

М. Ю. Сидляр, О. А. Ковалева, С. В. Ковалев

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ НАПРАВЛЕНИЯ ВЕТРА И МОЩНОСТИ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ ОГНЮ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ НИЗОВЫХ ПОЖАРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МУЛЬТИАГЕНТНОГО МЕТОДА

Ключевые слова: агентно-ориентированное моделирование, имитационное моделирование, распространение низового пожара, пожаротушение, роза ветров, направление ветра.

В статье показаны зависимости параметров направления ветра и настройки коэффициентов розы ветров для конфигурации и динамики распространения низового пожара. В статье рассмотрены допущения модели расчета и деления угла передачи с преобразованием в коэффициенты розы ветров, показана математическая модель противодействия и вычисления агентов на границах. Показана схема перехода между состояниями, с выделенной зоной пожарного агента, увеличивающим эффективность противодействия в зоне своей активности. Показан расчет пожарного противодействия и медленного понижения коэффициента эффективности на гео-плоскости с его возможным увеличением на пересечении взаимодействий. Показан фрагмент программного кода по нахождению координат точек агентов для нахождения граничных положений на гео-плоскости. Показаны различия распространения огня с учетом ветра, а также с указанием мощности. Рассмотрена динамика прохождения низового огня по конфигурации с учетом прямоугольника противодействия с рассмотрением рукавов обхода и смыкания огня за прямоугольником противодействия. Показаны конфигурации огня при мощности противодействия и мощности ускорения огня, а также сравнительная таблица с основными показателями длительности распространения огня и оставшихся агентов в случаях с учетом и не учетом ветра и замедлением или ускорением противодействия. Описана идея о минимальном отличии характера полного отсутствия тушения и произвольно-хаотичного тушения огня. Показана таблица характеристик подавления огня разными способами с учетом количества пожарных агентов с разным радиусом и эффективностью тушения огня.

M. Yu. Sidlyar, O. A. Kovaleva, S. V. Kovalev

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF WIND DIRECTION AND FIRE RESISTANCE POWER IN MODELLING THE SPREAD OF GROUND FIRES USING A MULTIAGENTIC METHOD

Keywords: agent-based modeling, simulation modeling, ground fire spread, fire suppression, wind rose, wind direction.

The article shows the dependencies of wind direction parameters and wind rose coefficient settings for the configuration and dynamics of ground fire spread. The article examines the assumptions of the model for calculating and dividing the transmission angle with conversion to wind rose coefficients, and shows a mathematical model for counteraction and calculating agents at the boundaries. The diagram of the transition between states is shown, with a selected zone of the fire agent, increasing the effectiveness of counteraction in the zone of its activity. The calculation of fire counteraction and slow decrease of the efficiency coefficient on the geo-plane with its possible increase at the intersection of interactions is shown. A fragment of the program code for finding the coordinates of agent points for finding boundary positions on the geo-plane is shown. Differences in fire propagation are shown taking into account the wind, as well as indicating the power. The dynamics of the passage of ground fire along the configuration is considered taking into account the counteraction rectangle with consideration of the bypass sleeves and the closure of fire behind the counteraction rectangle. Fire configurations are shown for the counteraction power and the fire acceleration power, as well as a comparative table with the main indicators of the duration of fire spread and the remaining agents in cases with and without taking into account the wind and the slowing down or acceleration of the counteraction. The idea of the minimal difference between the nature of the complete absence of extinguishing and arbitrary-chaotic extinguishing of fire is described. A table of characteristics of fire suppression by different methods is shown, taking into account the number of fire agents with different radii and efficiency of extinguishing fire.

Введение

Огонь в лесу убивает все живое: флору, фауну, травянистую подстилку, при соприкосновении с жильем человека наносит вред и ему. Все это приносит непоправимый экономический и экологический урон. Прогнозирование распространения, скорости и динамики низового пожара помогает в грамотном пожаротушении, минимализации и ликвидации последствий возгорания.

Распространение огня в лесу или в поле соответствует низовому пожару. Более 90% всех пожаров сводится к указанному виду. На характер и скорость распространения влияют различные факторы: влажность, гео-рельеф, тип леса, важным является и факт

сезонности [1]. Все зависит еще от предварительной противопожарной подготовки, снижающей вероятность возникновения пожара. Несмотря на это, из-за климатических условий: чрезмерная засуха, сильный штормовой ветер, переносающий искру с другого источника огня, человеческий фактор и даже удар молнии [2] и самовоспламенения [3] пожар может возникнуть и в том месте, где проводились работы по противопожарной безопасности, но это будет уже иметь меньший урон.

Для снижения уровня распространения пожаров, проводится мониторинг за текущим состоянием пожаров. Ведется постоянное наблюдение из космоса

со спутников, определяющих начальные стадии пожаров, включая автоопределение с помощью методов распознавания образов [4] а также определяющих направление и силу ветра в необходимых координатах земной поверхности [3], используются данные наблюдений за погодой метеостанций [5]. В помещении для этого служат датчики огня [6]. Всё это, вместе с архивными данными о предыдущих выгорающих объектах, с рельефом дает стартовые данные для прогноза распространения огня.

В теории рассмотрены скорости распространения пожара по подстилке опавшей листвы, хвои или коры в различных типах леса [7], коэффициенты влажности и наклон рельефа местности. В замкнутых помещениях рассматриваются также варианты с доступом кислорода [8], а при моделировании критических ситуаций в подводных лодках рассматриваются виды распространения пожара в подводном и надводном положении [6].

Неоднородными являются не только элементы ландшафта: мох, листовенная прослойка прогорают быстро, кора – медленно, а камни и дороги меняют направление движение огня, реки препятствуют продвижению низового огня. Распространение огня вверх по склону идет значительно быстрее, нежели вниз [9]. При этом распространение огня идет не только фронтом и флангами, но и в обратном направлении – задняя кромка, против ветра, образуя эллиптическую поверхность [10]. Каждая точка ландшафта с учетом класса пожарной опасности типа леса, рельефа и наличия деревьев может иметь коэффициент [3], подобно нечетким множествам [11], при этом, изменяясь коэффициент может от влажности леса, после дождя, направления ветра и температуры и времени суток. Важно уметь изменять указанные параметры автоматически пересчитывая пожарные коэффициенты на гео-плоскости.

