

УДК 630.43

DOI: 10.15827/2311-6749.19.183

ПРИМЕНЕНИЕ АГЕНТНЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ИМИТАЦИИ ПРОЦЕССА ЛОКАЛИЗАЦИИ ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ

*С.В. Яровой, аспирант, ach_bask@mail.ru
(Сибирский государственный технологический университет,
просп. Мира, 82, г. Красноярск, 660049, Россия)*

Аннотация. В статье рассматривается задача моделирования лесопожарных ситуаций. Для ее решения предлагается использовать агентный подход совместно с технологией геоинформационных систем, что позволяет объединить преимущества обоих направлений. Разработана мультиагентная модель, позволяющая как прогнозировать распространение кромки лесного пожара, так и имитировать прямой метод тушения низового лесного пожара немеханизированными противопожарными отрядами. На основе предложенной модели был разработан программный комплекс, который предлагается использовать для решения широкого круга задач. Во-первых, система будет полезна для оперативного определения параметров распространения лесного низового пожара в лесных насаждениях, а также разработки комплекса мер по его предотвращению и противодействию. Во-вторых, данная система может служить основой для учебно-тренажерных систем, предназначенных для обучения студентов вузов и техникумов лесохозяйственного профиля, работников лесохозяйственной отрасли и МЧС на курсах повышения квалификации в учебно-игровой форме основам тактики борьбы с лесными пожарами.

Ключевые слова: природный пожар, локализация природного пожара, имитационное моделирование, геоинформационная система, агентная модель, программный комплекс.

Природный пожар – неконтролируемый процесс горения, стихийно возникающий и распространяющийся в природной среде. Данный термин объединяет лесные, торфяные и степные пожары. Природные пожары наносят огромный экономический и экологический ущерб регионам, в которых они возникают. Для управления эффективной борьбой с природными пожарами было разработано большое количество информационных систем, позволяющих с различной степенью точности моделировать их поведение (системы BehavePlus [1], FARSITE [2], WFDS [3] и др.). Данные системы основаны на математических моделях, имеющих различную точность, время расчета и требовательность к вычислительным ресурсам.

Однако, помимо моделирования непосредственно самой кромки природного пожара, существует необходимость моделирования различного рода искусственных воздействий на пожар для его локализации и ликвидации. Подобные модели могут активно использоваться при управлении лесопожарной ситуацией, в частности, для решения задачи оптимального управления противопожарными силами и средствами. На практике выбор средств и методов для локализации природного пожара зависит от большого количества факторов, которые практически не поддаются формализации. В таких условиях, на взгляд автора, наиболее эффективным методом является агентное моделирование.

Агентное моделирование (agent-based modeling, ABM) представляет собой новый подход имитационного моделирования, направленный на моделирование сложных динамических систем с помощью исследования поведения и взаимодействия автономных и независимых субъектов (агентов) в некоторой среде [4]. Агентные модели используются как в естественных науках (физике, биологии), так и в общественных (в социологии, экономике). Наибольшее применение данный тип моделей получил в тех случаях, когда есть необходимость продемонстрировать деятельность системы, состоящей из большого числа взаимосвязанных субъектов (от десятков до нескольких тысяч), деятельность которых зависит от влияния большого количества различных случайных воздействий.

Для моделирования лесопожарных ситуаций особый интерес также представляют *геоинформационные системы* (ГИС), которые обладают возможностями хранения и визуализации пространственной информации. Совместное использование агентного моделирования и ГИС позволяет объединить преимущества обоих направлений, применить перспективные средства для моделирования процессов, протекающих в условиях реального ландшафта.

Идея моделирования кромки природного пожара с помощью агентного подхода не нова [5, 6]. Агентные модели такого рода создавались с помощью специализированных систем для программного описания деятельности агентов и состояния среды (агентных платформ), таких как NetLogo, StarLogo, Repast Symphony и др. Данный подход позволяет упростить программную реализацию имитационной модели, но значительно затрудняет ее интеграцию с ГИС. Кроме того, в работах [5, 6] производится моделирование свободно распространяющегося пожара, без моделирования противопожарных сил и средств.

Таким образом, существует необходимость создания имитационной системы на основе агентного подхода, позволяющей моделировать лесопожарные ситуации на реальной местности, включающие как

моделирование пожара, так и процесс его ликвидации. Рассмотренная ниже агентная модель ориентирована на имитацию прямого метода тушения низового лесного пожара немеханизированными противопожарными отрядами.

Описание среды моделирования

Среда моделирования представляет собой участок карты реальной местности с нанесенным на нее слоем, описывающим *растительные горючие материалы* (РГМ). Таким образом, имеется возможность совмещать данные ГИС и агентной модели. В модели используется информация о населенных пунктах, реках, озерах, дорогах, оврагах, лесных насаждениях и др. Позиционирование на карте производится путем задания пространственных координат, различных для каждого объекта. В качестве модели горючего используется модель тонкого слоя [7]. В модели тонкого слоя лесной покров рассматривался как однородный слой на поверхности земли с усредненными характеристиками РГМ. Эти характеристики определяются на основании пирологического описания выделов карты лесов.

Таким образом, для каждого местоположения на карте заранее задается тип поверхности, определяющий наличие *основных проводников горения* (ОПГ) и их тип. В зависимости от типа ОПГ определяются базовая скорость распространения кромки пожара $V_{\text{ОПГ}}$, м/мин., и теплота воспламенения слоя Q , Дж/м².

