

## ПРИМЕНЕНИЕ АГЕНТНОГО ПОДХОДА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ И ЛОКАЛИЗАЦИИ ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ

С.В. Яровой, Г.А. Доррер

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный технологический университет»,  
Красноярск, пр. Мира 82, e-mail: ach\_bask@mail.ru

В статье рассматривается задача моделирования лесопожарных ситуаций. Для ее решения предлагается использовать агентный подход совместно с технологией геоинформационных систем (ГИС), что позволяет объединить преимущества обоих направлений. С использованием формализма вложенных сетей Петри разработана мультиагентная модель, позволяющая как прогнозировать распространение кромки лесного пожара, так и имитировать прямой метод тушения низового лесного пожара немеханизированными противопожарными отрядами.

В качестве среды для агентов может использоваться любой участок карты реальной местности. В предлагаемой модели используется два типа агентов. Агенты первого типа (агенты типа А) представляют собой участки фронта распространения пожара и используются для моделирования поведения лесного пожара. В совокупности представляют контур пожара на карте. Модель допускает наличие одновременно несколько таких контуров, распространяющихся независимо друг от друга в различных частях карты. Агенты второго типа (агенты типа В) имитируют действия противопожарных сил и оказывают воздействие на агентов первого типа.

На основе предложенной 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.

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

The article considers the task of modeling forest fire situation. To solve it proposed to use the agent-based approach with the technology of geographic information systems (GIS) that allows you to combine the advantages of both directions. With help of Nested Petri Nets theory was developed agent-based model. This model allows us to predict the spread of the edge of a forest fire, and simulate the direct method of fight to grass-roots forest fires.

As an environment for agents can be any portion of the real terrain maps. The proposed model uses two types of agents. Agents of the first type (agent A) are areas of the fire front propagation and are used to model the behavior of forest fire. Taken together, they represent of forest fire edge on the map. The model allows multiple edges, which independently spread in different parts of the map. Agents of the second type (agent B) are used for simulation the action of firefighters and effect on the agents A.

Based on this model was developed a software package. This package is proposed to use for a wide range of tasks. Firstly, the system is useful for determining the operational parameters of the spread of grass-roots forest fires and development of measures to prevent and combat it. Secondly, this system can serve as a basis for teaching basics of forest fire fighting tactics in the form of educational game for forestry workers and the Ministry of Emergency Situations as a part of advanced professional training and for teaching students of universities and colleges.

**Keywords:** wildfire, wildfire control, simulation modeling, geographic information system, Nested Petri nets, agent-based model, software.

### ВВЕДЕНИЕ

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, на 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 (Andrews, 2003), FARSITE (Finney, 1988), WFDS (Mell, 2007) и др.). Данные системы основаны на математических моделях, имеющих раз-

личную 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. Использование подобного рода моделей 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 наш взгляд, наиболее эффективным методом является агентное моделирование.

Агентное моделирование (agent-based modeling, АВМ) представляет собой новый подход имитационного моделирования, который направлен на моделирование сложных динамических систем с помощью исследования поведения и взаимодействия автономных и независимых субъектов (агентов) в некоторой среде (Аксенов, 2006). Агентные модели используются как в естественных науках (физике, биологии), так и в общественных (социологии, экономике). Данный тип моделей получил наибольшее применение 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 (Кухта, 2014; Dai, 2013). 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 (Кухта, 2014; Dai, 2013) 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 используются 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 ис-

пользуется модель тонкого слоя (Shatalov, 2013). 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 определяется базовая скорость распространения кромки пожара  $V_{\text{опг}}$  м/мин, и теплота воспламенения слоя  $Q$ , Дж/м<sup>2</sup>.

Также в качестве основных показателей среды принимаются следующие параметры:

- величина скорости ветра по данным ближайшей метеостанции  $V_{\text{в}}$ ;
- вектор направления ветра  $W$ ;
- класс пожарной опасности.