Фронт любого пожара сам по себе не однороден и проходит стадии прогрева, сушки и пиролиза [12], на следующей стадии уже идет яркое горение «факел» [13], достигая максимума в высоте. При моменте пиролиза идет перекидывание очага на соседние объекты. С точки зрения клеточных автоматов и мультиагентных систем в момент пиролиза агент горящий передает агенту, находящемуся в соседней клетке (или агенту на необходимом расстоянии) методом Гюйгенса [14]. При этом каждая точка-агент снова становится источником огня и при наличии ветра образуется вероятностный эллипсоид горения, который воспламеняет пламенем соседние клетки [15]. Таким образом, перетекает фронт огня. В случае пересечения дорог и рек сетка фронта пересчитывается [16] с учетом искусственных и естественных преград. Рассчитывать фронт огня можно с использованием плоской картинки, учитывая коэффициенты рельефа, влажности и противопожарного взаимодействия. С другой стороны есть варианты построения трехмерных моделей, приводя пространственную поверхность к клеткам с вершинами методом триангуляций [17], с последующим учетом высот и направления ветра, вычисляющих скорость распространения и кромку огня для следующих центров.

Для криминалистической экспертизы важным пунктом в теории является нахождение точки начала горения и сравнение разных вариантов прогорания от точки нулевого возгорания [18]. Рассматривая динамику распространения огня в замкнутом помещении или на открытом пространстве важно понимать движение направление и движения огненной кромки с целью выставления противопожарных бригад, использующих современные методы пожаротушения. Важным является считывание, что пожарные бригады имеют ресурсы на подъезд и на отдых [19]. Имеются даже варианты вызова искусственного дождя [20], покрывающего большую площадь поверхности одновременно.

В работе [21] рассматривается математическая модель о подготовке серий профилактических мероприятий для проведения противопожарных мероприятий, а также пожарных мер принимаемых после тушений пожаров. В [19] моделируется работа пожарных бригад в некотором округе. Рассматриваются ресурсы бригады в том числе и по времени: выезд на место, тушение пожара, время отдыха. По количеству и интенсивности пожаров смотрится как работает пожарная команда округа, сколько пожаров распространяются без огневого противодействия, сколько с задержками. В работе [22] рассматривается дискретная модель лесных насаждений с агентами кромки лесного пожара, которые распространяются с учетом эллиптической природы огня на клетке плоскости, рассчитываемая от округления координат распространения огня, в качестве дополнительных характеристик агента, рассматриваются реальные непрерывные координаты положения кромки огня. В работе рассматривается огибание прямоугольника фронтом огня. В работе [23] показаны этапы внесения рельефа и ландшафта Томской области, растительности по кластерам для прогнозирования низовых и торфяных пожаров с учетом температурных условий и ветра. В работе [24] показано распространение пожара по ветру с расчетом четырех новых точек дополнительной кромки на каждой итерации. В исследованиях [9] учитываются направление и скорость ветра, влажность температура и рельеф для прогнозирования распространения огня, а в [25] показано огибание полян различной формы без растительности при наличии ветра. В программном продукте [8] указываются параметры помещения в морском судне, доступ кислорода, а также источник огня, после чего прогнозируется его распространение. В работе [14] показано как тушатся пожары бригадами, обходящими кромку пожара с разных сторон, ветер и погодные условия учитываются.

Рассмотрим идею мультиагентности на плоскости при распространении огня. Она в общем виде выражается в том, что каждый элемент поверхности может передавать огонь с некоторой положительной вероятностью. А соседний агент может принять огонь. Этот процесс в каждую единицу времени проверяет переход огня от одних агентов к другим. Также имеет место выгорание агента, после которого он уже не передает энергию соседним агентам. Важным пунктом является направление ветра, при том, что для больших территорий направление ветра может быть не

постоянно, образовывая вихри, при этом эпицентры вихревых явлений могут меняться с течением времени, необходимо учитывать силу и направление ветра, а также мощность противодействия в каждой клетке гео-плоскости.

Для локализации и противодействия низового пожара, авторами предложена универсальная модель, которая вместе с распространением вирусов и информации показывает распространения огня с использованием методов мультиагентных систем.

Время количества итераций в «минуте» и количество минут, которое горит агент до полного сгорания, должно настраивается в алгоритмической системе. Гео-плоскость может иметь области, которые не горят и не прогорают – водные преграды, политые участки, противопожарные рвы, широкие дороги, есть области, которые горят медленно и быстро с учетом особенностей рельефа и типа травянистой подстилки.

Важным в модели является работа с розой ветров и настройкой коэффициентов направления розы ветров. Задавая коэффициенты розы ветров, мы получаем выраженное направление передачи пожара.

Моделирование распространения направления пожаров в зависимости от направления ветра и гео-поверхности. При моделировании пожаров, авторы пользовались мультиагентной идеей распространения огня. Каждый агент - имеет собственное время горения, а также вероятности интенсивности прогорания соседних агентов, передавая огонь соседнему агенту случайным образом. В нашей модели учитывается установка розы ветров на одном слое с возможностью смены направления ветра.

Цели задачи

Целью данной работы является построение модели и допущений, описывающий распространение огня, указывающую сложное направление ветра. В качестве задач рассматриваем возможность настраивания розы ветров с изменением указанных данных с использованием автоматической загрузки. Рассмотреть параметры мощности противодействия для гео-поверхности, показывающей температурные и географические особенности местности. Настроить интерфейсные формы и компоненты настройки для управления направлением ветра, а также настройки противодействия для пожарных, у которых может меняться радиус и частота противодействия. Сделать универсализацию модуля распространения пожара как один из вариантов распространения эпидемии. Рассмотреть возможность установки сценарных планов для противодействия огню. Рассмотреть автоматическое позиционирование пожарных на границе распространения огня. Провести эксперименты по распространению огня с начальными условиями с направлением ветра и мощностями замедления, получить числовые характеристики указанных распространений. Рассмотреть эксперименты по распространению огня с наличием и без наличия ветра, а также с различными вариантами противопожарного противодействия.