Также в качестве основных показателей среды принимаются следующие параметры:

- величина скорости ветра по данным ближайшей метеостанции V_{ω} ;
- вектор направления ветра W ;
- класс пожарной опасности.

Данные параметры в значительной степени влияют на скорость и направление распространения пожара, а также интенсивность горения.

В модели выделили два типа агентов:

- участок фронта распространения пожара (агенты типа A);
- противопожарная команда (агенты типа B).

Агенты типа A используются для моделирования поведения лесного пожара и в совокупности представляют контур пожара на карте. Модель допускает наличие одновременно нескольких таких контуров, распространяющихся независимо друг от друга в различных частях карты.

Агенты типа B имитируют действия противопожарных сил и оказывают воздействие на агентов первого типа.

Свойства и характеристики агентов типа A

Агент, представляющий участок фронта распространения пожара, характеризуется следующими параметрами:

- текущие пространственные координаты (X, Y) ;
- вектор внешней нормали к контуру $n = [n_x, n_y]^T$;
- вектор скорости движения $v = [v_x, v_y]^T$;
- значение интенсивности горения I ;
- значение уровня задымления M ;
- ссылки L и R на соседних агентов для создания единого контура;
- текущее состояние горения $onFire = [true, false]$.

Основная цель, которой руководствуются агенты A при исполнении, – это перемещение по среде моделирования. Расчет пространственных координат данных агентов на каждом шаге моделирования осуществляется по заранее заданному закону. Также во время исполнения модели агенты A могут порождать новых агентов или погибать при определенных условиях. Область видимости агентов A ограничена расстоянием до соседних по контуру агентов за счет ссылок L и R .

Расчет пространственных координат

Расчет новых координат A_x, A_y на каждой итерации моделирования производится с помощью алгоритма, основанного на *методе подвижных сеток* (МПС) [8, 9]. Согласно данному методу, расчетная сеточная область не задается заранее, а продвигается и развивается вместе с контуром пожара, представленным в виде набора точек:

$$C_i(t) = \{x_i(t), y_i(t), p_i(t), L(i), R(i)\}, i \in N(t),$$

где $x_i(t), y_i(t)$ – координаты точки на плоскости; $p_i(t)$ – вектор внешней нормали к контуру; $L(i)$ и $R(i)$ – номера точек контура, расположенных, соответственно, слева и справа от C_i ; $N(t)$ – множество номеров агентов, образующих контур в момент t .

Для расчета следующего состояния контура используются такие данные:

- скорость распространения пожара v_0 ;
- индикатриса нормальной скорости $\xi_n(\varphi, \omega)$.

Приращение координат в точке $C_i(t)$ производится по формулам:

$$x_i(t+\Delta t) = x_i(t) + v_0 \cdot \xi_n(\varphi_i, \omega) \cdot \Delta t \cdot \cos(\alpha_i),$$

$$y_i(t+\Delta t) = y_i(t) + v_0 \cdot \xi_n(\varphi_i, \omega) \cdot \Delta t \cdot \sin(\alpha_i),$$

где φ_i – угол между нормалью к контуру в точке $C_i(t)$ и направлением ветра ω ; α_i – угол между нормалью к контуру в точке $C_i(t)$ и горизонтальной осью.

Для использования данного алгоритма сопоставили каждую точку $C_i(t)$ с агентами типа A в нашей модели. В качестве входных данных для алгоритма используются характеристики агентов (X, Y, n, v, L, R), а также параметры среды, такие как скорость и направление ветра, класс пожарной опасности, тип ОПГ. Помимо расчета приращений координат для точек контура, алгоритм МПС предусматривает анализ пересечений и самопересечений контуров, а также упорядочение расстояний между соседними точками. Внедрение данных процессов в нашу модель позволило эффективно управлять популяцией агентов A (добавлять и удалять агентов).

На рисунке 1 визуальнo представлен контур пожара при расчете, а также схематично указано положение агента A_i на разных итерациях процесса моделирования t и $t+1$. Стрелка n_i – это направление нормали к контуру для i -го агента, $i \in N(t)$. Вектор W – направление ветра.

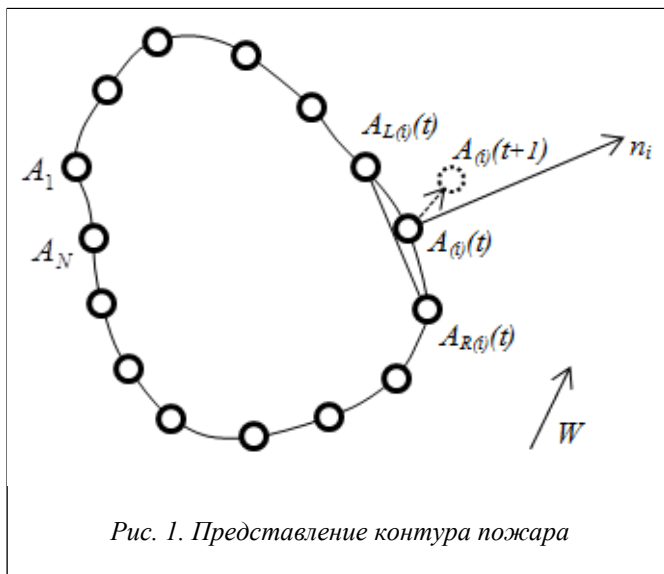


Рис. 1. Представление контура пожара

Помимо расчета параметров агента A , характеризующих его пространственное положение в среде, во время моделирования производится расчет интенсивности горения и уровня задымления вокруг агента. Значения данных параметров имеют решающее значение при взаимодействии с агентами B .

