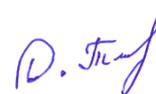


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования

Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского

На правах рукописи



**ТЕРЕНТЬЕВА Ольга Анатольевна**

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ  
ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ МАРКОВСКИХ  
ПРОЦЕССОВ**

1.2.2 - Математическое моделирование,  
численные методы и комплексы программ

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель -  
доктор физико-математических наук,  
профессор  
Гуц Александр Константинович

Омск - 2023

## Оглавление

<b>Введение .....</b>	<b>4</b>
<b>Глава 1. Современное состояние моделирования процессов лесных пожаров .....</b>	<b>12</b>
1.1. Проблемные вопросы и факторы, определяющие готовность лесной системы к ситуации наличия риска возгорания.....	12
1.2. Пожары Омских лесов.....	14
1.3. Анализ отечественных и зарубежных работ, посвященных вопросам моделирования лесных пожаров .....	19
1.4. Классификация математических моделей природных пожаров .....	22
1.5. Управление лесными пожарами .....	26
1.6. Постпожарное состояние лесной системы .....	29
<b>Глава 2. Методы моделирования и численные методы решения задач предупреждения лесных пожаров.....</b>	<b>31</b>
2.1. Метод оценки вероятности возникновения лесных пожаров .....	31
2.2. Марковские процессы, системы дифференциальных уравнений Колмогорова .....	33
2.3. Численный метод решения задачи для оценки готовности лесной системы к ситуации наличия риска возгорания .....	34
2.3.1. Постановка и решение задачи анализа готовности системы, находящейся в конфликтной ситуации .....	44
2.4. Постановка задачи и вычислительный (численный) метод решения задачи для вычисления количества лесных участков, находящихся в различных состояниях горения.....	53
2.5. Метод моделирования постпирогенных зон различной интенсивности пожара .....	56

<b>Глава 3. Комплексы программ и проверка их адекватности для расчета моделирования процессов лесных пожаров .....</b>	<b>64</b>
3.1. Программа для вычисления готовности конфликтующей системы .....	64
3.2. Расчеты для оценки готовности лесной системы к ситуации наличия риска возгорания .....	76
3.3. Программное приложение, визуализирующее расчёты постпожарной сукцессии мхов в заповеднике Утриш .....	82
3.4. Программа для вычисления количества лесных участков, находящихся в различных состояниях горения.....	91
<b>Заключение.....</b>	<b>99</b>
<b>Список использованных источников.....</b>	<b>101</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А.....</b>	<b>112</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....</b>	<b>116</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ В.....</b>	<b>118</b>

## Введение

**Актуальность диссертационной работы.** В настоящее время роль математического моделирования в процессе изучения лесных пожаров приобретает особое значение, так как антропогенное воздействие на лесные массивы увеличивается. Согласно Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации одним из актуальных направлений является возращание антропогенных нагрузок на окружающую среду до масштабов, угрожающих воспроизводству природных ресурсов, и связанный с их неэффективным использованием рост рисков для жизни и здоровья граждан.

Лесные пожары являются одним из природных и антропогенных факторов, которые могут существенно изменить состояние лесов, вплоть до их уничтожения, и нанести значительный экономический и социальный ущерб, приводя к возгоранию ферм, домов и различных сооружений, гибели животных и, в некоторых случаях, гибели людей от огня.

Для того чтобы потушить лесные пожары, нужно использовать большое количество средств и сил. Профилактические мероприятия являются одним из актуальных способов предупреждения условий возникновения лесных пожаров и, как следствие, устранения негативных постпожарных последствий.

Профилактика лесных пожаров играет очень важную роль, так как на ее основе планируются противопожарные мероприятия, а также количество используемых противопожарных ресурсов и оборудования.

Одной из главных причин гибели леса в Омской области являются пожары, а необходимость защиты лесов регулярно подчеркивается учеными еще с 20-го века.

Вопросами моделирования и изучением лесных пожаров занимались такие ученые как Н.П. Курбатский [27], Э.Н. Валендик [3,4], Л.А. Володченкова [2],

А.М. Гришин [15], Г.А. Доррер [61], R.R.Linn [78], W. Mell [67], D. Morvan [79] и другие ученые.

Валендик Э.Н. отмечала, что главным фактором возникновения лесных пожаров является антропогенный, так как большое количество таких пожаров происходит вблизи сельскохозяйственных палов, дорог, населенных пунктов и т.д.

Для оптимальной организации профилактических мероприятий, а также способов борьбы с лесными пожарами Львов П.Н. считает необходимым разделение больших территорий на части, по определенному признаку, например, по способу применения одинаковых профилактических мероприятий.

Доррер Г.А. в своих работах рассмотрел вопросы, связанные с математическим моделированием пространственной структуры слоев лесных горючих материалов, а также практическое применение таких моделей [22].

Моделирование лесных пожаров включает в себя их исследование на моделях реально существующих процессов с целью получения объяснений развития этих явлений, а также для прогноза ситуаций, интересующих исследователя.

**Объектом исследования** являются лесные пожары и способы их предупреждения. **Предмет исследования** – математические методы моделирования систем предупреждения лесных пожаров.

#### **Цель и задачи исследования.**

**Целью** диссертационного исследования является разработка новых математических методов моделирования систем предупреждения лесных пожаров на основе теории марковских процессов.

**Для достижения поставленной цели в диссертации необходимо решить следующие задачи:**

1. Предложить метод моделирования системы предупреждения лесных пожаров на основе теории марковских процессов.

2. Разработать вычислительный (численный) метод и алгоритм решения задачи для оценки (метод аналитической оценки) готовности лесной системы к риску возгорания.

3. На основе марковской модели сформулировать и решить задачу для вычисления количества лесных участков, находящихся в различных состояниях горения.

4. Разработать комплекс программ для расчета моделирования различных процессов лесных пожаров.

5. Провести численное решение и проверить адекватность разработанных программ.

**Научная новизна диссертационной работы** состоит в следующем:

1. Предложены математические методы моделирования и системы предупреждения лесных пожаров на основе теории марковских процессов.

2. Предложена формула вычисления степени готовности лесной системы к ситуации возникновения пожара.

3. Разработан комплекс программ, с помощью которого на основе данных Информационной системы дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ-Рослесхоз) можно планировать противопожарные мероприятия и заранее промоделировать возникающие проблемные ситуации.

4. Создано программное приложение вычисления времени постпожарной сукцессии растительности и вероятностей состояния участков леса различной интенсивности горения. Апробировано на примере заповедника Утриш на Черноморском побережье России.

**Практическая значимость работы** состоит в том, что предложенный метод моделирования и вычислительные алгоритмы могут использоваться при анализе и в практической деятельности, в рекомендациях при проведении противопожарных профилактических мероприятий, при разработке планов

тушения лесных пожаров, а также станут частью теоретической базы по изучению лесных пожаров. Практическая ценность и новизна подтверждаются также тем, что на основе изложенных методов разработан комплекс программ, позволяющий эффективно планировать противопожарные профилактические мероприятия в лесных массивах, заранее смоделировать проблемные ситуации, которые могут возникнуть.

Результаты диссертационного исследования использованы и внедрены в практическую деятельность следующих организаций:

- Главное управление лесного хозяйства Омской области;
- Отдел лесных отношений по Болотнинскому лесничеству (Новосибирская область);
- Учебный процесс ФГАОУ ВО Омского государственного университета им.Ф.М. Достоевского;
- Федеральный исследовательский центр «Субтропический научный центр Российской академии наук» (г. Сочи).

#### **Методы исследования.**

В работе применяются математические методы с использованием теории марковских процессов и теории графов, метод дискретизации (для решения уравнений Колмогорова-Чепмена), математическое и компьютерное моделирование.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Метод математического моделирования системы предупреждения лесных пожаров на основе теории марковских процессов.
2. Численные методы и алгоритмы вычисления количества лесных участков, находящихся в различных состояниях горения, используемые для минимизации возможности возникновения лесных пожаров, а также для моделирования противопожарной готовности лесных объектов.
3. Алгоритм моделирования способов предупреждения лесных пожаров,

позволяющий упорядочить выбор профилактических противопожарных мер, отличающийся от существующих возможностью проверки оценки степени готовности лесной системы к ситуации наличия риска возгорания леса.

4. Комплексы программ, реализующие алгоритмы для расчета моделирования процессов предупреждения лесных пожаров.

#### **Соответствие паспорту научной специальности.**

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» по следующим пунктам:

п.2 – Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий;

п. 3 – Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента;

п. 5 – Разработка новых математических методов и алгоритмов валидации математических моделей объектов на основе данных натурного эксперимента или на основе анализа математических моделей.

**Степень достоверности результатов.** Достоверность результатов подтверждается математически корректными выводами из анализа материалов, показывающих состояние лесов Омской области по данным Главного управления лесного хозяйства Омской области и других регионов, а также практической апробацией результатов исследования.

#### **Апробация результатов исследования.**

Основные результаты диссертационной работы были представлены и обсуждены на следующих научных конференциях:

– VI всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых с международным участием (Кемерово, 2014);

- 3-я научно-практическая internet-конференция «Междисциплинарные исследования в области математического моделирования и информатики» (Ульяновск, 2014);
- Россия молодая: передовые технологии – в промышленность (Омск, 2015);
- VI Международная конференция «Проблемы оптимизации и экономические приложения» (Омск, 2015);
- Всероссийская молодежная научно-практическая конференция «Информационные технологии в науке и производстве» (Омск, 2015);
- IV Всероссийская научная конференция «Омские научные чтения – 2020» (Омск, 2020);
- VIII Международная научная конференция, «Математическое и компьютерное моделирование», посвященная памяти А.Л. Иозефера (Омск, 2020);
- X Международная научная конференция «Математическое и компьютерное моделирование» (Омск, 2023).

**Публикации.** Основные теоретические и практические результаты диссертационного исследования изложены в 13 работах, в числе которых 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ, включенных в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук», 2 свидетельства о регистрации электронных ресурсов, 8 работ, опубликованных в сборниках материалов конференций и сборниках тезисов конференций различного уровня.

**Личный вклад автора.** Представленные в диссертационном исследовании и выносимые на защиту методы моделирования, разработанные численные (вычислительные) методы и комплекс программ принадлежат лично автору.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и трех приложений. Объем диссертации с

приложениями составляет 118 страниц, без приложений – 111 страниц. Диссертация содержит 11 таблиц и 43 рисунка. Список литературы включает 83 наименования.

**В первой главе «Современное состояние моделирования процессов лесных пожаров»** представлен анализ и проведен литературный обзор имеющихся на сегодняшний день отечественных и зарубежных работ, посвященных проблемным вопросам и факторам возникновения лесных пожаров. Рассмотрены вопросы экологического прогнозирования состояния лесов Омской области. Приводятся данные Главного управления лесного хозяйства Омской области, касающиеся лесных пожаров.

Дается характеристика основных категорий земель Омской области и типов леса на основании возможности распространения пожара.

Существующие на сегодняшний день показатели, лежащие в основе математического моделирования профилактики лесных пожаров, задаются на основе экспертной оценки с частичной научной основой. В работе вводится понятие «степень готовности лесной системы к пожару», которая рассчитывается в математических моделях и отражается в методах подготовки лесных фитоценозов к ситуациям возможности рисков возгорания.

**Вторая глава «Методы моделирования и численные методы решения задач предупреждения лесных пожаров»** посвящена построению моделей, численных (вычислительных) методов и алгоритмов решения задач, связанных с процессом предупреждения лесных пожаров. Основным методом исследования является теория марковских процессов.

Рассмотрена задача вычисления постпирогенных зон различной интенсивности пожара, дана постановка и метод решения задачи для вычисления количества лесных участков, находящихся в различных состояниях горения (горения, тления и прекращения пожара). Вычисления проводились с

использованием теории марковских процессов и применением дифференциальных уравнений Колмогорова.

**В третьей главе «Комплексы программ и проверка их адекватности для расчета процессов лесных пожаров»** описаны разработанные в рамках диссертационного исследования три программных приложения, реализующие основные методы исследования:

- программа для оценки готовности лесной системы к возгоранию;
- программа для вычисления количества лесных участков, находящихся в различных состояниях горения;
- программа для расчета сукцессии растительности постпирогенных зон различной интенсивности горения.

С помощью указанных вычислительных средств осуществлены соответствующие расчеты.

## **Глава 1. Современное состояние моделирования процессов лесных пожаров**

В первой главе представлен анализ и проведен литературный обзор имеющихся на сегодняшний день отечественных и зарубежных работ, посвященных проблемным вопросам и факторам возникновения лесных пожаров. Дается обзор экспериментальных исследований, проводимых на момент становления лесопирологической науки по настоящее время.

Приводятся данные Главного управления лесного хозяйства Омской области, касающиеся лесных пожаров.

### **1.1. Проблемные вопросы и факторы, определяющие готовность лесной системы к ситуации наличия риска возгорания**

Пуряева А.Ю. в своей работе отметила следующее: «Лес – это экологическая система, которая является одной из составляющих совокупности типов растений, таких как древесные, кустарниковые, травянистые, мхи и лишайники, а также животные и микроорганизмы, которые влияют друг на друга и являются биологически взаимосвязанными».

Лесной пожар является естественным элементом многих экосистем, а также стихийным бедствием, которое необходимо предотвратить. Беспрецедентное изменение климата и увеличение антропогенной нагрузки, приводящие к увеличению числа лесных пожаров и их негативных последствий, определяют необходимость моделирования и оценки риска возникновения пожарной опасности. Лесные пожары – это глобальная катастрофа. Такие пожары приводят к тяжелым последствиям не только в Омской области, но и в других регионах, где они угрожают населению, животным, жилым и промышленным объектам.

Ежегодно в России возникает от 10 до 40 тысяч лесных пожаров. Их

количество зависит от погодных условий, а площадь может достигать нескольких миллионов гектаров. Лесные пожары, возникающие в Омской области, угрожают специальным и экономическим объектам, способствуют повреждению органического слоя почвы и ее эрозии, загрязняют атмосферу и природные водоисточники продуктами сгорания. Именно лесные пожары наносят основной ущерб землям лесного фонда Российской Федерации. Наибольшее число пожаров происходят в регионах с высокой плотностью населения и развитой дорожной сетью. Крупные лесные пожары возникают здесь в засушливые периоды года и прежде всего в местах распространения сосновых насаждений, которые являются наиболее пожароопасными [19]. Возникновение и развитие лесных пожаров зависит как от состояния горючего материала древесины, лесного покрова и наличия источников огня, так и от погодных условий: температуры и влажности воздуха, количества выпавших дождей, ветрового режима, гроз [32].