Допущения модели

Описание модели. Допущения и ограничения.

1. Распространение огня протекает на прямоугольном поле $M \times N$, таком, что M и N от 30 до 1000.

2. На гео-поверхности находятся агенты. Агентами в случае распространения огня могут считаться точки поверхности с различной предрасположенностью к горению.

3. У каждого агента имеется несколько служебных характеристик. Главной характеристикой агента является состояние и внутреннее время начала горения. Состояниями являются «целый», «горит», «сгорел».

4. Агент взаимодействует одновременно со всеми окружающими его агентами, а также считывает данные характеристики с поля гео-пространства, на котором он находится.

5. Агент, который находится в состоянии «горит», передает огонь на соседнего агента «целый» с заданной вероятностью. Переходы в состояние «сгорел» из состояния «горит» идет после срабатывания временного таймера.

6. Соседними для агента являются 8 соседних клеток с точки зрения окрестности Мура.

7. Имеется возможность настроить вектор распространения ветра, при котором будет приоритетное распространение огня от «горящего» агента к «целому». Роза ветров с коэффициентами ветра задается изначально. Раз в календарную минуту ветер может менять направление.

8. При распространении огня имеется опция по противодействию огню. Пожарный агент генерируется случайно. Вокруг него на выбранный радиус устанавливается зона противодействия – зона полива, которая на гео-поле устанавливает коэффициент понижающий распространение пожара. Имеются опции привязки к границе – гарантирует в окрестности агента более двух очагов пламени агентов, которые «горят». Пожарное противодействие уменьшается с каждой итерацией и прекращается после заданного количества времени. Если зоны радиуса пожарного противодействия перекрываются, то мощность изменяется, учитывая данные от предыдущих поливов.

9. Все операции противодействия привязываем в виде сценарного плана для предупреждения и смягчения развития эпидемической угрозы, привязывая выполнение действий противодействия к календарным дням. Таким образом, можно изменять направление ветра, а также координировать количество пожарных бригад, направленных на борьбу с огнем.

Математическая модель

1. G - множество клеток географической территории. $G = \{g\}$, где $g(x, y)$ – конкретная точка на гео-плоскости с координатами (x, y) – узел гео-пространства. Считается, что географическая территория в нашем случае тоже является агентным множеством. $G[[x, y]]$ – будем обозначать массив узлов пространства. В наших допущениях считаем пространство ограниченным и двумерным или сводящимся к двумерному. Ограничения на координаты географической поверхности $1 \leq x \leq N$ и $1 \leq y \leq M$, при $30 \leq N, M \leq 1000$, при том, что x и y натуральные числа

$x, y \in h$. Во время работы процесса множество G точек не изменяется, точки к плоскости не добавляются.

2. Единица времени - одна итерация системы. Если текущая итерация равна τ , то следующая за ней будет $\tau + 1$. Итерация при старте программы начинается с 1.

3. Метод пожарной дезинфекции работает следующим образом. Дано число *dezikol* – число агентов, вокруг которых происходит дезинфекция и/или пожаротушение. От общего числа агентов находим *dezikol* случайных чисел $d_1, d_2, d_3, \dots, d_i, \dots, d_{dezikol}$. Множество $D = \{d_i\}$ - множество всех агентов – дезинфекторов. Эти агенты становятся центрами тушения огня. $d_i = \text{random}(|A|) + 1$. Радиус и частоту пожарной дезинфекции *deziRad* обозначим переменными *dezi_chastota* соответственно. Тогда при таких $\tau \equiv 0(\text{mod } dezi_chastota)$ для всех $g \in M'(deziRad)$ для всех клеток гео-плоскости в окрестности Мура радиуса *deziRad* будем пересчитывать коэффициент противодействия огню.

У дезинфекции имеется опция *autodezi_graniz* при *autodezi_graniz = true*, то в качестве агентов «пожарных» выбираются только те, в окрестности Мура которых два и более «горящих» агента. Для каждого пробного пожарного агента d находим множество «горящих» агентов в окрестности Мура радиуса 1, при количестве «горящих» соседних агентов, больших 2, пробный агент становится дезинфектором. т.е. агент d_i принадлежит множеству дезинфекционных-пожарных агентов $d_i \in D$, если существует множество агентов W , что выполняется условие $w \in W$, при $w \in M'_{a_i}$ и $w[sostojanie = 2]$, с условием $|w| \geq 2$.

4. Дезинфекция и противодействие огню. При противодействии на все клетки указанного радиуса наносятся данные о противодействии. *MaxKolanti* – количество итераций, при которых в данной гео-точке будет сохраняться противодействие. *dez_maxi* – максимальный коэффициент, понижающий вероятность загорания в клетке.

$\forall g(\text{tekx}, \text{teky}) \in M'(deziRad)$. Если в точке $g[x, y]$ был коэффициент пожарного противодействия, $g[\text{Max}_{ant} = \text{dez}_{maxi}, \text{Kolanti} = \text{MaxKolanti}]$, то $g[\text{Max}_{ant} = \text{An}]$, пересчитаем по формуле $g[\text{Max}_{ant} = \frac{\text{An}}{2} + \text{dez}_{maxi}]$, взяв половину предыдущего значения.

5. Убывание противопожарного противодействия во всех клетках пространства осуществляется каждую итерацию и соответствует коэффициенту *dez_delta* $\forall g(\text{tekx}, \text{teky}) \in G$. Пусть во время τ вероятность пожарной дезинфекции составляла p_{anti} : $g[\text{Max}_{ant} = p_{anti}](\tau)$, то на следующей итерации эта вероятность будет уменьшена на *dez_delt*. $g[\text{Max}_{ant} = p_{anti} - \text{dez_delt}](\tau + 1)$. При $g[\text{Max}_{ant} \leq 0]$, $g[\text{Max}_{ant} = 0]$. Количество итераций, которые сохраняют противодействие уменьшаем на 1. $g[\text{Kolanti} = \text{kolAn}](\tau)$, и противодействие $g[\text{Kolanti} = \text{kolAn} - 1](\tau + 1)$. При превышении внутреннего числа максимального количества дезинфекции, то максимальное противодействие станет равно 0: $g[\text{Max}_{anti} = 0]$.