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

Одним из эффективных средств моделирования мультиагентных систем являются вложенные сети Петри (*Nested Petri Nets – NPN*) (Ломазова, 2004).

Появление указанной разновидности сетей Петри связано с желанием исследователей иметь инструмент для адекватного и удобного представления систем со сложной иерархической и мультиагентной структурой.

Вложенные сети Петри представляют собой расширение стандартного формализма сетей Петри, в котором фишки, представляющие локальные ресурсы в позициях системной сети, сами могут быть сложными объектами с сетевой структурой и моделироваться сетями Петри нижнего уровня – их мы будем называть спутными сетями.

Структурно такая сеть состоит из системной сети  $SN$  и набором сетей-фишек (спутных)  $EN_i$ ,  $i=1, \dots, n$ . При этом между некоторыми переходами системной сети и переходами сетей-фишек может быть установлена связь, разрешающая только их совместное срабатывание. Такие переходы называются помеченными.

Функционирование сетей, входящих в  $NPN$ , в значительной мере совпадает с функционированием традиционных сетей Петри. Отличие составляют механизмы синхронизации работы сетей Петри различного уровня. В связи с этим в  $NPN$  различают следующие четыре вида шагов срабатывания.

- Системно-автономный шаг, который соответствует срабатыванию непомеченного перехода в системной сети  $SN$ .
- Спутно-автономный шаг, который соответствует срабатыванию непомеченного перехода в сети-фишке  $EN_i$ .
- Шаг горизонтальной синхронизации, при котором одновременно срабатывают переходы в сетях-фишках  $EN_i$ , помеченные одинаковыми метками.
- Шаг вертикальной синхронизации, при котором одновременно срабатывают переходы в систем-

ной сети  $SN$  и сетях-фишках  $EN_i$ , имеющие одинаковые метки.

Разумеется, при этом предполагается, что во всех сетях все участвующие в работе переходы являются активными, т.е. в их входных позициях имеются необходимые для срабатывания ресурсы.

Ниже рассмотрены свойства и алгоритмы функционирования двух типов сателлитных сетей,  $EN1_p$  и  $EN2_p$ , которые далее обозначены как агенты типа  $A$  и  $B$ .

Эти агенты выполняют следующие функции:

- моделирование фронта распространения пожара (агенты типа  $A$ );
- моделирование действий противопожарных команд (агенты типа  $B$ ).

Агенты типа  $A$  используются для моделирования поведения лесного пожара и в совокупности представляют контур пожара на карте. Модель допускает наличие одновременно несколько 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.

Системная сеть  $SN$  моделирует состояние инфраструктуры и создание/ликвидацию сателлитных агентов. В данной работе эта сеть не рассматривается из-за ограниченности объема статьи.

### СВОЙСТВА И ХАРАКТЕРИСТИКИ АГЕНТОВ ТИПА $A$

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

- текущими пространственными координатами  $(X, Y)$ ;
- вектором внешней нормали к контуру  $n = [n_x, n_y]^T$ ;
- вектором скорости движения  $v = [v_x, v_y]^T$ ;
- значением интенсивности горения  $I$ ;
- значением уровня задымления  $M$ ;
- ссылками  $L$  и  $R$  на соседних агентов для создания единого контура;
- текущим состоянием горения  $onFire = [true, false]$ .

Основной целью, которой агенты  $A$  руководствуются 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 новых координат  $A_x$ ,  $A_y$  на каждой итерации моделирования производится с помощью алгоритма, основанного на методе подвижных сеток (МПС) (Доррер, 2008; Годунов, 1972).

Для агентов  $A$  возможно два состояния, характеризующих текущее состояние горения. Обозначим эти состояния следующим образом:

- « $onF$ » (агент «горит»);
- « $notF$ » (агент «не горит»).

Переход агента из состояния « $onF$ » в « $notF$ » возможно 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).

Переход агента из состояния « $notF$ » в « $onF$ » в данной модели не предусмотрен. Т.е. если агент однажды перешел в состояние « $notF$ », то он продолжает в нем находиться до конца процесса моделирования. Таким образом, сформулировали два простых правила перехода состояния для агентов типа  $A$ .

