

УДК 630*432.35

ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ И ЛИКВИДАЦИИ ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ С ПОМОЩЬЮ АГЕНТНЫХ МОДЕЛЕЙ

Г. А. Доррер, С. В. Яровой

*Сибирский государственный университет науки и технологий им. М. Ф. Решетнева
660014, Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31*

E-mail: g_a_dorrer@mail.ru, ach_bask@mail.ru

Поступила в редакцию 14.04.2017 г.

Предложен новый метод описания процессов распространения и ликвидации природных пожаров на основе агентного моделирования. Основными структурными единицами при создании таких моделей являются классы активных объектов (агентов). Использование агентов в сочетании с геоинформационными системами (ГИС) позволяет эффективно описывать процесс распространения природного пожара и действие противопожарных сил, в том числе команд пожарных, наземных средств механизации, авиационных и других средств. Модель, рассматриваемая в данной работе в качестве иллюстрации предлагаемого метода, позволяет прогнозировать распространение кромки низового пожара и имитировать его тушение немеханизированными средствами. Используются два класса агентов, обозначаемые *A* и *B*. Кромка пожара представляется как цепочка агентов класса *A*, каждый из которых моделирует горение элементарного участка растительного горючего с определенной интенсивностью. Движение фронта пожара (перемещение *A*-агентов) описывается уравнением Гамильтона–Якоби с использованием индикатрис нормальной скорости фронта (фигуротрис). Конфигурация фронта рассчитывается на основе алгоритма подвижных сеток. Агенты типа *B* имитируют процесс тушения пожара. Они сближаются с агентами типа *A* и воздействуют на них, снижая интенсивность горения до полного потухания. Система моделирования представлена в виде двухуровневой вложенной сети Петри, описывающей семантику взаимодействия агентов. Разработана ГИС-ориентированная сетевая информационная система, которая реализует алгоритмы агентного моделирования, в том числе для различных классов действующих агентов и их функций. Система может оказаться полезной как при принятии решений по борьбе с природными пожарами, так и при обучении оперативного персонала. Приведены примеры моделирования результатов принятых решений по тушению низовых лесных пожаров.

Ключевые слова: *природный пожар, агентное моделирование процессов борьбы с природными пожарами, геоинформационная система, обучение персонала.*

DOI: 10.15372/SJFS20170510

ВВЕДЕНИЕ

Природный пожар – неконтролируемый процесс горения растительных материалов в лесах, степях, торфяниках, стихийно возникающий и распространяющийся в природной среде. Природные пожары наносят значительный экономический и экологический ущерб регионам, в которых они возникают, приводят к гибели людей. Каждый природный пожар – однократное и уникальное событие, которое представляет собой весьма неудобный объект для изучения и воздействия. Этим объясняется важность

математического и компьютерного моделирования происходящих при пожаре процессов. Для поддержки принятия решений по борьбе с природными пожарами к настоящему времени разработано большое количество математических моделей и компьютерных систем, позволяющих прогнозировать их поведение. Здесь можно упомянуть системы FARSITE (Finney, 2004), BehavePlus (Andrews et al., 2005), WFDS (Mell et al., 2007) и др.

Однако помимо моделирования процессов, происходящих при природных пожарах, для эффективного управления противопожарными

силами и средствами важно уметь рассчитывать внешние воздействия на пожар, для чего необходимо иметь математические модели, описывающие процессы локализации и ликвидации пожара. В настоящее время известно два подхода к решению таких задач: расчет объема необходимых противопожарных сил на основе упрощенной модели динамики пожара (Parlar, 1982) и определение траекторий движения противопожарных сил для локализации пожара путем построения не преодолимого огнем препятствия (Dorrer, Ushanov, 1996). Однако оба подхода лишь приближенно описывают реальную ситуацию при борьбе с пожаром, в которой, как правило, участвует множество людей и технических средств, а тактика борьбы с пожаром многообразна и зависит от ряда трудно формализуемых факторов.

Для реалистичного описания рассматриваемых процессов требуются более мощные средства моделирования, к которым, в частности, относится имитационное моделирование, основанное на использовании активных объектов – агентов, так называемое агентное моделирование (agent-based modeling). При агентном моделировании осуществляется имитация поведения сложных динамических систем путем описания поведения и взаимодействия большого количества (от десятков до нескольких тысяч) автономных и независимых субъектов (агентов) в некоторой среде (Аксенов, Гончарова, 2006).

Системы борьбы с природными пожарами относятся к такому классу систем. Здесь в качестве активных агентов могут выступать параметры среды, развивающийся природный пожар, а также взаимодействующие с ним противопожарные силы и средства. Взаимодействие агентов должно отображаться на карте местности, поэтому для моделирования необходимо привлекать геоинформационные системы (ГИС) для визуализации сценариев развития ситуаций и хранения пространственной информации.

