

УДК 614+519.248

## РАЗРАБОТКА СИМУЛЯЦИОННОГО ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ С УЧЁТОМ ПОГОДНЫХ УСЛОВИЙ И ФОРМЫ ЛАНДШАФТА

А.А. Гиниятов<sup>1</sup>, В.В. Кугуракова<sup>2</sup>, Р.С. Якушев<sup>3</sup>

Казанский (Приволжский) федеральный университет

<sup>1</sup>gin.arslan@gmail.com; <sup>2</sup>vlada.kugurakova@gmail.com; <sup>3</sup>sultanich@rambler.ru

### **Аннотация**

Предсказание динамики распространения огня в лесном массиве – важная задача, требующая постоянного усовершенствования, доработки и тщательного анализа. Одним из лучших инструментов предсказания динамики возгорания является компьютерное моделирование. Цель работы – построить качественную наглядную и эффективную систему, позволяющую смоделировать возгорание в лесном массиве с учетом большого числа параметров, таких, как рельеф, ветер, влажность, рельеф лесного покрова, тип горючего материала и т. д. При разработке был использован модульный подход, позволяющий неограниченно дорабатывать и расширять программный продукт, а также адаптировать его под широкий класс природных катаклизмов, будь то наводнение, землетрясение и др.

**Ключевые слова:** 3D, виртуальная реальность, симуляция, моделирование чрезвычайных ситуаций, пожары

### **МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ**

Моделирование процесса распространения лесных пожаров является сложным процессом, где учитываются все основные параметры ландшафта, лесного покрова и погодных условий. Каждый применяемый подход имеет свои преимущества и недостатки. Вся сложность заключается в том, что практически невозможно реализовать идеально работающий алгоритм, учитывая все параметры и при этом не усложняя процесс вычисления на компьютере.

В процессе предварительного анализа было рассмотрено несколько разных подходов к моделированию лесных пожаров. Существует два основных метода

реализации данного процесса: дискретный и непрерывный. Практически во всех дискретных моделях ландшафт и лесной покров представлены в дискретном виде, то есть, условно говоря, весь моделируемый «мир» представлен в виде матрицы, где каждая ячейка является некой малой областью с постоянными параметрами. В подобных моделях для описания процесса дискретную область обычно представляют в виде графа или смежных ячеек. В непрерывных моделях все основные параметры описаны в виде сложных функций, представленных в виде дифференциальных и интегральных уравнений. Дискретные модели являются простыми в реализации и менее сложными в плане вычисления. Непрерывные модели, в свою очередь, сложны в реализации, представлении и вычислениях, но бесспорным их преимуществом является точность расчета распространения пожара [1].

В настоящей работе для разработки системы моделирования и предсказания процесса распространения лесных пожаров была выбрана дискретная модель распространения пожара; использован дискретный метод двукратного нахождения кратчайшего пути на дискретной модели, который обеспечивает оптимальный компромисс между простотой и точностью и идеально подходит для наших целей.

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАНДШАФТА И ЛЕСНОГО ПОКРОВА**

Проблему распространения пожара можно описать в виде задачи поиска кратчайшего пути между вершиной возгорания и всеми остальными вершинами графа [1]. Для этого, разумеется, сначала нужно представить ландшафт в виде графа, на котором будет решаться задача нахождения кратчайшего пути.

Для представления моделируемой области в дискретном виде построенный алгоритм разбивает ее на ячейки одинакового размера, для каждой ячейки просчитываются средние значения ландшафта, лесного покрова и погодных условий. Полученные данные используются при построении графа. При выборе параметров дискретизации наиболее важным является нахождение так называемой «золотой середины». Чем выше плотность дискретизации, тем выше точность моделирования, но высокая плотность приводит к дополнительным вычислительным нагрузкам. Очевидно, данный параметр существенно зависит от мощности используемой вычислительной машины.

В основе алгоритма представления области в виде графа лежит метод триангуляции Делоне [6]. Суть триангуляции Делоне  $DT(S)$  заключается в том, что множество вершин графа связывается таким образом, чтобы ребра графа не пересекались, если вершины графа визуальнo расположить на одной плоскости. Вторым, наиболее важным требованием при построении рёбер графа методом Делоне является следующее условие: любая окружность, описывающая треугольник, составленный из вершин графа (точек), не содержит в себе других точек (рис. 1) [6].