Как отмечают специалисты, основной причиной возникновения природных пожаров является человеческий фактор. Согласно приведенной в открытых источниках статистике, в России 80 процентов пожаров, которые возникают в пожароопасное время года, происходят по вине человека.

В соответствии со статьями 51,53 Лесного кодекса Российской Федерации «леса подлежат охране от пожаров. Меры пожарной безопасности в лесах включают в себя:

- 1) предупреждение лесных пожаров;
- 2) мониторинг пожарной опасности в лесах и лесных пожаров;
- 3) разработку и утверждение планов тушения лесных пожаров;
- 4) иные меры пожарной безопасности в лесах» [28].

Противопожарная профилактика в лесах во многом определяет дальнейшее развитие пожарной обстановки и включает в себя три основные группы предупредительных профилактических мероприятий: предупреждение возникновения лесных пожаров, ограничение распространения лесных пожаров,

проведение организационно-технических и других мероприятий, обеспечивающих пожарную устойчивость лесного фонда. Предупреждение возникновения лесных пожаров включает в себя противопожарную пропаганду, разъяснительную и воспитательную работу, регулирование посещаемости лесов населением, а также лесную рекреацию (использование лесов для отдыха, спортивных мероприятий, туризма, экскурсий и т.п.). Контроль за соблюдением правил пожарной безопасности начинается заблаговременно с мероприятий противопожарной пропаганды.

Большое значение для усиления безопасности лесной территории имеет создание искусственных водоемов или обустройство имеющихся, так как вода является основным средством тушения лесных пожаров. Кроме того, юридические лица (предприятия, организации, учреждения) и граждане, ведущие рубку леса, обязаны, вне зависимости от способа и времени рубок, производить одновременно с заготовкой древесины очистку мест рубок от порубочных остатков. Способы очистки мест рубок указываются лесхозами в лесорубочных билетах.

## **1.2. Пожары Омских лесов**

Рассматривая в целом леса Омской области, можно отметить, что по пятибалльной шкале природной пожарной опасности, для них определен средний класс пожарной опасности 4, который характеризуется преобладанием лиственных деревьев (75,9% в общем балансе покрытых лесной растительностью земель).

Процент насаждений, характеризующихся наибольшей пожарной опасностью (1 и 3 классов пожарной опасности), составляет 10,8% общей площади лесничеств Омской области. Но для некоторых районов он более высок. Леса Большереченского, Васисского, Степного, Тевризского, Усть-Ишимского,

Крутинского лесничеств имеют наиболее высокую горимость по классам пожарной опасности. Наибольшая площадь, пройденная пожаром, наблюдается в Васисском, Твризском, Большеуковском лесничествах (рисунок 1).

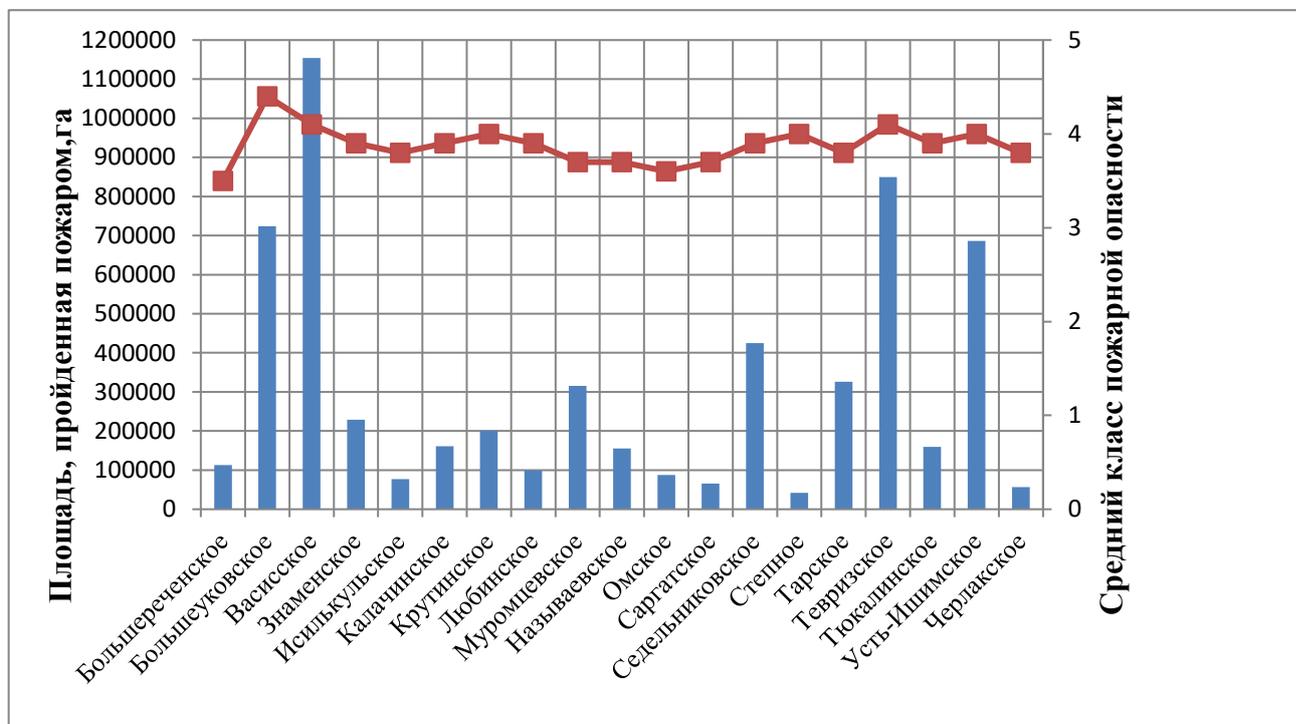


Рисунок 1 – Распределение площади лесного фонда по классам пожарной опасности

Степень пожарной опасности лесов оценивалась на основании классификации природной пожарной опасности лесов, утвержденной приказом Федерального агентства лесного хозяйства (Рослесхоз) от 5 июля 2011 года. № 287 «Об утверждении классификации природной пожарной опасности лесов и классификации пожарной опасности в лесах в зависимости от условий погоды».

Общая площадь лесов, погибших от пожаров на территории Омской области за период с 2017 г. по 2022 г. составляет 63935,11 га (рисунок 2). Максимальное количество пожаров произошло в 2021 г.<sup>1</sup>, их количество составляет 555 пожаров, а площадь 22988,72 га. В 70% случаев пожары

<sup>1</sup> - по данным Главного Управления лесного хозяйства Омской области

произошли по вине населения и в 30% случаев по причине сельскохозяйственных палов (рисунок 3). Такой показатель является одним из худших по Сибирскому Федеральному округу в 2020г. В 2022 году 50,6% всех пожаров возникло по причине неосторожного обращения с огнём местного населения, а по причине сельскохозяйственных палов – 43,5%.

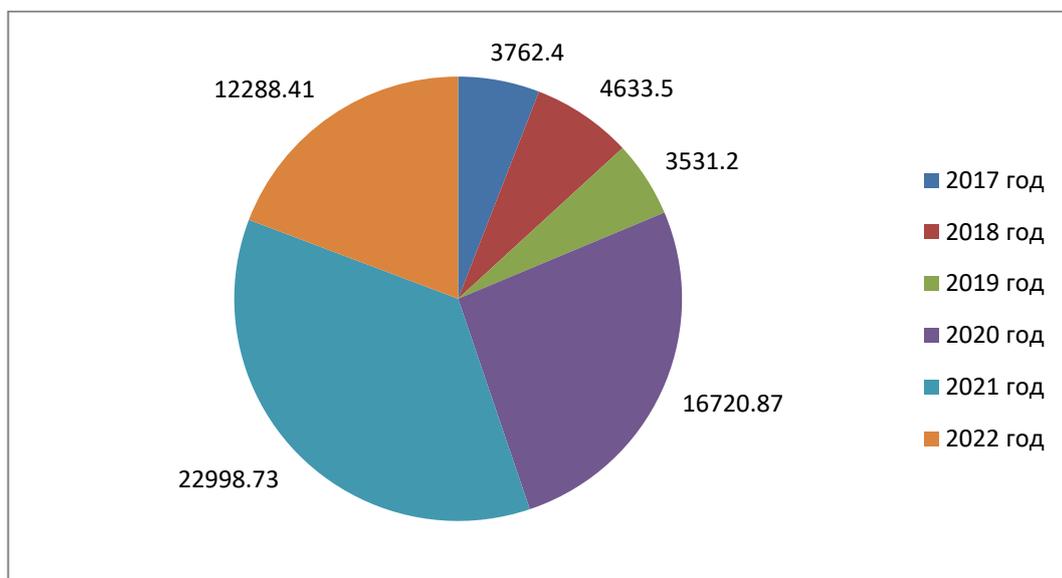


Рисунок 2 – Площадь лесов, погибших от пожаров за 2017 – 2022 г.г.

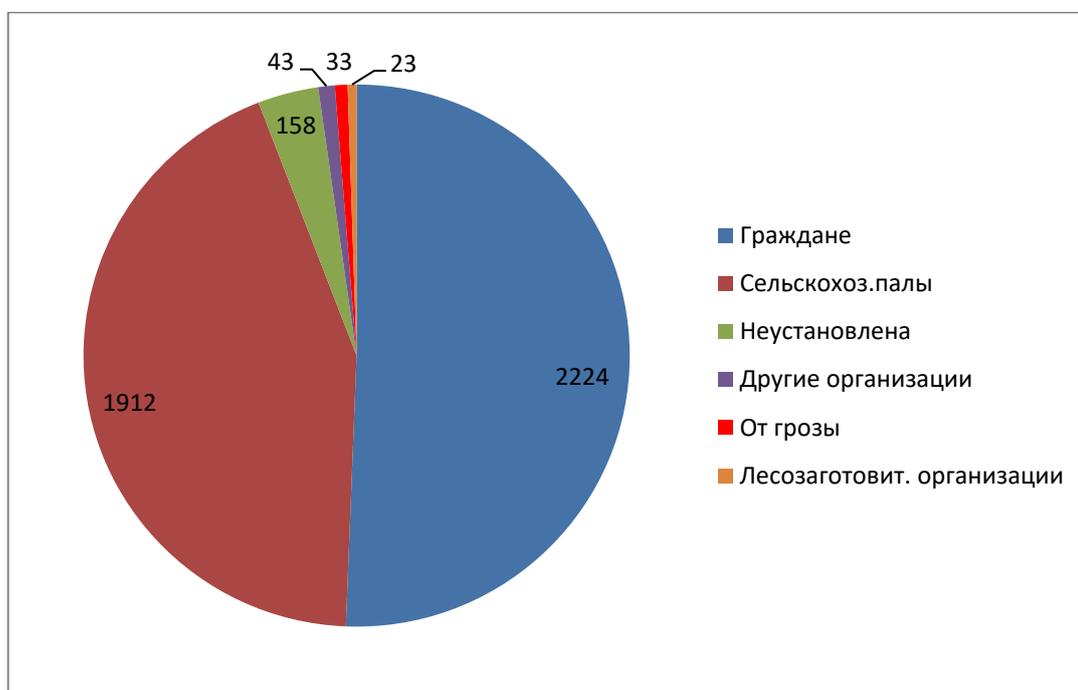


Рисунок 3 – Распределение количества лесных пожаров по причинам их возникновения

В 2014 году от пожаров сгорело 118421, 22 га лесной площади, количество пожаров за этот год – 539. За период с 2002 по 2022 год максимальное количество пожаров было зафиксировано в 2010 году (873 пожара).

Количество дней пожароопасного сезона за период с 2015 г. по 2022 г. отображено на рисунке 4. Согласно исследованию, максимальный пожароопасный сезон наблюдался в 2020 г, а минимальный в 2018 г.



Рисунок 4 – Количество дней пожароопасного сезона по исследованиям за 2015-22 гг.

Динамика горимости лесов по количеству лесных пожаров и площади, пройденной пожарами за период с 2002 по 2022 годы, приведена на рисунке 5.

Пожароопасный сезон наступает по мере таяния снега и просыхания поверхности почвы и напочвенного покрова. Он продолжается несколько месяцев и заканчивается только с приходом устойчивой дождливой погоды или установлением снежного покрова. Даты начала его могут изменяться в отдельные годы, иногда сезон начинается раньше, иногда позже.

Такая картина наблюдается и с окончанием пожароопасного сезона. Даты начала и окончания пожароопасного сезона устанавливаются приказом по

Главному управлению лесного хозяйства Омской области. Средняя продолжительность пожароопасного сезона за последние два года составляла 205 дней.

