

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего  
образования  
«Уральский федеральный университет имени первого Президента России  
Б.Н. Ельцина»

Физико-технологический институт

Кафедра теоретической физики и прикладной математики

# ПРОЕКТ ПО МОДУЛЮ

по теме: Моделирование лесного пожара  
методом Монте-Карло

Руководитель: Мазуренко В.В.

Студент: Здерев П.А.

Группа: ФТ-210005

Екатеринбург

2023

# Содержание

<b>1</b>	<b>Введение</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Основная часть</b>	<b>3</b>
2.1	Теоретические основы . . . . .	3
2.1.1	Общие сведения . . . . .	3
2.1.2	Описание методов . . . . .	5
2.1.3	Описание используемых алгоритмов и моделей . . . . .	6
2.2	Практическая часть . . . . .	6
2.2.1	Описание основного алгоритма программы . . . . .	6
2.2.2	Демонстрация основного алгоритма . . . . .	7
2.2.3	Анализ влияния различных факторов на распространение пожара	15
2.2.4	Влияние размера модели на распространение пожара . . . . .	21
2.2.5	Влияние посадки на пожар . . . . .	23
2.2.6	Способы тушения пожара . . . . .	25
2.2.7	Сравнение с реальными данными . . . . .	26
<b>3</b>	<b>Заключение</b>	<b>27</b>
<b>4</b>	<b>Список использованных источников</b>	<b>29</b>

# 1 Введение

Масштабы лесных пожаров за последнее десятилетие вывели эти природные опасности на передний план управления рисками. Лесные пожары - это стихийные бедствия, которые могут произойти в любое время и в любом месте. Они могут быть вызваны многими факторами, такими как молния, человеческие ошибки, высокие температуры и сильный ветер. В результате пожаров может произойти нанесение значительного ущерба биологическому разнообразию, экономической деятельности и здоровью людей. Поэтому моделирование лесных пожаров является важным инструментом для изучения их динамики и разработки мер по предотвращению и борьбе с ними.

Когда речь заходит о лесных пожарах, это не только огромные убытки в экономическом и экологическом плане, но и о жизнях людей и животных. Риск возникновения пожаров в лесах возрастает каждый год, из-за климатических изменений, неосторожного поведения людей, и других факторов.

Моделирование лесного пожара - это процесс создания математической модели, которая описывает распространение пожара в лесном массиве. Для создания такой модели необходимо учитывать различные факторы, такие как влажность почвы, тип растительности, скорость ветра и другие метеорологические условия. Все эти факторы могут существенно влиять на динамику пожара и его скорость распространения.

Метод Монте-Карло - это стохастический метод, который может использоваться для моделирования лесных пожаров. Он позволяет смоделировать случайное поведение пожара, учитывая различные факторы, такие как скорость ветра, тип растительности и другие метеорологические условия. Этот метод может использоваться для анализа различных стратегий борьбы с пожарами, таких как создание препятствий и контроль за распространением огня.

**Целью данной работы** является разработка программы, которая будет использовать метод Монте-Карло для моделирования распространения лесного пожара.

**Объектом исследования** выступает модель лесного пожара.

**Предметом исследования** является лесной пожар.

Реализация данной цели исследования обусловила необходимость решения следующих **задач**:

- рассмотреть модель лесного пожара
- проанализировать влияние внешних факторов на развитие пожара
- изучить скорость распространения в зависимости от вида деревьев
- определить способы борьбы с пожаром
- сделать тезисные выводы и предложения по результатам проведенного исследования.

**Метод исследования:** построение модели распространения лесного пожара.

## **2 Основная часть**

### **2.1 Теоретические основы**

#### **2.1.1 Общие сведения**

Лесные пожары – это одно из самых опасных и разрушительных природных явлений, которые происходят по всему миру. Они возникают в результате неконтролируемого горения лесной растительности и могут привести к разрушению огромных территорий, угрозе жизни и здоровью людей, а также нанесению значительного экономического ущерба.

Возникновение лесных пожаров обычно связано с комбинацией трех факторов: наличия горючих материалов, высокой температуры и наличия кислорода. Наличие горючих материалов, таких как листья, ветки, хвоя и другие растительные отходы, является необходимым условием для возникновения пожара. Высокая температура

может быть вызвана природными факторами, такими как молнии, или антропогенными факторами, такими как открытое пламя, курение или неправильно утилизированный костер. Наличие кислорода также является необходимым условием для горения.

Кроме того, существуют множество других факторов, которые могут повысить вероятность возникновения и распространения лесных пожаров. Среди них можно выделить климатические условия, такие как высокая температура, сухость и ветер, а также плохие условия экологического баланса, такие как изменение состава растительности или нарушение биологического разнообразия.

Распространение лесных пожаров также может быть связано с многими факторами, такими как направление и скорость ветра, рельеф местности, наличие речек и озер, а также степень доступности для огнеборцев. Ветер может быстро распространять огонь на большие расстояния, а рельеф местности может создавать условия для формирования огненных ловушек, когда пожар не может двигаться в каком-либо направлении.

Поэтому предотвращение лесных пожаров и контроль их распространения являются важными задачами для общества. Моделирование распространения лесного пожара с помощью компьютерных технологий является одним из наиболее эффективных инструментов для разработки стратегий борьбы с пожарами и оценки их потенциальных последствий.

Одним из основных элементов моделирования распространения лесного пожара является анализ факторов, влияющих на его возникновение и распространение. Для более точного моделирования распространения пожара необходимо учитывать эти факторы, а также оценивать их взаимодействие друг с другом. Например, ветер может усилить интенсивность пожара, а наличие горючих материалов в топографически низких местах может привести к его быстрому распространению. Важным элементом моделирования является также оценка влияния человеческой деятельности на возникновение и распространение лесных пожаров. Неосторожность при костре или бросание окурков могут стать причиной возникновения пожара, а также влиять на его распространение. Поэтому необходимо учитывать и этот фактор при разработке стратегии борьбы с пожарами.

### 2.1.2 Описание методов

Моделирование распространения пожара - это процесс создания математической модели, которая имитирует поведение пожара и его распространение. Существует несколько методов моделирования пожара, которые используются для прогнозирования и анализа поведения пожара, а также для создания планов предотвращения пожара.

Один из таких методов - метод Монте-Карло, который является статистическим методом моделирования, основанным на генерации случайных чисел. Он может использоваться для анализа распространения пожара на основе различных факторов, таких как топография, погода, влажность и направление ветра. В методе Монте-Карло создается модель, которая представляет ландшафт, на котором распространяется пожар. Ландшафт может быть разбит на квадраты или ячейки, которые соответствуют определенной площади исследования. Каждая ячейка может быть либо подвержена пожару, либо нет, в зависимости от вероятности пожара в этой области. Для создания модели пожара используются несколько параметров, таких как скорость распространения пожара, интенсивность огня, длина горения и другие. В каждой ячейке, которая подвержена пожару, эти параметры применяются для вычисления скорости распространения пожара в следующей ячейке.

Одним из главных преимуществ метода Монте-Карло является его способность моделировать сложные системы, включая системы, в которых существуют случайные величины. Это позволяет учесть множество факторов, которые мы описали в прошлом разделе. Кроме того, метод Монте-Карло позволяет моделировать множество возможных сценариев распространения пожара в различных условиях, что позволяет определить оптимальные меры для предотвращения или остановки пожара. Например, можно определить оптимальное место для установки точек противопожарной защиты, а также оценить эффективность различных методов тушения пожара. Однако, метод Монте-Карло имеет и свои недостатки. Он требует большого количества вычислительных ресурсов, особенно при моделировании на больших масштабах, что может существенно затруднить проведение вычислений в реальном времени. Кроме того, точность моделирования может сильно зависеть от качества входных данных, что может привести к неточным результатам, если данные были введены неправильно или были получены с ошибками.

Тем не менее, в целом, метод Монте-Карло является эффективным и мощным

инструментом для моделирования распространения лесных пожаров и может быть использован для разработки оптимальных стратегий предотвращения и борьбы с пожарами.