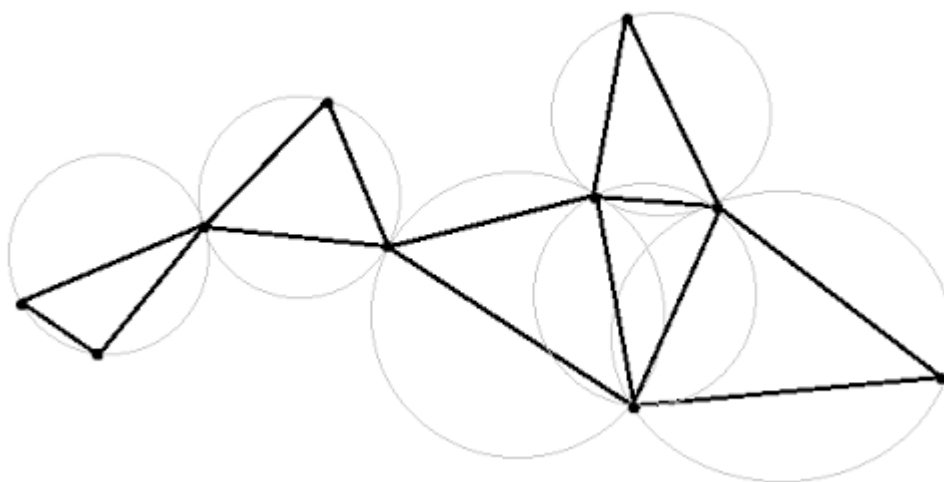


Рис. 1. Триангуляция Делоне

Таким образом, все вершины графа связываются так, чтобы выполнялось условие триангуляции Делоне. Данный метод гарантирует оптимальное связывание вершин графа: геометрическая длина пути будет оптимальной, поскольку все треугольники в данном случае не имеют углов больше 90 градусов.

Вершина графа содержит в себе все параметры ландшафта и лесного покрова в усредненных значениях, то есть значения всех ячеек матрицы, входящих в зону покрытия графа, суммируются, затем вычисляются средние значения путем деления на количество всех ячеек, которые входят в область вершины [1].

Наиболее интересной является модель вычисления веса ребра между вершинами графа. Ключевую роль при распространении пожара играет ветер, который задает вектор распространения пожара. Как упоминалось ранее, исследователи данной проблемы пришли к выводу, что в основе влияния ветра на распространение лесного пожара лежит форма эллипса [1].

Очевидно, что эллипс всегда вытянут по направлению ветра, где очагом возгорания служит задний фокус. Чем больше точка отклонена от направления ветра (чем больше угол  $B$ ), тем меньше скорость распространения линии огня. Этот факт является основополагающим при построении рёбер графа и лежит в основе моделирования лесных пожаров. Степень вытянутости эллипса напрямую зависит от силы ветра – чем сильнее ветер, тем больше степень вытянутости.

### **КРАТЧАЙШИЙ ПУТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПОЖАРА**

На первый взгляд, может показаться достаточным построения графа  $G(V, E)$  описанным ранее образом. Казалось бы, необходимо найти кратчайший путь от точки возгорания до остальных и остановиться. Однако так мы найдем лишь приближенные значения.

Как было установлено в [1], угол отклонения играет основную роль при распространении линий огня. Поэтому однопроходной алгоритм [1] приводит к неточностям – для уточнения результатов необходимо второе, дополнительное приближение. В результате, основываясь на первом приближении, алгоритм «пытается» улучшить процедуру определения расстояний до вершин графа  $G(V, E)$ . Отметим, что при первом приближении для нахождения кратчайшего пути используется алгоритм Дейкстры [4], поскольку он является оптимальным для графов рассматриваемого типа. Сложность алгоритма  $O(n \log N + M)$ , где  $N$  – количество вершин,  $M$  – количество ребер в графе, достигается благодаря оптимизации способа поиска минимальной вершины с помощью кучи<sup>4</sup>.