Моделирование динамики природного пожара с помощью агентного подхода ранее рассматривалось в работах (Batty, Jiang, 1999; Niazi et al., 2010; Dai, Zhang, 2013; Кухта, 2014), в которых модели создавались с помощью специализированных программных систем (агентных платформ), таких как NetLogo, StarLogo, Repast Simphony, что позволяет упростить программную реализацию имитационной модели, но затрудняет интеграцию моделей с картографическими системами. Кроме того, в этих работах моделируется только свободно распространяю-

щийся пожар и не учитывается действие противопожарных сил и средств.

В данной работе предлагается метод создания агентных имитационных систем на примере системы, моделирующей распространение низового лесного пожара и его тушение немеханизированными противопожарными силами. Кратко описаны семантика взаимодействия агентов и программная реализация предлагаемого метода.

ОПИСАНИЕ ДИНАМИКИ ФРОНТА ПОЖАРА

Рассмотренная ниже агентная модель динамики природного пожара основана на следующих предположениях (Доррер, 2008).

1. Область моделирования представляет собой фрагмент карты реальной местности, покрытой слоем растительных горючих материалов. Это позволяет объединить данные ГИС и агентных моделей. Карта содержит слои, отображающие различные элементы среды моделирования: населенные пункты, реки, озера, дороги, овраги, лесные насаждения, растительное горючее и др. Координаты каждого элемента заданы. Используется так называемая модель тонкого слоя горючих материалов (thin layer model of vegetation fuel) (Shatalov, Dorrer, 2013). В этой модели не учитывается вертикальная структура растительности, а горючие материалы рассматриваются как однородный слой на поверхности Земли с усредненными характеристиками. Такие характеристики хранятся в базе данных пирологических описаний участков леса.

2. Процесс распространения огня по слою горючих материалов и процесс противодействия распространению огня рассматриваются в проекции на горизонтальную плоскость (на карте соответствующего масштаба). Координатная система $X = [x^1, x^2]^T$ привязана к карте; $X \in D$, где D – рассматриваемая сценарная область.

3. Микрометеорологические, топографические параметры и характеристики горючих материалов в каждой точке карты предполагаются известными. Это позволяет вычислять параметры процесса горения в каждой точке карты с помощью известных моделей горения растительных материалов (Софронов, 1967; Коровин, 1969; Rothermel, 1972; Brown et al., 2000; Волокитина, 2002 и др.).

Пусть $\varphi(X, t) = 0$ – уравнение фронта пожара (рис. 1). Эта функция описывает движение

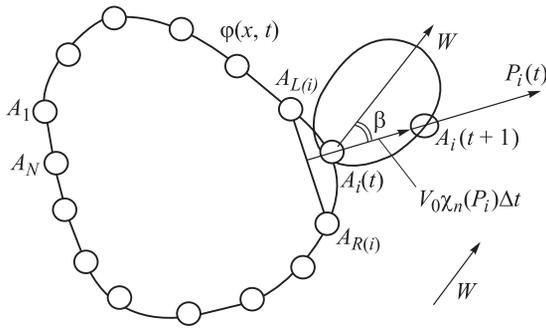


Рис. 1. Представление контура пожара как цепочки А-агентов, перемещение которых происходит в соответствии с алгоритмом подвижных сеток.

кромки огня и удовлетворяет уравнению Гамильтона–Якоби:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + V \cdot \text{grad } \varphi = 0, \quad (1)$$

где $V = V(X) = [v^1, v^2]$ – вектор-строка скорости фронта пожара.

Вектор-столбец градиента

$$\text{grad } \varphi = \left[\frac{\partial \varphi}{\partial x^1}, \frac{\partial \varphi}{\partial x^2} \right]^T = P[p1, p2]$$

представляет собой нормаль к линии фронта пожара.

Уравнение (1) рассматривается при начальных условиях

$$X(0) = X_0(\alpha), P(0) = P_0(\alpha), \quad (2)$$

где $X_0(\alpha)$ и $P_0(\alpha)$ представляют собой параметрическое представление начального контура пожара и множества нормалей к нему; U – допустимое множество значений параметра α .

При описании динамики фронта пожара на основе системы (1), (2) возможны два подхода. Один из них использует известный в оптике принцип Гюйгенса, при котором каждая точка фронта горения порождает некую область влияния, называемую локальным множеством (local set) (Mell et al., 2007), или индикатрисой скорости распространения $\chi(\varphi)$. Индикатриса определяет конфигурацию фронта пожара.