### **2.1.3 Описание используемых алгоритмов и моделей**

В качестве простых моделей для описания распространения пожара можно выделить две:

1. Модель ячеек: это одна из самых распространенных моделей для моделирования лесных пожаров. Она основана на разделении земной поверхности на ячейки, каждая из которых может быть занята топливом или быть пустой. При моделировании распространения пожара, каждая ячейка может изменять свои свойства в зависимости от того, насколько близко она находится к источнику огня и какая погода в данный момент действует на эту территорию.
2. Модель Монте-Карло: как уже было упомянуто выше, метод Монте-Карло может использоваться для моделирования распространения лесных пожаров. Он позволяет оценить вероятность возникновения пожара в определенной области и оценить возможные траектории его распространения. Эта модель основана на использовании случайных чисел, которые помогают определить, какие ячейки будут заняты огнем и как быстро он будет распространяться.

В нашей работе мы совместим эти две модели и получим гибридную модель: из модели ячеек и метода Монте-Карло. Она позволяет учитывать не только свойства территории, но и влияние погодных условий, таких как скорость ветра, направление и влажность, на распространение пожара.

## **2.2 Практическая часть**

### **2.2.1 Описание основного алгоритма программы**

В качестве языка программирования для разработки модели автор будет использовать *Python*. Мы будем создавать базовую модель на примере двумерной

решетки размером  $L \times L$ . Где каждая клетка - это одно дерево, которое может находиться в 3 состояниях :  $h$  - не горит(здоровое) ,  $b$  - горит ,  $d$  - сгорело полностью. В начальный момент времени нам нужно выбрать одно дерево, которое начнет гореть: мы выберем в центре решетки, на деле же можно выбрать случайное дерево или даже несколько деревьев.

После того как пожар начался, деревья вблизи источника огня могут загореться с определенной вероятностью  $p_b$ , таким образом наш пожар будет распространяться, подобно эпидемии какого-либо вируса. Так же горящее дерево может потушиться с другой вероятностью  $p_h$ . Данную вероятность определяет два основных фактора: 1. как долго дерево горит - очевидно, что в начале пожара шанс, что дерево потухнет выше, 2. количество горящих деревьев вблизи данного дерева, будем считать, что если рядом горят другие деревья, то шанс тушения ниже. В природе дерево может само потушиться несколькими способами : дождь, гроза, ветер, засуха, наличие вредителей, недостаток питательных веществ в почве(это позволит дереву быстрее испарять влагу, которая используется для тушения пожара – дерево будет испарять больше влаги, что поможет быстрее тушить пожар)

По истечении определенного времени  $t_b$  горящее дерево полностью сгорит, считаем, что сгоревшее дерево не может передать огонь.

Это основные параметры нашей модели, в процессе моделирования мы будем вычислять приращения параметров:  $\Delta B$ ,  $\Delta D$ , количество загоревшихся и сгоревших деревьев соответственно за единицу времени.

Так как процесс лесного пожара довольно длителен (может достигать несколько дней) за единицу времени примем  $\Delta t = 1$  час, на полное сгорание одного дерева требуется  $t_b = 8$  часов.

### 2.2.2 Демонстрация основного алгоритма

Посмотрим как будет распространяться пожар в чистом лесу, без влияния каких-либо факторов. Рассмотрим два случая : первый – дерево может самопотушиться (допустим, идет гроза, а пожар начался вследствие удара молнии) , второй – дерево не может самопотушиться.



*Первый случай.*

Будем считать что вероятность перехода огня на соседнее дерево равна 0.5, вероятность что дерево потушится 0.05, соответственно,  $p_b = 0.5$ ,  $p_h = 0.05$ . Размеры леса примем  $50 \times 50$ . Так же добавим, что если дерево было потушено, но если вокруг него горят 4 дерева, то оно загорится вновь. Получившиеся результаты:

В первый час времени:

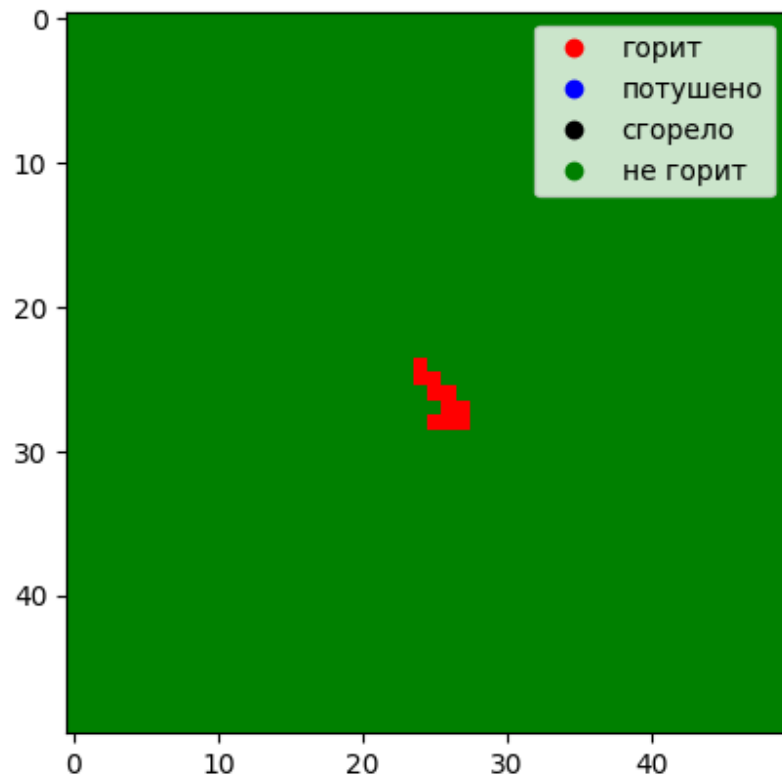


Рисунок 1:  $t=1$  час

Пожар только начался, посмотрим как изменится картина за 10 часов:

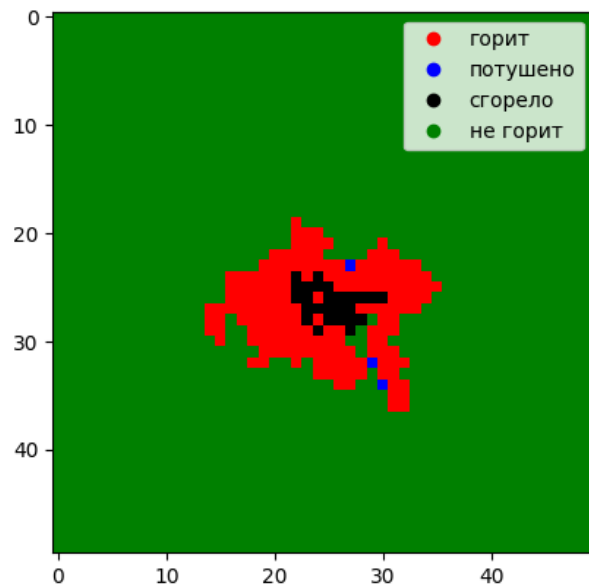


Рисунок 2:  $t=10$  час

Спустя 10 часов появились уже сгоревшие деревья, некоторым удалось потушиться, но это не значит что они останутся здоровыми до конца пожара. Пожар на 30 час:

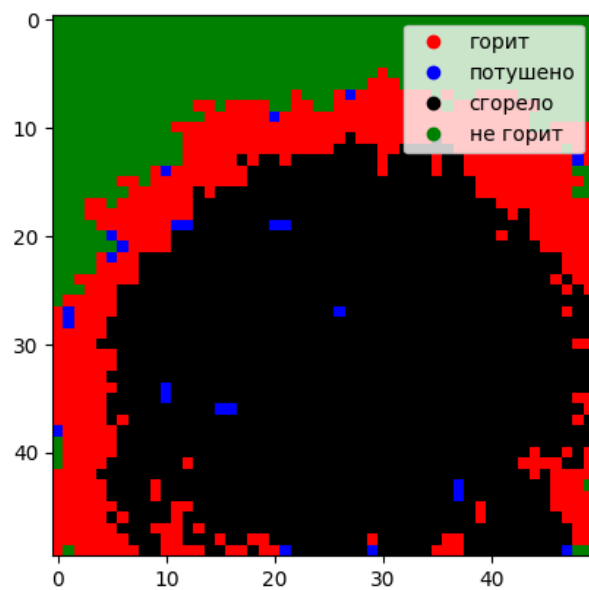


Рисунок 3:  $t=30$  час

Уже появилось поле сожженных деревьев, пожар близится к концу, в огромном поле сожженных деревьев нашлись деревья, которые смогли уцелеть после пожара. Пожар закончился на 45 часе времени:

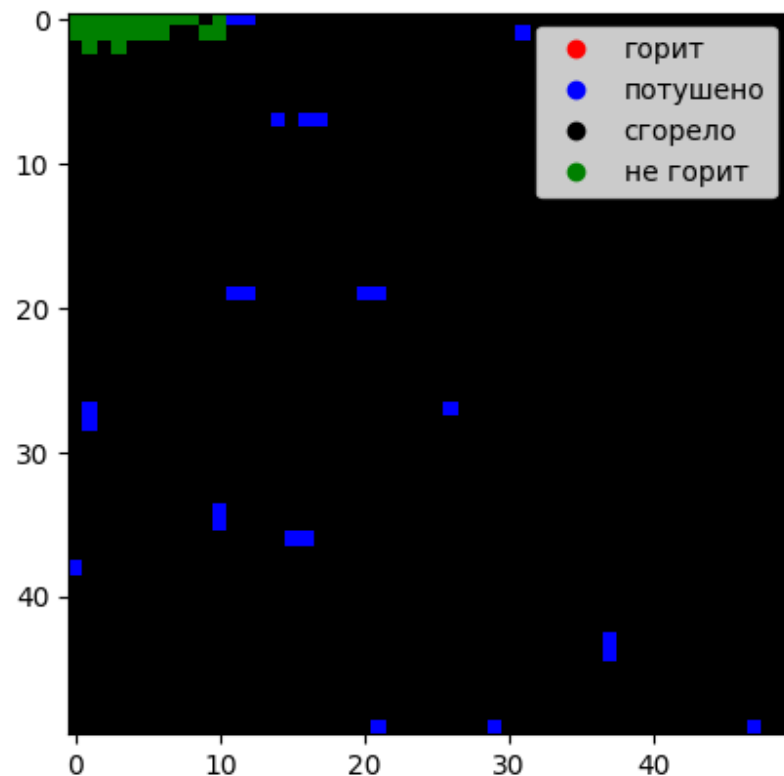


Рисунок 4:  $t=45$  час

Пожар не смог сжечь весь лес полностью, остались деревья, которые вообще не загорались, они находятся в конце леса, и некоторые деревья смогли уцелеть в гуще пожара. Можно сделать небольшой вывод, что т.к. имеется шанс что дерево потухнет, а на краях решетки пожар не может развиваться в 4 стороны, т.к. одна сторона граница, то на краях практически всегда будут деревья которые не были затронуты природной катастрофой. Такой вывод следует из 10 проведенных моделей. Так же из измерений можно сказать, что в среднем пожар кончается за 50 часов, возможно есть зависимость между размером решетки и длительностью пожара, т.к. они совпали (50 часов = 50 длина стороны), однако данная зависимость не представляет интерес в рамках данного проекта.

График количества деревьев в различных состояниях:

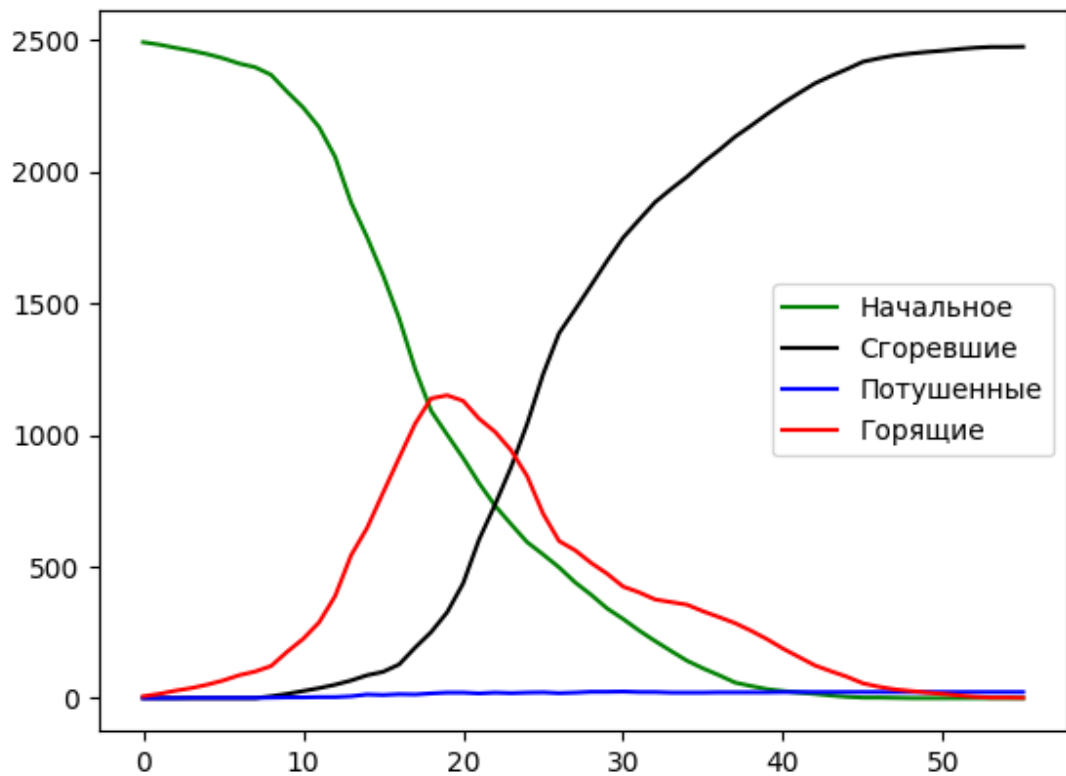


Рисунок 5: График состояний деревьев

Видно, что примерно в одно время – 20 часов, начинает резко возрастать график сгоревших деревьев, что довольно неправдоподобно без каких-либо внешних факторов, по аналогии, как будто, добавили катализатор в химическую реакцию, но у нас ничего такого нет, поэтому модель нужно модернизировать.

*Второй случай* Теперь мы рассмотрим моделирование лесного пожара с особой характеристикой – отсутствием возможности тушения дерева. При анализе такого сценария нашей целью будет изучение динамики и характеристик пожара, ведь распространению стихийного бедствия ничего не мешает.

В первый час времени:

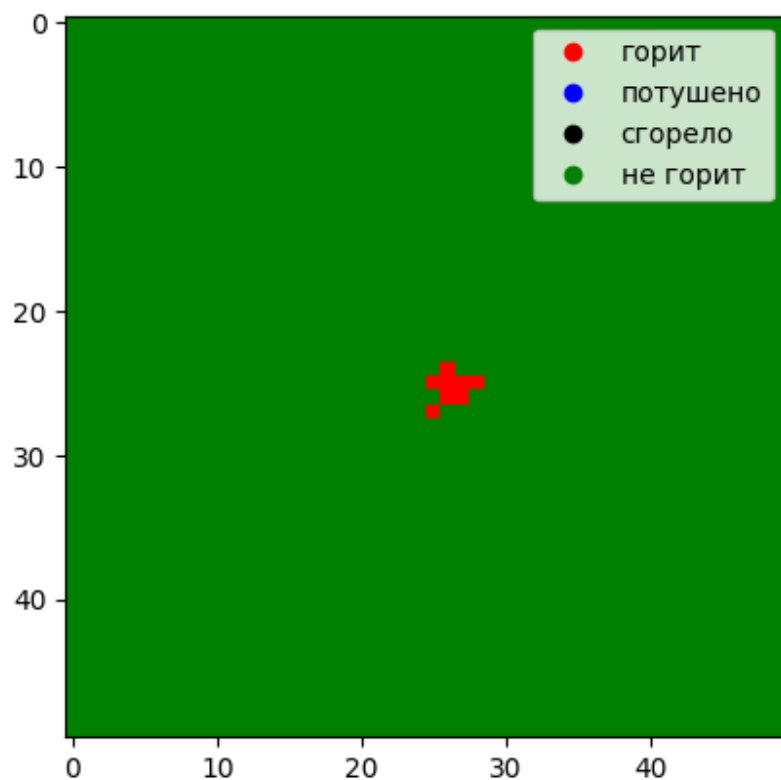


Рисунок 6:  $t=1$  час

Начало пожара, посмотрим как изменится картина за 10 часов:

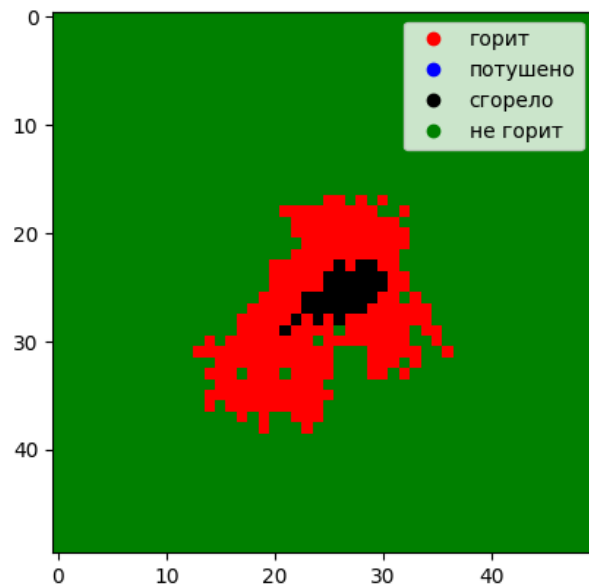


Рисунок 7:  $t=10$  час

Спустя 10 часов опять же появились сгоревшие деревья. Пожар распространился больше, чем в случае с потушенными деревьями, т.к. они являлись блокаторами для распространения огня, в этом случае их нет. Пожар на 30 час:

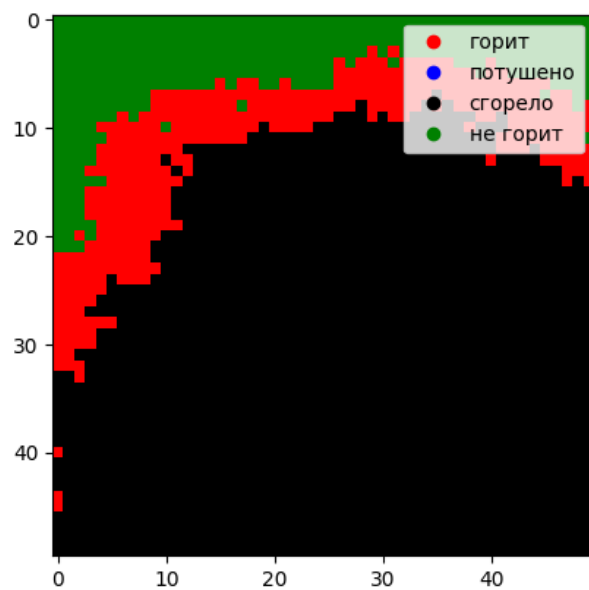


Рисунок 8:  $t=30$  час

Сгорело примерно три четверти леса, пожар близится к концу. Вновь наблюдается более стремительное распространение пожара, чем в первом случае. Пожар закончился на 42 часу времени, лес полностью сгорел.

Теперь вывод поменялся: в случае отсутствия препятствий в виде потушенных деревьев, как в первом случае, пожар распространяется в среднем на 20% быстрее. За 5 измерений среднее время пожара составило 41 час, то есть на 20% меньше, чем в первом случае – 50 часов.

График количества деревьев в различных состояниях:

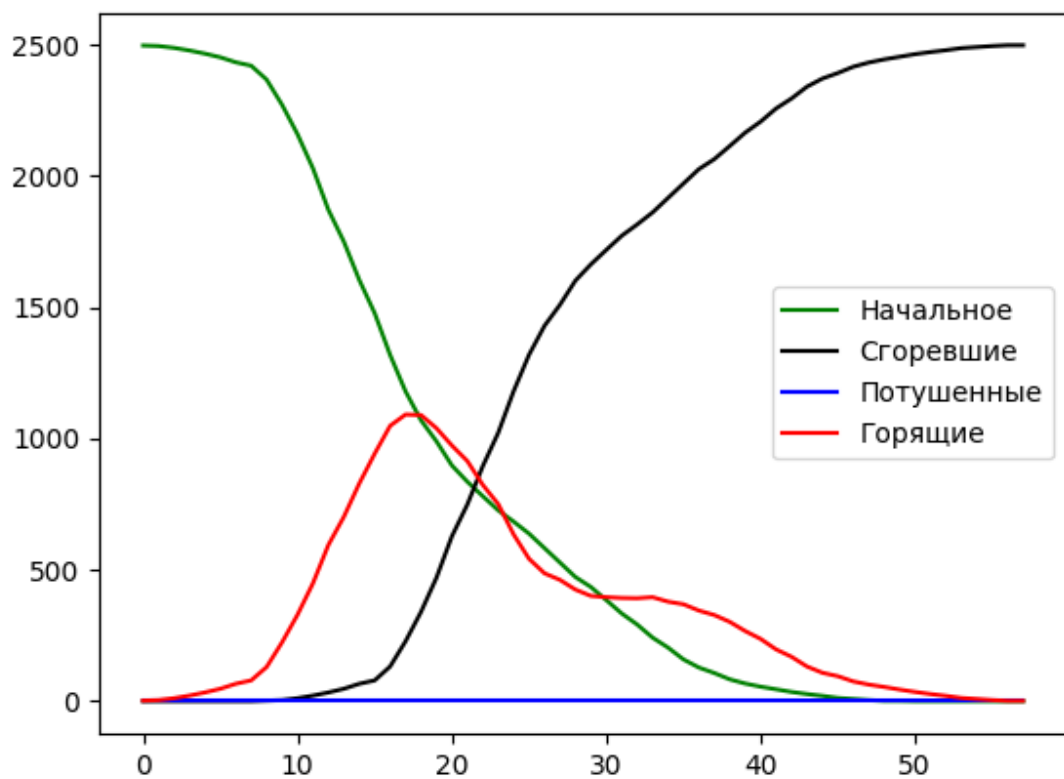


Рисунок 9: График состояний деревьев

Теперь исходя из графика пожар перешел в заключительную фазу раньше – примерно на 15 час.

### 2.2.3 Анализ влияния различных факторов на распространение пожара

*Ветер.* В предыдущей части нашего проекта мы рассмотрели базовый алгоритм моделирования распространения пожара с использованием метода Монте-Карло. Однако, в реальных условиях пожары часто осложняются различными факторами, которые могут существенно повлиять на динамику пожара и его распространение. Один из таких факторов - ветер, который играет значительную роль в процессе распространения огня, ускоряя его движение в определенном направлении и увеличивая вероятность возгорания окружающих объектов.

В этой части проекта мы рассмотрим модификацию нашей модели, чтобы учесть влияние ветра на распространение пожара. Мы введем новые параметры для характеристики направления и силы ветра и обновим алгоритм моделирования, чтобы учитывать эти факторы в процессе распространения огня. Это позволит нам получить более реалистичные результаты и лучше понять, как ветер воздействует на пожары в различных условиях.

Будем считать, что ветер всегда дует на север равномерно, и шанс того, что дерево загорится под действием ветра возрастает, и, наоборот, против ветра огню тяжелее распространяться. Посмотрим на полученные результаты:

В первый час времени:

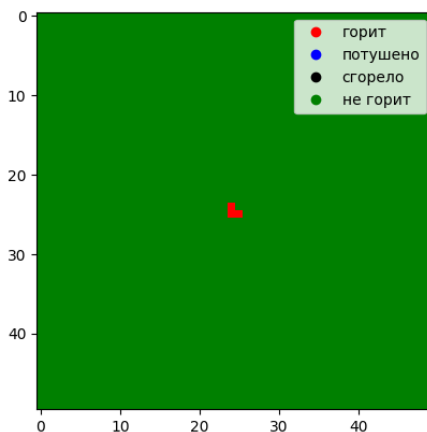


Рисунок 10:  $t=1$  час



Десятый час времени:

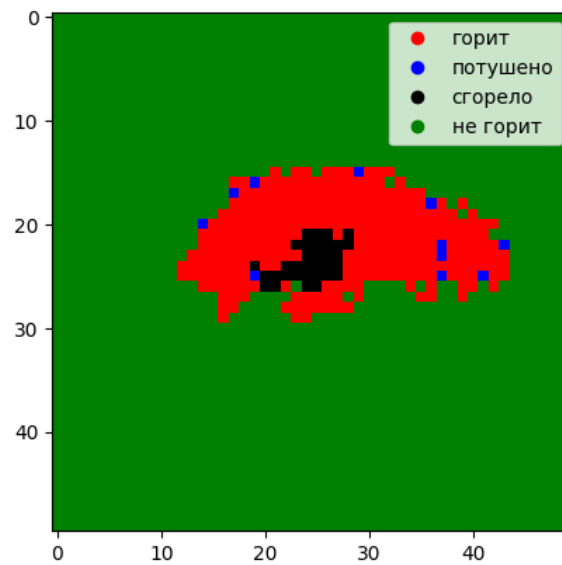


Рисунок 11:  $t=10$  час

Заметим как влияет ветер, огонь очень активно распространился в направлении ветра. Как изменилась картина на 30 час:

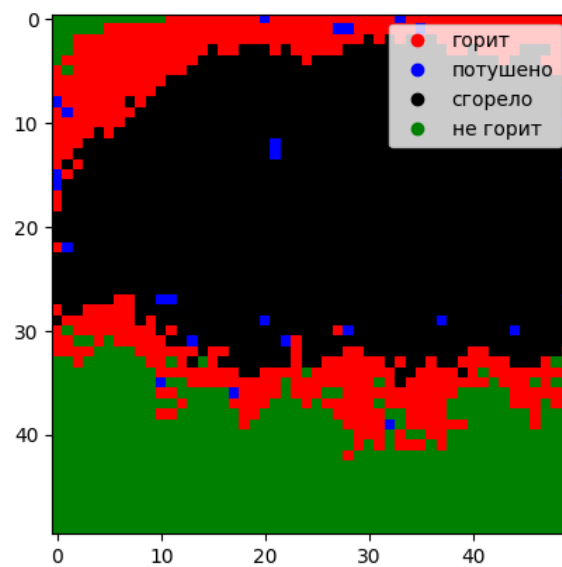


Рисунок 12:  $t=30$  час

Сравнивая с предыдущими результатами, заметим, что пожар распространился согласно направлению ветра, что и логично, то есть верхней границы пожар достигнет быстрее чем раньше, однако полностью лес сгорит медленнее. Лес в конце пожара:

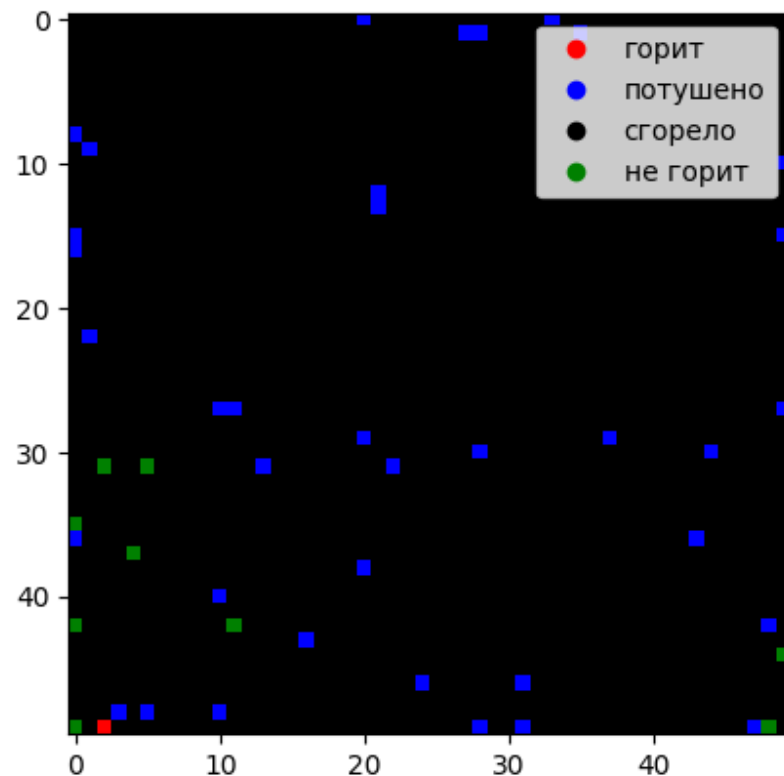


Рисунок 13:  $t=72$  час

Лес догорел лишь на 72 час, в среднем при в таких условиях пожар завершался за 60 часов, количество потушенных деревьев уменьшилось в северной части леса из-за быстрого распространения пожара, а в южной части леса их стало больше. Однако верхней границы леса пожар достиг раньше, чем в других измерениях. В нашей модели ветер увеличивает шанс загорания дерева на 15%, на столько же процентов изменились и показатели среднего времени, то есть они взаимосвязаны линейно. График пожара выглядит следующим образом:

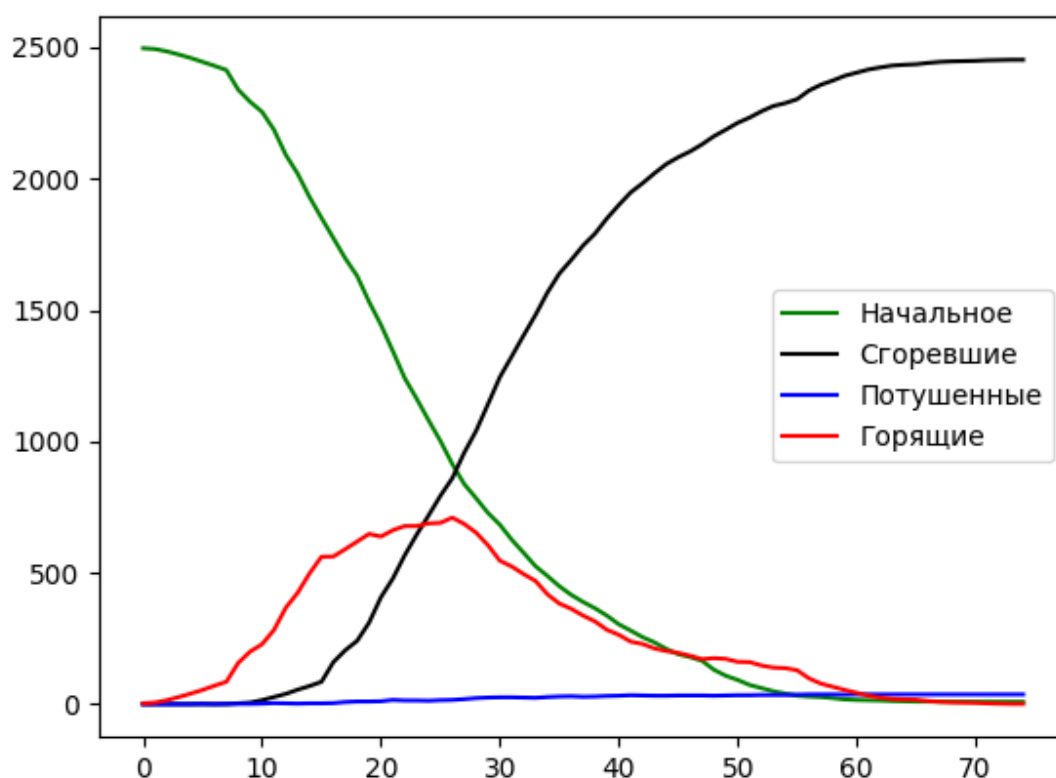


Рисунок 14: График пожара

Экстремум красного графика уменьшился ввиду того, что пожар распространялся сильнее лишь на половину карты, и увеличение скорости компенсировалось уменьшением скорости распространения в обратном направлении, что и снижает экстремум данного графика.