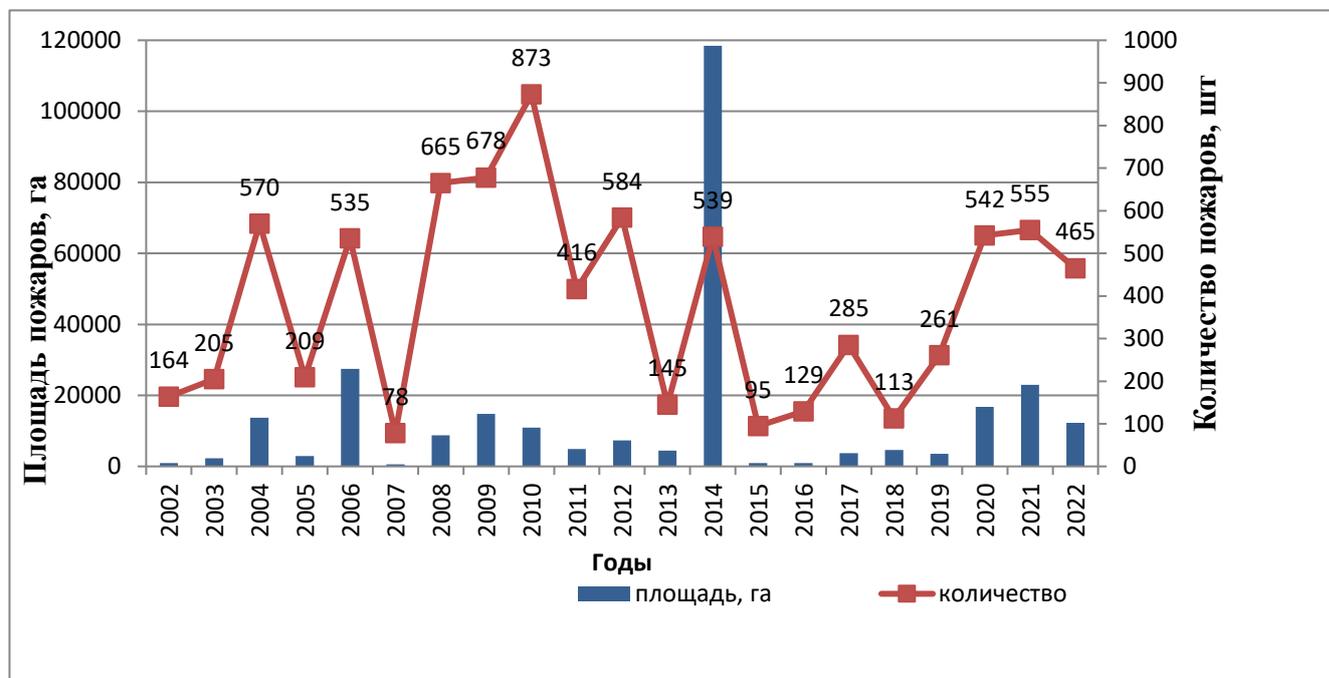


Рисунок 5 – Динамика горимости лесов за 2002 – 2022гг.

Всего за данный период было обнаружено и потушено 8106 лесных пожаров на площади 283199,5 га, из них крупных лесных пожаров – 2037. Наиболее сильно пострадал от лесных пожаров лесной фонд Омской области в 2006, 2014 и 2021 годах. Общая площадь, пройденная пожарами составила 68%. В большей степени это связано с погодными условиями и увеличением рекреационной нагрузки на леса. В среднем в год (за десятилетний период) возникало 439 лесных пожаров на площади 8725,4 га.

В таблице 1 представлены показатели продолжительности периода горимости по лесничествам Омской области. Наибольшее число пожаров выявлено в Омском лесничестве, а наименьшее – в Васисском лесничестве.

Таблица 1 – Показатели горимости за 10 лет

Лесничество	Площадь лесничества, га	Число пожаров, шт.	Общая площадь, пройденная пожарами, га	Относительная горимость			
				По числу случаев на 1млн. га	класс горимости	По площади на 1тыс. га	класс горимости
Большереченское	113323	301	12515,0	266	1	11,04	1
Большеуковское	723609	231	6401,6	32	4	0,88	2
Васисское	1154502	11	80,7	1	5	0,01	5
Знаменское	228555	91	4218,4	40	4	1,85	1
Исилькульское	77374	26	501,0	34	4	0,65	2
Калачинское	161137	255	3258,7	158	2	2,02	1
Кругинское	201083	160	2265,9	80	3	1,13	1
Любинское	99166	304	4541,6	307	1	4,58	1
Муромцевское	315725	262	12919,7	83	3	4,09	1
Называевское	155458	232	2710,8	149	2	1,74	1
Омское	87567	731	6781,6	835	1	7,74	1
Саргатское	65268	443	6896,6	679	1	10,57	1
Седельниковское	424878	21	341,8	5	4	0,08	4
Степное	41542	195	1135,9	469	1	2,73	1
Тарское	325885	383	9371,9	118	2	2,88	1
Тевризское	849759	56	991,9	7	4	0,12	4
Тюкалинское	159127	284	7684,6	178	2	4,83	1
Усть-Ишимское	685960	64	1443,1	9	4	0,21	3
Черлакское	56659	343	3192,9	605	1	5,64	1
Всего	5926577	4393	87253,7	74	3	1,47	1

### 1.3. Анализ отечественных и зарубежных работ, посвященных вопросам моделирования лесных пожаров

Лесные пожары – это повторяющиеся природные явления, частота и серьезность которых в последние десятилетия возрастают. Они угрожают жизни людей и наносят ущерб экосистемам и инфраструктуре, что приводит к высоким затратам на восстановление. Для решения проблемы лесных пожаров необходимо управлять рядом мероприятий и координировать их, чтобы разработать

подходящие меры реагирования, которые были бы одновременно эффективными и доступными [18]. Сюда входят действия, предпринятые до (смягчение последствий, предотвращение и готовность), во время (реагирование) и после события (восстановление).

Проблема возникновения лесных пожаров, которые причиняют огромный ущерб и оказывают негативное влияние на здоровье человека, а также приводят к уничтожению жилья и даже к гибели людей, общеизвестна и с давних пор волнует человечество.

Одной из первых работ, которая раскрывает экспериментальные основы изучения распространения пожара, считается работа Aversani P [70], выполненная в 1919 году. Hayes, G.L. впервые рассмотрел оценки основных факторов, которые влияют на процесс лесных пожаров с теоретической точки зрения [76].

Разработанные Нестеровым В.Г. и Курбатским Н.П. научные основы построения местных шкал пожарной опасности в лесах явились серьезным достижением в направлении исследования природы лесных пожаров.

Ученые Curry J., Fons W. [72] в 1940-х годах провели первые экспериментально-аналитические исследования пожаров в лесу с точки зрения физики пожара и разработали математическую модель прогнозирования скорости его распространения.

Канадский исследователь Байрам Дж. в 1956г. предложил следующее уравнение, которое вычисляет интенсивность лесного пожара:

$$I = HwR, \quad (1)$$

где  $I$  – интенсивность пожара, кВт/м,

$H$  – теплота сгорания топлива, кДж/кг,

$w$  – масса топлива, потребляемого на единицу площади, кг/м<sup>2</sup>,

$R$  – скорость распространения фронта пожара, м/сек [65,71].

Спустя 10 лет уравнение Байрама стало популярным среди ученых, занимающихся вопросами лесных пожаров, его стали использовать для решения задач, связанных с прогнозированием пожаров.

Математическому моделированию лесных пожаров посвящено большое количество работ Гришина А.М., которые использовались для прогнозирования экологических катастроф, Барановского Н.В. для прогноза сценариев и условий возникновения лесных пожаров. Проблемой развития и распространения лесных пожаров занимались Гусев В.Т., Волокитина, Комяк В.А. Так, например, Гусев В.Т. предложил новый метод оценки минимального расстояния от опорной полосы до кромки пожара при пуске отжига [39].

Вдовенко М.С. была предложена вычислительная технология моделирования процесса распространения лесного пожара на основе параллельных алгоритмов, использующая математическую модель данного процесса и геометрическую декомпозицию расчётной области [5].

Телицын Г.П.[17] и Шешуков Г.Н.[66] в своих работах рассмотрели опыт компьютерного моделирования процесса распространения и тушения лесных пожаров. Доррер Г.А. и его ученики изучили моделирование пространственной структуры слоев лесных горючих материалов и практического применения этих моделей [61]. Общие математические модели лесных и торфяных пожаров предложены Гришиным [13,14].

Ученый Перминов В.А. предложил численное решение задачи о возникновении верхового пожара в трехмерной постановке [40].

С 70-х годов XX века зарубежные ученые Альбини [68], Р.Ротермел [80], Портерье [73], Вильсон, Фрадсен [75] в своих работах исследовали причины возникновения и распространения природных пожаров. Результатами их работ стали новые математические модели лесных пожаров. Данные модели относились к классу полуэмпирических, поэтому не являлись универсальными. Эта

особенность стала их существенным недостатком, так как в основе изучения любого математического процесса лежат экспериментальные вычисления.

К настоящему времени благодаря работе отечественных и зарубежных исследователей накоплен значительный объем знаний как теоретического, так и прикладного характера по всем основным направлениям лесной пирологии. Однако проблема лесных пожаров остается для Российской Федерации чрезвычайно актуальной. Для её успешного решения требуется дальнейшее совершенствование методов охраны лесов от пожаров.

#### **1.4. Классификация математических моделей природных пожаров**

Проблема математического моделирования природных пожаров имеет свою специфику. Она вызвана, во-первых, тесной связью процессов горения природных пожарах со строением и состоянием лесных биогеоценозов. Во-вторых, процессы возникновения, распространения и развития природных пожаров происходят на значительных площадях, часто в течение длительного времени и зависят от большого числа факторов, зачастую трудно определяемых и подверженных случайным возмущениям. Поэтому весьма существенным является вопрос о необходимом уровне детализации при описании этого объекта. Любая модель беднее описываемого объекта, и решение вопроса о необходимой степени адекватности ее реальному объекту зависит от комплекса предъявляемых к ней требований, определяемых в свою очередь назначением и предполагаемым использованием модели. Поэтому речь должна идти не об отдельных моделях пожаров, а об их системе [65].

Основные цели математического моделирования природных пожаров следующие:

1. Понимание процессов, происходящих при лесном пожаре.
2. Прогнозирование распространения и развития лесного пожара.

3. Управление борьбой с лесными пожарами.

4. Обучение персонала [65].

Проанализировав работы ученых, нужно отметить, что математические модели лесных пожаров по уровню принятия решения подразделяются на следующие стадии:

Начальная стадия – рассматривается процесс моделирования горения горючих материалов, их физико-химические свойства.

Вторая стадия – производится оперативно-тактическое моделирование, которое заключается в определении развития пожаров на неоднородной лесной территории с прогнозом их контуров и ряда характеристик, необходимых для организации тушения.

Третья стадия – стратегическое моделирование, где пожары рассматриваются как события в системе охраны леса.

Главы 2 и 3 диссертационной работы посвящены третьей стадии математического моделирования, а именно предупреждению лесных пожаров.

После изучения работ зарубежных и отечественных ученых, приведем классификацию математических моделей лесных пожаров (рисунок б).

Первый классификационный признак определяется в зависимости от характера математических уравнений.

1. Теоретические модели. Созданы на основе законов, управляющих механикой жидкости, горением и теплопередачей. Валидация таких моделей чрезвычайно сложна, хотя их можно экстраполировать на самые разнообразные пожарные ситуации.

2. Эмпирические модели. Состоят из статистических корреляций, полученных в результате экспериментов или исторических исследований лесных пожаров. Они применимы только к системам, в которых условия идентичны тем, которые использовались при формулировании и тестировании моделей.

Теоретические и эмпирические модели в объединении представляют другой вид моделей – аналитические. Значимым примером такого вида модели является аэротермохимическая модель лесного пожара, предложенная в 80-е годы А.М.Гришиным [65]. Модель содержит большое количество уравнений и дополнительных условий, которые описывают фазовые и химические превращения при горении, а кроме этого, движение газовых потоков, вызванное этими процессами.



Рисунок 6 – Классификация математических моделей лесных пожаров

Долгое время эта модель не была реализована в полном виде из-за больших вычислительных сложностей, связанных с расчетом трехмерных взаимосвязанных процессов тепло- и массообмена в сочетании с химическими реакциями. Тем не менее, на основе этой модели решено множество частных задач, например, двумерная модель распространения верховых пожаров (В.А. Перминов) [41], расчет теплового взаимодействия пожара с деревянными строениями (А. Фильков) [62] и ряд других.

3. Полуэмпирические модели. Предлагаются на основе простых, общих и

теоретических выражений и дополняются экспериментально. Их экстраполяция адекватна в ситуациях, аналогичных тем, которые используются при получении экспериментальных данных. Трудность проверки этих моделей меньше, чем теоретического моделирования, хотя и значительна.

Второй классификационный признак определяется в зависимости от динамики лесных пожаров.

Выделяют два вида моделей: экспериментально-аналитические и экспериментально-статистические. Минусом таких моделей является то, что в них используются данные, которые задаются экспериментом, соответственно нет возможности дать полную характеристику процессам развития пожара.

Примером экспериментально-аналитической модели послужила модель зарубежного ученого Ротермела [80], разработанная в 1972 году. В основу математической модели легли расчеты скорости горения, которые выполняются при помощи уравнений сохранения энергии, полученные исследователем Франдсеном [74].

Примером экспериментально-статистической модели является модель, предложенная Г. А. Амосовым [1]. Он предложил в качестве экспериментальных данных о пожаре использовать пламенное и беспламенное горение в лесу.

Из приведенного обзора и классификации математического моделирования лесных пожаров, становится ясным, что в настоящее время существует огромное количество работ, которые посвящены вопросам моделирования пожаров, а именно их распространению. Во второй главе диссертационной работы описаны, разработанные нами методы моделирования предупреждения лесных пожаров, при помощи которых нетрудно определить готовность лесной системы к ситуации наличия риска возгорания.

## 1.5. Управление лесными пожарами

Управление лесными пожарами представляет собой действия широкого спектра. Если мы будем иметь представление о том, насколько сложным является лесной пожар как природное явление, то придем к следующему выводу: данные действия не ограничены только реактивными мерами, примером которых могут быть тушение пожара. Деятельность управления лесными пожарами должна начинаться на более ранних этапах и включать такие пункты, как умышленное выжигание лесной подстилки с целью предупреждения лесного пожара, уведомление населения в вопросах пожарной безопасности и т.д. Управление лесными пожарами должно рассматриваться как часть комплексной стратегии экологического управления, целью которого является рациональное использование природных ресурсов для улучшения качества человеческой жизни.

Жарикова М.В. в своей научной работе дает следующее определение «управление лесными пожарами – это совокупность действий, направленных на уменьшение влияния лесных пожаров на природные ресурсы, экосистемы, а также окружающую среду в соответствии с целями организации, осуществляющей управление. Управление лесными пожарами включает в себя традиционные действия по контролю за пожароопасной обстановкой (выявление, подавление огня и т.д.), а также более сложные действия (выжигание, управление ЛГМ и т.д.)».

Успех тушения лесных пожаров напрямую зависит от того, насколько эффективная работа проведена по пожарной профилактике, от возможности выявления пожара на ранней стадии, а также какие подготовительные работы выполнены для успешной ликвидации пожара.

В зависимости от того на какой стадии (до, во время или после пожара) будут выполняться действия, связанные с управлением лесными пожарами, их подразделяют на следующие три группы:

- 1) предупреждение;
- 2) тушение;
- 3) предотвращение последствий.

**Предупреждение (профилактика) пожаров** включает в себя совокупность мероприятий, направленных на предупреждение возникновения пожаров и на создание условий для их оперативного тушения.