Правило агента  $A$  №1: Если  $V_{\text{огп}} = 0$ , 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.

### СВОЙСТВА И ХАРАКТЕРИСТИКИ АГЕНТОВ ТИПА $B$

Агент, моделирующий противопожарную команду, характеризуется следующими параметрами:

- текущими пространственными координатами  $(X, Y)$ ;
- значением скорости движения по местности  $v$ ;
- направлением обхода контура пожара  $\alpha = [R, L]$ ;
- значением скорости тушения кромки пожара  $V_T$  (мера воздействия агента  $B$  на интенсивность горения  $I$  агента  $A$ );
- номером  $fc$  ближайшего по расстоянию агента типа  $A$ ;
- значением психологического состояния  $P$ ;
- текущим состоянием борьбы с пожаром  $inFight [true, false]$ .

При исполнении, агенты типа  $B$  руководствуются одной единственной целью – «потушить» все очаги возгорания. Для этого агент  $B$  перемещается по среде к ближайшему агенту  $A_p$  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  $A_{R(i)}$ .

Для агентов  $B$  возможно два состояния, характеризующих текущее состояние борьбы с пожаром. Обозначим эти состояния 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, т.е. 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» контура.



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

Правило агента *B №1*: Если твое состояние «*move*» и расстояние от агента *B* до агента  $A_{jc}$  равно 0, переходи в состояние «*fight*» и начинай взаимодействие с агентом  $A_{jc}$ , 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 авторами 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. Данная библиотека может работать с данными различных картографических сервисов, таких как OpenStreetMap, Google, Yandex и др.

Ниже представлены два примера работы разработанной системы.

### Пример №1

Параметры среды, выставленные перед началом моделирования:

- тип ОПГ – сухомышастый;
- класс пожарной опасности - 3;
- скорость ветра под пологом леса – 2,5 м/с (С/3).

Расположили 2 противопожарные команды по 2 и 4 человека для тушения обходом с фронта. Площадь очага пожара при обнаружении  $\approx 0,2$  га. Площадь очага в начале локализации  $\approx 3$  га.

На рисунке 1 представлен график изменения площади пожара  $S$  с течением времени. На рисунке 2 – график изменения длины кромки активного горения  $L$ . Дискретизация модели по времени – 5 минут, т.е. 1 итерация моделирования приравнивается 5 минутам реального времени.

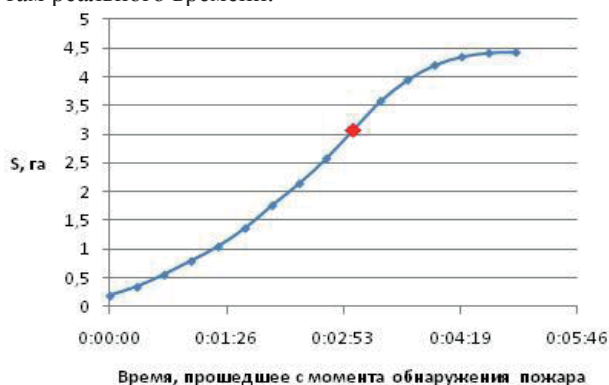


Рисунок 1 – Пример №1, график динамики площади пожара в процессе моделирования

В данном примере противопожарные команды начали локализацию спустя 3 часа после обнаружения очага, что отчетливо видно на графиках. Длина кромки активного горения устойчиво начала снижать свое значение, а рост общей площади пожара значительно замедлился. Через 2 часа, после начала локализации, пожар был успешно локализован, т.е. 2 противопожарные команды по 2 и 4 человека успешно справились со своей задачей.

На рисунках 3-5 представлены скриншоты работающей программы. Рисунок 3 - исходная позиция пожарных команд при начале локализации и контур пожара. Рисунок 4 - положения противопожарных команд и контур пожара спустя 1 час локализации (12 итераций моделирования). Рисунок 5 - положения противопожарных команд и контур пожара спустя 2 часа локализации (24 итерации моделирования).