Расчет интенсивности горения РГМ

Согласно [10], интенсивность I рассчитывается по формуле

$$I = Q \cdot v_i \cdot \rho_{be},$$

где v_i – значение скорости распространения пламени, м/мин.; ρ_{be} – эффективная плотность горючего, кг/м³, то есть количество горючего материала (из общего запаса, содержащегося в слое), которое участвует в воспламенении; Q – теплота воспламенения (количество тепла, необходимое для доведения единицы веса горючего материала до воспламенения), Дж/кг.

Поскольку в предлагаемой модели используется модель тонкого слоя горючего, была использована эмпирическая формула, в которой в качестве Q используется теплота сгорания слоя, МДж/м² [11].

Таким образом, интенсивность горения агента A_i , на которого не оказывается воздействие агентом B , при моделировании рассчитывается следующим образом:

$$I_i = (Q \cdot v_i + I_{R(i)} + I_{L(i)})/3,$$

где I_i – интенсивность горения агента A_i ; Q – поверхностная теплота сгорания слоя; v_i – значение скорости движения агента A_i ; $I_{R(i)}$ – интенсивность горения агента $A_{R(i)}$; $I_{L(i)}$ – интенсивность горения агента $A_{L(i)}$. То есть при расчете интенсивности горения текущего агента A_i учитывается аналогичный показатель соседних агентов.

Также на каждом шаге моделирования показатель интенсивности I_i может быть изменен случайным образом в положительную или отрицательную сторону с вероятностью P_{if} . Это необходимо для имитации неоднородности таксационных выделов, ошибок в определении типов леса и других факторов, которые могут служить причиной ошибок прогноза [11].

Расчет задымленности

Задымление является одним из отрицательных факторов, способствующих увеличению ущерба от лесного пожара, а также значительному затруднению борьбы с ним. В настоящее время существует большое количество работ, посвященных моделированию дымового шлейфа [12, 13], однако реализация данных моделей требует высоких вычислительных затрат, а сами модели являются избыточными для данного исследования. Таким образом, была выбрана концепция локального пламени [8], согласно которой, несколько огрубляя физическую картину распространения дымового облака, принимается, что каждое локальное пламя (в нашем случае каждый агент типа A) порождает локальный дымовой поток, конфигурацию которого в приземном слое можно определить следующим образом:

$$\lambda_s(x, y, t, \varphi_\omega) = v_{s0}(x, y, \omega) \cdot (t - t_0) \cdot \chi_s(\omega, \varphi_\omega - \varphi),$$

где (x, y) – координаты точки в области активного горения; φ_ω – направление ветра, рад; φ – текущий угол, рад, $0 \leq \varphi \leq 2\pi$; t – текущее время, с, $t_0 \leq t \leq t_0+r$; t_0 – время воспламенения горючего в точке (x, y) , с; r – продолжительность горения горючего в точке (x, y) ; $\chi_s(\omega, \varphi_\omega - \varphi)$ – индикатриса локального дымового потока, определяющая его форму; v_{s0} – горизонтальная скорость распространения дымового облака в приземном слое.

Согласно [13], v_{s0} вычисляется с помощью выражения

$$v_{s0} = 0,28 + 0,607w - 0,0217w^2,$$

где w – скорость ветра над пологом леса, м/с.

Поскольку в предлагаемой модели на каждом шаге моделирования агенты типа A перемещаются в новую точку пространства, r всегда будет равна времени, эквивалентному одному шагу моделирования (при реализации модели использовался шаг = 5 мин.).

Сам уровень задымления M непосредственно около агента A принят в виде безразмерной величины, зависящей от интенсивности горения I , и может принимать значение от 0 (при $I = 0$) до 1 (при $I \rightarrow \max$).

Добавление новых агентов в процессе моделирования

В процессе моделирования агенты A перемещаются, увеличивая размер контура пожара в десятки и сотни раз. Расстояние между агентами также растет, что приводит к очень грубому представлению контура пожара. Таким образом, существует необходимость упорядочения расстояния между соседними агентами $A_i(t)$ и $A_{R(i)}(t)$, $i \in N(t)$. Для этого рассчитывается расстояние $l(i)$ между каждой парой агентов. Если $l(i) > l_{\max}$, порождается новый агент $A_j(t)$, который располагается между парой $A_i(t)$ и $A_{R(i)}(t)$. В качестве характеристик нового агента $A_j(t)$ записываются средние значения соответствующих характеристик агентов $A_i(t)$ и $A_{R(i)}(t)$. Данный процесс схематично представлен на рисунке 2.

Значение l_{\max} является определяющим для точности расчета контура в обратно-пропорциональной зависимости. Однако слишком малое значение l_{\max} приведет к порождению большого числа агентов, что значительно увеличит требования к вычислительной мощности при моделировании. При внешней границе карты ≈ 10 км автором рекомендуется устанавливать значения $l_{\max} \approx 10$ м.

Удаление агентов в процессе моделирования

Удаление (гибель) агентов типа A производится в двух случаях.

Во-первых, удаление агентов происходит, если расчетное расстояние $l(i)$ между агентами $A_i(t)$ и $A_{R(i)}(t)$ меньше заданного значения l_{\min} . В этом случае агент $A_i(t)$ удаляется, а ссылки R и L у агентов $A_{R(i)}$ и $A_{L(i)}$ корректируются следующим образом: $R(L(i))=R(i)$, $L(R(i))=L(i)$.