Профилактические противопожарные мероприятия подразделяются на две основные группы:

1. Мероприятия по предупреждению возникновения лесных пожаров и контролю за соблюдением правил пожарной безопасности в лесах.
2. Мероприятия, направленные на предупреждение распространения лесных пожаров.

Первая группа мероприятий связана с предупреждением незапланированных возгораний, которое зависит от четкой идентификации причин и обстоятельств. Причины могут быть природные или антропогенные [63].

Природные причины, в отличие от антропогенных, являются трудно контролируемы. Антропогенные причины возгораний могут быть частично устранены с помощью информирования населения, которое осуществляется путем разъяснения правил пожарной безопасности (лекции, плакаты, публикации, выступления по радио и телевидению), а также принятия соответствующих законов, направленных на сохранение лесов. Информирование является попыткой повысить осведомленность и знания населения, особенно отдельных групп, непосредственно связанных с лесным хозяйством, например, фермеров. Поведение граждан также можно регулировать с помощью соответствующего законодательства.

Вторая группа мероприятий связана с предупреждением распространения пожара, которое может быть осуществлено путем управления лесными горючими

материалами. Управление лесными горючими материалами представляет собой набор действий, направленных на регулирование воспламеняемости природных горючих материалов посредством механических, химических, биологических и ручных средств, а также с помощью преднамеренных выжиганий для обеспечения задач землепользования. Предотвращение чрезмерного накопления топлива (уменьшение его количества) может быть осуществлено с помощью физического удаления топлива путем трудоемкой ручной работы или с помощью выжигания.

**Тушение пожара** – это вся деятельность, связанная с ликвидацией пожара после его обнаружения. В настоящее время, несмотря на модернизацию огнетушащей техники и развитие новых методов борьбы с огнем, тушение пожара все еще остается трудоемкой задачей, требующей большого количества ручной работы. Успешное тушение пожара напрямую связано с своевременным его обнаружением и эффективным начальным тушением, что позволяет локализовать пожар раньше, чем он станет неконтролируемым. Своевременное обнаружение пожаров достигается путем усиления наблюдения, которое в самом простейшем виде представляет собой патрулирование [63].

**Предотвращение** последствий лесных пожаров в основном происходит за счет экономической поддержки государства, частных лиц и т.д. Если последствия незначительны, то на помощь могут прийти частные лица. В случае более серьезных последствий, как правило, используются государственные фонды. Одним из основных мероприятий по предотвращению последствий лесных пожаров является лесовосстановление, под которым понимают выращивание лесов на территориях, подвергшихся пожарам. Лесовосстановление применяется для создания новых лесов или улучшения состава древесных пород в уже существующих. Есть два основных способа лесовосстановительных работ: посадка или посев леса (искусственный способ) и содействие естественному возобновлению (создание условий для быстрого заселения ценными древесными породами).

Очевидно, что может произойти ситуация, когда те или иные мероприятия, направленные на предупреждение, тушение или предотвращения пожаров, не приносят результата. Любые действия могут быть не выполнены по вине людей или той или иной организации. В таком случае называем это отказом системы защиты леса от пожара. В работе будем рассматривать процесс подготовки лесного фитоценоза к существованию в ситуации угрозы пожара в предположении, что возможности лесных хозяйств имеют конечную надежность – отсюда отказы, а люди, выполняющие как противопожарные, так и восстановительные работы по завершению противопожарного мероприятия абсолютно надежны [8].

Введем понятие степени готовности лесной системы к пожару. Под **степенью готовности лесной системы** будем понимать вероятность того, что система окажется в состоянии подготовки к противостоянию пожарам или возобновлению мероприятия в случае отказа соответствующего компонента.

Данная величина будет вычислена нами во второй главе диссертационной работы в математических моделях и методах подготовки лесных фитоценозов к ситуациям наличия рисков возгорания.

## 1.6. Постпожарное состояние лесной системы

После пожара лес может занять два совершенно различных равновесных состояния. Рассмотрим примеры состояния лесов после пожара.

Исследования ряда лесов показывают, что не всегда наблюдается удовлетворительное лесовосстановление.

Например, исследования Захарова А.А., Горбунова И.В. показали, что «удовлетворительная густота и состояние подроста кедра зависят в основном от формирующегося после пожара типа леса. Недостаточно подроста в лишайниковом, бадановом и рододендроновом типах кедрового леса. Лучшее

формирование постпирогенных кедровников на хребтах Малханский, Черский и Даурский отмечено в зеленомошных и брусничниковых типах леса» [23].

Авторы этой работы предполагают, что именно пирогенный фактор играет главную роль в групповом размещении древесных пород. Известно, что одиночный подрост сильнее страдает от малоинтенсивных пожаров, чем групповой [60]. «В группах подроста снег сходит позднее, а подстилка и травянистая мортмасса высыхают медленнее, вследствие чего при весенних палах огонь обходит эти участки. Кроме того, многократное обгорание и мозаичное выгорание травяного покрова изменяет его состав и горизонтальную структуру, что также влияет на прорастание семян и развитие всходов» [2].

В монографии [7], основываясь на исследованиях среднетаежных лиственничников Красноярского края, говорится, что важным фактором, определяющим возможность существования лесов, являются лесные пожары.

Таким образом, наблюдения лесов после пожаров доказывают, что состояние восстановленного леса после пожара не является однозначно определенным: возможны качественно различные новые равновесные состояния. Какое именно состояние, какой лес будет произростать на месте пожара? На это влияют самые разнообразные случайные факторы.

## **Глава 2. Методы моделирования и численные методы решения задач предупреждения лесных пожаров**

Во второй главе диссертационной работы ставится задача создания численных методов, алгоритмов решения и математических моделей смены состояний лесных систем, которые можно использовать для составления плана профилактических противопожарных мероприятий в лесу, а также прогнозирования вероятности возникновения пожаров. Предложенные модели помогут дать ответы на следующие вопросы: как распространяются лесные пожары, оценивается готовность лесной системы к риску возгорания, определяются постпирогенные зоны различной интенсивности пожара.

### **2.1. Метод оценки вероятности возникновения лесных пожаров**

В 40-х годах 20 века В.Г. Нестеровым была разработана и официально принята шкала, которая использовалась для вычисления горимости леса. Согласно предложенному методу выделяют 5 классов пожарной опасности.

Комплексный показатель В.Г. Нестерова [36] отражает баланс иссушающих и увлажняющих факторов и вычисляется на основе данных о температуре воздуха (в градусах), температуре точки росы (в градусах), количестве выпавших осадков (в миллиметрах).

Необходимыми данными, которые, используются для вычисления комплексного показателя пожарной опасности в лесу по условиям погоды являются:

- температура воздуха и точка росы (в градусах) на 12 часов по местному времени;
- количество выпавших осадков (в миллиметрах) за предыдущие сутки.

Для определения температуры воздуха используется сухой термометр психрометра, а для определения температуры точки росы – психрометрические таблицы на основании отсчетов по сухому и смоченному термометрам. Чтобы определить количество выпавших осадков используется осадкомер. Точность измерения количества осадков составляет 0,5 мм, а температуры воздуха и точки росы – с точностью до 0,1°С.

Для оценки пожарной опасности в лесу будем использовать формулу комплексного показателя текущего дня, предложенную В.Г. Нестеровым:

$$\text{ППО} = \sum_{j=1}^n t_j(t_j - r_j). \quad (2)$$

Здесь

$t$  – температура воздуха  $j$ -ого дня,

$r$  – температура точки росы  $j$ -ого дня,

$j=1$  – день, когда был дождь,  $j=2, \dots, n$  – дни без осадков,

$n$  – число дней после последнего дождя.

Шкаловая оценка пожарной опасности является универсальной и имеет пять классов пожарной опасности в лесу по условиям погоды (таблица 2).

Таблица 2 - Шкала пожарной опасности в лесу по условиям погоды

<b>Класс пожарной опасности</b>	<b>Величина показателя пожарной опасности (в С)</b>	<b>Степень пожарной опасности</b>
I	1-300	очень малая
II	301-1000	малая
III	1001-4000	средняя
IV	4001-12000	высокая
V	>12000	чрезвычайная

## 2.2. Марковские процессы, системы дифференциальных уравнений Колмогорова

Основным методом диссертационного исследования является теория марковских процессов. В данном параграфе дано описание марковских процессов и систем дифференциальных уравнений Колмогорова.

Марковским процессом называется случайный процесс, который протекает в системе  $S$  и обладает следующим свойством: для каждого момента времени  $t_0$ , вероятность любого состояния в будущем (при  $t > t_0$ ) зависит только от ее состояния в настоящем (при  $t = t_0$ ) и не зависит от того, когда и каким образом система пришла в это состояние (т.е. как развивался процесс в прошлом).

С учетом непрерывности времени, наиболее подходящими из всех типов марковских процессов будут являться марковские случайные процессы с дискретными состояниями и непрерывным временем. В марковской модели исходные параметры – это интенсивности, или силы перехода из состояния в состояние.

Для описания марковских процессов в диссертационной работе используются системы дифференциальных уравнений Колмогорова для вероятностей состояний.

Для построения структуры уравнений Колмогорова используется следующий алгоритм: левая часть каждого уравнения является производной вероятности состояния, а правая часть содержит такое количество членов, сколько стрелок связано с данным состоянием. Соответствующий член будет иметь знак «плюс», если стрелка направлена в состояние, и знак «минус», если направлена из состояния. Каждый член равен произведению плотности вероятности перехода, соответствующий данной стрелке, умноженной на вероятность того состояния, из которого исходит стрелка.

### **2.3. Численный метод решения задачи для оценки готовности лесной системы к ситуации наличия риска возгорания**

Главное управление лесного хозяйства по Омской области регулярно проводит противопожарные мероприятия на землях лесного фонда, основной задачей которых являются охрана лесов от пожаров.

Согласно данным лесничеств Омской области объектами противопожарного обустройства лесов являются лесные дороги, предназначенные для охраны лесов от пожаров, просеки, противопожарные разрывы, противопожарные минерализованные полосы, пожарные водоёмы и подъезды к источникам противопожарного водоснабжения, пожарно-наблюдательные пункты, противопожарные аншлаги, места отдыха и курения. В таблице 3 приведены существующие объекты противопожарного обустройства лесов для каждого лесничества Омской области.

Будем считать, что противопожарные мероприятия являются шагами  $i = 1, 2, \dots, n$  в процессе подготовки лесного фитоценоза к противостоянию пожару. Любой из указанных шагов может не выполняться по вине людей или той или иной организации. Под организациями будем подразумевать лесные хозяйства, которые могут ошибаться, давать сбой и даже отказывать, а их возможности имеют конечную надежность.

Будем рассматривать процесс подготовки лесного фитоценоза к существованию в ситуации угрозы пожара в предположении, что возможности лесных хозяйств имеет конечную надежность – отсюда отказы, а люди, выполняющие противопожарные работы, так и восстановительные работы по завершению противопожарного мероприятия абсолютно надежны [8].

Таблица 3 – Противопожарное обустройство лесов Омской области

Наименование лесничества	Лесные дороги, предназначенные для охраны лесов от пожаров, км	Просеки шириной 4 м, км	Противопожарные разрывы шириной 10-30 м, км	Противопожарные минерализованные полосы, км	Пожарно-наблюдательные пункты, шт	Пожарные водоемы и подъезды к ним, шт	Противопожарные аншлаги, шт	Места отдыха и курения, шт
Большереченское	12,0	-	-	735,0	6	-	65	15
Большешуковское	9,0	-	-	614,5	-	-	-	-
Васисское	15,0	-	-	173,0	-	-	-	-
Знаменское	12,0	-	-	273,0	1	-	39	22
Исилькульское	17,0	-	-	995,1	-	7	59	22
Калачинское	10,0	-	-	911,5	2	-	76	16
Крутинское	12,0	-	-	555,1	-	13	39	14
Любинское	-	-	-	7,0	2	31	90	9
Муромцевское	57,0	-	-	1130,5	1	-	112	14
Называевское	3,0	-	-	1094,5	1	-	48	27
Омское	40,0	-	-	-	9	-	202	56
Саргатское	7,0	-	-	711,0	2	-	42	13
Седельниковское	10,0	-	-	453,5	-	0	40	16
Степное	2,0	-	-	-	-	23	40	16
Тарское	10,0	-	-	943,2	-	6	60	8
Тевризское	11,0	-	-	329,0	-	9	40	16
Тюкалинское	9,0	-	-	695,0	2	64	80	23
Усть-Ишимское	9,8	-	-	367,0	-	-	30	14
Черлакское	9,0	-	-	657,0	2	-	66	22
<b>Всего по области</b>	<b>254,8</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>10644,9</b>	<b>28</b>	<b>162</b>	<b>1128</b>	<b>323</b>

Пусть имеем три стадии готовности лесной системы к пожару и обозначим их как  $S_0, S_1, S_2$ .

$S_i (i = 0, 1, 2)$  – состояние лесного фитоценоза на  $i$ -м шаге процесса подготовки к противостоянию пожарам («подготовки к работе»);

$\mu_i = \text{const} (i = 0, 1)$  – интенсивность выполнения  $i$ -й операции подготовки к противостоянию леса пожарам;

$S_{ij} (i = 0, 1; j = 1, 2)$  – состояние лесного фитоценоза на  $i$ -м шаге работ в случае отказа и соответственно возобновления мероприятия с последующим переходом к шагу  $j$ ;

$\lambda$  – интенсивность отказов подразделений системы подготовки к работе;

$\mu$  – интенсивность возобновления мероприятия после отказа [8].

Аппроксимируя поведение состояния лесного фитоценоза марковским случайным процессом с конечным числом состояний и учитывая сделанные предположения и обозначения, составим иллюстрацию возможных переходов между состояниями системы, которая может быть описана графом переходов, изображённом на рисунке 7.