6. В каждой точке гео-плоскости $g \in g(\text{tekx}, \text{teky})[\text{roza_vectorx}, \text{roza_vectory}]$. Вектор $\overrightarrow{roza}_g$ $\overrightarrow{roza}(\text{roza_vectorx}, \text{roza_vectory})$ имеется две координаты розы ветров *roza_vectorx, roza_vectory* - показывающие смещение из указанной точки направления заражения. Указывается ветер распространения. Роза ветров считывается графическим файлом, каждый пиксель которого характеризует векторное поле ветра.

7. Для каждого «целого» агента $a_i(\text{tekx}, \text{teky})[\text{sostojanie} = 2]$ для каждой точки h из окрестности Мура точки $a_i(\text{tekx}, \text{teky}) = g \forall h \in M'_{a_i}$ считаем максимум воспламенения (в теории инфекций – заражение)

$$Pzar(h) = \max_{\substack{w(\text{tekx}, \text{teky})=h \\ w[\text{sostojanie}=2]}} \{w[Pzara_j]\}$$

После чего вычисляем вектор между точками g и h . $\vec{f} = \overrightarrow{gh}$ вектор $\vec{f}$ имеет Декартовы координаты $\vec{f}(fx, fy)$ Найдем скалярное произведение для вычисления косинуса угла между $\vec{f}$ и вектором розы $\overrightarrow{roza}_g$. $\cos(f, \overrightarrow{roza}_g) = \frac{fx \cdot \text{roza_vectory} + fy \cdot \text{roza_vectorx}}{|\vec{f}| \cdot |\overrightarrow{roza}_g|}$

при $g \neq h$. Для каждого значения косинуса угла имеется таблица коэффициентов розы ветров. Так как значение $\cos \alpha$ угла ограничено значениями от -1 до 1 $-1 \leq \cos \alpha \leq 1$, то разбив интервал на 10 отрезков, поставим каждому интервалу в соответствие характеристическое число *Roza_veteri*.

Если точки g и h совпадают, то мы определим итоговое значение $\cos(f, \overrightarrow{roza}_g)$ равным 1. Для всех точек $\square$ из окрестности точки g общее воспламенение считаем как максимум воспламенения всех окрестных точек с поправкой на коэффициент розы ветров

$$Pzara_j = \max_{h \in M'_{a_i}} \{Pzar(h) \cdot \text{Roza}_{veteri} /$$

Max_An(h)\},

где *Max_An(h)* – коэффициент противодействия дезинфекций.

Теоретический анализ

Схема переходов из основных состояний, показана на рисунке 1. В схеме показаны основные состояния и взаимодействие с дезинфекторами – пожарными, уменьшающими вероятность передачи огня от «горящего» агента к «целому», а также показан выделенный агент «пожарный», своим воздействием, уменьшающий распространение огня вокруг себя.

Интерфейс окна ввода дезинфекции и пожарного противодействия показан на рисунке 2. Является частью параметров противодействия программного комплекса «Программный комплекс мультиагентного моделирования развития эпидемической ситуации. Случай поливолнового заражения»[26] описаны в работе [27] в которых дезинфекционное противодействие в случае противопожарного получает следующий дополнительный настроечный механизм.

В указанном окне настроек имеются поля ввода для количества дезинфекторов, пожарных – поле ввода «количество», а также частота срабатывания. При числе 10 – пожарные будут через каждые 10 итераций распылять пожарный или дезинфицирующий

раствор. Радиус – радиус окрестности Мура, на которое идет противодействие пожарного. Опция «Авто-дезинфекция границы» включает режим, при котором центр пожарного тушения выбирается так, чтобы в окрестности было два «горящих» агента. «Дезинфекция – числитель» – указывает меру противодействия, силу или мощность средства пожарного тушения или силу лекарственного раствора при дезинфекции. Параметр «Дезинфекция – дельта» показывает на сколько уменьшается сила воздействия при каждой итерации. «Дезинфекция количество» – показывает количество итераций, после которых взаимодействие прекращается.

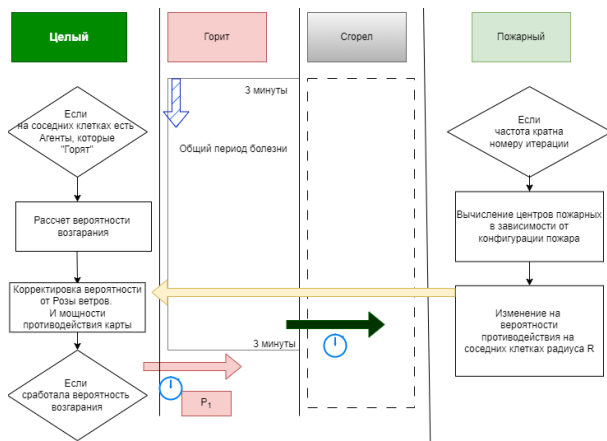


Рис. 1 – Схема перехода состояний агентов процесса горения и противодействие огню

Fig. 1 – Schematic of the transition of states of the agents of the combustion process and fire resistance

Рис. 2 – Интерфейс окна настройки дезинфекции

Fig. 2 – Interface of the disinfection setting window

При загрузке картинки с направлением ветра, за ветер отвечает первые 9 пикселей левого верхнего угла. Коррекция мощности розы ветров – цветовая гамма будет отображена в верхнем углу программы. Если 8 цветов совпадают или пересекаются с множеством цветов-направлений, то считается, что картинка не имеет мощности понижения коэффициентов, а имеет только координаты направлений ветра.