Во-вторых, агенты удаляются при обрезке контура, которую необходимо произвести при самопересечении или взаимном пересечении двух контуров пожаров. Для этого на каждой итерации в процессе моделирования осуществляется анализ пересечений и самопересечений контуров.

Во время данного анализа вычисляются точки пересечения каждого из отрезков контура, образуемых агентами A_i и $A_{R(i)}$, со всеми остальными отрезками A_i и $A_{R(i)}$.

Пересечение контуров, в том числе и самопересечение, имеет место, если для некоторой пары отрезков A_i , $A_{R(i)}$ и A_j , $A_{R(j)}$ ($i \neq j$, $i \neq R(j)$, $j \neq R(i)$) точка их пересечения ξ лежит внутри каждого из них. В этом случае изменяются ссылки у агентов A_i и $A_{R(i)}$: $R(i)=R(j)$, $L(R(j))=i$. Агенты, оказавшиеся внутри области получившегося контура, удаляются.

Переход состояний агента

Как уже было сказано, для агентов A возможны два состояния, характеризующие текущее состояние горения. Обозначим эти состояния следующим образом:

- *onF* (агент горит);
- *notF* (агент не горит).

Переход агента из состояния *onF* в *notF* возможен в нескольких случаях.

Во-первых, агент может самостоятельно перейти в *notF*, когда попадает в область, в которой отсутствуют ОПГ. Во-вторых, он может быть потушен агентами типа B , оказывающими на них воздействие, снижающее интенсивность горения I (более подробно данный процесс будет рассмотрен далее).

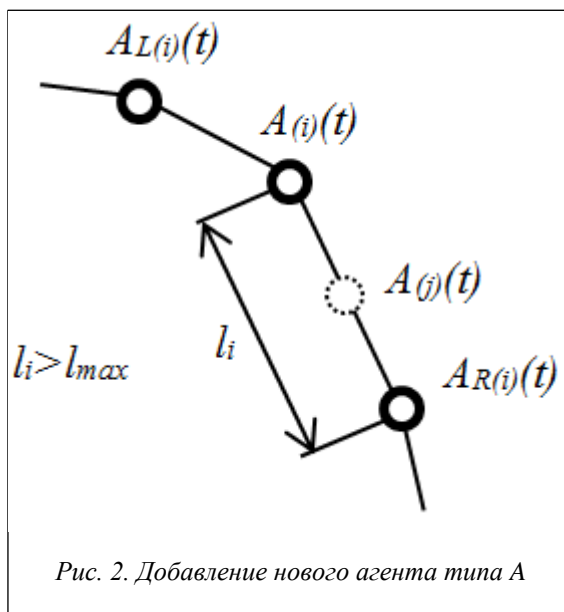


Рис. 2. Добавление нового агента типа A

Переход агента из состояния *notF* в *onF* в данной модели **не предусмотрен**. То есть, если агент однажды перешел в состояние *notF*, то он продолжает в нем находиться до конца процесса моделирования. Таким образом, сформулированы два простых правила перехода состояния для агентов типа *A*.

Правило агента *A* № 1. Если $V_{\text{онг}} = 0$, переходи в состояние *notF* (*не горит*) и прекращай движение по среде, иначе продолжай движение.

Правило агента *A* № 2. Если $I = 0$, переходи в состояние *notF* (*не горит*) и прекращай движение по среде, иначе продолжай движение.

На основании данных правил получили следующую таблицу переходов состояний агентов типа *A*:

Состояние	$V_{\text{онг}}$	I	Переход состояния
<i>onF</i>	0	0	<i>onF</i> => <i>notF</i>
<i>onF</i>	>0	0	<i>onF</i> => <i>notF</i>
<i>onF</i>	0	>0	<i>onF</i> => <i>notF</i>
<i>onF</i>	>0	>0	<i>onF</i> => <i>onF</i>
<i>notF</i>	любое	любое	<i>notF</i> => <i>notF</i>

Свойства и характеристики агентов типа *B*

Агент, моделирующий противопожарную команду, характеризуется следующими параметрами:

- текущие пространственные координаты (X, Y);
- значение скорости движения по местности v ;
- направление обхода контура пожара $\alpha = [R, L]$;
- значение скорости тушения кромки пожара V_T (мера воздействия агента *B* на интенсивность горения I агента *A*);
- номер fc ближайшего по расстоянию агента типа *A*;
- значение психологического состояния P ;
- текущее состояние борьбы с пожаром *inFight* [*true, false*].

При исполнении агенты типа *B* руководствуются единственной целью – потушить все очаги возгорания. Для этого агент *B* перемещается по среде к ближайшему агенту A_i и воздействует на его показатель интенсивности горения I . Как только данный показатель становится равным 0, агент A_i меняет свое состояние на не горит, а агент *B* перемещается к следующему агенту $A_{R(i)}$.

Перед запуском модели выбирается количество агентов типа *B*, затем задаются характеристики каждого агента (v, α, V_T, P). Начальное расположение агентов на карте также задается заранее, исходя из выбранной тактики тушения низового лесного пожара (схемы организации тушения). Возможны четыре схемы тушения [14, 15]:

- по всему периметру (для слабых по интенсивности пожаров);
- охватом с фронта (для слабого и среднего по интенсивности лесного пожара);
- охватом с фланга (для пожаров средней интенсивности);
- сведением на клин (для сильного лесного пожара).