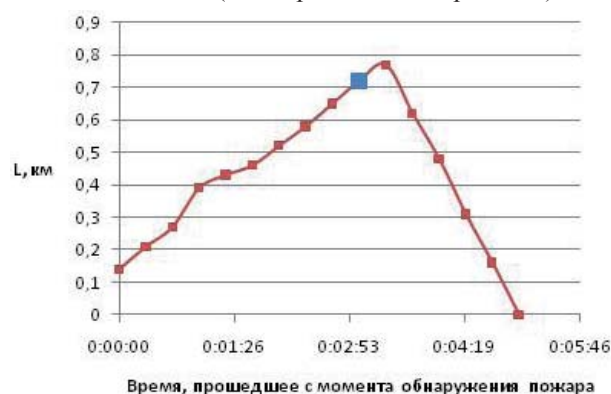


Рисунок 2 – Пример №1, график динамики длины кромки активного горения пожара в процессе моделирования

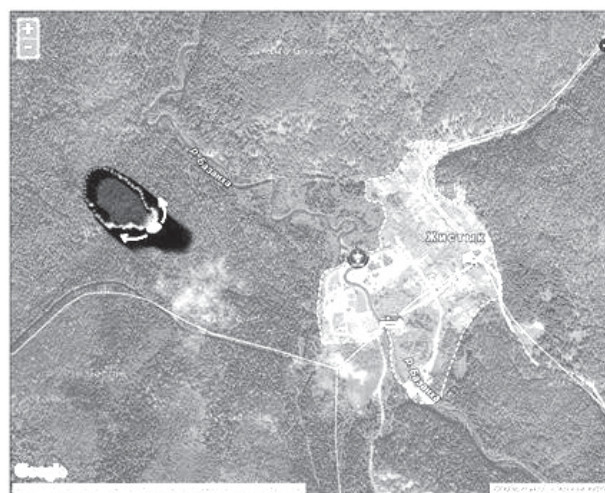


Рисунок 3 – Пример №1, исходная позиция пожарных команд при начале локализации и контур пожара

### Пример №2

Параметры среды, выставленные перед началом моделирования:

- тип ОПГ – лишайниковый;
- класс пожарной опасности - 4;
- скорость ветра под пологом леса – 2,5 м/с (С/В).

Расположили 2 противопожарные команды по 6 человек для тушения сведением на клин. Площадь

очага пожара при обнаружении  $\approx 0,2$  га. Площадь очага в начале локализации  $\approx 15$  га.

На рисунке 6 представлен график изменения площади пожара  $S$  с течением времени. На рисунке 7 – график изменения длины кромки активного горения  $L$ . Дискретизация модели по времени – 5 минут, т.е. 1 итерация моделирования приравняется 5 минутам реального времени.

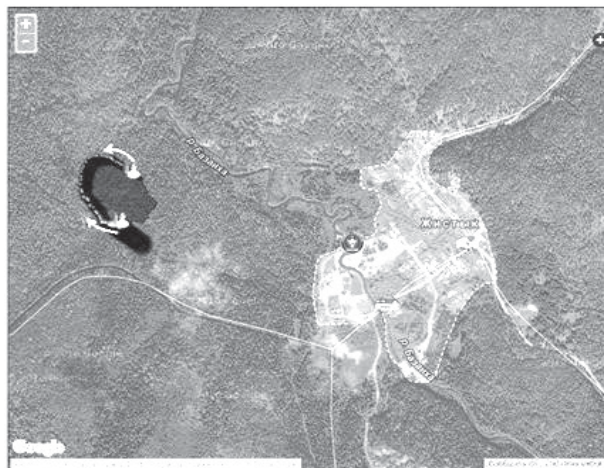


Рисунок 4 – Пример №1, положения противопожарных команд и контур пожара спустя 1 час локализации