В случае, если картинка имеет два параметра и «направление» и «мощность», то при загрузке производится пересчет гео-плоскости сразу по двум параметрам: «направление» и «мощность». Как мы понимаем цвет пикселя картинки может быть или «направлением» или «мощностью», поэтому каждый пиксель гео-плоскости получает информацию с пары соседних точек. Если первая – точка (x, y) – точка направления, то программа считает вектор заражения, и правую точку $(x+1, y)$ попытается проверить на

вопрос того, является ли ее соседняя точка – цветом изменения мощности заражения. И наоборот – если текущая точка (x, y) – точка, мощности, программа проверит соседнюю точку на наличие вектора ветра. Если цвет не из палитры для вектора, то это означает – случайность заражения, отсутствие мощности – означает, что коэффициенты розы ветров остаются без изменения.

С точки зрения распространения огня или радиации – точки понижения мощности – характеризуются ослаблением распространения в данном гео-сегменте. Это может быть вылитое ведро воды или сброс с вертолета противопожарных средств. Действие точечное по распространению огня, поэтому рекомендуется его применять в планах смены вместе со схемами картинок, подгружаемых планом мероприятий. Это также может быть и долгосрочное противодействие – посыпание песком и другими негорючими веществами. Повышение мощности в сегменте характеризуется нахождением на гео-плоскости легкогорючего объекта в виде стога сена, горюче-смазочные жидкости. Мощность не меняет общей характеристики ветра, не является преградой, но является зоной более сложного прохождения поверхности и заражения агентов в указанных точках поверхности.

Алгоритм и программная реализация

Рассмотрим фрагмент кода программы, описывающей установку дезинфицирующих агентов.

if dezinfection then begin // если идет работа с дезинфекцией. Точек противопожарного противодействия

for I := 1 to dezikol do begin // устанавливаем центры дезинфекции, открываем цикл

nkk:=0; // устанавливаем счетчик итераций цикла в начальное положение 0. Счетчик нужен для автоматической остановки цикла по достижении определенного количества итераций

repeat
nkk:=nkk+1; // увеличение счетчика количества итераций цикла поиска центра точек дезинфекции
vuxod:=false; // устанавливаем флаг выхода из

цикла в положение false, показывая, что если не работают условия, то выбор агента дезинфекции - пожара: точка работы пожарника, будет продолжен
uuz:=random(kolagentz)+1; // выбираем номер агента на плоскости, который будет центром окрестности противодействия и тушения

ax:=vseagenty[uuz].xtek; // определяем его текущие координаты по x

ay:=vseagenty[uuz].ytek; // и по y
axmin:=ax-1; axmax:=ax+1; // находим границы прямоугольной окрестности Мура

aymin:=ay-1; aymax:=ay+1; // по вертикали
if axmin<0 then axmin:=1; // корректируем границы с учетом их возможного попадания на края исходной прямоугольной области. Аналогично продлеваем и для других краевых координат

numka2:=0;
for ux:=axmin to axmax do // проверяем окрестность Мура
for uy:=aymin to aymax do

```

numa2:=numka2+geo_karta[ux,uy].sosotoyan[2]; //
рассчитываем количество горящих в данный момент
агентов. Из карты состояний с каждой точки считываем
количество состояний горящих и суммируем.
if numka2>=2 then begin // если количество горящих
агентов в окрестности больше двух
dezinum[i]=uuz; // запоминаем тот номер, кото-
рый находится на границе горения
vuxod:=true; // устанавливаем условие флага вы-
хода, чтобы выйти из цикла поиска
end;
if autodezi_graniz=false then nkk:=1001; // если
нет границы дезинфекции, создадим вариант для
выхода из цикла после первой итерации. Найденный
случайный агент будет центром пожарного противо-
действия
if nkk>1000 then begin // если количество перебо-
ров более 1000
vuxod:=true; // устанавливаем флаг в положение
выход, чтобы не заикливать цикл поиска
dezinum[i]=uuz; // устанавливаем центр противо-
пожарной дезинфекции
end;
until vuxod; // завершаем цикл постусловия, по
поиску центра пожарного противодействия
end; end; // завершение работы варианта поиска
центров дезинфекции затем у каждого центра дезин-
фекции будет установлен радиус и мощность проти-
водействия и на этот радиус в необходимой окрест-
ности Мура будет падать на гео-плоскости актив-
ность заражающего воздействия агентов по распро-
странению огня (заражения, информации).

```

Рассмотрим эксперименты

Эксперимент 1. Мощность и розы ветров

На гео-плоскости размера 50x50. 3 источника огня. 95% заполнения. Фиксированное положение агентов. Длительность горения 3 минуты. В первом случае проводилось без учета ветра, с учетом ветра, направленного в левый нижний угол с коэффициентами 4; 2; 1; 0,7; 0,3; 0;0;0;0;0, что показывает преимущество распространения по главному направлению, против направления ветра не распространяется. На рисунке 3 показаны в первых четырех строках динамика распространения огня за первые 10 мину, одна минута равна 22 итерации. Красный цвет – агент «целый», который может гореть, синий цвет – агент, который горит в данный момент. Зеленый цвет – агент в данный момент «сгорел». Первая строка показывает ситуацию с полным отсутствием ветра, вторая строка показывает распространение огня вправо-вниз, третья строка показывает вариант распространения с усиленной мощностью, а четвертая строка показывает распространение пожара по ветру с замедлением.

Замедления и ослабления мощности на гео-поверхности могут быть связаны с текущей температурой, а также рельефом или дополнительными особенностями противодействия.

В таблице 1 показаны основные числовые характеристики указанных типов распространения огня в указанных случаях.

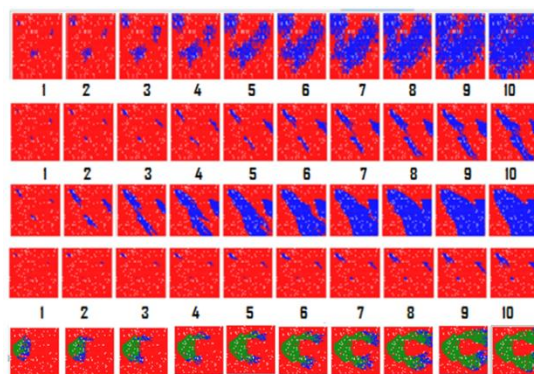


Рис. 3 – Схемы распространения огня по направлениям движения

Fig. 3 – Patterns of fire spread by direction of travel

Таблица 1- Зависимость характера распространения пожара от наличия ветра и мощности противодействия

Table 1 – Dependence of the fire spread pattern on the presence of wind and the power of counteraction

№	Ветер	Мощность	Max	MT	Длит	Оставшиеся
1	-		2300	15	40	<1%
2	+		450	35	185	38%
3	+	+	1550	16	72	26%
4	+	-	1050	19	120	40%

В колонке «Ветер» показано наличие или отсутствие ветра, в колонке «мощность», «+» показывает вариант с усилением скорости распространения «-» замедление.