Область видимости агентов *B* ограничена только самой средой моделирования. Где бы ни находился данный агент на карте, он всегда будет передвигаться в сторону ближайшего очага пожара (агента *A*).

В процессе моделирования расчет новых координат B_x, B_y производится различными способами в зависимости от текущего состояния борьбы с пожаром. Если *inFight* = *true*, то по мере тушения в качестве координат X, Y агента *B* принимаются текущие координаты агентов *A*. Если *inFight* = *false*, производится расчет расстояния S_{ji} от текущего агента B_j до каждого агента A_i . Затем выбирается наименьшее из этих расстояний и производится перезапись $B_{jc}=i$. Высчитывается нормаль направления движения N от B_j до A_i . Сами координаты B_x, B_y рассчитываются следующим образом:

$$B_x(t+1) = B_x(t) + N_x \cdot v,$$

$$B_y(t+1) = B_y(t) + N_y \cdot v.$$

Добавление новых агентов в процессе моделирования

Автоматическое добавление новых агентов типа *B* в процессе моделирования не предусмотрено. Однако возможно добавление новых агентов вручную, если этого требуют цели и задачи исследования.

Удаление агентов в процессе моделирования

Удаление агентов типа *B* производится только в случае «гибели» противопожарной команды, которая может произойти в процессе тушения агентов *A*.

*Взаимодействие агентов типа *A* и *B**

Рассмотрим более подробно взаимодействие агентов *A* и *B*, имитирующее процесс тушения участка кромки пожара противопожарной командой. Если агент *B* справится со своей задачей, то агент *A* перейдет в состояние *notF* (не горит). В противном случае агент *B* будет удален. Процесс тушения участка

кромки может продолжаться одну или более итераций в процессе моделирования, а успех агента B напрямую зависит от показателей V_T и P .

Скорость тушения кромки пожара V_T определяется перед началом моделирования исходя из профессиональной подготовки, физического состояния, оснащенности и количества пожарных в команде. При тушении пожара эффективность труда во многом зависит также от психологического состояния пожарных P , которое обусловлено большим числом факторов, таких как напряженность работ, задымленность, высокая температура и др. [15]. Данный показатель может иметь значение от 0 до 1.

Если тушение одного и того же агента A занимает большое количество итераций моделирования, происходит значительное снижение психологического состояния пожарных P . Также на данный показатель влияет показатель задымления M агента A . При высокой задымленности психологическое состояние P снижается значительно быстрее. Если данный показатель достигает 0, считается, что пожарная команда уже не в силах потушить данный участок кромки и агент погибает. В случае успеха P значительно увеличивается, пожарная команда может приступить к тушению следующего участка.

Помимо рассмотренных факторов, на работоспособность также влияет большое количество факторов, которые имеют вероятностный характер. Обозначим совокупность этих факторов как F . Они могут как снизить работоспособность (характер растительности, состояние погоды, неуверенные действия руководителя), так и повысить ее (кратковременный отдых, смена режима работы, уверенные действия руководителя). Значение F рассчитывается случайно в заданных пределах и напрямую увеличивает или уменьшает показатель P .

Таким образом, интенсивность горения агента A_i , находящегося под воздействием агента B_j , рассчитывается следующим образом:

$$I_i(t+1) = I_i(t) - (V_{Tj} \cdot P_j),$$

где $I_i(t+1)$ – значение интенсивности горения агента A_i в период времени $t+1$; $I_i(t)$ – значение интенсивности горения агента A_i в период времени t ; V_{Tj} – скорость тушения кромки пожара агентом B_j ; P_j – значение психологического состояния пожарных агента B_j .

Переход состояний агента

Для агентов B возможны два состояния, характеризующие текущее состояние борьбы с пожаром. Обозначим их следующим образом:

- *fight* (агент тушит кромку);
- *move* (агент перемещается по карте).

Переход агента из состояния *move* в *fight* возникает, когда пространственное расстояние от агента B до агента A_{fc} равно нулю, то есть противопожарная команда достигла кромки пожара.

Обратный переход возможен в случае, если все агенты текущего контура пожара потушены, и одновременно с этим на карте есть другой или другие непотушенные контуры.

Таким образом, сформулированы два простых правила перехода состояния для агентов типа B .

Правило агента B № 1. Если твое состояние *move* и расстояние от агента B до агента A_{fc} равно 0, переходи в состояние *fight* и начинай взаимодействие с агентом A_{fc} , иначе продолжай движение.

Правило агента B № 2. Если твое состояние *fight* и количество непотушенных агентов A в контуре равно 0, то переходи в состояние *move* и двигайся к ближайшему горящему агенту A , иначе продолжай борьбу.

Реализация агентной модели

На основе предложенной мультиагентной модели автором был разработан программный комплекс, имеющий клиент-серверную архитектуру и веб-интерфейс. На сервере находится база данных, в которой хранится информация о среде моделирования (реальной местности). Программный код серверной части реализован на языке PHP. Клиентская часть системы реализована на JavaScript (JS) с использованием библиотеки с открытым исходным кодом OpenLayers. Данная библиотека предназначена для создания карт на основе программного интерфейса (API) и позволяет создать веб-интерфейс для отображения картографических материалов. Библиотека может работать с данными различных картографических сервисов, таких как OpenStreetMap, Google, Yandex и др.