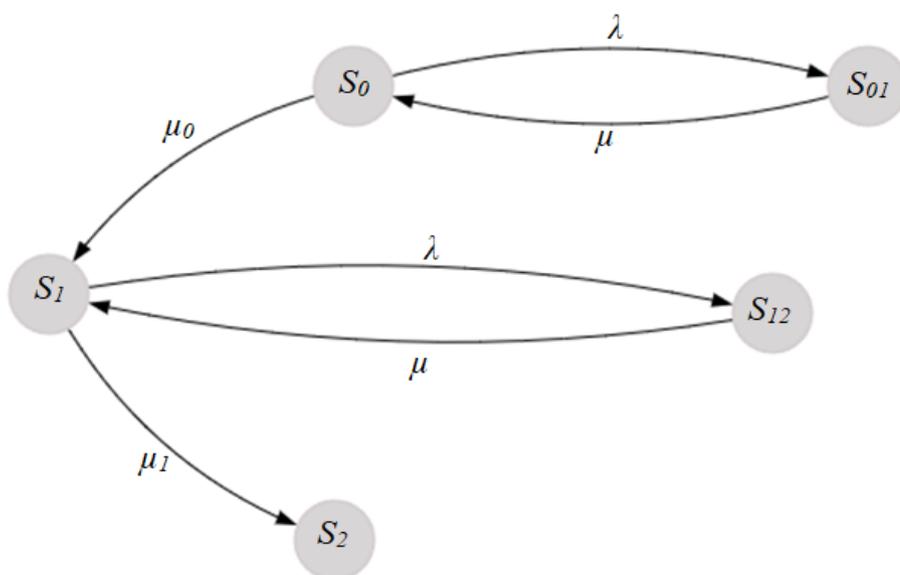


Рисунок 7 – Граф состояний системы

Обозначим  $p_i(t)$  – вероятность нахождения лесной системы в состоянии

$S_i (i = 0, 1, 2)$  и  $p_{ij}(t)$  – вероятность нахождения системы в состоянии  $S_{ij} (i = 0, 1; j = 1, 2)$ .

Тогда система подготовки к противостоянию пожарам описывается дифференциальными уравнениями Колмогорова

$$p'_0 = \mu p_{01}(t) - (\mu_0 + \lambda)p_0(t), \quad (3)$$

$$p'_1 = \mu_0 p_0(t) - \mu_1 p_1(t), \quad (4)$$

$$p'_2 = \mu_1 p_1(t), \quad (5)$$

$$p'_{01} = \lambda p_0(t) - \mu p_{01}(t), \quad (6)$$

$$p'_{12} = \lambda p_1(t) - \mu p_{12}(t). \quad (7)$$

$$\sum_0^2 p_i + p_{01} + p_{12} = 1. \quad (8)$$

Уравнения (3-8) решаем при начальных данных

$$p_0(0) = 1; p_{01} = p_{12} = p_1(0) = p_2(0) = 0.$$

Введем коэффициент готовности леса к ситуации наличия риска пожара:

$$\Gamma(t) = 1 - \sum_0^1 p_i(t) - \sum_0^1 \sum_1^2 p_{ij}(t). \quad (9)$$

Значение интенсивности выполнения  $i$ -й операции подготовки к противостоянию леса пожарам  $\mu_i$  будет задаваться по формуле:

$$\mu_i = Pr K, \quad (10)$$

где  $Pr$  является единым коэффициентом противопожарных мер и зависит от противопожарных мероприятий характерных для Омской области,  $K$  - класс пожарной опасности (горимости).

Согласно Лесному плану Омской области (с изменениями на 22 декабря 2022 года) по статистике за 2008-2018 гг. были запланированы следующие противопожарные мероприятия: устройство противопожарных минерализованных полос; обновление противопожарных минерализованных полос; строительство лесных дорог, предназначенных для охраны лесов от пожаров; реконструкция и содержание лесных дорог, предназначенных для охраны лесов от пожаров; заключение договоров (соглашений) с органами исполнительной власти; опубликование статей в печати; проведение бесед; организация выступлений по радио и телевидению; благоустройство зон отдыха граждан, пребывающих в лесах; установка и размещение стендов и других знаков и указателей, содержащих информацию о мерах пожарной безопасности в лесах; проведение профилактического контролируемого противопожарного выжигания хвороста, лесной подстилки, сухой травы и других лесных горючих материалов [59].

В соответствии с распоряжением Главного управления лесного хозяйства Омской области от 03.11.2011 года № 267-р «О распределении земель лесного фонда, расположенных на территории Омской области, по способам осуществления мониторинга пожарной опасности и выделении района применения авиационных сил и средств в зоне авиационной охраны лесов» вся территория области разделена на районы наземной и авиационной охраны лесов. Указанные виды охраны лесов также будем учитывать для численных расчетов [59].

Сгруппируем перечисленные выше мероприятия и представим в виде таблицы 4, в соответствии с объемом их выполнения за 2008-2018 гг., согласно статистическим данным, предоставленным Главным управлением лесного хозяйства по Омской области.

Основными способами обнаружения лесных пожаров на территории Омской области являются зона наземного мониторинга (5,8%), зона авиационного мониторинга (94,2%).

Таблица 4 – Противопожарные мероприятия в лесах Омской области

Укрупненное мероприятие	Профилактические мероприятия	Объем выполнения
Противопожарное обустройство лесов	Устройство противопожарных минерализованных полос.	7836 км
	Обновление противопожарных минерализованных полос.	22500 км
	Строительство лесных дорог, предназначенных для охраны лесов от пожаров.	0 км
	Реконструкция и содержание лесных дорог, предназначенных для охраны лесов от пожаров.	426 км
	Проведение профилактического контролируемого противопожарного выжигания хвороста, лесной подстилки, сухой травы и других лесных горючих материалов.	27600 га
Пропаганда охраны лесов среди населения	Заключение договоров (соглашений) с органами исполнительной власти.	90 шт
	Опубликование статей в печати.	60 шт
	Проведение бесед.	12342 шт
	Организация выступлений по радио и телевидению.	48 шт
	Благоустройство зон отдыха граждан, пребывающих в лесах.	426 шт
	Установка и размещение стендов и других знаков и указателей, содержащих информацию о мерах пожарной безопасности в лесах.	1500 шт
Авиапатрулирование		45000 га
Наземная охрана		1859 км

Наземное маршрутное патрулирование проводится на участках наиболее опасных в пожарном отношении, а также на территории, не охваченной авиационным патрулированием. При следовании по маршрутам наземного патрулирования посещаются наиболее горимые участки: хвойные лесные культуры, места отдыха местных жителей и т.д.

Время и кратность патрулирования устанавливается ежедневно заданием на проведение работ по мониторингу пожарной опасности в зависимости от класса пожарной опасности.

Согласно вышесказанному, выделим следующие основные классы противопожарных мероприятий, характерных для Омского лесничества Омской области:

авиапатрулирование –  $A_p$ ;

наземная охрана –  $G_s$ ;

противопожарное обустройство лесов –  $P_f$ ;

пропаганда охраны лесов среди населения –  $P$ .

Каждому классу противопожарных мероприятий, характерных для Омского лесничества Омской области, согласно данным Главного управления Лесного хозяйства Омской области введен коэффициент значимости. Суммарное значение коэффициентов равно единице:

значимость  $A_p = 0,2$ ;

значимость  $G_s = 0,1$ ;

значимость  $P_f = 0,3$ ;

значимость  $P = 0,4$ .

Тогда получим алгоритм вычисления значения  $P_r$  единого коэффициента противопожарных мер, который будет осуществляться с помощью формулы:

$$P_r = \frac{0,2 A_p + 0,1 G_s + 0,3 P_f + 0,4 P}{100} . \quad (11)$$

1) класс противопожарных мер может принимать значение равно 0 или 1, в зависимости будет ли происходить отказ подразделений системы подготовки к работе. Например, если из строя выйдет какое-либо мероприятие, например, наземная охрана, противопожарное обустройство лесов и пропаганда охраны лесов среди населения, т.е.  $G_s = P_f = P = 0$ . Тогда  $Pr = \frac{0,2*1+0,1*0+0,3*1+0,4*1}{100} = 0,009$ .

Для расчета показателя пожарной опасности – температуры воздуха и температуры точки росы воспользуемся данными Информационной системы дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства ИСДМ-Рослесхоз. Согласно данным блока мониторинга пожарной опасности, во вкладке показатели пожарной опасности по условиям погоды (регионы) можем определить необходимые показатели на конкретную дату для заданного лесничества. На рисунке 8 приведены данные для Омского, Тарского, Тевризского лесничеств Омской области на 3 июля 2023года. Доступ к ИСДМ - Рослесхоз получен автором работы дополнительно, на основе официального запроса начальнику ФБУ «Авиалесохрана» (приложение В).

2) Зная, входные данные можем вычислить показатель пожарной опасности, используя формулу (2).

3) Вычисленное значение показателя пожарной опасности можем перевести по шкале (таблица 1) в класс пожарной опасности и определить необходимую степень пожарной опасности.

Степень пожарной опасности лесов Омской области оценивалась на основании классификации природной пожарной опасности лесов, утвержденной приказом Федерального агентства лесного хозяйства (Рослесхоз) от 5 июля 2011 года. № 287 «Об утверждении классификации природной пожарной опасности лесов и классификации пожарной опасности в лесах в зависимости от условий погоды».

## Рисунок 8 – Показатели пожарной опасности по условиям погоды, согласно данным ИСДМ-Рослесхоз



Федеральное агентство лесного хозяйства

**Информационная система дистанционного мониторинга  
Федерального агентства лесного хозяйства**

Блок мониторинга пожарной опасности

[Главная](#) / [Показатели пожарной опасности по условиям погоды \(регионы\)](#)

Выход. Версия для печати  [Вывод в Excel](#)

Выбор даты: ▼ ▼ текущего сезона ▼ OK

Показатели пожарной опасности по условиям погоды  
< за 3 июля 2023 г. >  
**Сибирский ФО**  
**Омская область**

Группировать по <span style="border: 1px solid gray; padding: 2px;">▼</span> <b>авиаотделениям</b>										
Наименования авиаотделений, авиагрупп, оперативных точек	2	3	4	5	6	7	Крайний срок поступления данных по ночным осадкам	Часовой пояс	Наименования метеостанций (ф.2-МЕТЕО по станциям)	Высота снежного покрова
<b>Омское</b>	28696: Калачинск	+32.9 °С	+5.9 °С	...	0 мм	0 см	1:00 - 4:00 - 7:00	GMT+6:00		
	29701: Любимовка	+33.8 °С	+3.2 °С	...	0 мм	0 см	1:00 - 4:00 - 7:00	GMT+6:00		
	28588: Называевск	+33.3 °С	+2.3 °С	...	0 мм	0 см	1:00 - 4:00 - 7:00	GMT+6:00		
	28797: Омская	+35.0 °С	+4.8 °С	...	0 мм	0 см	1:00 - 4:00 - 7:00	GMT+6:00		
	28698: Омск	+32.4 °С	+8.2 °С	...	0 мм	0 см	1:00 - 4:00 - 7:00	GMT+6:00		
	28598: Сергатовское	+32.0 °С	+11.0 °С	...	0 мм	0 см	1:00 - 4:00 - 7:00	GMT+6:00		
	28586: Токталинск	+31.2 °С	+9.1 °С	...	0 мм	0 см	1:00 - 4:00 - 7:00	GMT+6:00		
	28593: Большеречье	+31.2 °С	+10.2 °С	...	0 мм	0 см	1:00 - 4:00 - 7:00	GMT+6:00		
<b>Тарское</b>	28498: Колосовка	+31.4 °С	+11.0 °С	...	0 мм	0 см	1:00 - 4:00 - 7:00	GMT+6:00		
	29401: Седелниково	+31.0 °С	+17.2 °С	...	0 мм	0 см	1:00 - 4:00 - 7:00	GMT+6:00		
	28493: Тара	+31.3 °С	+10.7 °С	...	0 мм	0 см	1:00 - 4:00 - 7:00	GMT+6:00		
	<b>Среднее значение по авиаотделению</b>									
<b>Тевризское</b>	28491: Большие Ужи	+31.8 °С	+11.8 °С	...	0 мм	0 см	1:00 - 4:00 - 7:00	GMT+6:00		
	28383: Тевриз	+32.2 °С	+11.4 °С	...	0 мм	0 см	1:00 - 4:00 - 7:00	GMT+6:00		
	<b>Среднее значение по авиаотделению</b>									

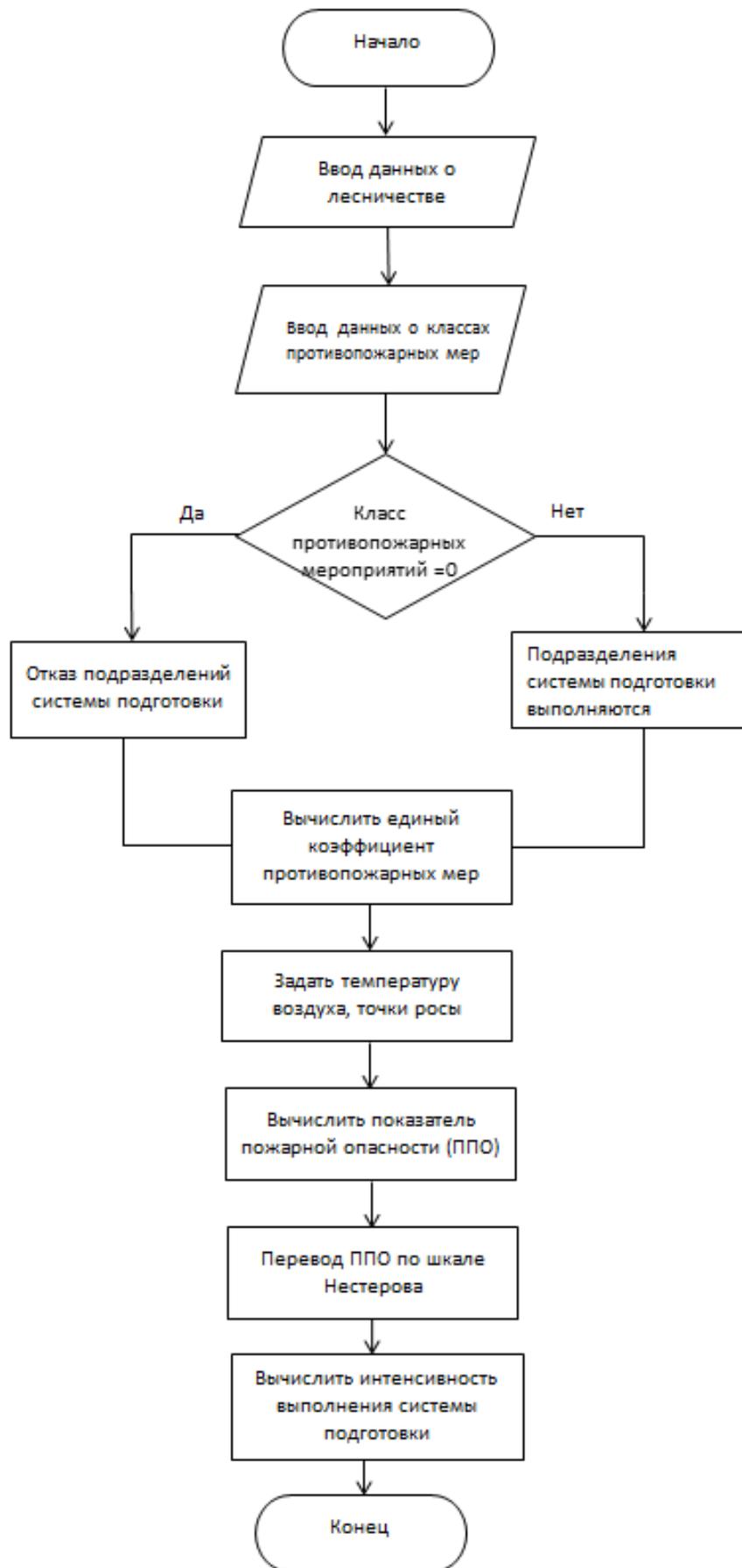


Рисунок 9 – Алгоритм вычисления интенсивности выполнения стадии готовности лесной системы к пожару

4) Значение среднего класса пожарной опасности будет являться величиной  $K$ .

