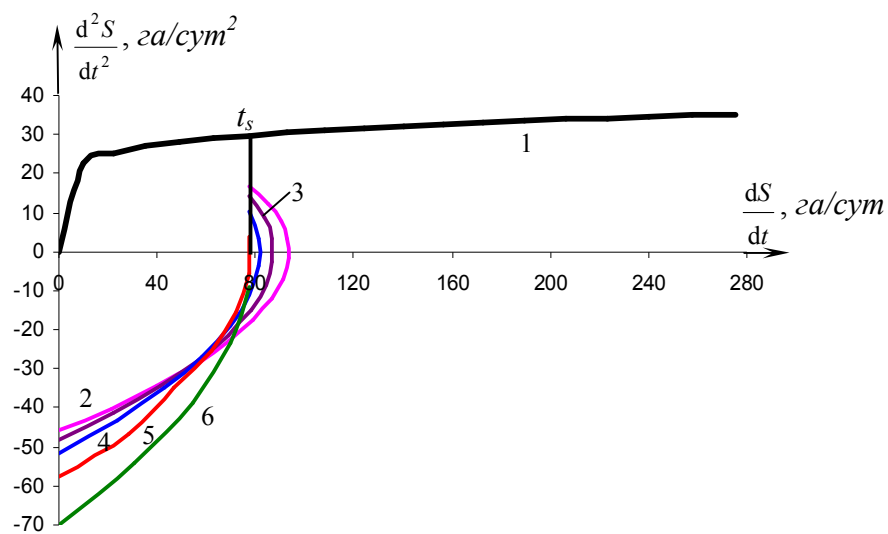


Рис. 7. Фазовый портрет динамики пожара в координатах $dS/dt - d^2S/dt^2$

Как видно, с ростом управляющей величины u уменьшается время локализации пожара t_F , а также площадь, пройденная огнём. Следует также отметить, что в данной модели в соответствии с формулой (22) получается разрыв второй производной d^2S/dt^2 в момент начала борьбы с пожаром t_S и в момент её окончания t_F . Физически это означает, что противопожарные команды начинают борьбу с пожаром максимально интенсивно, без постепенного наращивания сил, и также одновременно эту борьбу заканчивают. Для получения более подробной модели следует рассматривать управляющее воздействие как функцию времени $u(t)$, и тогда мы приходим к задаче оптимального управления, аналогичной постановке Парлара и Виксона [11].

Заключение

Приведенные в работе математические модели и примеры расчетов говорят о принципиальной возможности оценивать динамику крупных лесных пожаров и производить более глубокую обработку данных об их динамике как свободно распространяющихся, так и находящихся под воздействием противопожарных сил и средств. Авторами создан и успешно испытан программный модуль нейросетевого прогнозирования параметров лесных пожаров на основе спутниковой информации. В настоящее время ведется разработка подсистемы прогнозирования лесных пожаров с более широкими функциями. Возможно, полезным окажется использование моделей пожара, основанных на уравнениях тепло- и массообмена [10].

Следует надеяться, что по мере накопления опыта качество прогнозирования параметров лесных пожаров и оценки эффективности противопожарных мероприятий будет возрастать.

Благодарности. Авторы благодарны руководству ФГУ "Авиалесоохрана", Центра обработки спутниковой информации при Институте леса СО РАН, а также Красноярской базы авиационной охраны лесов за предоставленные архивные данные по лесным пожарам.

Литература

1. *Sukhinin A.I., Kashkin V.B., Ponomarev E.I.* Monitoring Forest Fires in Eastern Siberia from Space // Proc. of SPIE. Vol. 3983. P. 206.
2. *Барталев С.А.* Информационная система дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства РФ (состояние и перспективы развития) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. М.: Институт космических исследований РАН, т. 5, № II; 2008. С. 419-429.
3. **Отчёт** по теме "Тестирование моделей поведения лесных пожаров и методики прогнозирования распространения лесного пожара для оценки возможности использования их в ИСДМ – Рослесхоз" (Отчёт по договору № 221/99 от 01.07.09 г. с ИЛ СО РАН). Красноярск: СибГТУ, 2009. 57 с.

4. **Берестенькова М.В., Акинфеев Р.С., Коморовский В.С.** Применение нейронных сетей с учителем для прогнозирования прироста площади лесного пожара на основе данных ИСДМ-Рослесхоз // Материалы 11-й Всерос. науч.-практ. конф. "Проблемы информатизации региона" ПИР-2009. Красноярск, 2009. С. 165-167.

5. **BehavePlus** fire modeling system, version 4.0: User's Guide / Andrews, Patricia L.; Bevins, Collin D.; Seli, Robert C. // Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-106WWW Revised. Ogden, UT: Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 2008. 116 p.

6. **Отчёт** по государственному контракту № 82 "Разработка систем управления пожарами в Красноярском крае для повышения эффективности охраны лесов" // Институт леса СО РАН. Красноярск, 2009. 131 с.

7. **Доррер Г.А.** Динамика лесных пожаров. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. 404 с.

8. **Albini F.A.** Estimating wildfire behavior and effects / USDA Forest Service. Gen. Tech. Rep. INT – 30. Ogden, USA, 1976. 72 p.

9. **Нейроинформатика** / Горбань А.Н. и др. Новосибирск: Наука. СО РАН, 1998. 296 с.

10. **Гришин А.М.** Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними / Новосибирск: Наука, 1992. 407 с.

11. **Parlar M., Vicson R.G.** Optimal Forest Fire Control: an Extension of Park's Model // Forest Science, 1982. Vol. 28, N2. P. 345-355.