Далее представлены примеры работы разработанной системы.

Пример № 1

Параметры среды, выставленные перед началом моделирования:

- тип ОПГ – лишайниковый;
- класс пожарной опасности – 2;
- скорость ветра под пологом леса – 1 м/с (Ю/З).

Согласно [14, 15], интенсивность представленного пожара определяется как слабая, поэтому выбрана схема тушения по всему периметру. Вокруг пожара расположили три противопожарные команды по 6 человек и задали направление обхода против часовой стрелки. Площадь очага пожара при обнаружении ≈ 4 га. На рисунке 3 показаны исходная позиция пожарных команд и исходный контур пожара.



*Рис. 3. Пример работы имитационной системы № 1
(стартовая позиция, площадь пожара = 4,3 га)*

На рисунке 4 показаны положение пожарных команд и контур пожара спустя 4 часа (48 итераций моделирования).



*Рис. 4. Пример работы имитационной системы № 1
(время тушения пожара – 4 часа, площадь пожара = 7,5 га)*

Как видно из представленного примера, после 4 часов локализации пожар продолжает развиваться и потушено менее 50 % текущей кромки пожара. Одновременно с этим общая длина горящей кромки по-

жара на четвертом часе тушения приблизительно равна длине исходной кромки пожара, это говорит о том, что три отряда пожарных по 6 человек не способны справиться с данным пожаром.

Пример № 2

Параметры среды, выставленные перед началом моделирования:

- тип ОПГ – лишайниковый;
- класс пожарной опасности – 3;
- скорость ветра – 1,5 м/с (С/В).

Согласно [14, 15], интенсивность представленного пожара определяется как средняя, поэтому выбрали схему тушения охватом с фронта. Расположили две противопожарные команды по 12 человек около фронта в одной точке и задали направление обхода в противоположных направлениях. Площадь очага пожара при обнаружении ≈ 3 га. На рисунке 5 показаны исходная позиция пожарных команд и исходный контур пожара.



*Рис. 5. Пример работы имитационной системы № 2
(стартовая позиция, площадь пожара = 3,4 га)*

На рисунке 6 показаны положения пожарных команд и контур пожара спустя 3 часа (36 итераций моделирования). Как видно из данного рисунка, спустя 3 часа локализации пожара фронт полностью потушен, а пожарные команды продолжают успешно продвигаться по флангам в сторону тыла пожара. Так



*Рис. 6. Пример работы имитационной системы № 2
(время тушения пожара – 3 часа, площадь пожара = 10,1 га)*

как тушение фронта пожара является наиболее опасным и трудоемким процессом относительно тушения других элементов пожара, то уже на этом этапе можно сказать, что для борьбы с данным пожаром была выбрана правильная схема тушения, а два отряда пожарных по 12 человек способны данную схему реализовать. Это утверждение подтверждается изображением на рисунке 7.

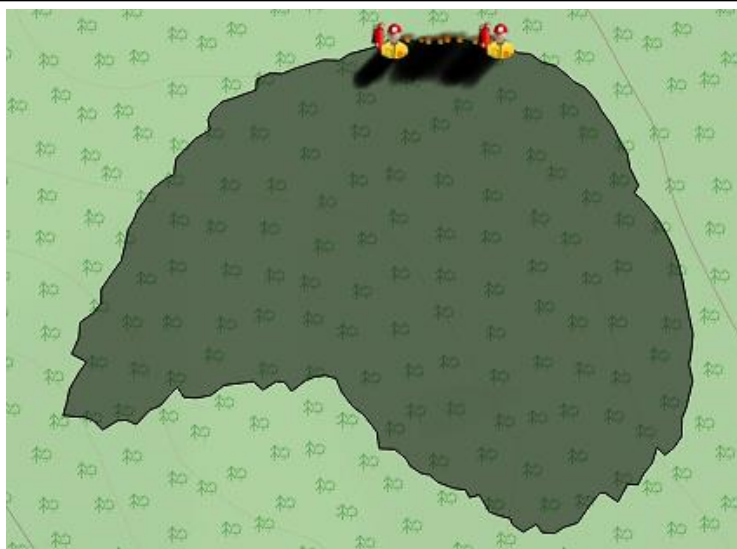


Рис. 7. Пример работы имитационной системы № 2
(время тушения пожара – 6 часов, площадь пожара = 12,1 га)

Пример № 3

Параметры среды, выставленные перед началом моделирования:

- тип ОПГ – лишайниковый;
- класс пожарной опасности – 3;
- скорость ветра – 2 м/с (С/З).

В данном примере на борьбу с пожаром отправили две противопожарные бригады (2 и 4 человека), имеющие различные скорости тушения кромки пожара V_T : $V_{T1} = 1$ м/мин., $V_{T2} = 2$ м/мин.

На рисунке 8 представлены исходная позиция агентов B и исходный контур пожара.