Во время второго прохода алгоритм проверяет возможность улучшения нахождения кратчайшего пути. Найдем сначала путь от вершины  $V_1$  до  $V_6$ , прохо-

---

<sup>4</sup> Куча (или heap) — это специализированная структура данных типа дерево, которая удовлетворяет свойству кучи: если  $B$  является узлом-потомком узла  $A$ , то  $\text{ключ}(A) \geq \text{ключ}(B)$ . Из этого следует, что элемент с наибольшим ключом всегда является корневым узлом кучи, поэтому иногда такие кучи называют max-кучами (в качестве альтернативы, если сравнение перевернуть, то наименьший элемент будет всегда корневым узлом, такие кучи называют min-кучами). Не существует никаких ограничений относительно того, сколько узлов-потомков имеет каждый узел кучи, хотя на практике их число обычно не более двух. Куча является максимально эффективной реализацией абстрактного типа данных, который называется очередью с приоритетом. Кучи имеют решающее значение в некоторых эффективных алгоритмах на графах, таких, как алгоритм Дейкстры на  $d$ -кучах и сортировка методом пирамиды.

---

дящий по вершинам  $t_{16} = \{V_1 \rightarrow \dots \rightarrow V_6\}$  (заметим, что  $t_{16}$  получен в результате первого прохода). Далее алгоритм пытается уточнить значение  $t_{16}$  путем введения дополнительных точек, являющихся пересечением вектора  $r_{\max}$  (вектор наибольшего распространения для рассматриваемой вершины (точка  $V_i$ ) пути) и одного из ребер, исходящих из вершины  $V_{i+1}$ .

### АРХИТЕКТУРА ПРИЛОЖЕНИЯ

Поскольку система является комплексной, целесообразно представить ее архитектуру в виде модулей. Модульный подход позволяет расширить функционал системы.

Система состоит из трех основных модулей (рис. 2): представления; нахождения кратчайших путей и моделирования процесса пожара; визуализации.

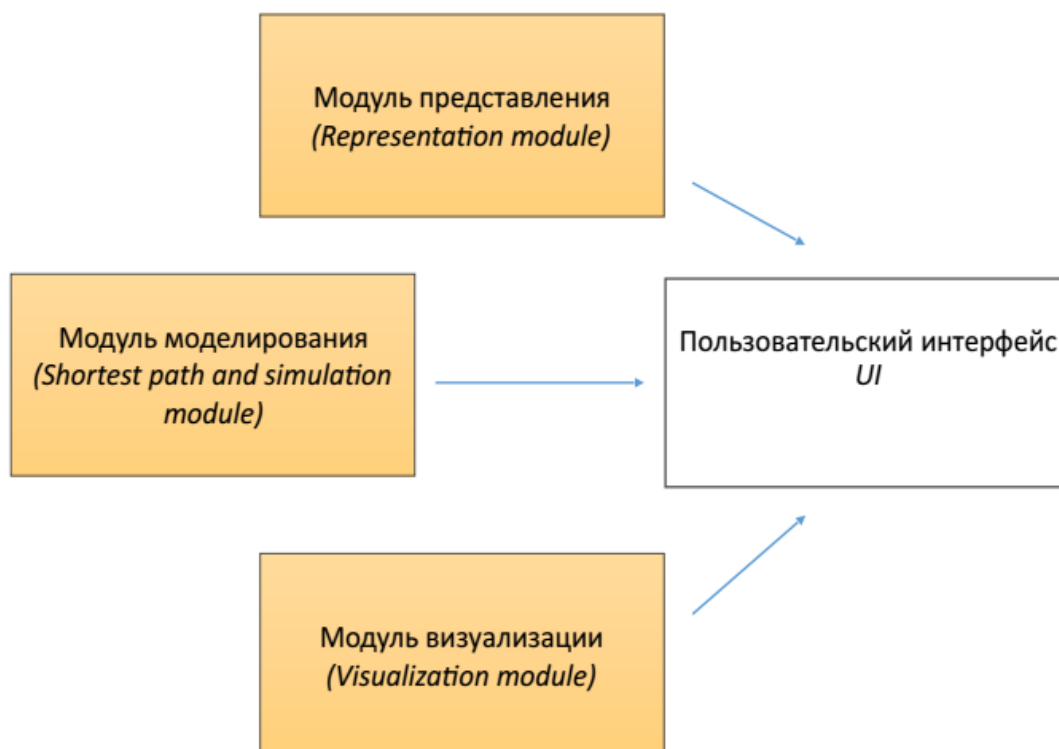


Рис. 2. Архитектура приложения

Модуль представления (Representation module) отвечает за представление области в форме матрицы и построение графа на основе дискретной модели.