*Вид деревьев.*

Когда мы рассмотрели влияние базового фактора такого, как ветер перейдем к более продвинутой модели и рассмотрим, как будет распространяться пожар с учетом вида деревьев. Рассмотрим одни из самых распространенных деревьев в России - сосну и березу. Ввиду того, что береза имеет значительно больше плотность чем сосна, то она будет сгорать дольше, для упрощения примем, что сосна сгорает за 6 часов, береза за 9. Хвойные деревья поджигаются легче всего, поэтому вероятность переноса огня на сосну будет выше, чем на березу в случае попутного ветра на 10%, в случае противоположно направленного на 5%. Расположение деревьев будет хаотичным с равным распределением. Перейдем к моделированию:

В первый час времени:

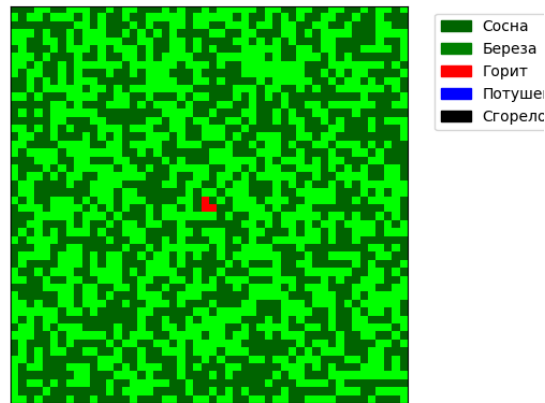


Рисунок 15:  $t=1$  час

Выделив отдельными цветами виды деревьев, видим как они хаотично распределены по всему лесу, посмотрим как будет развиваться пожар, десятый час времени:

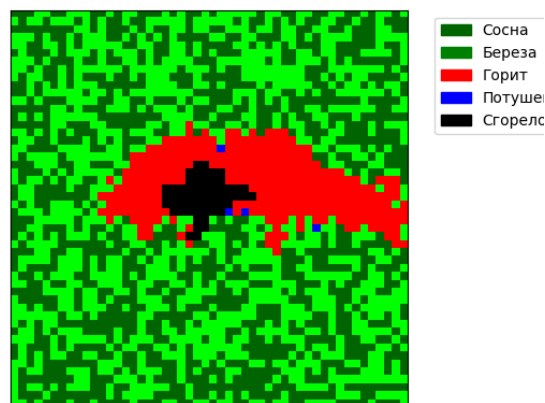


Рисунок 16:  $t=10$  час

Аналогично предыдущему опыту, видно влияние ветра, так же заметим из-за того, что сосны горят быстрее, количество сгоревших деревьев на 10 час возросло по сравнению с предыдущими опытами, примерно, на 10%. Пожар в 30 час времени:

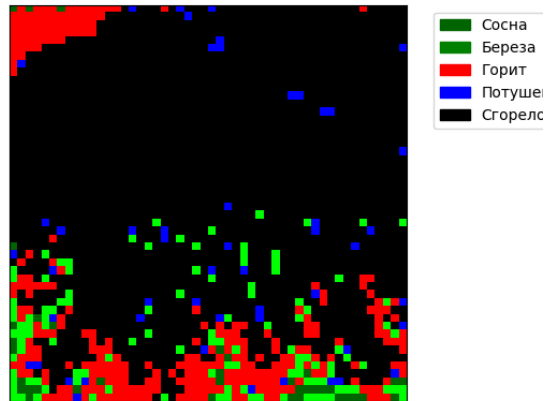


Рисунок 17:  $t=30$  час

Заметно серьезное отличие: лес сгорает в разы быстрее по причине наличия сосен! При этом есть деревья, на которые огонь даже не попал, благодаря тому, что около них есть потушенные индивиды, более того, все эти деревья - березы, у которых шанс загореться ниже по сравнению с соснами. Пожар завершился на 48 час времени:

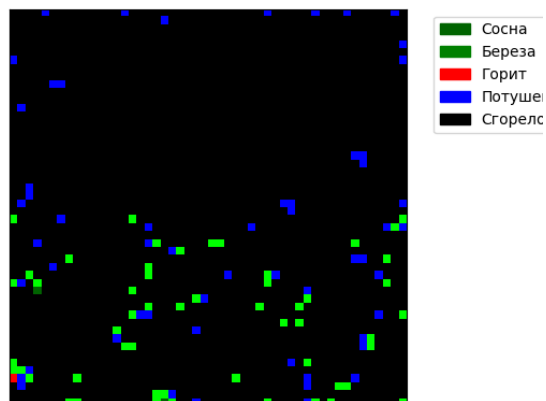


Рисунок 18:  $t=48$  час

Анализ проведем после рисунка графика.

График пожара из 30 измерений:

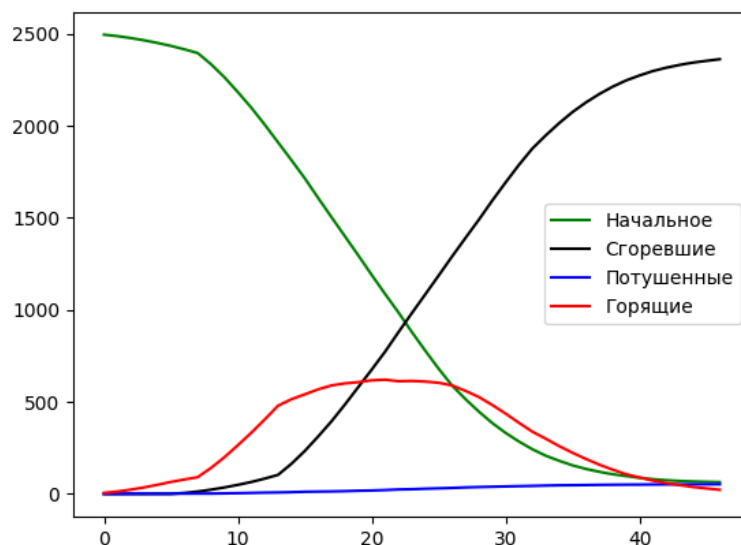


Рисунок 19: График распространения

Средняя продолжительность пожара составила 45 часов, благодаря тому, что хвойные деревья способствуют распространению пожара, мы смогли сократить долгую длительность пожара в предыдущем опыте с 60 до 45 часов, при этом модель стала более реалистичной, пожар стал идти равномерно, а не так резко как в начальной модели. Однако, количество сгоревших деревьев сильно возрастает и если не начать тушение пожара рано, то потери будут очень высокими, достаточно взглянуть на черную линию графика.

#### 2.2.4 Влияние размера модели на распространение пожара

Теперь когда построена модель, приближенная к реальности попробуем изменять параметры и будем наблюдать за изменениями модели, для начала изменим размер с 50 на 100 и 200:

Для  $L = 100$ :

Графики из 30 измерений:

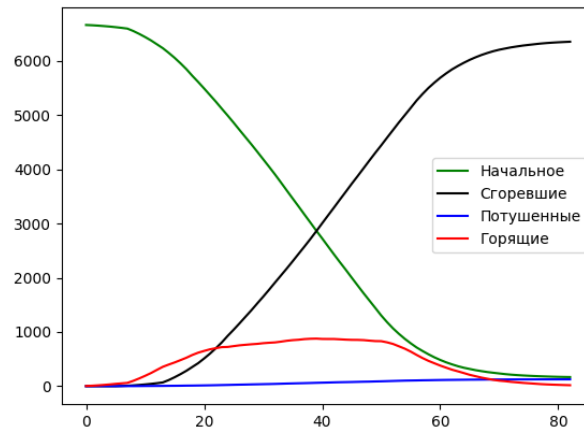


Рисунок 20: График распространения

Для  $L = 200$ :

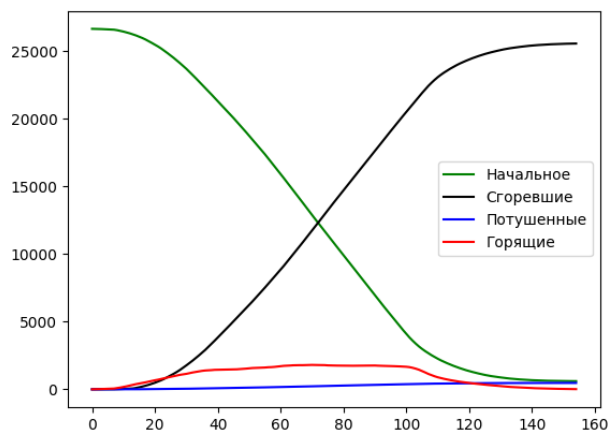


Рисунок 21: График распространения

Исходя из увеличения размера можно заметить закономерности:

1. Средняя длительность пожара возрастает практически прямо пропорционально размеру решетки, для  $L = 100$  длительность составила примерно 90 часов, для  $L = 200$  около 160 часов.