Колонка «Max» - показывает максимальное число горящих одновременно агентов, а колонка «MT» показывает время в минутах, когда максимум был достигнут. «Длит» - показывает общую длительность горения в минутах. Колонка «Оставшиеся» показывает, сколько агентов в процентах осталось не горевшими (целыми) после полного завершения горения. На рисунке 4 показана динамика количества горящих элементов.

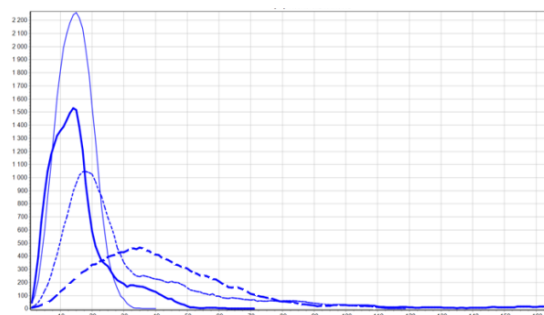


Рис. 4 – Сравнительные графики горящих агентов в случаях ветра с различными мощностями

Fig. 4 – Comparative plots of burning agents in wind cases with different capacities

Тонкая сплошная кривая показывает количество горящих агентов при условии полного отсутствия

ветра (строка 1). Жирная сплошная линия показывает третий случай первого эксперимента: наличие ветра с увеличенной мощностью распространения огня. Тонкий пунктир – четвертый эксперимент и четвертая строка распространения огня на рисунке 3. Жирный пунктир показывает случай распространения огня по направлению ветра без изменений мощности (вторая строка на рисунке 3).

Эксперимент 2. Покажем на одном рисунке мощность усиления и замедления. В верхней половине при одном и том же ветре мощность противодействия в 2 раза, в нижней мощность усиления в 2 раза. При этом, три стартовых источника огня в верхней части локализовались, в нижней части прошло выгорание и распространение до края экрана. Рассматривая все варианты распространения огня, включая замедленные и ускоренные, видим, что при указанной розе ветров получаются эллиптические кривые. Можно увидеть на рисунке 3 во второй, третьей и четвертой строках динамики распространения огня.

Рассмотрим распространение огня. Условия распространения: ветер вправо по горизонтали, три источника огня, на пути огня прямоугольник противодействия с коэффициентом понижения 2, вокруг прямоугольника усиленная мощность распространения с коэффициентом 1,5. На рисунке 3 пятая строка показывает динамику обтекания с 11 по 29 минуту с интервалом через минуту. До 11 минуты согласно розе ветров огонь подступал к прямоугольнику противодействия.

В результате получилось огибание прямоугольника двумя рукавами огня сверху и снизу, при этом агенты горели и внутри прямоугольника, но их было значительно меньше. После прямоугольника остался теневой фрагмент, в котором тоже не выгорел участок гео-поверхности, после которого произошло смыкание горения и продолжение горения по направлению ветра вправо аналогичные результаты в работе [20, Кухта].

Эксперимент 3. Противодействие огню

Рассмотрим на плоскости 50x50 с 96% заполнением агентов горения. Радиус движения всех агентов равно 0. Дезинфекция дельта =5, дезинфекция количество =10. В таблице 2 покажем варианты распространения огня при разных видах противодействия.

Таблица 2 - Зависимость оставшихся негоревшими агентов от характера пожарного противодействия

Table 2 – Dependence of the remaining unburned agents on the nature of fire resistance

№	П	V	R	K	T	M	Итог	%
1	-	-				35	467	19
2	5	-	1	200	5	60	466	19
3	5a	-	1	200	5	80	642	27
4	5a	-	1	300	5	100	629	26
5	20a	-	1	300	5	24	2251	94,8
6	5a	-	2	400	5	20	2348	98,9
7	-	+					148	6,2
8	5a		1	220	12	100	1613	67
9	10a		1	300	8	20	2350	97,9

Настроим максимальную длительность горения на 3 минуты. 22 итерации в одной минуте. 5 стартовых источника огня. Конфигурация заполнения – случайна.

В первой колонке «П» показываем количество агентов-пожарных, литера «a» показывает автоопределение границы в указанных случаях. Первая колонка «V» – показывает наличие или отсутствие ветра без учета мощности. «R» – радиус пожарного противодействия. «K» – коэффициент противодействия. «T» – частота пожарного взаимодействия. Колонка «M» – показывает итоговое время полного сгорания в минутах.

Колонка «Итог» - количество негоревших, оставшихся «целыми» агентов на момент завершения горения. В процентах показано итоговый процент негоревшей территории. Жирным шрифтом в таблице выделена та конфигурация, при которых источники огня локализованы.

На рисунке 5 видим случаи с 5 и 10 пожарными соответственно. Это строки 8 и 9 таблицы 2 соответственно.

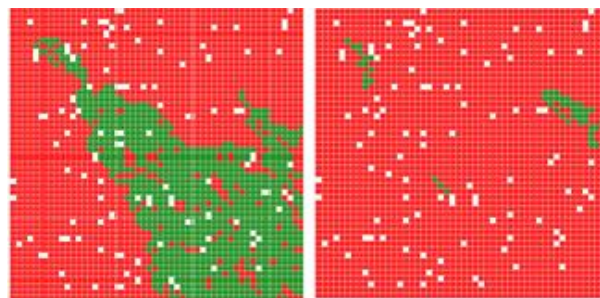


Рис. 5 – Схема распространения огня с учетом ветра и различными схемами противодействия

Fig. 5 – Fire spread pattern with wind and different countermeasure schemes

Видим, что случайный подбор пожарных без определения границ с высокой частотой полива по результату сгоревшего пространства не отличается от полного отсутствия пожарных (первая и вторая строки). Отличием является только время горения. При хаотичном поливе оно больше (60 против 35).