Модуль моделирования (Shortest path and simulation module) представляет алгоритмы поиска кратчайшего пути для первого и второго проходов и отвечает за симуляцию лесного пожара на основе полученного графа.

Модуль визуализации (Visualization module) отвечает за трехмерную визуализацию процесса распространения пожара.

Контроллер пользовательского интерфейса содержит все основные узлы управления. Задачи контроллера меню – навигация по пользовательскому интерфейсу и предоставление доступа другим модулям для взаимодействия с пользователем.

### **МОДУЛЬ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ**

Лесной покров, заданный пользователем, в паре с моделью ландшафта представляется в дискретной модели в виде матрицы (класс WorldDiscreteRepresentation). Затем строится граф по принципу Делоне.



Рис. 3. Визуализация ландшафта вместе с триангуляцией Делоне

Белые точки на изображении (рис. 3) соответствуют вершинам графа. Рассмотрим частный случай триангуляции Делоне: все треугольники являются равнобедренными в проекции на плоскость XZ. Такое упрощение существенно облегчает процесс разработки, при этом не теряется эффективность.

Таким образом, модель ландшафта представлена в виде графа, имеющего топологию триангуляции Делоне. При подсчете весов ребер учитывается угол отклонения между соседними вершинами графа, что напрямую имеет отношение к поведению ветра и плотности распространения лесного покрова. Определение точек графа на поверхности производится путем вычисления коллизии испускаемого луча (raycast) и меша (mesh) поверхности ландшафта.

### МОДУЛЬ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В данном модуле реализованы алгоритмы поиска кратчайшего пути и симуляции распространения пожара. Функционал позволяет пользователю видеть результат пожара в любое время  $t$ . Имеется возможность наблюдать за фронтом огня в режиме реального времени. Модуль является ядром симуляции пожара в данном приложении. Контролер пользовательского интерфейса представляет собой прослойку между основными контроллерами и пользовательским интерфейсом (рис. 4).

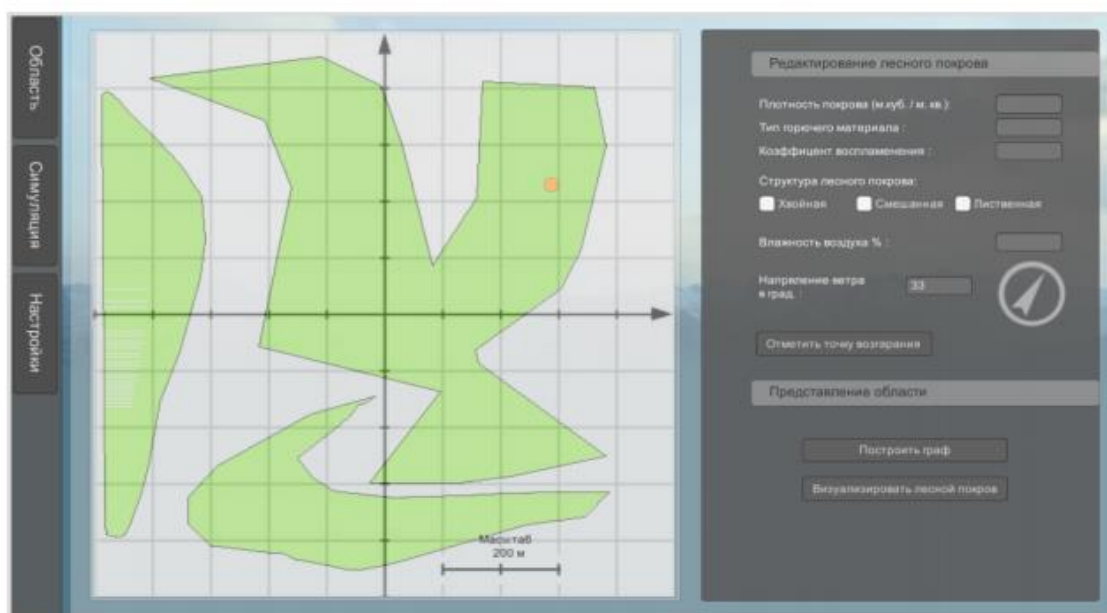


Рис. 4. Меню для редактирования лесного покрова

### МОДУЛЬ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

Данный модуль полностью отвечает за трехмерное представление. Список задач, за которые отвечает модуль, можно представить в следующем виде:

- визуализация лесного покрова на основе введенных пользователем данных;

- визуализация выгоревших частей лесного покрова;
- визуализация выгоревших частей ландшафта;
- визуализация огня и дыма с помощью системы частиц;
- оптимизация визуализируемых объектов и частиц.