Однако для целей численного моделирования динамики пожара удобнее другой подход, основанный на использовании нормальной скорости фронта пожара $V_n = V \cdot P/|P|$, где $|P|$ – длина нормали и $P/|P|$ – единичный вектор нормали к линии фронта.

При этом уравнение (1) преобразуется к виду

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + V_n |P| = 0. \quad (3)$$

Уравнение (3) также рассматривается при начальных условиях (2).

Как следует из теории процессов горения и наблюдений, скорость распространения пожара зависит от множества параметров внешней среды, в первую очередь от скорости ветра и уклона местности, где происходит горение. Поэтому нормальная скорость движения фронта пожара может быть представлена как функция нескольких аргументов:

$$V_n = V_n(X, t, W, S, \beta, \gamma), \quad (4)$$

где W – скорость ветра; S – уклон местности; β – угол между направлением ветра \vec{W} и направлением нормали к линии фронта P ; γ – угол между вектором склона и направлением нормали к линии фронта. В рамках данного подхода нормальная скорость движения фронта пожара в любой точке слоя горючих материалов может быть представлена как произведение двух функций:

$$V_n = V_n(X, t, W, S, \beta, \gamma) = V_0(X, t, W, S) \chi_n(P, W, S), \quad (5)$$

где V_0 – максимальная скорость распространения пожара, когда направление нормали к контуру совпадает с направлением ветра и направлением уклона местности.

Множитель $0 \leq \chi_n(P, W, S) \leq 1$ определяет степень уменьшения скорости распространения пожара V_n в других направлениях, когда направление нормали к контуру не совпадает с направлением ветра и уклона. Эта функция определяет локальные направления движения фронта пожара и называется индикатрисой нормальной скорости фронта, или, следуя Н. Minkowski (Рунд, 1981), фигуротрисой (figurotrisa) процесса распространения. Свойства этой функции рассмотрены в работе Г. А. Доррера (Доррер, 2008). Для простоты изложения в дальнейшем обозначим фигуротрису как $\chi_n(P)$.

Использование фигуротрис позволяет создать эффективный алгоритм численного моделирования процесса распространения фронта пожара. Идея алгоритма заключается в использовании метода подвижных сеток, предложенного С. К. Годуновым и Г. П. Прокоповым (1972). Суть метода заключается в том, что расчетная сетка задачи не строится априори, а определяется текущим решением задачи. Сетка двигается и развивается по мере выполнения вычислений.

Рассмотрим конструкцию расчетной сетки. Кромка пожара в момент t представляет собой замкнутую линию, проходящую через точки C_1, \dots, C_N (см. рис. 1). Каждая точка $C_i = C_i(t)$

определяется вектором $C_i(t) = \{X_i, L(i), R(i), t\}$, $i = 1, \dots, N$, где $X_i = (x_i^1, x_i^2)$ – координаты точки на карте, $L(i)$ и $R(i)$ – соответственно номера соседних точек, лежащих слева и справа от C_i .

Алгоритм включает следующие этапы.

1. Создание узлов сетки в следующий момент $t + 1$ (первая итерация). Для каждой точки $C_i(t)$ вычисляется новый вектор координат:

$$X_i(t + 1) = X_i(t) + X_0(X, t)\chi_n(P_i)\Delta t, \quad (6)$$

где P_i – вектор нормали к фронту в точке $C_i(t)$. Этот вектор определяется как нормаль в точке $C_i(t)$ к линии, проходящей через точки $C_{i-1}(t)$, $C_i(t)$, $C_{i+1}(t)$; Δt – временной шаг расчета.

2. Упорядочение сетки. При моделировании распространения пожара по пересеченной местности расстояния между соседними узлами изменяются и сетка может стать беспорядочной. Для того чтобы поддерживать регулярную структуру сетки, предусмотрены два действия: введение нового узла, если расстояние между соседними узлами превысит заданную максимальную величину $lmax$, и исключение одного из узлов, если такое расстояние окажется меньше заданной величины $lmin$. Например, если расстояние между узлами $C(i)$ и $CR(i)$ больше $lmax$, то между ними вводится новый узел $C(j)$ и меняются ссылки на соседние узлы $R(i) = j$, $L(R(i)) = j$, $R(j) = R(i)$, $L(j) = i$. Аналогично, если расстояние между $C(i)$ и $C(R(i))$ меньше $lmin$, то узел $C(i)$ исключается из списка и изменяются ссылки $C(R(i)) = C(L(i))$, $C(L(i)) = C(R(i))$.

Благодаря списочной структуре описания фронта пожара возможно моделирование фронтов пожаров сложной формы, движения нескольких отдельных пожаров, их разделение или слияние.

Входные данные для расчета процесса горения являются типовыми для многих моделей (Софронов, 1967; Rothermel, 1972).