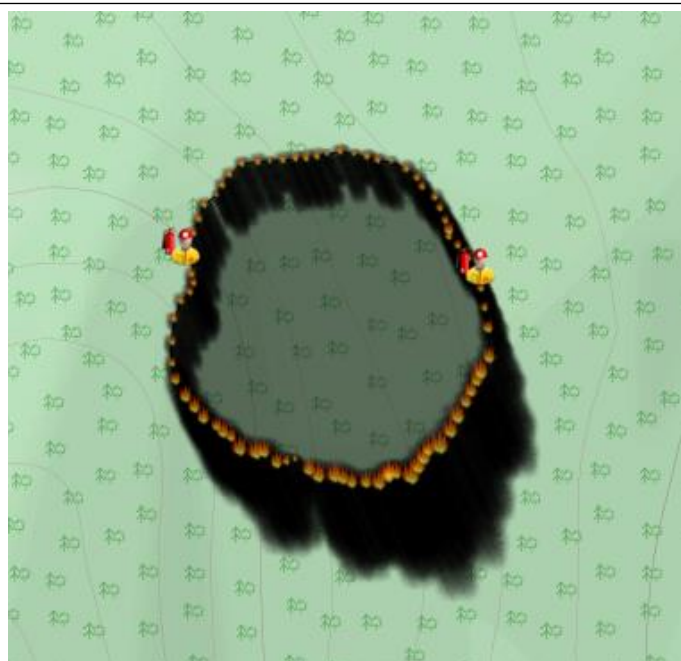
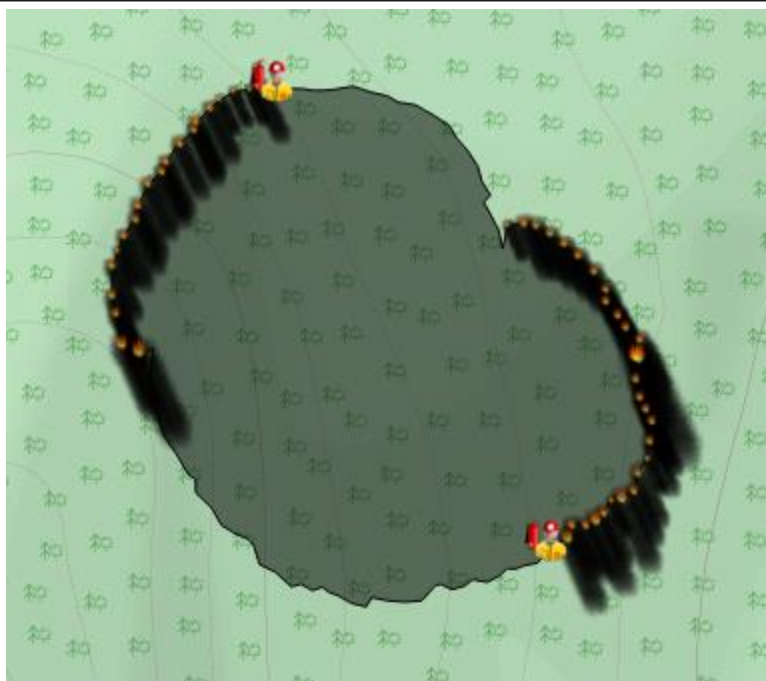


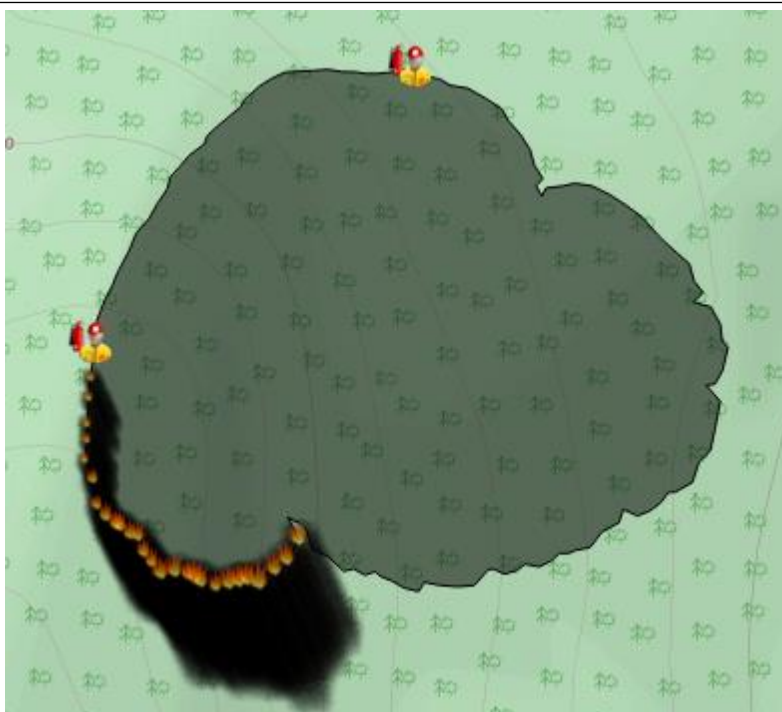
Рис. 8. Пример работы имитационной системы № 3
(стартовая позиция, площадь пожара = 4,6 га)

На рисунках 9 и 10 показаны положения противопожарных команд и контур пожара спустя 2 и 4 часа соответственно.



*Рис. 9. Пример работы имитационной системы № 3
(время тушения пожара – 2 часа, площадь пожара = 8,9 га)*

Через 8 часов 10 минут тушения противопожарные бригады успешно справились со своей задачей (рис. 11).