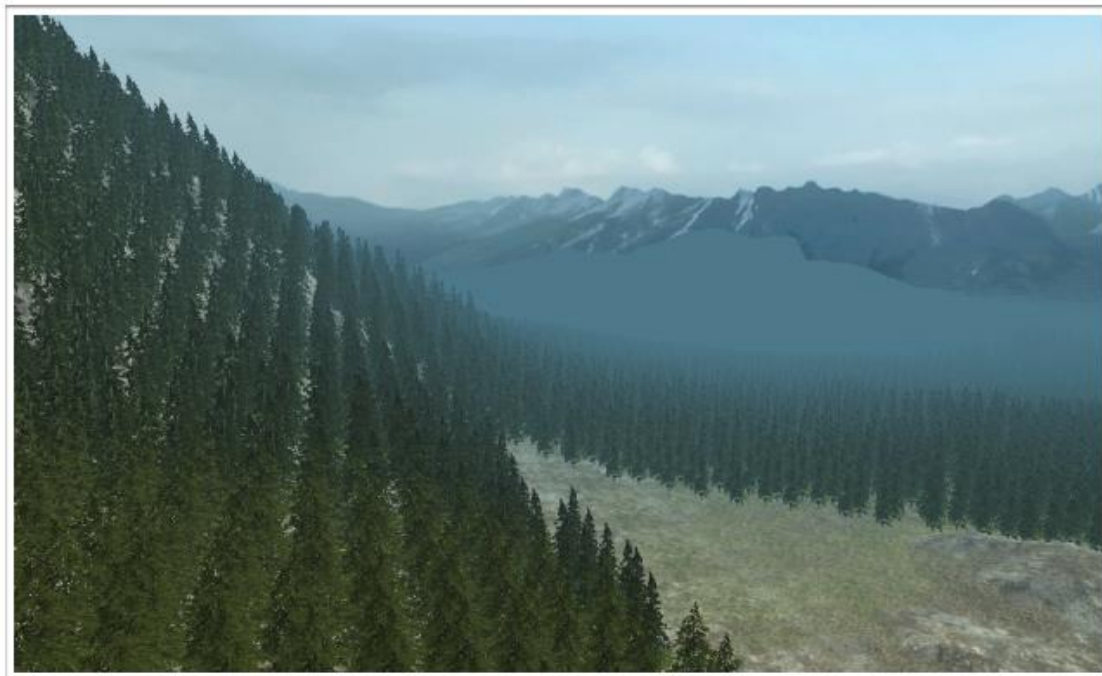


Рис. 5. Результат визуализации хвойного леса на ландшафте

Отметим, что несмотря на отсутствие в данном модуле сложных алгоритмов, большой размер ландшафта и лесного покрова влекут за собой огромное количество объектов (например, деревьев) на сцене, что приводит к увеличению полигонов и влияет на скорость отображения в процессе симуляции. Для решения данной проблемы использован метод LOD Group, который встроен в движок Unity [5]. На рис. 5 представлен результат визуализации лесного покрова, в данном случае хвойного.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Для сравнения полученных результатов была использована симуляция со схожими входными данными, но на другой симуляционной системе, моделирующей распространение пожаров – FARSITE [7], результаты которой были взяты в качестве эталонных. FARSITE широко используется для предсказания и предотвращения лесных пожаров службами по защите лесных массивов, службами спасения и им подобными в западных странах. В FARSITE реализована непрерывная



модель представления лесного массива, в отличие от дискретной модели, использованной при разработке рассматриваемого приложения. Ниже приведены результаты распространения пожара, полученные в обеих системах (рисунки 6 и 7).