Учитываются параметры растительного горючего:

- тип горючих материалов;
- запас горючего, кг/м²;
- теплотворная способность горючего Q , дж/м².

Учитываются также параметры внешней среды:

- класс пожарной опасности по погоде (от I до V);
- скорость и направление ветра W по данным ближайшей метеостанции, м/с;
- величина и направление уклона местности, град.

Указанные параметры являются наиболее важными для вычисления интенсивности горения на кромке пожара I , Вт/м, максимальной скорости распространения V_0 , м/мин, параметров фигуротрисы $\chi_n(P)$, что позволяет вычислять скорость движения фронта в любой его точке.

АГЕНТНАЯ МОДЕЛЬ

Предлагаемая в данной работе модель использует два типа агентов, обозначаемых символами A и B . Агенты типа A (A -агенты) предназначены для моделирования процесса распространения пожара как волны горения на основе уравнений Гамильтона–Якоби и рассмотренного алгоритма подвижных сеток. Каждый узел $C(i)$ подвижной сетки соответствует одному агенту A_i . Множество A -агентов представляет собой контур пожара (см. рис. 1). Пространственные координаты агентов этого типа $X_i(t)$ вычисляются на каждом шаге моделирования. Кроме того, как описано выше, в процессе моделирования при определенных условиях агенты могут «погибать» или, напротив, возникать новые. На рисунке также показано перемещение агента $A_i(t)$ на следующем временном шаге $A_i(t + 1)$. Вектор $P_i(t)$ представляет собой нормаль к линии фронта пожара в точке $A_i(t)$; W – вектор ветра; $V_0\chi_n(P_i)\Delta t$ – расстояние, на которое перемещается агент A_i за один шаг.

Агенты типа A могут находиться в активном и пассивном состояниях. A -агент, находящийся в активном состоянии, генерирует тепловой поток $I(t)$, интенсивность которого рассчитывается с помощью модели горения растительных горючих материалов (Rothermel, 1972), и дымовой шлейф, параметры которого определяются моделью (Мальбахов и др., 2005). Интенсивность теплового потока зависит от условий горения и может снижаться под воздействием агентов типа B . При уменьшении величины $I(t)$ до нуля A -агент переходит в пассивное состояние и больше не участвует в процессе моделирования.

Агенты типа B моделируют действие противопожарных сил и воздействуют на агентов типа A . Они преследуют единственную цель – «погасить» все узлы горения, т. е. перевести все A -агенты в пассивное состояние. Для этого B -агент движется по среде моделирования к ближайшему A -агенту и, подойдя к нему, уменьшает интенсивность горения $I_A(t)$:

$$I_A(t + 1) = I_A(t) - \Delta I_B(t), \quad (7)$$

где $\Delta I_B(t)$ – снижение интенсивности горения, вызываемое B -агентом за один шаг моделирования. «Погасив» очередной A -агент, B -агент пере-

мещается к ближайшему активному A -агенту и продолжает свои действия.

Перед началом моделирования задаются число, расположение и характеристики A - и B -агентов. Характеристики A -агентов определяются параметрами горения, скоростью движения фронта пожара V_0 и фигуротрисой $\chi_n(P)$. Производительность B -агентов определяется инструкциями по борьбе с природными пожарами (Щетинский, 2002; Иванов и др., 2011).

ФОРМАЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ И РЕАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ

Моделирующая система построена по иерархическому принципу и формально может быть описана как цветная вложенная сеть Петри (Coloured Nested Petri Net) (Jensen, 1997; Ломазова, 2004). Она содержит две подсистемы: базовую и спутниковую. Базовая часть содержит всю информацию о среде моделирования, осуществляет связь с ГИС, с пользователями системы и управляет спутниковыми агентами, которые моделируют пожарную ситуацию на карте местности. В данной работе используются два типа спутниковых агентов – A и B , действие которых описано выше. На рис. 2 приведен фрагмент спутниковой части раскрашенной сети Петри, показывающей взаимодействие агентов типа A и B .

Ниже кратко описана семантика поведения этих агентов. Пространственное положение агента типа A определяется системной сетью в соответствии с динамикой фронта пожара, как описано выше. Состояние этого агента определяется маркировкой позиции P_A , которая включает булеву переменную $status_A$, определяющую статус агента, и интенсивность горения

$intensity_A$ в локальном участке местности, занимаемом агентом. При наличии ресурса в этой позиции агент считается активным. В начале работы ресурс активизируется по сигналу системной сети путем срабатывания перехода \bar{t}_{A0} по дуге a_{A0} . Активное состояние агента поддерживается по дугам a_{A1} , a_{A2} при срабатывании перехода t_{A1} . При отсутствии горючих материалов на участке местности, занимаемом агентом, ресурс обнуляется через переход \bar{t}_{A2} . При взаимодействии с агентом типа B ресурс $intensity_A$ уменьшается на каждом шаге моделирования на величину $delta_intensity_A$, которая передается по дуге a_{A4} при срабатывании перехода \tilde{t}_{AB} согласно формуле (7). При $intensity_A = 0$ агент типа A становится пассивным.