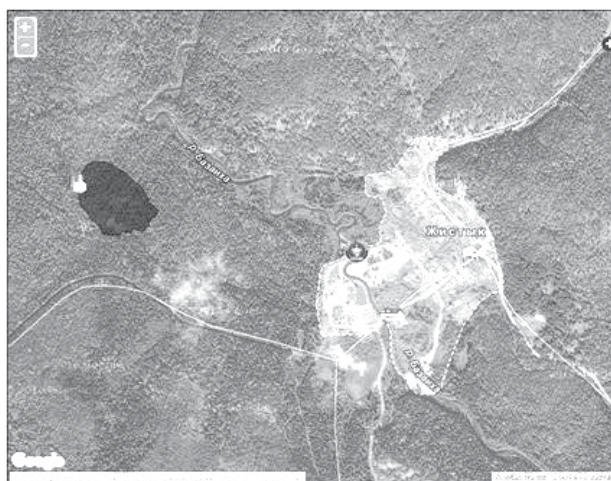


Рисунок 5 – Пример №1, положения противопожарных команд и контур пожара спустя 2 часа локализации

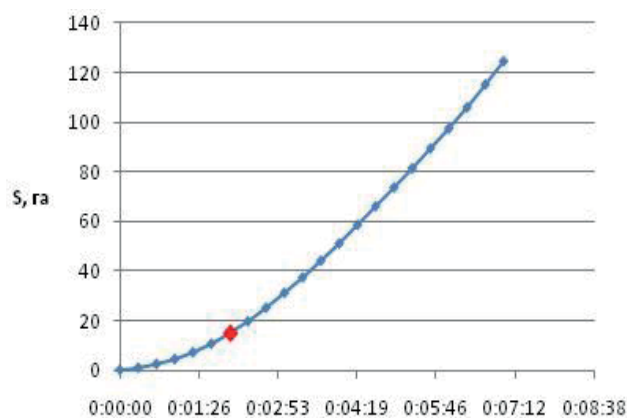


Рисунок 6 – Пример №2, график динамики площади пожара в процессе моделирования



Рисунок 7 – Пример №2, график динамики длины кромки активного горения пожара в процессе моделирования

В данном примере противопожарные команды начали локализацию спустя 2 часа после обнаружения очага. Однако, как видно из графиков, воздействие команд на пожар вызвало лишь незначительное замедление роста его площади. При достижении значения  $S \approx 100$  га действия отрядов резко утратили свою эффективность, и спустя 4 часа локализации значение длины кромки активного горения показывает значительный рост. Таким образом, можно сказать, что 2 противопожарные команды по 6 человек не смогли успешно справиться с представленным пожаром, используя тактику тушения сведением на клин. Требуется добавить дополнительные силы и средства либо сменить тактику для его локализации.

На рисунках 8-10 представлены скриншоты работающей программы. Рисунок 8 - исходная позиция пожарных команд при начале локализации и контур пожара. Рисунок 9 - положения противопожарных команд и контур пожара спустя 2 часа локализации (24 итерации моделирования). Рисунок 10 - положения противопожарных команд и контур пожара спустя 4 часа локализации (48 итераций моделирования).

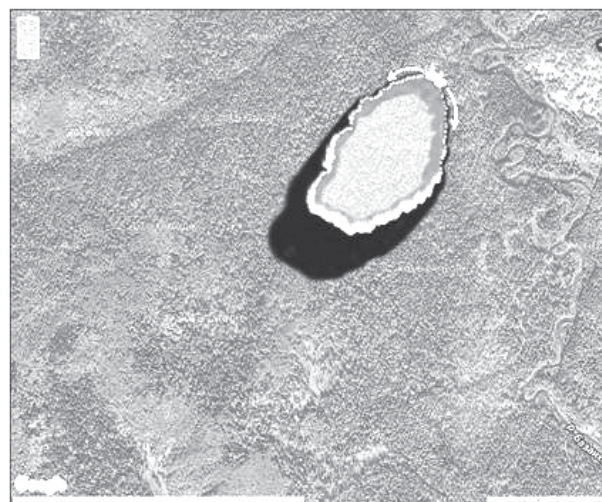


Рисунок 8 – Пример №2, исходная позиция пожарных команд при начале локализации и контур пожара