5) Вычислим значение интенсивности выполнения каждой стадии подготовки к противостоянию леса пожарам по формуле  $\mu_i = Pr K$ , алгоритм вычисления представлен на рисунке 9.

6) Интенсивность отказов подразделений системы подготовки к работе  $\lambda$  задается также, как и коэффициент противопожарных мер для случая, когда будет или нет происходить отказ подразделений системы подготовки к работе.

Таким образом, зная исходные данные, будет вычислена степень готовности лесной системы к ситуации наличия риска возгорания. В главе 3 разработано программное приложение, вычисляющее это выражение.

### **2.3.1. Постановка и решение задачи анализа готовности системы, находящейся в конфликтной ситуации**

Предложенное автором в 2.3. решение задачи готовности системы применимо не только для оценки готовности лесной системы к ситуации наличия риска возгорания, но и для анализа любой сложной системы, находящейся в конфликтной ситуации и, в частности, для готовности технической системы.

Действительно, выясним, что характерно для конфликтующей технической системы?

«Практически во всех известных работах [25,29,33,45], посвященных исследованию вопросов противоборства технических систем в конфликтных ситуациях влияние человеческого фактора на поведение и надежность работы таких систем либо не рассматривалось вообще, либо молчаливо полагалось, что человек, участвующий в процессе подготовки системы к противоборству или восстановлению работоспособности после отказов компонентов в процессе

противоборства, является абсолютно надежным и не подверженным негативному влиянию со стороны противника, снижающим его характеристики надежности.

На самом деле, любая техническая система, участвующая в конфликтной ситуации [47], как правило, является системой с программно-аппаратным управлением процесса подготовки системы к противоборству в конфликтной ситуации и восстановлению работоспособности системы после отказов и представляет собой человеко-машинный комплекс, в котором человек может выполнять различные функции: оператора (настройщика), ремонтника, оператора и ремонтника, эргатического резерва (резервного компонента в системе) и другие, в зависимости от поставленных целей и задач перед технической системой» [10].

Предположим, что человек является составной частью технической системы и оказывает влияние на ее надежность в процессе подготовки к работе и в процессе восстановления после отказов. При этом будем считать, что в идеальном случае человек абсолютно надежный, а в реальных условиях человек обладает конечной надежностью и в силу физиологических особенностей или воздействия на него противника может ошибаться (временно отказывать) с интенсивностью  $\zeta$  и восстанавливать свою работоспособность с интенсивно  $\nu > 0$ , при условии абсолютной надежности человека. При конечной надежности человека  $\nu = 0$  [46]. Известно [52], что интенсивность ошибок и сбоев человеко-оператора на 1–2 порядка выше сбоев и отказов технических систем.

Поведение рассматриваемого человеко-машинного комплекса будем исследовать в предположении аппроксимации его марковским процессом и простейших потоках отказов и восстановлений как человека, так и технической системы, в состав которой включим систему контроля состояния технической системы и управления процессом восстановления функциональных свойств после отказов. При этом будем полагать, что интенсивность отказов системы контроля и восстановления технической системы равна  $\lambda$ , а интенсивность ее восстановления после отказов равна  $\mu$  [46].

Очевидно, в случае борьбы с лесными пожарами столь же значима роль человека. Фактически, имея дело с лесными системами, мы имеем дело с **конфликтующей системой**, которая противостоит возгораниям, наводнениям, незаконным вырубкам и прочее. Вместо человеко-машинного комплекса мы имеем человеко-организационный комплекс, при функционировании которого необходимо решать те же задачи, что и при функционировании человеко-машинного комплекса.

С учетом сказанного и расширяя область исследуемых систем, находящихся в конфликтной ситуации [11], будем ниже говорить о системах, находящихся в конфликтной ситуации, как о **конфликтующих системах**; под оператором иметь в виду людей их обслуживающих, а под аппаратно-организационной частью системы понимать, в случае технических систем, аппаратно-программную часть технической системы.

В результате, имеем следующие три математические модели, решающие задачи готовности конфликтующей системы к конфликтным ситуациям.

**Первая математическая модель.** Будем рассматривать процесс подготовки конфликтующей системы к работе в конфликтной ситуации в предположении, что аппаратно-организационная часть системы подготовки имеет конечную надежность, а оператор абсолютно надежный.

Необходимые для расчета величины обозначим следующим образом:

$E_i$  ( $i = 0, 1, \dots, n$ ) – состояние системы на  $i$ -м шаге процесса подготовки к функционированию (подготовки к работе) или восстановлению после отказов блоков в процессе противоборства системы;

$\mu_i = const$  ( $i = 0, 1, \dots, n - 1$ ) – интенсивность выполнения  $i$ -й операции подготовки (восстановления после отказов) системы;

$E_{ij}$  ( $i = 0, 1, \dots, n - 1; j = 1, 2, \dots, n$ ) – состояние технической системы на  $i$ -м шаге подготовки (восстановления) при наличии отказа в аппаратно-организационной части системы подготовки;

$\lambda$  – интенсивность отказов аппаратно-организационной части системы подготовки к работе (восстановления после отказов);

$\lambda_1$  – интенсивность ее восстановления после отказа аппаратно-организационной части системы [46].

Тогда поведение рассматриваемой системы может быть описано (при условии марковского процесса) графом переходов на рисунке 10.

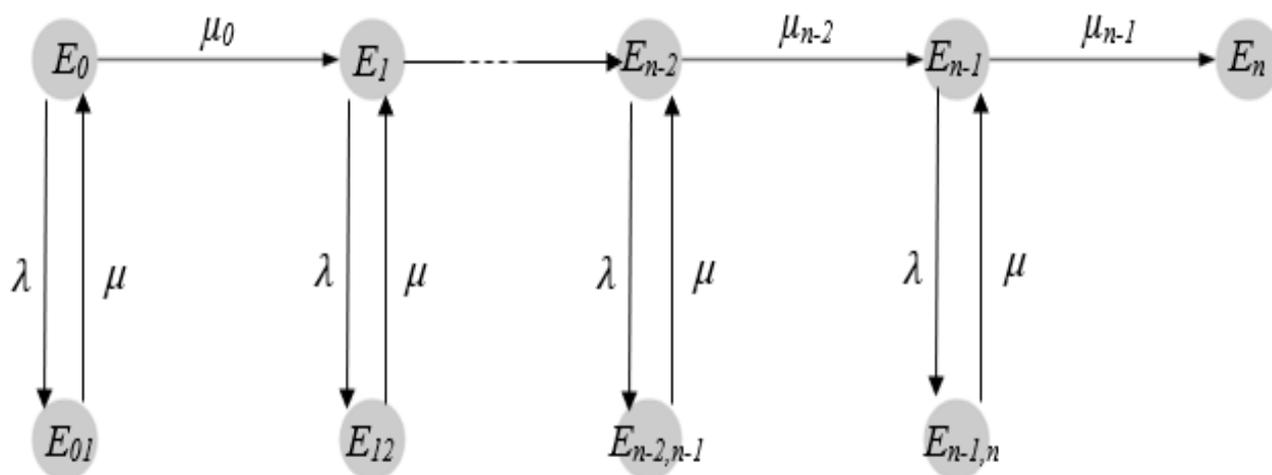


Рисунок 10 – Граф переходов

Пусть  $p_i(t)$  – вероятность нахождения системы в состоянии  $E_i$  ( $i = 0, 1, \dots, n$ );  $p_{ij}(t)$  – вероятность нахождения системы в состоянии  $E_{ij}$  ( $i = 0, 1, \dots, n-1; j = 1, 2, \dots, n$ ) [8]. В силу сделанных замечаний, зная известные правила вычисления составим систему дифференциальных уравнений, решения которых будут характеризовать поведение конфликтующей системы:

$$\begin{aligned}
 p'_0(t) &= \mu p_{01}(t) - (\mu_0 + \lambda) p_0(t), \\
 p'_k(t) &= \mu_{k-1} p_{k-1}(t) + \mu p_{k,k+1}(t) - [\mu_k p_k(t) + \lambda p_{k,k+1}(t)], \\
 k &= 1, 2, \dots, n-1, \\
 p'_n(t) &= \mu_{n-1} p_{n-1}(t).
 \end{aligned} \tag{12}$$

При начальных условиях  $p_0(0) = 1, p_i(0) = 0 \quad 1 \leq i \leq n, p_{ij}(0) = 0$  ( $i=0,1,\dots, n-1; j=1,2,\dots,n$ ), уравнения, описанные в (12) можно решить аналитически [6], либо численными методами и вычислить функциональную готовность  $P_{\Phi\Gamma}(t)$  рассматриваемой системы, участвующей в конфликтной ситуации

$$P_{\Phi\Gamma}(t) = 1 - \left[ \sum_{i=0}^{n-1} p_i(t) + \sum_{\substack{i=0,1,\dots,n-1 \\ j=1,2,\dots,n}} p_{ij}(t) \right]. \quad (13)$$

**Вторая математическая модель.** Используя предположения и обозначения, введенные при рассмотрении первой модели, будем полагать, что человек – оператор, производящий подготовку к работе и принимающий участие в восстановлении системы после отказов в конфликтной ситуации, имеет конечную надежность. Это означает, что в процессе подготовки к работе и восстановлении работоспособности после отказов конфликтующей системы он может в силу физиологических факторов и под негативным воздействием противника допускать ошибки (сбои – временные отказы) с интенсивностью  $\zeta$ , до устранения которых – восстановления работоспособности оператора с интенсивностью  $\nu$ , рассматриваемая техническая система будет находиться в одном из «отказовых» состояний  $E_{ij}$  ( $i=0,1,\dots, n-1; j=1,2,\dots,n$ ) [46].

Вероятность нахождения системы в состоянии  $E_{ij}^*$  обозначим  $p_{ij}^*(t)$ .

На рисунке 11 представлена графическая иллюстрация поведения конфликтующей системы.

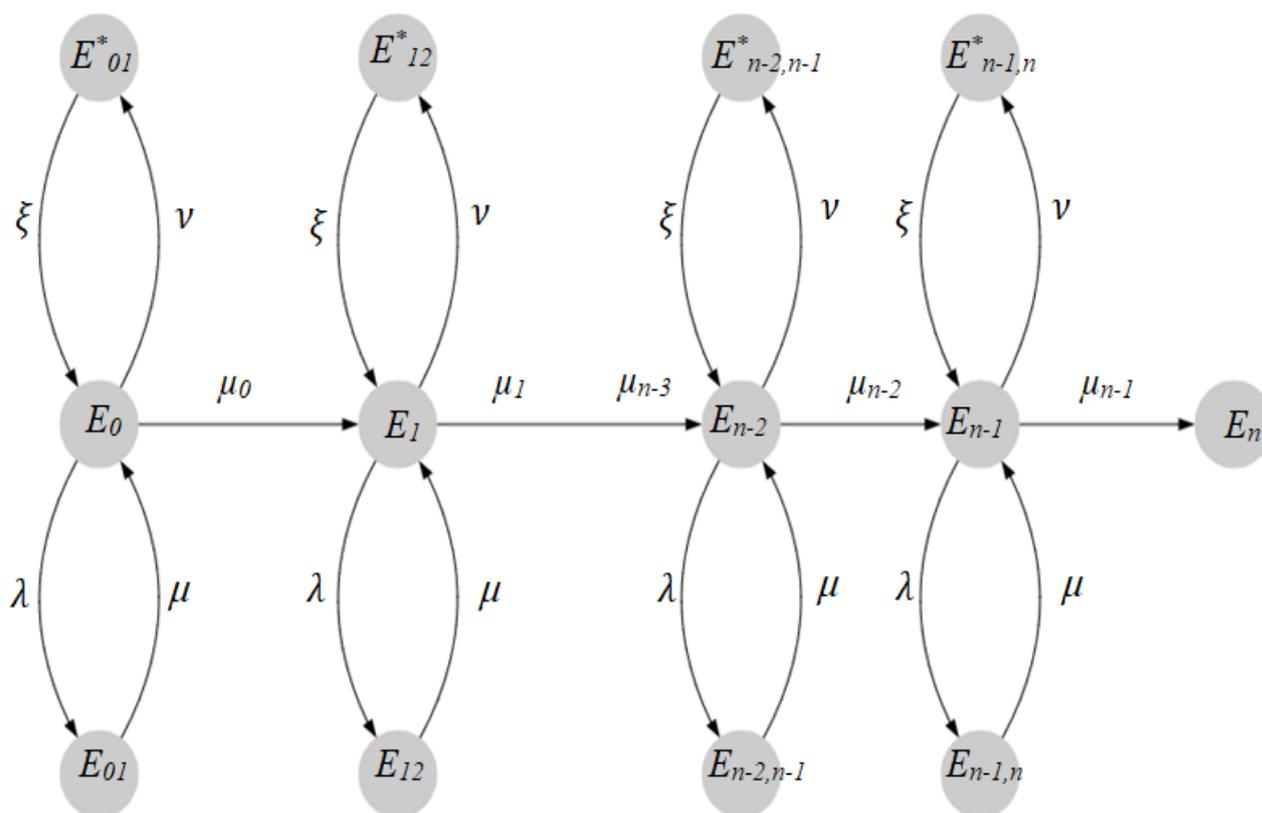


Рисунок 11 – Граф процесса подготовки к функционированию конфликтующей системы при конечной надежности оператора и аппаратно-программной части системы подготовки к работе