Пространственное положение агента типа B определяется системной сетью в соответствии с алгоритмом движения противопожарных сил. Состояние этого агента является булевой переменной $status_B$ и определяется маркировкой позиции P_B : при наличии ресурса в этой позиции агент считается активным. Ресурс при начале работы активизируется через переход \bar{t}_{B0} по дуге a_{B0} из системной сети. Активное состояние агента поддерживается по дуге a_{B1} при срабатывании перехода t_{B1} . При активации перехода \tilde{t}_{AB} происходит воздействие на агента типа A – уменьшение величины ресурса $intensity_A$ в позиции P_A , как описано выше. Взаимодействие агентов управляется системной сетью.

На основе предложенной мультиагентной модели разработан программный комплекс, имеющий клиент-серверную архитектуру и web-интерфейс, что позволяет работать с программой одновременно нескольким пользователям. На сервере реализуется базовая часть системы и база данных, в которой хранится ин-

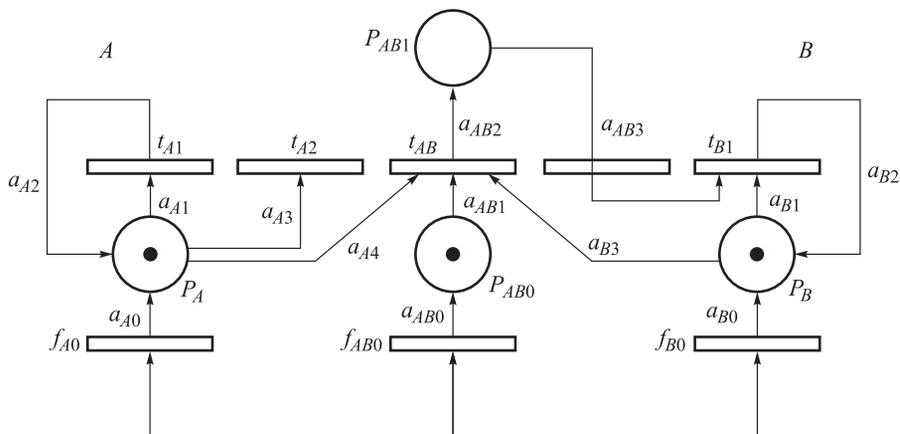


Рис. 2. Спутниковая сеть Петри, моделирующая взаимодействие агентов типа A и B .

формация о среде моделирования (карта местности, параметры погоды, характеристики горючих материалов, данные о противопожарных средствах). Клиентская часть системы реализует поведение сателлитных агентов, она написана на JavaScript с использованием библиотеки Open Layers. Библиотека позволяет создавать карты на основе программного интерфейса (API) и позволяет осуществлять web-интерфейс для отображения картографических материалов. Библиотека может работать с данными различных картографических сервисов, таких как Open Street Map, Google, Yandex и др. Более подробно программная реализация модели описана в работе С. В. Яровой (Яровой, 2016).

Ниже представлены примеры моделирования процесса тушения низового пожара с помощью разработанной системы.

ПРИМЕР 1

Параметры среды, в которой происходит пожар:

– основной проводник горения – лишайник;

– класс пожарной опасности – III;
 – скорость ветра под пологом леса – 1.5 м/с,
 направление: северо-запад;
 – местность равнинная, с небольшими неровностями.

Площадь очага пожара при начале тушения составляет около 3 га. Согласно данным справочников (Щетинский, 2002; Иванов и др., 2011), интенсивность пожара средняя, поэтому может быть принята тактика тушения охватом пожара с фронта. К тушению привлечены две команды по 12 чел. каждая, расположенные в одной точке вблизи фронта пожара. Командам задано направление обхода пожара в противоположных направлениях.

На рис. 3, а представлены исходная позиция пожарных команд и исходный контур пожара.

Рис. 3, б показывает положение пожарных команд и контур пожара спустя 3 ч (36 итераций моделирования).

Как видно из рисунка, пожарные команды продолжают успешно продвигаться по флангам в сторону тыла пожара.