Для наглядности на левом фрагменте рисунка 5 показано как после оказанного противодействия огонь дошел до границы и продолжит свое распространение на соседних квадратах. На правой части рисунка 5 отчетливо видна итоговая локализация сгоревших агентов.

Выводы

В статье рассмотрено влияние параметров направления ветра мощности на распространение низовых пожаров. Созданы допущения и математическая модель при распространении пожары с направлением ветра, а также с понижением мощности. Рассмотрен универсализационный подход, позволяющий видеть распространение огня в программном продукте, рассматривающем распространение эпидемий. Приведен интерфейс окна, изменяющего параметры противопожарного взаимодействия. Показаны варианты противодействия и особенности границ

при различных способах противодействия. Рассмотрены эксперименты с различными вариантами пожаротушения подавлением распространения передачи горения на границе области горения.

Литература

1. О.В. Хонгорова, М.Г. Есина *International Journal of Advanced Studies*, 7, 1-2, 75-77 (2017).
2. П.С. Титаев *Пожаровзрывобезопасность*, 24, 5, 44-53 (44-53).
3. А.М. Родионов, С.А. Иванов *Экономика. Информатика*, 50, 4, 913-923 (2023). DOI: 10.52575/2712-746X-2023-50-4-913-923.
4. Т.С. Станкевич *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*, 1,20-34 (2021). DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-20-34.
5. А.Х. Топкарян, А.В. Коновко, Р.Л. Белоусов, А.В. Панкратов *Научные и образовательные проблемы гражданской защиты* 4, 38-48 (2022).
6. И.В. Образцов И.В., М.Г. Пантелеев *Известия ЮФУ. Технические науки*. 1, 167-180 (2024). DOI: 10.18522/2311-3103-2024-1-167-18.
7. П.Н. Гоман *Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства* 4,86-98 (2023). DOI: 10.21178/2079-6080.2023.4.86
8. А.М. Гавриленко, Ю.А. Карпов, А.Н. Кононов *Судостроение*. 6, 59-63 (2022).
9. С.В. Пузач, К.Е. Сафошкина, Т. ЛЕ Ань *Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация*. 4, 7-15 (2019). DOI: 10.25257/FE.2019.4.7-15.
10. Д.П. Касымов *Лесная пирология. Учебно-методическое пособие*. Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, 2020. С. 29-30.
11. Номоконова О.В. *Ученые записки Забайкальского государственного университета*. 15, 3, 117-121 (2020). DOI: 10.21209/2658-7114-2020-15-3-117-121.
12. А.М. Гришин *Вестник Томского государственного университета. Математика и механика*. 2, 105-114 (2008).
13. С.С. Тимофеева, Т.И. Дроздова, Г.В. Плотникова, В.Ф. Гольчевский *Физико-химические основы развития и тушения пожара Учебное пособие*. Иркутский государственный технический университет, Иркутск, 2013. С. 37-38.
14. Г.А. Доррер, С.В. Яровой *Сибирский лесной журнал*. 5, 105-113. (2017). DOI: 10.15372/SJFS20170510.
15. M.A. Finney *FARSITE: Fire Area Simulator—model development and evaluation*. RMRS-RP-4, Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 2004. P. 3-10.
16. C. Tymstra, R.W. Bryce, B.M. Wotton; S.W. Taylor, O.B. Armitage *Development and structure of Prometheus: the Canadian Wildland Fire Growth Simulation Model*. Nat. Resour. Can., Can. For. Serv., North. For. Cent., Edmonton, AB. 2010, P. 5-12, 41-50.
17. А.В. Павлова, П.Р. Родионов, С.Е. Рубцов *Экология. Экономика. Информатика. Серия: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем*. 1, 4, 245-251 (2019). DOI: 10.23885/2500-395X-2019-1-4-245-251.
18. Т.П. Сысоева, С.Ф. Лобова, А.А. Кухарев *Научно-аналитический журнал "Вестник Санкт-Петербургского государственного университета Государственной противопожарной службы МЧС России"*. 3, 121-131 (2019).
19. М.О. Авдеева, О.Л. Узун, А.С. Доронин, М.В. Гаврилова *XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс*. 11, 2, 196-201 (2022). DOI: 10.46548/21vek-2022-1158-0034.
20. П.А. Цветков *Сибирский лесной журнал*. 5, 3-25 (2015). DOI: 10.15372/SJFS20150501 .
21. О.А. Терентьева *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 3, 194-197, (2024). DOI: 10.24412/2071-6168-2024-3-194-195.
22. В.Б. Кухта // *Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник*. 18, 5, 92-97 (2014).
23. А.И. Фильков *Физико-математическое моделирование возникновения природных пожаров* Издательский Дом Томского государственного университета, Томск, 2014. С. 208-228.
24. Д.М. Мальков *ИТ Арктика* 2,3-18 (2020)
25. Д.В. Баровик, В.Б. Таранчук *Экономика. Информатика*. 47,3, 610-622 (2020). DOI: 10.18413/2687-0932-2020-47-3-610-622.
26. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2023618517 Программный комплекс мультиагентного моделирования развития эпидемической ситуации. Случай полиовирусного заражения /М.Ю. Сидляр, О.А. Ковалева, С.В. Ковалев. – Заявка № 2023617550 дата поступления 26 апреля 2023г. зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 26. Апреля 2023.
27. М.Ю. Сидляр, О.А. Ковалева, С.В. Ковалев *Российская наука, инновации, образование (РОСНИО-П-2023)* (Красноярск, Россия, 15–17 июня 2023). Сборник научных статей по материалам II Всероссийской (национальной) научной конференции с международным участием. Красноярск, 2023, 295-307.