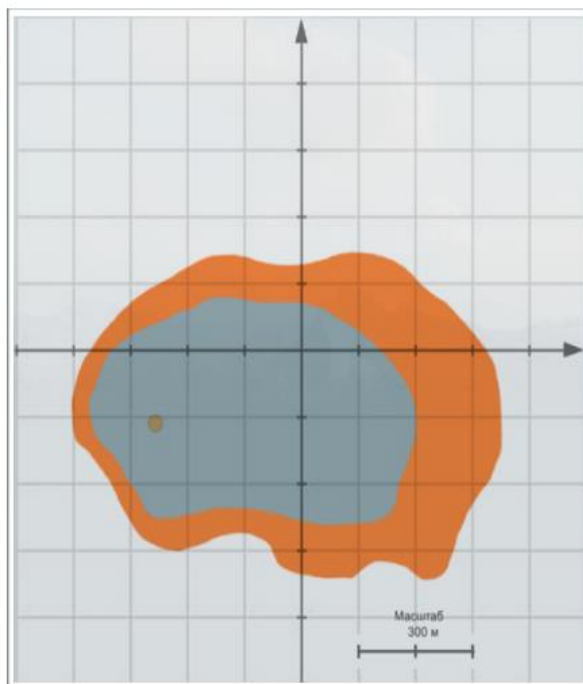


Рис. 6. Диаграмма распространения лесного пожара при использовании в симуляции дискретной модели

На рис. 6 представлен результат работы описываемой системы с дискретным распространением огня. Линия фронта изображена оранжевым (более светлым), выгоревшие участки – серым (менее светлым) цветами. Второе изображение (рис. 7) – это результат симуляции, полученный приложением FARSITE. Разными цветами обозначены линии фронта огня в разные периоды времени.

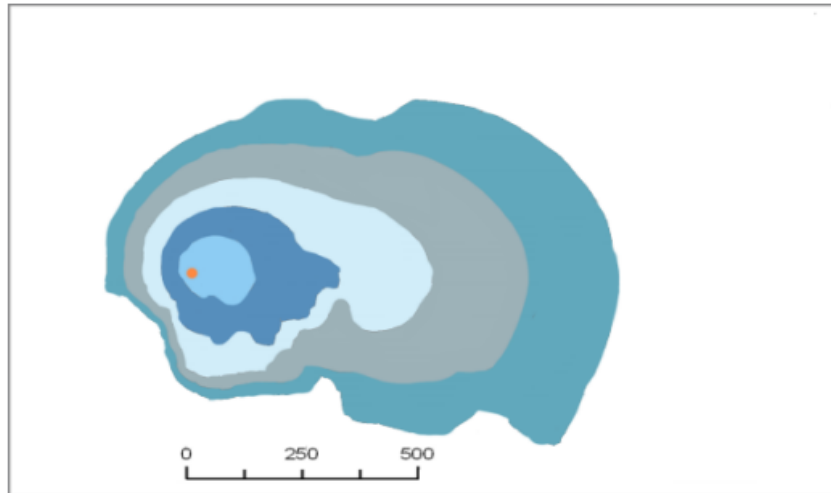


Рис. 7. Линии фронта в разные периоды времени, полученные в симуляции с использованием непрерывной модели распространения огня

В качестве входных параметров использовались одни и те же данные, лесной покров и его структура в обоих случаях были одинаковыми. Небольшие различия есть в моделях ландшафта, однако это существенно не влияет на результат. Ветер направлен на восток.

Сравнение полученных результатов показало, что существенных различий между ними нет. Результат работы системы FARSITE является более точным в силу того, что система реализует непрерывную модель.

В условиях необходимости развития симуляционных моделей прогнозирования пожаров, особенно в отсутствии ситуационного центра общероссийского характера, предполагающего сбор и интерпретацию данных по возникновению очагов, прогнозированию распространения лесных масштабных пожаров с многофакторным учётом розы ветров, свойственной разным территориям, нами предложено частное решение, использующее дискретную модель данных, которая тем не менее достаточна для отражения прогнозируемого фронта распространения пожара и может являться базовой при условии учёта других факторов при моделировании минимальных необходимых мер для прекращения распространения огня в каждом частном случае.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Alexander Stepanov, James MacGregor Smith. Modeling wildfire propagation with Delaunay triangulation and shortest path algorithms. URL: [http://www.ecs.umass.edu/mie/faculty/smith/StepanovJMSmith\\_EJOR\\_R4.pdf](http://www.ecs.umass.edu/mie/faculty/smith/StepanovJMSmith_EJOR_R4.pdf).
2. Лепп Н.Э., Ушанов С.В. Имитационное моделирование процесса распространения лесного пожара. URL: <http://elib.sfu-kras.ru/bitstream/2311/8443/1/lepp.pdf>.
3. Introduction to Fire Behavior Modeling. URL: [https://www.frames.gov/files/8413/4643/5159Intro\\_to\\_Fire\\_Behavior\\_Modeling\\_Guide\\_2012.06.25.pdf](https://www.frames.gov/files/8413/4643/5159Intro_to_Fire_Behavior_Modeling_Guide_2012.06.25.pdf).
4. Knuth D. The Art of Computer Programming, Vol. 3: Sorting and Searching, 2nd Edition. Addison-Wesley, 1998. 800 p.
5. Unity API. URL: <https://docs.unity3d.com/ScriptReference/>.
6. Скворцов А.В. Триангуляция Делоне и её применение. Томск: Изд-во Томского университета, 2002. 128 с.
7. FARSITE – fire growth simulation modeling system. URL: <http://www.fire-lab.org/project/farsite>.