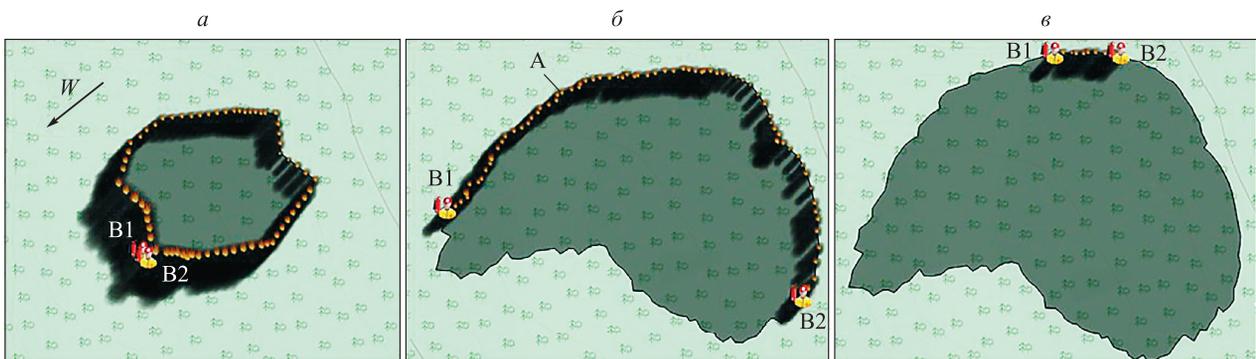


Рис. 3. Первый пример работы имитационной системы – тушение пожара двумя командами: а – начало тушения, площадь, пройденная огнем, – 3.4 га; б – конфигурация пожара через 3 ч, площадь пройденная огнем, – 10.1 га; в – завершение тушения пожара через 6 ч, площадь, пройденная огнем, – 12 га. Здесь и на рис. 4 А – агенты типа А (кромка пожара); В1 – агент типа В номер 1 (первая противопожарная команда); В2 – агент типа В номер 2 (вторая противопожарная команда); W – западное направление.

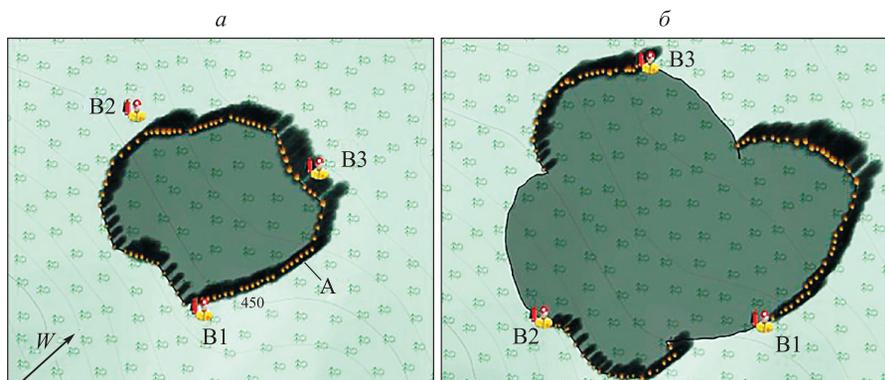


Рис. 4. Второй пример моделирования – попытка потушить пожар тремя командами: а – начало тушения, площадь, пройденная огнем, – 4 га; б – конфигурация пожара через 4 ч, площадь, пройденная огнем, – 10 га.

Это свидетельствует о том, что выбраны правильная тактика тушения и достаточные противопожарные силы. Через 6 ч пожар полностью локализован и потушен (рис. 3, в).

ПРИМЕР 2

Параметры среды моделирования:

- тип растительного горючего – лишайник;
- класс пожарной опасности – II;
- скорость ветра под пологом леса – 1 м/с, направление ветра – юго-восток.

Согласно указанным справочникам, интенсивность моделируемого пожара определяется как слабая, поэтому выбрана схема воздействия на пожар по всему периметру. Привлечены 3 команды по 6 чел. каждая, расставленные вокруг кромки пожара и получившие задание обходить пожар против часовой стрелки. Площадь очага пожара при обнаружении составляет около 4 га. На рис. 4, а представлены исходная позиция пожарных команд и исходный контур пожара.

На рис. 4, б показаны положение команд и контур пожара спустя 4 ч после начала тушения (через 48 итераций процесса моделирования). Как видно из рисунка, спустя 4 ч пожар продолжает развиваться, потушено менее 50 % действующей кромки пожара.

Кроме того, общая длина горящей кромки пожара на четвертом часе тушения приблизительно равна длине исходной кромки пожара. Это говорит о том, что принято неверное решение: 3 отряда пожарных по 6 чел. не способны справиться с данным пожаром.