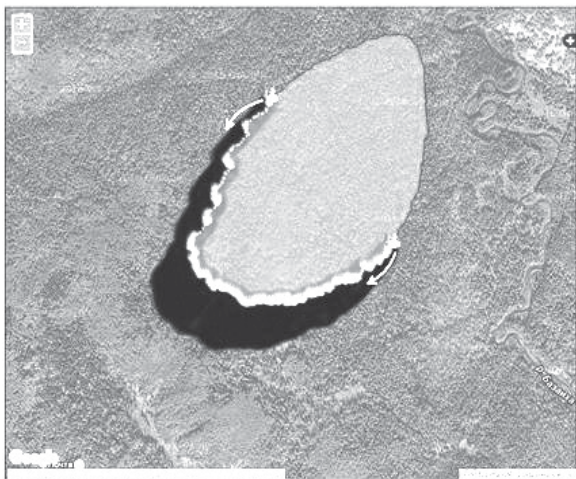


Рисунок 9 – Пример №2, положения противопожарных команд и контур пожара спустя 2 часа локализации

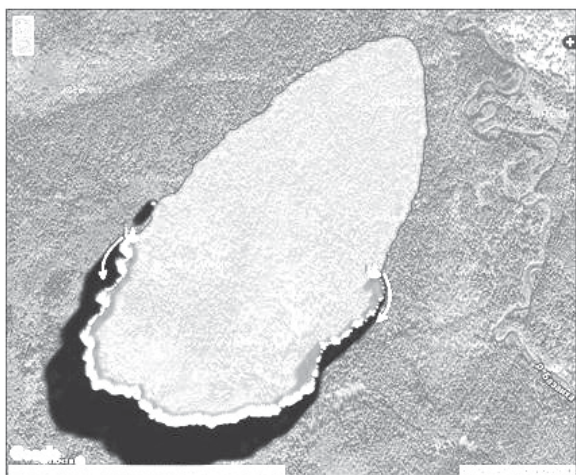


Рисунок 10 – Пример №2, положения противопожарных команд и контур пожара спустя 4 часа локализации

## ВЫВОДЫ

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.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Andrews P.L., Bevins C.D., Seli R.C. BehavePlus fire modeling system, version 2.0: User's Guide. USDA Forest Service Gen. Techn. Rep. RMRS-GTR-106WWW. Ogden, 2003, 45 p.
- Finney M.A., FARSITE: Fire are simulator model, development and evaluation. USDA Forest Service, Res. Paper RMRS-RP-4. Ogden, 1998, 47 p.
- 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.
- Аксенов К.А., Гончарова Н.В. Динамическое моделирование мультиагентных процессов преобразования ресурсов // Екатеринбург: Изд-во УГТУ-УПИ. 2006. 311 с.
- Кухта В.Б. Метод моделирования распространения низового пожара в лесных насаждениях с использованием агентного подхода // Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник. 2014. №5. С. 92-97.
- Dai D., Zhang Y. Simulating fire spread in a community using an agent-based model. Proceedings of the 12th International Conference on GeoComputation. LIESMARS Wuhan University, Wuhan, China, 2013, pp. 130-132.
- 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.
- Доррер Г.А. Динамика лесных пожаров // Новосибирск: Изд-во СО РАН. 2008. 404 с.
- Годунов С.К., Прокопов Г.П. Об использовании подвижных сеток в газо-динамических расчетах // Журн. вычислит. матем. и математ. физики. 1972. Т. 12. №2. С. 429-439.
- Ломазова И.А. Вложенные сети Петри: моделирование и анализ распределенных систем с объектной структурой. – М.: Научный мир, 2004. – 208 с.

Поступила в редакцию 21.06.16  
Принята к печати 12.09.16