Система дифференциальных уравнений, которая будет описывать такую конфликтующую систему, будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned}
 p'_0(t) &= \mu p_{01}(t) + \xi p^*_{01}(t) - (\mu_0 + \lambda + \nu)p_0(t), \\
 p'_k(t) &= \mu_{k-1}p_{k-1}(t) + \mu p_{k,k+1}(t) + \xi p^*_{k,k+1}(t) - [\mu_k p_k(t) + \lambda p_{k,k+1}(t) \\
 &+ \nu p^*_{k,k+1}(t)], \\
 k &= 1, 2, \dots, n-1, \\
 p'_n(t) &= \mu_{n-1}p_{n-1}(t).
 \end{aligned} \tag{14}$$

Начальные условия, используемые для решения системы уравнений (14), примут следующий вид:

$$p_0(0) = 1; p_i(0) = 0 \quad 1 \leq i \leq n; p_{ij}(0) = 0, p_{ij}^*(0) = 0 \quad (i = 0, 1, \dots, n-1; j = 1, 2, \dots, n),$$

Тогда вычисление функциональной готовности рассматриваемой модели конфликтующей системы в силу предположений, указанных выше определяется в соответствии с формулой:

$$P_{\Phi\Gamma}(t) = 1 - \left[ \sum_{i=0}^{n-1} \rho_i(t) + \sum_{\substack{i=0,1,\dots,n-1 \\ j=1,2,\dots,n}} \rho_{ij}(t) + \sum_{\substack{i=0,1,\dots,n-1 \\ j=1,2,\dots,n}} \rho_{ij}^*(t) \right]. \quad (15)$$

Теперь исследование функциональной готовности рассматриваемой человеко-организационной системы с помощью персональной ЭВМ не представляет сложности

### **Третья математическая модель**

При рассмотрении первых двух моделей мы полагали, что интенсивности выполнения каждой  $i$ -й операции подготовки к работе или восстановлению работоспособности конфликтующей системы после отказов  $\mu_i (i=0, 1, \dots, n-1)$  является постоянной величиной то есть на интенсивность выполнения этих операций противник не оказывает влияние. В реальных условиях, конфликтной ситуации противник, как правило, стремится повлиять (уменьшить) за счет своих ресурсов нападения интенсивности выполнения операций подготовки к работе и восстановления работоспособности после отказов [46] человеко-организационной конфликтующей системы. При этом интенсивности восстановления являются функциями времени, т.е.  $\mu_i(t) \neq const (0 \leq i \leq n-1)$ . В этом случае модель для решения задачи вычисления функциональной готовности рассматриваемой системы может быть сведена к построению статистически эквивалентной системы, где каждый локальный переход из одного состояния в другое заменен

так эквивалентной группой переходов, имеющих постоянные во времени интенсивности, что результирующая условная вероятность перехода в этой группе достаточно близка к условной вероятности перехода в реальной системе.

С учетом сказанного выше, при условии конечной надежности человека – оператора и организационной части системы подготовки конфликтующей системы к работе, используя обозначения, сделанные при рассмотрении первой и второй модели, граф состояний, описывающий поведение рассматриваемой модели системы, приведен на рисунке 12 [46].

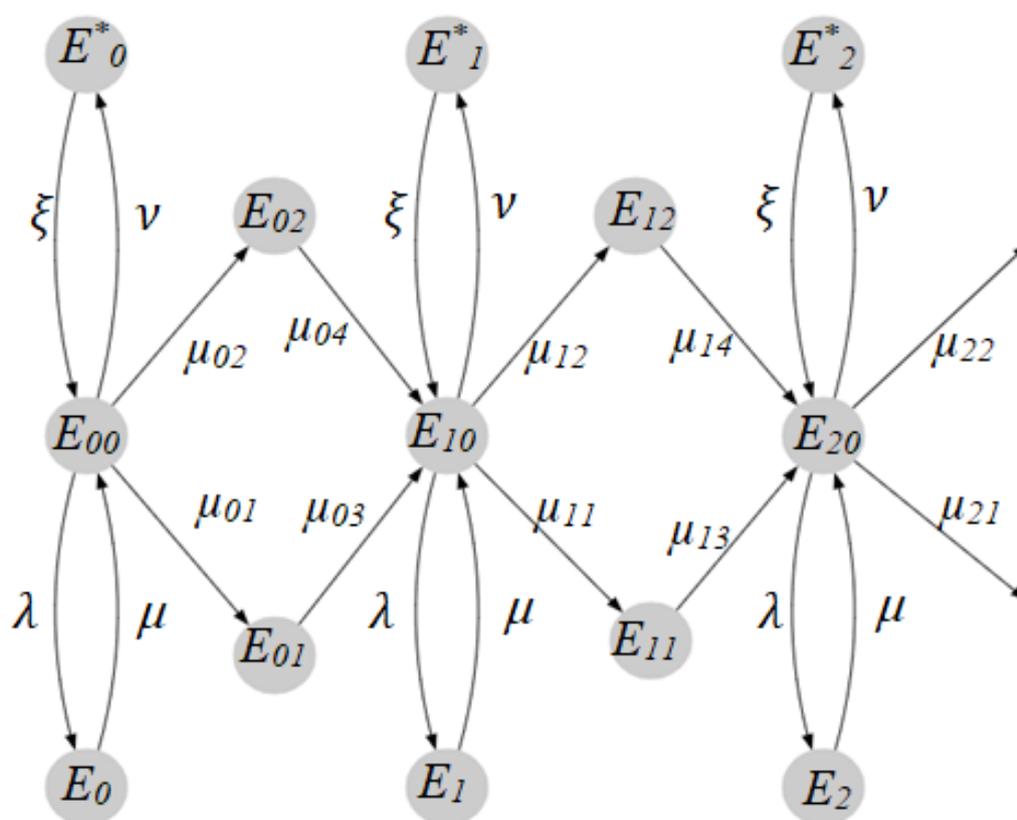


Рисунок 12 – Графическая иллюстрация подготовительного процесса системы к функционированию, при конечной надежности оператора и аппаратно-программной части системы подготовки к работе при зависимой от времени интенсивности выполнения операций подготовки

В данном случае система дифференциальных уравнений, описывающих поведение рассматриваемой конфликтующей системы, которая графически представлена на рисунке 12, может быть вычислена:

$$\begin{aligned}
p'_{00}(t) &= \mu p_0(t) + \xi p_0^*(t) - \lambda p_0(t) - \nu p_0^*(t) - \mu_{01} p_{01}(t) - \mu_{02} p_{02}(t), \\
p'_{10}(t) &= \mu p_1(t) + \xi p_1^*(t) + \mu_{03} p_{01}(t) + \mu_{04} p_{02}(t) - [\mu_{11} p_{11}(t) + \mu_{12} p_{12}(t) + \\
&\quad + \lambda p_1(t) + \nu p_1^*(t)], \\
p'_{20}(t) &= \mu p_2(t) + \xi p_2^*(t) + \mu_{13} p_{11}(t) + \mu_{14} p_{12}(t) - [\mu_{21} p_{21}(t) + \mu_{22} p_{22}(t) \\
&\quad + \lambda p_2(t) + \nu p_2^*(t)], \\
&\quad \cdot \quad \cdot \\
&\quad \cdot \quad \cdot \\
p'_{(n-2)0}(t) &= \mu p_{n-2}(t) + \xi p_{n-2}^*(t) + \mu_{(n-1)1} p_{(n-2)1}(t) + \mu_{(n-1)2} p_{(n-2)2}(t) - \\
&\quad - [\mu_{(n-1)1} p_{(n-1)1}(t) + \mu_{(n-1)2} p_{(n-1)2}(t) + \lambda p_{n-2}(t) + \nu p_{n-2}^*(t)], \\
p'_{(n-1)0}(t) &= \mu p_{n-1}(t) + \xi p_{n-1}^*(t) + \mu_{(n-1)3} p_{(n-1)1} + \mu_{(n-1)4} p_{(n-1)2}(t) - \\
&\quad - [\mu_{n1} p_{n1}(t) + \mu_{n2} p_{n2}(t) + \lambda p_{n-1}(t) + \nu p_{n-1}^*(t)], \\
p'_{n0}(t) &= \mu_{n3} p_{n1}(t) + \mu_{n4} p_{n2}(t).
\end{aligned} \tag{16}$$

Представленная система уравнений (16) является громоздкой, поэтому аналитически вычислить ее не представляется возможным. Для вычисления системы необходимо использовать численные методы, которые с легкостью можно реализовать, используя языки программирования различного уровня.

Вычисление функциональной готовности рассматриваемой конфликтующей системы будет определяться формулой:

$$P_{\Phi r}(t) = 1 - \left[ \sum_{i=0,1,\dots,n} (\rho_{i0}(t) + p_{i1}(t) + p_{i2}(t)) + \sum_{i=0,1,\dots,n-1} (p_i(t) + p_i^*(t)) \right]. \quad (17)$$

где вероятности  $p_{ij}(t)$ ,  $p_i(t)$ ,  $p_i^*(t)$  соответствуют нахождению конфликтующей системы в состояниях, обозначенных одноименными вершинами графа на рисунке 10.

Используя положения, идеи и примеры построения математических моделей для вычисления функциональной готовности участвующей в конфликтной ситуации человеко-организационной системы в процессе ее подготовки к работе и в процессе восстановления работоспособности после отказов компонентов с учетом участия в этих процессах человека-оператора, нетрудно построить математическую модель для вычисления функциональной готовности конфликтующей системы  $P_{\Phi r}(t)$ , когда все переменные  $\mu_i(t)$ ,  $\lambda_i(t)$ ,  $\zeta_i(t)$ ,  $v_i(t)$ , участвующие в построении модели, являются функциями времени [46].

#### **2.4. Постановка задачи и вычислительный (численный) метод решения задачи для вычисления количества лесных участков, находящихся в различных состояниях горения**

Пусть имеем лесную систему, которая находится в трех состояниях:  $S_2$  – горения,  $S_{мл}$  – тления,  $S_{nr}$  – прекращения горения.

В каждом состоянии система имеет определенное количество участков, которые задаются при известных размерах лесных участков.

$\varphi(t_1)$ ,  $\varphi(t_2)$ ,  $\varphi(t_3)$  – количество участков в состояниях горения, тления и прекращения горения соответственно. Их количество изменяется в процессе нахождения в определенной стадии.

Граф переходов для такой модели выглядит следующим образом:

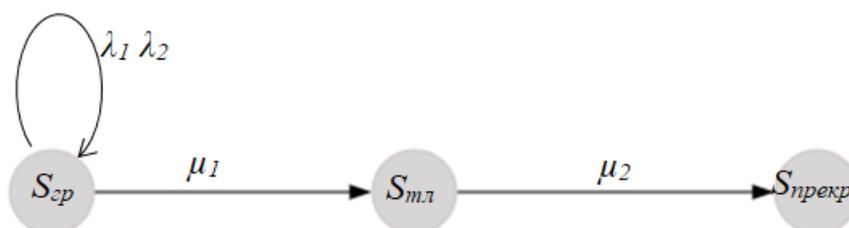


Рисунок 13 – Граф переходов между состояниями системы

Величины  $\mu_1$ ,  $\mu_2$  – интенсивности перехода участка из состояния горения в тления, из тления в прекращение горения, и задаются формулами:

$$\mu_1 = \frac{1}{t_{\Gamma}}, \quad (18)$$

$$\mu_2 = \frac{1}{t_{\text{ТЛ}}}, \quad (19)$$

где  $t_{\Gamma}$  – среднее время горения,  $t_{\text{ТЛ}}$  – среднее время тления,  $\lambda_1$  определяется как количество смежных участков, которые возгораются от одного горящего,  $\lambda_2$  величина, обратная среднему времени прогревания, которая задается формулой:

$$\lambda_2 = \frac{1}{t_{\text{прогр}}}. \quad (20)$$

Тогда вероятность перехода из одного лесного участка в другое описывается следующими дифференциальными уравнениями:

$$\frac{d\varphi(t_1)}{dt} = \varphi(t_1)(\lambda_1\lambda_2 - \mu_1), \quad (21)$$

$$\frac{d\varphi(t_2)}{dt} = \mu_1\varphi(t_1) - \mu_2\varphi(t_2), \quad (22)$$

$$\frac{d\varphi(t_3)}{dt} = \mu_2\varphi(t_2). \quad (23)$$

Решая дифференциальные уравнения, получим:

$$\varphi(t_1) = e^{(\lambda_1 - \lambda_2 - \mu_1)t}, \quad (24)$$

$$\varphi(t_2) = \frac{\mu_1}{\mu_2 - \mu_1} (e^{(\lambda_1 \lambda_2 - \mu_1)t} - e^{\mu_2 t}), \quad (25)$$

$$\varphi(t_3) = 1 + \frac{1}{\mu_2 - \mu_1} (\mu_1 e^{\mu_2 t} - \mu_2 e^{(\lambda_1 \lambda_2 - \mu_1)t}). \quad (26)$$

Видно, что с увеличением значения времени  $t$  вероятность нахождения лесной системы в состоянии горения  $\varphi(t_1)$  будет стремиться к нулю. А в потушенном состоянии  $\varphi(t_3)$ , наоборот, увеличивается и экспоненциально стремится к единице.

Итак, результатом математических расчетов являются количественные оценки, которые позволяют оценить параметры процессов природных пожаров при известных размерах лесных участков. В качестве таких размеров выступают вычисленные в модели величины лесных участков, находящиеся в любой момент времени в состояниях  $\varphi(t_1)$  горения,  $\varphi(t_2)$  тления или в  $\varphi(t_3)$  потушенном состоянии. Вычисленные оценки могут быть использованы в качестве рекомендаций при разработке планов тушения лесных пожаров, организации предупредительных профилактических мероприятий, а также составления прогноза развития природных пожаров.