Приведенные примеры говорят, на наш взгляд, о реалистичности процесса агентного моделирования. Дело в том, что имеющиеся нормативы использования противопожарных сил дают довольно грубые оценки, которые с учетом особенностей погоды, местности и горючих материалов могут привести к принятию ошибочных решений. Моделирование процессов распространения и тушения пожара позволяет уточнить возможный ход и последствия этого процесса. Одним из препятствий для повышения достоверности и точности моделирования рассматриваемых процессов в настоящее время является отсутствие достаточного количества специальных карт и баз данных по характеристикам растительных горючих материалов для охраняемых территорий. Это вынуждает использовать на практике различные косвенные данные.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен новый метод имитационного моделирования процессов распространения и борьбы с природными пожарами, основанный на агентном подходе, позволяющий одновременно моделировать процессы распространения природного пожара и процесс борьбы с ним. Возможности рассмотренной в качестве примера модели могут быть расширены путем введения новых агентов, моделирующих динамику параметров внешней среды и поведение других участников процесса борьбы с природными пожарами, в том числе различных механизированных и авиационных средств, что позволит повысить реалистичность и достоверность моделирования.

Разработанная на основе предложенного метода мультиагентная модель и программная система могут быть использованы для решения широкого круга задач.

Во-первых, система может быть полезной для оперативного определения параметров распространения низовых пожаров в лесных насаждениях и степях, а также для разработки комплекса мер по их предотвращению и тушению в рамках систем управления борьбой с пожаром.

Во-вторых, данная модель может служить основой для учебно-тренажерных систем, предназначенных для обучения в игровой форме студентов учебных заведений лесохозяйственного и пожарно-спасательного профиля, работников лесного хозяйства и МЧС основам тактики борьбы с природными пожарами.

В настоящее время на основе разработанной программной системы, объединенной с системой дистанционного обучения MOODLE, ведется разработка компьютерного тренажера FIREMAN, предназначенного для использования в учебных заведениях и оперативных подразделениях ГПС МЧС России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аксенов К. А., Гончарова Н. В. Динамическое моделирование мультиагентных процессов преобразования ресурсов. Екатеринбург: Изд-во УГТУ-УПИ, 2006. 311 с.
- Волокитина А. В. Защита населенных пунктов от чрезвычайных ситуаций, связанных с природными пожарами (практические рекомендации). Красноярск: ИЛ СО РАН, 2002. 63 с.
- Годунов С. К., Прокопов Г. П. Об использовании подвижных сеток в газодинамических расче-