*Рис. 10. Пример работы имитационной системы № 3
(время тушения пожара – 4 часа, площадь пожара = 11,4 га)*

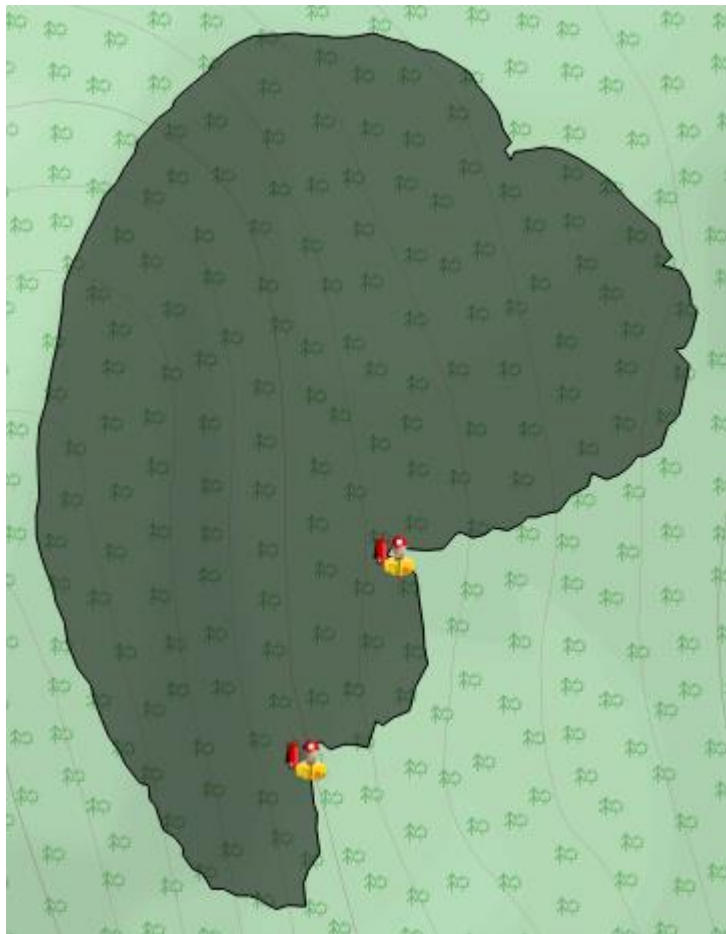


Рис. 11. Пример работы имитационной системы № 3
(время тушения пожара – 8 часов 10 мин., площадь пожара = 15,8 га)

В результате проведенного исследования автором была разработана мультиагентная модель для имитации прямого метода тушения низового лесного пожара немеханизированными противопожарными отрядами. На основе данной модели был разработан программный комплекс, который предлагается использовать для широкого круга задач. Во-первых, система будет полезна для оперативного определения параметров распространения лесного низового пожара в лесных насаждениях, а также разработки комплекса мер по его предотвращению и противодействию. Во-вторых, данная система может служить основой для учебно-тренажерных систем, предназначенных для обучения студентов вузов и техникумов лесохозяйственного профиля, работников лесохозяйственной отрасли и МЧС на курсах повышения квалификации в учебно-игровой форме основам тактики борьбы с лесными пожарами.

Литература

1. Andrews P.L., Bevins C.D., Seli R.C. BehavePlus fire modeling system, v. 2.0: User's Guide. USDA Forest Service Gen. Techn. Rep. RMRS-GTR-106WWW. Ogden, 2003, 45 p.
2. Finney M.A. FARSITE: Fire are simulator model, development and evaluation. USDA Forest Service, Res. Paper RMRS-RP-4. Ogden, 1998, 47 p.
3. Mell W., Jenkins M.A., Gould J., Cheney Ph. A physics-based approach to modeling grassland fires. International Journal of Wildland Fire. 2007, vol. 16, pp. 1–22.
4. Аксенов К.А., Гончарова Н.В. Динамическое моделирование мультиагентных процессов преобразования ресурсов // Екатеринбург: Изд-во УГТУ-УПИ, 2006. 311 с.
5. Кухта В.Б. Метод моделирования распространения низового пожара в лесных насаждениях с использованием агентного подхода // Лесной вестник. 2014. № 5. С. 92–97.
6. Dai D., Zhang Y. Simulating fire spread in a community using an agent-based model. Proceedings of the 12th Intern. Conf. on GeoComputation. LIESMARS Wuhan Univ., Wuhan, China, 2013, pp. 130–132.
7. Shatalov P.S., Dorrer G.A. Parallel computation of forest fire and its interaction with infrastructure objects. Fourth Fire Behave and Fuels Conference, conference abstracts. St. Petersburg, 2013, p. 3.

8. Доррер Г.А. Динамика лесных пожаров. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. 404 с.
9. Годунов С.К., Прокопов Г.П. Об использовании подвижных сеток в газодинамических расчетах // Журн. вычислит. матем. и математ. физики. 1972. Т. 12. № 2. С. 429–439.
10. Rothermel R.C. A mathematical model for fire spread predictions in wildland fuels. USDA Forest Service Research Paper INT-115, Ogden, 1972, 40 p.
11. Волокитина А.В. Защита населенных пунктов от чрезвычайных ситуаций, связанных с природными пожарами (практические рекомендации). Красноярск: Изд-во СО РАН, 2002. 63 с.
12. 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. Joint Fire Science Program Conf. and Workshop, Boise, 1999, 12 p.
13. 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 // География и природные ресурсы. 2004. С. 170–174 (спец. выпуск).
14. Иванов В.А., Иванова Г.А., Москальченко С.А. Справочник по тушению природных пожаров // 2-е изд., перераб. и доп. Красноярск, 2011. 130 с.
15. Щетинский Е.А. Тушение лесных пожаров: пособие для лесных пожарных. М.: Изд-во ВНИИЛМ, 2002. 104 с.