2. С увеличением размера пожар становится более плавным и похожим на реальный пожар, то есть при моделировании не стоит рассматривать малые решетки.
3. Максимальное значение графика горящих деревьев прямо пропорционально увеличению размера модели.

### 2.2.5 Влияние посадки на пожар

Теперь попробуем посмотреть за развитием пожара, если мы не будем садить деревья рядом друг с другом, а будем садить их в шахматном порядке, одной из самых распространенных посадок в мире. Вокруг дерева будет только поле, а по диагонали стоят деревья, также будем считать, что поле не может загореться. Моделирование:

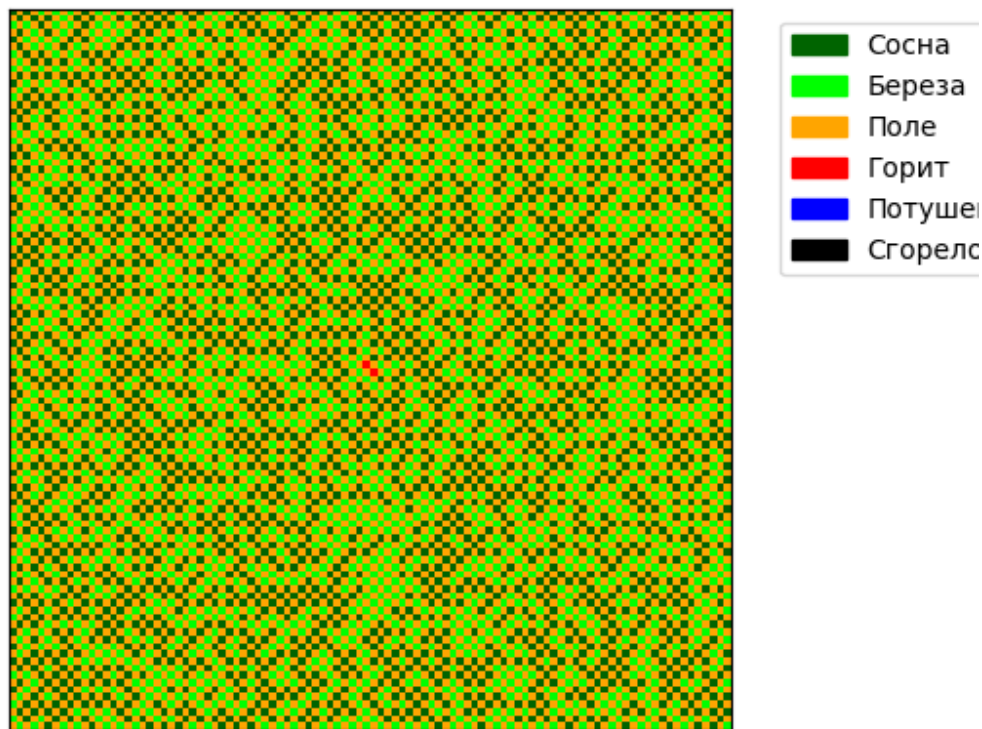


Рисунок 22: Первый час

На 30 час пожар выглядел следующим образом: в направлении ветра лес активно сгорал, но в противоположном направлении пожар очень слабый.



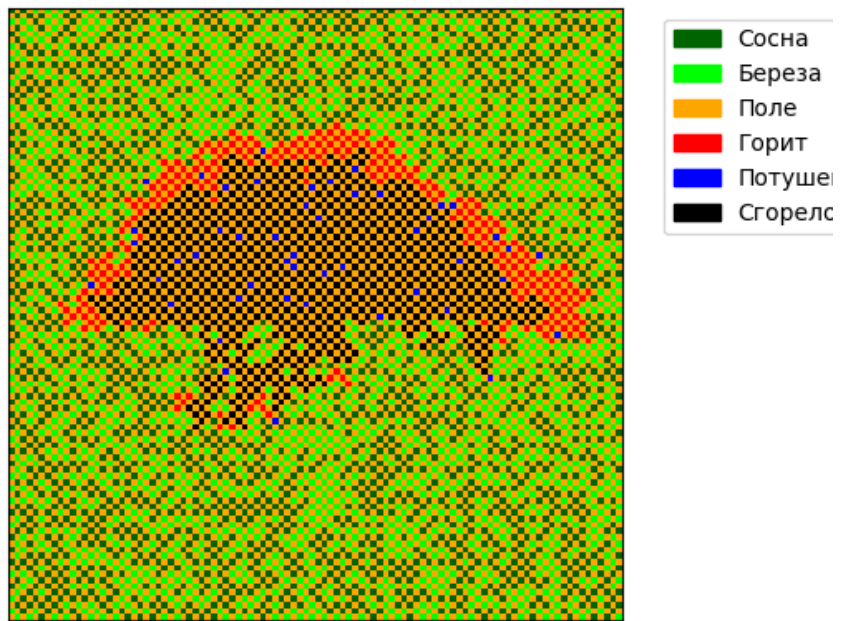


Рисунок 23: 30 час времени

Завершение пожара:

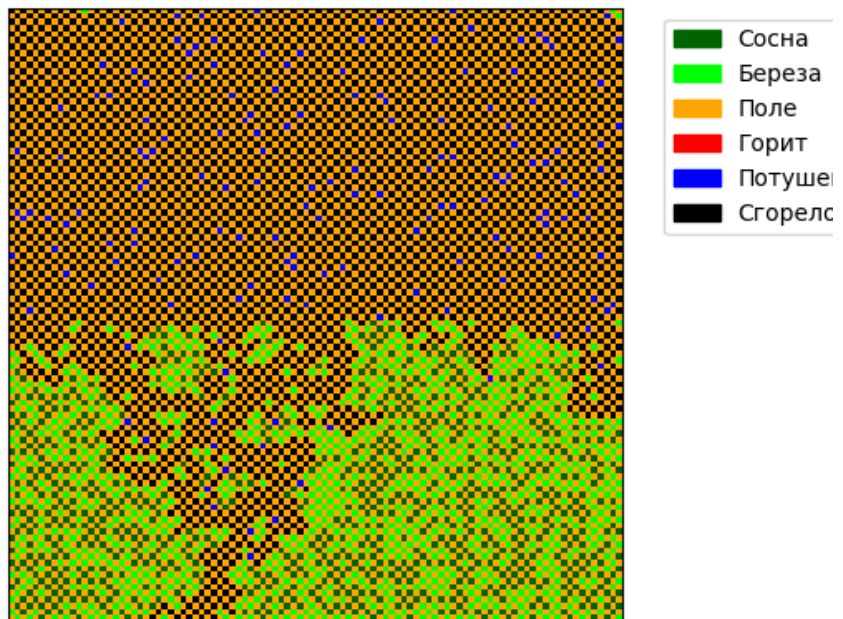


Рисунок 24: 90 час времени

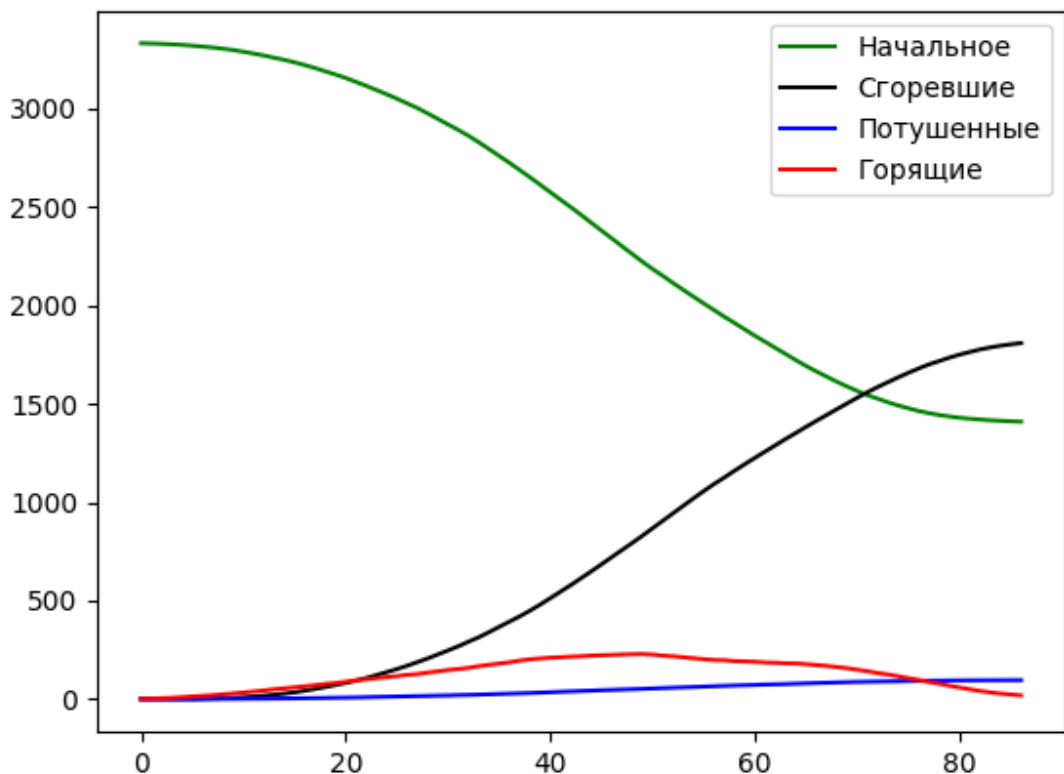


Рисунок 25: График при шахматной посадке из 30 измерений

При шахматной посадке деревьев пожар не смог поразить весь лес и потушился, поразив примерно 60% леса, но это уже достижение, ведь пожар развивался в разы медленнее, максимум графика горящих деревьев находится на одном уровне с графиком при размере  $L = 50$ , а у нас  $L = 100$ ! Исходя из этого, с точки зрения пожарной безопасности и эффективности выгоднее рассаживать деревья в шахматном порядке, а не сплошной посадкой, хоть так и будет меньше деревьев в сумме, но тогда последствия пожара будут вполне обратимыми.

### 2.2.6 Способы тушения пожара

Анализируя все, описанные выше, эксперименты можно выделить несколько основных правил для эффективного тушения лесного пожара:

1. Контролировать весь пожар по периметру, не позволять ему распространяться

2. С помощью летательных аппаратов тушить центр - очаг пожара
3. Продвигаться к центру со всех сторон по мере тушения пожара
4. Использовать шахматную посадку деревьев, чтобы пожар распространялся медленнее

Соблюдение этих простых правил позволяет свести потери леса к минимуму, так как оцепив пожар мы запретим ему распространяться, как в наших опытах во все стороны. Тушить центр пожара следует по причине того, что деревья в нем горят дольше всего и их нужно успеть спасти, но тушения центра не достаточно для победы над пожаром, поэтому пожарным следует продвигаться со всех сторон.

### **2.2.7 Сравнение с реальными данными**

Для оценки достоверности нашей модели, сравним полученные результаты нашего моделирования с данными о реальных пожарах, прошедших в Свердловской области в 2023 году.

Выберем более локальное место и для анализа возьмем пожар вблизи посёлка Сухой лог. Согласно источникам, в самом начале пожарного сезона, когда пожарные еще не успели предпринять меры, огонь распространялся с такой скоростью, что увеличивал свою площадь примерно в 2,5 раза за сутки. За двое суток сгорела треть гектара леса, а площадь пожара достигает 6 гектар.

Согласно нашей модели, пожар за сутки увеличивал свою площадь в 1,8 раза, за двое суток сгорела четверть гектара леса и огонь распространился примерно на 4 гектара.

Сравнивая данные, точность нашей модели для данного пожара составила 73%, неточность обусловлена тем, что в нашей модели не так много внешних факторов, параметры вероятностей выбраны приблизительно, в период пожаров в Свердловской области была высокая температура воздуха, что способствовало распространению пожара.

Попытаемся достичь большей точности нашей модели для данного пожара, дабы нивелировать отсутствия влияния температуры в нашей модели, добавим вероятность загорания деревьев на 10%. Тогда получились следующие результаты:

1. Пожар за сутки увеличивает площадь в 2,3 раза.

2. За двое суток сгорело 0,4 гектара леса.

Модель стала более точной, примерно, на 90 %, однако на графике теперь присутствует резкий скачок в возрастании горящих деревьев, который был в первой версии нашей модели (см.рис 5), что не является правдоподобным, поэтому простым увеличением вероятности модель сделать точнее не получится и нужно вводить новые дополнительные факторы.

### 3 Заключение

В ходе выполнения проекта на тему "Моделирование распространения пожара методом Монте-Карло" были изучены основы теории вероятности и статистики, применяемые для моделирования и анализа распространения пожара. Метод Монте-Карло, являющийся стохастическим подходом, был выбран в качестве основного инструмента исследования из-за его гибкости и способности описывать сложные системы, такие как пожары, с большой точностью и надежностью.

Целью проекта было создание математической модели, описывающей процесс распространения пожара. Модель была разработана на основе анализа природных процессов, происходящих при горении, а также учетом особенностей конкретного объекта и его окружения.

Особое внимание было уделено анализу влияния различных факторов на динамику пожара, таких как сила ветра, направление ветра, вид деревьев, условия самотушения деревьев, посадка деревьев, размер модели. Было установлено, что каждый из этих факторов оказывает существенное влияние на характеристики пожара, такие как скорость распространения, продолжительность пожара, последствия бедствия.

Были определены основные правила тушения пожаров исходя из опытов.

Несмотря на то что метод Монте-Карло является достаточно точным и надежным подходом для моделирования распространения пожара, в рамках данного проекта можно сказать, что есть различные ограничения. В частности, стоит отметить необходимость учета взаимодействия пожара с окружающей средой и

другими объектами, например наличие специфического ландшафта леса, что требует использования более сложных математических моделей и методов.

В целом, результаты проекта подтверждают эффективность и применимость предложенного подхода для анализа и управления пожарными рисками. При этом были выявлены ключевые факторы, влияющие на динамику пожара, а также предложены конкретные рекомендации и инструменты для повышения пожарной безопасности объектов. В дальнейшем исследования в данной области могут быть направлены на разработку более продвинутой системы прогнозирования и управления пожарными рисками, объединяющих данные о погодных условиях, характеристиках объектов, их расположении и других факторах, что позволит создать более полную и точную картину пожарной опасности на макро- и микроуровнях. В то же время выявленные в ходе исследования ограничения и направления для дальнейшего развития свидетельствуют о том, что в данной области есть еще много возможностей для научного и технологического прогресса.

## 4 Список использованных источников

1. ХРОНИКА ПОЖАРОВ / [Электронный ресурс] // 66.ru : [сайт]. — URL: <https://66.ru/news/incident/263879/> (дата обращения: 25.05.2023).
2. Пожары в Свердловской области / [Электронный ресурс] // news-mail.ru : [сайт]. — URL: <https://news.mail.ru/incident/56320281/> (дата обращения: 25.05.2023).
3. Пожары в Екатеринбурге и Свердловской области / [Электронный ресурс] // ural.kp : [сайт]. — URL: <https://www.ural.kp.ru/daily/27507/4768079/> (дата обращения: 25.05.2023).
4. Alisa Keyser Modeling forest fire severity in California, USA / Alisa Keyser [Электронный ресурс] // ResearchGate : [сайт]. — URL: <https://www.researchgate.net/publication/253693957> (дата обращения: 25.05.2023).
5. Hamidreza Sahraiiian Modeling the spreading of forest fire using the cellular automata and intelligent approaches / Hamidreza Sahraiiian [Электронный ресурс] // ResearchGate : [сайт]. — URL: <https://www.researchgate.net/publication/325602898> (дата обращения: 25.05.2023).
6. M.A. Finney Mechanistic modelling of landscape fire patterns, in: D.J. Mladenoff, W.L. Baker (Eds.), Spatial Modelling of Forest Landscape Change: Approaches and Applications, Cambridge University Press [Текст] / M.A. Finney — . — : , 1999 — 209 с.
7. K. Green et al. Using GIS to predict fire behavior, J. Forestry 93 [Текст] / K. Green et al. — . — : , 1995 — 25 с.
8. W.M. Pitts, Wind effects on fires, Prog. Energy Combust. Sci. 17 [Текст] / W.M. Pitts, — . — : , 1991 — 134 с.
9. Wikipedia / [Электронный ресурс] // Википедия : [сайт]. — URL: <https://ru.wikipedia.org> (дата обращения: 17.01.2023).