- тах // Журн. вычисл. матем. и матем. физики. 1972. Т. 12. № 2. С. 429–439.
- Доррер Г. А. Динамика лесных пожаров. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. 404 с.
- Иванов В. А., Иванова Г. А., Москальченко С. А. Справочник по тушению природных пожаров; Проект ПРООН/МКИ «Расширение сети ООПТ для сохранения Алтае-Саянского эко-региона». 2-е изд. перераб. и доп. Красноярск, 2011. 130 с.
- Коровин Г. Н. Методика расчета некоторых параметров низовых лесных пожаров. Сб. науч.-иссл. работ по лесн. хоз-ву. Вып. XII. Л.: ЛенНИИЛХ, 1969. С. 244–262.
- Кухта В. Б. Метод моделирования распространения низового пожара в лесных насаждениях с использованием агентного подхода // Вестн. Московск. гос. ун-та леса – Лесн. вестн. 2014. № 5. С. 92–97.
- Ломазова И. А. Вложенные сети Петри: моделирование и анализ распределенных систем с объектной структурой. М.: Научный мир, 2004. 208 с.
- Мальбахов В. М., Шлычков В. А., Лежнин А. А., Дубровская О. А. Численная модель распространения дымового шлейфа при лесных пожарах с параметрическим учетом процессов горения // Геогр. и природ. ресурсы. 2005. Спец. вып. Тр. Междунар. конф. по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды: ENVIROMIS-2004, Томск, 16–25 июля 2004 г. С. 170–174.
- Рунд Х. Дифференциальная геометрия финслеровых пространств. М.: Наука, 1981. 340 с.
- Софронов М. А. Лесные пожары в горах Южной Сибири. М.: Наука, 1967. 150 с.
- Щетинский Е. А. Тушение лесных пожаров: пособие для лесных пожарных. Изд. 3-е, перераб. и доп. М.: ВНИИЛМ, 2002. 104 с.
- Яровой С. В. Применение агентных моделей для имитации процесса локализации природных пожаров // Электрон. науч. журн. «Программные продукты, системы и алгоритмы». 2016. № 2.
- Andrews P. L., Bevins C. D., Seli R. C. BehavePlus fire modeling system. Version 3.0: User's Guide. USDA Forest Service. Rocky Mountain Res. Stat. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-106WWW Revised. 2005. 143 p.
- Batty M., Jiang B. Multi-agent simulation: new approaches to exploring space-time dynamics within GIS. Centre for Advanced Spatial Analysis (CASA Working Papers 10). CASA, Univ. College London, London, UK, 1999.
- Brown D. F., Dunn W. E., Lazaro M. A., Policastro A. J. The smoke-fireplume model: tool for eventual application to prescribed burns and wildland fires // Proc. Joint Fire Sci. Conf. and Workshop «Crossing the millennium: Integrating spatial technologies and ecological principles for a new age in fire management», the Grove Hotel, Boise, Idaho, June 15–17, 1999. Univ. Idaho, ID, USA, 2000. 12 p.
- Dai D., Zhang Y. Simulating fire spread in a community using an agent-based model // Proc. 12th Int. Conf. on Geo-Computation. LIESMARS Wuhan Univ., Wuhan, China, 2013. P. 130–132.
- Dorrer G. A., Ushanov S. V. Mathematical modelling and optimization of forest fire localization processes // Fire in Ecosystems of Boreal Eurasia / J. G. Goldammer, V. V. Furyaev (Eds.). V. 48 Ser. For. Sci. Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, Netherlands, 1996. P. 303–313.
- Finney M. A. FARSITE: Fire area simulator – model development and evaluation. USDA Forest Service Rocky Mountain Res. Stat., Res. Paper RMRS-RP-4. Revised. Rocky Mountain Res. Stat., Ogden, UT, USA, 2004. 47 p.
- Jensen K. Coloured Petri Nets: Basic concepts, analysis methods and practical use. V. 3. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 1997. 265 p.
- Mell W., Jenkins M. A., Gould J., Cheney Ph. A physics-based approach to modeling grassland fires // Int. J. Wildland Fire. 2007. V. 16. P. 1–22.
- Niazi M. A., Siddique Q., Hussain A., Kolberg M. Verification & validation of an agent-based forest fire simulation model // Proc. 2010 Spring Simulation Multiconference, Orlando, FL, USA – April 11–15, 2010. P. 142–149.
- Parlar M. Optimal forest fire control: an extension of Park's model // For. Sci. 1982. V. 28. N. 2. P. 345–355.
- Rothermel R. C. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. Res. Pap. INT-115. Ogden, UT: U. S. Department of Agriculture, Intermountain Forest and Range Experiment Station, 1972. 40 p.
- Shatalov P. S., Dorrrer G. A. Parallel computation of forest fire and its interaction with infrastructure objects // Fourth Fire Behavior and Fuels Conf., July 1–4, 2013, St. Petersburg, Russia. Oral abstracts. St. Petersburg, 2013. P. 36–37.

DESCRIBING THE PROCESSES OF PROPAGATION AND ELIMINATING WILDFIRES WITH THE USE OF AGENT MODELS

G. A. Dorrer, S. V. Yarovoy

*Academician M. F. Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
Prospekt Krasnoyarskii Rabochii, 31, Krasnoyarsk, 660014 Russian Federation*

E-mail: g_a_dorrer@mail.ru, ach_bask@mail.ru

A new method of describing the processes of propagation and elimination of wildfires on the basis of agent-based modeling is proposed. The main structural units of the creation of such models are the classes of active objects (agents). Agent approach, combined with Geographic Information Systems (GIS) can effectively describe the interaction of a large number of participants in the process to combat wildfires: fire spreading, fire crews, mechanization, aerial means and other. In this paper we propose a multi-agent model to predict the spread of wildfire edge and simulate the direct method of extinguishing a ground fire with non-mechanized crews. The model consist with two classes of agents, designated *A* and *B*. The burning fire edge is represented as a chain of *A*-agents, each of which simulates the burning of an elementary portion of vegetation fuel. Fire front movement (moving the *A*-agent) described by the Hamilton-Jacobi equation with using the indicatrisises of normal front rate of spread (figurotris). The configuration of the front calculated on basis the algorithm of mobile grids. Agents other type, *B*-agents, described extinguishing process; they move to the agents of *A* type and act on them, reducing the combustion intensity to zero. Modeling system presented as two-level coloured nested Petri Net, which describes the agents' interaction semantics. This model is implemented as a GIS-oriented software system that can be useful both in the fire fighting management as well as in staff training tactics to fighting wildfires. Some examples of modeling decision making on a ground fire extinguishing are presented.

Keywords: *wildfire, agent-basic modeling of wildfire fighting, geographic information system, personnel training.*

How to cite: *Dorrer G. A., Yarovoy S. V. Describing the processes of propagation and eliminating wildfires with the use of agent models // Sibirskij Lesnoj Zurnal (Sib. J. For. Sci.). 2017. N. 5: 105–113 (in Russian with English abstract).*