References

1. O.V. Khongorova, M.G. Yesina *International Journal of Advanced Studies*, 7, 1-2, 75-77 (2017).
2. P.S. Titaev *Pozharovzryvzvyvobezopasnost*, 24, 5, 44-53 (44-53).
3. A.M. Rodionov, S.A. Ivanov *Economics. Informatika*, 50, 4, 913-923 (2023). DOI: 10.52575/2712-746X-2023-50-4-913-923.
4. T.S. Stankevich, *Russian Forestry Journal*, in *Bulletin of Higher Educational Institutions*, 1,20-34 (2021). DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-20-34.
5. A.Kh. Topkaryan, A.V. Konovko, R.L. Belousov, A.V. Pankratov *Scientific and educational problems of civil defense*, 4, 38-48 (2022).
6. I.V. Obratsov I.V., M.G. Panteleev *Izvestiya YuFU. Technical Sciences*. 1, 167-180 (2024). DOI: 10.18522/2311-3103-2024-1-167-18.
7. P.N. Goman *Proceedings of the St. Petersburg Forestry Research Institute* 4 , 86-98 (2023). DOI: 10.21178/2079-6080.2023.4.86
8. A.M. Gavrilenko, Y.A. Karpov, A.N. Kononov *Sudostroenie*. 6, 59-63 (2022).
9. S.V. Puzach, K.E. Safoshkina, T.LE An *Fires and emergencies: prevention, elimination*. 4, 7-15 (2019). DOI:10.25257/FE.2019.4.7-15.
10. D.P. Kasymov *Forest pyrology. Textbook*. National Research Tomsk State University, Tomsk, 2020. C. 29-30.
11. nomokonova O.V. *Uchenye zapiski Zabaikalskogo gosudarstvennogo universitet*. 15, 3, 117-121 (2020). DOI: 10.21209/2658-7114-2020-15-3-117-121.
12. A.M. Grishin, *Herald of Tomsk State University. Mathematics and Mechanics*. 2, 105-114 (2008).
13. S.S. Timofeeva, T.I. Drozdova, G.V. Plotnikova, V.F. Golchevsky *Physico-chemical bases of fire development and extinguishing. Textbook*. Irkutsk State Technical University, Irkutsk, 2013. P. 37-38.
14. G.A. Dorrer, S.V. Yarovoy *Siberian Forestry Journal*. 5, 105-113. (2017). DOI: 10.15372/SJFS20170510.

15. M.A. Finney FARSITE: Fire Area Simulator-model development and evaluation. RMRS-RP-4, Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 2004. P. 3-10.
16. C. Tymstra, R.W. Bryce, B.M. Wotton; S.W. Taylor, O.B. Armitage Development and structure of Prometheus: the Canadian Wildland Fire Growth Simulation Model. Nat. Resour. Can. For. Serv., North. For. Cent., Edmonton, AB. 2010, P. 5-12, 41-50.
17. A.V. Pavlova, P.R. Rodionov, S.E. Rubtsov Ecology. Economics. Informatics. Series: System Analysis and Modeling of Economic and Ecological Systems. **1**, 4, 245-251 (2019). DOI: 10.23885/2500-395X-2019-1-4-245-251.
18. T.P. Sysoeva, S.F. Lobova, A.A. Kukharev Scientific and analytical journal "Bulletin of St. Petersburg University of the State Fire Fighting Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia". **3**, 121-131 (2019).
19. M.O. Avdeeva, O.L. Uzun, A.S. Doronin, M.V. Gavrilova XXI century: results of the past and problems of the present plus. **11**, 2, 196-201 (2022). DOI: 10.46548/21vek-2022-1158-0034.
20. P.A. Tsvetkov Siberian Forestry Journal. **5**, 3-25 (2015). DOI: 10.15372/SJFS20150501.
21. O.A. Terentyeva Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Technical Sciences. **3**, 194-197, (2024). DOI: 10.24412/2071-6168-2024-3-194-195.
22. V.B. Kuhta // Bulletin of Moscow State University of Forestry - Lesnoy vestnik. **18**, 5, 92-97 (2014).
23. A.I. Filkov Physico-mathematical modeling of natural fires occurrence Publishing House of Tomsk State University, Tomsk, 2014. P. 208-228.
24. D.M. Malkov IT Arctic **2**, 3-18 (2020)
25. D.V. Barovik, V.B. Taranchuk Economics. Informatics. **47**, 3, 610-622 (2020). DOI: 10.18413/2687-0932-2020-47-3-610-622.
26. Certificate of registration of computer program No.2023618517 Software complex of multi-agent modeling of epidemic situation development. The case of polywave infection / M.Y. Sidlyar, O.A. Kovaleva, S.V. Kovalev. - Application No. 2023617550 date of receipt April 26, 2023g. registered in the Register of Computer Programs April 26. April 2023.
27. M.Yu. Sidlyar, O.A. Kovaleva, S.V. Kovalev Russian Science, Innovation, Education (ROSNIO-II-2023) (Krasnoyarsk, Russia, June 15-17, 2023). Collection of scientific articles on the materials of II All-Russian (national) scientific conference with international participation. Krasnoyarsk, 2023, 295-307.

© **М. Ю. Сидляр** – старший преподаватель кафедры Математического моделирования и информационных технологий (ММИТ), Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина (ТГУ им. Г.Р. Державина), Тамбов, Россия, m1kmikl@yandex.ru; **О. А. Ковалева** – д.т.н., профессор кафедры ММИТ, ТГУ им. Г.Р. Державина; Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия, solomina-oa@yandex.ru; **С. В. Ковалев** – д.т.н., профессор кафедры ММИТ, ТГУ им. Г.Р. Державина, sseedd@mail.ru.

© **М. Yu. Sidlyar** – Senior Lecturer, Department of Mathematical Modeling and Information Technologies (MMIT), G.R. Derzhavin Tambov State University (G.R. Derzhavin TSU), Tambov, Russia, m1kmikl@yandex.ru; **О. А. Kovaleva** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Professor of the MMIT department, G.R. Derzhavin TSU; Tambov State Technical University, Tambov, Russia, solomina-oa@yandex.ru; **S. V. Kovalev** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Professor of the MMIT department, G.R. Derzhavin TSU, sseedd@mail.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию – 18.01.25.

Дата принятия рукописи в печать – 20.02.25.