---

## SOFTWARE FOR FOREST FIRE SIMULATION WITH RESPECT TO WEATHER AND ENVIRONMENTAL CONDITIONS

**A.A. Giniyatov<sup>1</sup>, V.V. Kugurakova<sup>2</sup>, R.S. Yakushev<sup>3</sup>**

*Kazan (Volga Region) Federal University*

<sup>1</sup>gin.arслан@gmail.com; <sup>2</sup>vlada.kugurakova@gmail.com; <sup>3</sup>sultanich@rambler.ru

### **Abstract**

Prediction of forest fire dynamics is no easy task, requiring thoughtful examination of many factors involved, such as landscape, vegetation, climate and weather conditions, humidity, urbanization of land, and many others. One of the best approaches to this problem is a computer simulation. In this paper, we describe the thought process and the development of a forest fire simulator that means to address all of those difficulties.

**Keywords:** *3D, virtual reality, virtual simulation, forest fire simulation*

---

## REFERENCES

1. Alexander Stepanov, James MacGregor Smith. Modeling wildfire propagation with Delaunay triangulation and shortest path algorithms. URL: [http://www.ecs.umass.edu/mie/faculty/smith/StepanovJMSmith\\_EJOR\\_R4.pdf](http://www.ecs.umass.edu/mie/faculty/smith/StepanovJMSmith_EJOR_R4.pdf).
2. Lepp N., Ushanov S. Imitational modelling of forest fire spread. URL: <http://elib.sfu-kras.ru/bitstream/2311/8443/1/lepp.pdf>.
3. Introduction to Fire Behavior Modeling. URL: [https://www.frames.gov/files/8413/4643/5159Intro\\_to\\_Fire\\_Behavior\\_Modeling\\_Guide\\_2012.06.25.pdf](https://www.frames.gov/files/8413/4643/5159Intro_to_Fire_Behavior_Modeling_Guide_2012.06.25.pdf).
4. Knuth D. The Art of Computer Programming, Vol. 3: Sorting and searching, 2nd Edition. M. Addison-Wesley, 1998. 800 p.
5. Unity API. URL: <https://docs.unity3d.com/ScriptReference/>.
6. Skvortsov A. Delauney triangulation and its applications. Tomsk University Press, 2002.
7. FARSITE – fire growth simulation modeling system. URL: <http://www.fire-lab.org/project/farsite>.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



**ГИНИЯТОВ Арслан Альфирович** – выпускник 2016 года Высшей школы информационных технологий и информационных систем Казанского (Приволжского) федерального университета.

**Arslan Alfirovich GINIYATOV**, bachelor, graduate in 2016 of Higher School of Information Technology and Information Systems of Kazan Federal University.

email: gin.arслан@gmail.com



**КУГУРАКОВА Влада Владимировна** – старший преподаватель Высшей школы информационных технологий и информационных систем Казанского (Приволжского) федерального университета, руководитель лаборатории «Виртуальные и симуляционные технологии в биомедицине».

**Vlada Vladimirovna KUGURAKOVA**, senior Lecturer of Higher School of Information Technology and Information Systems of Kazan Federal University, Head of Laboratory “Virtual and simulation technologies in biomedicine”.

email: vlada.kugurakova@gmail.com



**ЯКУШЕВ Ринат Султанович** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теоретической механики Казанского (Приволжского) федерального университета.

**Rinat Sultanovich YAKUSHEV**, associate professor of Department of Theoretical Mechanics of Kazan Federal University.

email: sultanich@rambler.ru

*Материал поступил в редакцию 25 февраля 2016 года*