## 2.5. Метод моделирования постпирогенных зон различной интенсивности пожара

В данном параграфе излагается метод решения задачи, предложенный в статье [20] и описывающий ускорение сукцессии на участках с повышенной интенсивностью горения по сравнению с иными постпожарными участками на основе наличия того или иного преимущества, которое имели растения на сильно выгоревших участках леса. В диссертации мы дополняем эту модель вариантом [21] с более сложной «подпиткой» растений на участках с пониженной интенсивностью горения, чем в [20], для которого было написано программное приложение [21], представленное в 3.2.

В лаборатории геоэкологии и природных процессов Субтропического научного центра РАН (г. Сочи) исследовали сукцессию растительности в заповеднике Утриш на полуострове Абрау на Черноморском побережье России, который подвергся лесному пожару. Исследовали произошедшую геохимическую трансформацию почвенно-растительного покрова в разных местах, с разной интенсивностью пожара. Для изучения были взяты мхи, которые являются хорошими сорбентами и характеризуются максимально контрастными различиями в накоплении химических элементов в различных местах, подвергшихся пожару [20].

Максимальные накопления химических элементов в почвах обнаружались в местах интенсивного пожара. Был зафиксирован первый этап сукцессии для мхов в месте малоинтенсивного пожара, и установлен проходжение данного этапа сукцессии в месте максимального по интенсивности пожара. Найдено, что в местах интенсивного пожара средний коэффициент суммарного накопления химических элементов в почвах составляет 31 единицу, а внутри мест малоинтенсивного пожара этот же показатель равен 8. Для мхов эта зависимость дает отрицательную корреляцию с почвами. В месте интенсивного пожара коэффициент суммарного накопления для мхов дает 6 единиц, а внутри мест

малоинтенсивного пожара данный показатель равен 20.

Исследования определили спектр химических элементов, активно накапливаемых растениям на первых этапах сукцессии, который перспективен в случае применения комплексных удобрений, способных повлиять на ускоренное восстановление растительности постпожарных мест. Это такие элементы как натрий, фосфор, молибден, медь, цинк, никель, а также элементы редкоземельной группы: эрбий, гольмий, диспрозий, гадолиний, тербий, самарий, европий, неодим, тулий, лютеций, празеодим, иттербий, церий [20].

Предполагалось, что избыток тех или иных элементов на участках повышенной интенсивности горения по сравнению с участками с низкой интенсивностью пожара является причиной успешного первого этапа сукцессии мхов, занявшего 1 год на участках повышенной интенсивности горения, а их недостаток – это причина того, что на участках с низкой интенсивностью пожара сукцессия затянулась на 2 года [20].

Дополнительно к традиционным методам геохимической диагностики, проводимой для подтверждения заявления об ускорении сукцессии в постпожарных местах повышенной интенсивности горения, в [20] была предложена математическая модель, описывающая ускорение сукцессии по сравнению с иными постпожарными участками на основе наличия того или иного преимущества, которое имели растения на сильно выгоревших участках леса.

Сукцессия моделируется на постпожарных участках посредством марковских процессов.

Пусть даны два участка  $U_s$  и  $U_w$ , подвергшиеся соответственно пожару повышенной интенсивности и пониженной интенсивности. Три стадии сукцессии, обозначаем как  $S_0$ ,  $S_1$ ,  $S_2$ . Стадия  $S_0$  – это начальная стадия, послепожарная,  $S_1$  – первая стадия, имевшая место через 1 год, и, наконец, последующая стадия  $S_2$ , время наблюдений которой мы не фиксируем.

Сукцессия – это переходы растительности из стадии  $S_i$  к стадии  $S_j$  с определённой вероятностью  $P(ij)$ , которые описываются как интенсивности,

обозначаемые ниже символом  $\mu_i$  и понимаемым как среднее число событий в единицу времени, связанное с вероятностью  $P(ij)$  перехода от стадии  $S_i$  к стадии  $S_j$  за время  $\Delta t$ :

$$P(ij)(\Delta t) = \mu_i \Delta t, \quad (27)$$

при условии, что на отрезке времени  $\Delta t$  проявилось хотя бы одно событие из рассматриваемого потока событий.

Каждая стадия сукцессии наблюдается с некоторой вероятностью  $p_i$ . Изучаемые сукцессии наглядно изображаются посредством графов и описываются уравнениями Колмогорова – Чепмена.

В случае мхов на участке  $U_s$  имеем:

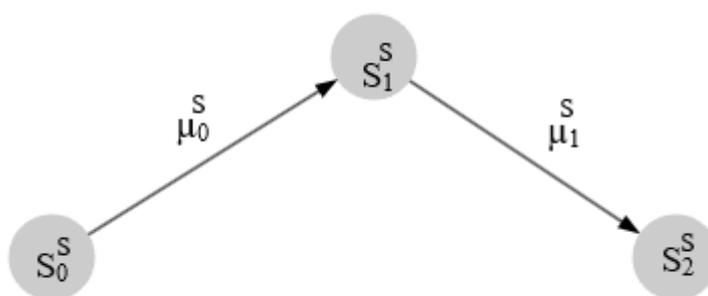


Рисунок 14 – Графическая иллюстрация сукцессии повышенной интенсивности горения

$$\begin{aligned} \frac{dp_0^s}{dt} &= -\mu_0^s p_0^s, \\ \frac{dp_1^s}{dt} &= -\mu_0^s p_0^s - \mu_1^s p_1^s, \\ \frac{dp_2^s}{dt} &= \mu_1^s p_1^s. \end{aligned} \quad (28)$$

$$\sum_0^2 p_i^s = 1. \quad (29)$$

А в случае участка с пониженной интенсивностью горения:

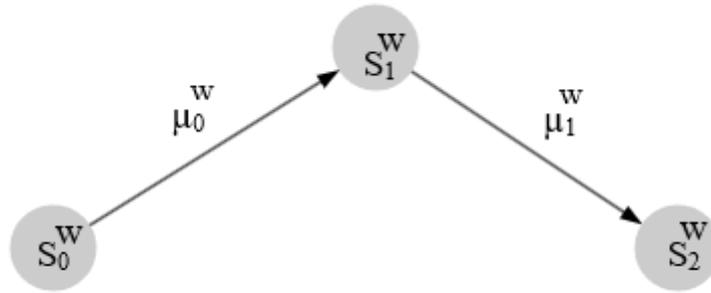


Рисунок 15 – Графическая иллюстрация сукцессии пониженной интенсивности горения

$$\frac{dp_0^w}{dt} = -\mu_0^w p_0^w,$$

$$\frac{dp_1^w}{dt} = -\mu_0^w p_0^w - \mu_1^w p_1^w, \quad (30)$$

$$\frac{dp_2^w}{dt} = \mu_1^w p_1^w.$$

$$\sum_0^2 p_i^w = 1. \quad (31)$$

В соответствии с нашим предположением избыток элементов на участке  $U_s$  ведёт к интенсификации потока событий, способствующих ускорению сукцессии. Поэтому считаем, что

$$\mu_0^s > \mu_0^w. \quad (32)$$

Вводим начальные условия

$$p_0^s(0) = 1, \quad p_1^s(0) = p_2^s(0) = 0, \quad p_0^w(0) = 1, \quad p_1^w(0) = p_2^w(0) = 0.$$

Находим решения задачи Коши:

$$p_0^s(t) = \mu_0^s e^{-\mu_0^s t},$$

$$p_1^s(t) = \frac{\mu_0^s}{\mu_1^s - \mu_0^s} [e^{-\mu_0^s t} - e^{-\mu_1^s t}], \quad (33)$$

$$p_2^s(t) = 1 + \frac{1}{\mu_1^s - \mu_0^s} [\mu_0^s e^{-\mu_1^s t} - \mu_1^s e^{-\mu_0^s t}],$$

и

$$p_0^w(t) = \mu_0^w e^{-\mu_0^w t},$$

$$p_1^w(t) = \frac{\mu_0^w}{\mu_1^w - \mu_0^w} [e^{-\mu_0^w t} - e^{-\mu_1^w t}], \quad (34)$$

$$p_2^w(t) = 1 + \frac{1}{\mu_1^w - \mu_0^w} [\mu_0^w e^{-\mu_1^w t} - \mu_1^w e^{-\mu_0^w t}].$$

Из (32) и первых уравнений в (33), (34) выводим, что  $p_0^s(t) < p_0^w(t)$ .

Тем самым, мы установили, что восстановление мхов на участке  $U_s$  идёт быстрее, поскольку вероятность оставаться на стадии  $S_0$  сильно падает с течением времени по сравнению с участком  $U_w$ .

Естественно предположить, что, оказавшись в стадии  $S_1$ , растения на участке  $U_s$  потеряли свое преимущество в избытке ряда элементов в процессе постпожарного восстановления.

Математически это оформляем в виде соотношений

$$\mu_1^s = \mu_1^w = \mu_1 > \mu_0^s > \mu_0^w. \quad (35)$$

Тогда имеем

$$p_1^s - p_1^w = \frac{1}{\frac{\mu_1}{\mu_0^s} - 1} [e^{-\mu_0^s t} - e^{-\mu_1 t}] - \frac{1}{\frac{\mu_1}{\mu_0^w} - 1} [e^{-\mu_0^w t} - e^{-\mu_1 t}] > 0. \quad (36)$$

Поскольку в силу (35):

$$\frac{1}{\frac{\mu_1}{\mu_0^s} - 1} > \frac{1}{\frac{\mu_1}{\mu_0^w} - 1}, \quad (37)$$

$$[e^{-\mu_0^s t} - e^{-\mu_1 t}] > [e^{-\mu_0^w t} - e^{-\mu_1 t}], \quad (38)$$

а произведение двух больших чисел больше произведения соответственно двух меньших чисел.

Следовательно,

$$p_1^s(t) > p_1^w(t),$$

И это означает, что на участке  $U_s$  растения имеют больше шансов оказаться в «успешной» стадии сукцессии  $S_1$ , чем на участке  $U_w$ .

### **Вариант «подпитки» растений на участке с пониженной интенсивностью горения**

Рассмотрим подробнее сукцессию на участках пожара с пониженной интенсивностью горения, вводя дополнительные состояния  $S_{01}$  и  $S_{12}$ , за счёт которых растения будут дополнительно «подпитываться». Переход к таким состояниям «подпитки» обозначим через  $\lambda_0$ , а обратный переход в исходную стадию – через  $\lambda_1$  [21].

Чем обусловлена необходимость изучить такой вариант сукцессии?

Растения (мхи) участка  $U_w$  в постпожарной стадии  $S_0^w$  оказались после пожара в более щадящей ситуации, чем мхи на участке  $Us$ . Избытка упомянутых выше химических элементов здесь нет, и для восстановления они требуется использовать некие дополнительным ресурсы  $S_{01}^w$  и  $S_{12}^w$ , необходимые для жизнедеятельности. В случае обращения к ним, растения получает силы к восстановлению, скажем «подпитываются» перед переходом к стадии  $S_1^w$  и  $S_2^w$  соответственно. Вероятности ресурсов  $S_{01}^w$  и  $S_{12}^w$ , а точнее обращение к ним с целью «подпитки», обозначаем как  $p_{01}$  и  $p_{12}$ . Обращение к ним идёт с интенсивностью  $\lambda_0$ , а «подпитка» – с интенсивностью  $\lambda_1$  (рисунок 16).

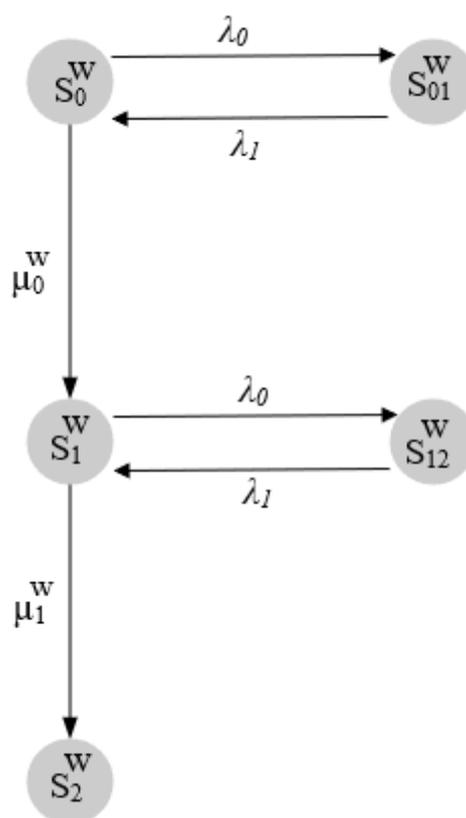


Рисунок 16 – Граф более «реальной» сукцессии на участке  $U_w$

Решение дифференциальных уравнений выглядит следующим образом:

$$\frac{dp_0^w}{dt} = \lambda_1 p_{01}^w(t) - (\mu_0 + \lambda_0) p_0^w(t), \quad (39)$$

$$\frac{dp_1^w}{dt} = \mu_0 p_0^w(t) - (\mu_1 + \lambda_0) p_1^w(t) + \lambda_1 p_{01}^w(t), \quad (40)$$

$$\frac{dp_2^w}{dt} = \mu_1 p_1^w(t), \quad (41)$$

$$\frac{dp_{01}^w}{dt} = \lambda_0 p_0^w(t) - \lambda_1 p_{01}^w(t), \quad (42)$$

$$\frac{dp_{12}^w}{dt} = \lambda_0 p_1^w(t) - \lambda_1 p_{12}^w(t), \quad (43)$$

$$\sum_{i=0}^2 p_i^w + p_{01}^w + p_{12}^w = 1. \quad (44)$$

При фиксированных начальных условиях  $p_0^w(0) = 1$ ;  $p_{01}^w = p_1^w(0) = p_2^w(0) = 0$  вычисления сводятся к решениям дифференциальных уравнений.

Компьютерная реализация и вычислительные эксперименты выполнены в третьей главе диссертационной работы.

### **Глава 3. Комплексы программ и проверка их адекватности для расчета моделирования процессов лесных пожаров**

#### **3.1. Программа для вычисления готовности конфликтующей системы**

Во второй главе авторами отмечено следующее: математическая модель, разработанная для моделирования процесса вычисления коэффициента готовности лесной системы к ситуации наличия риска возгорания, применима и к конфликтующей системе. В Объединённом фонде электронных ресурсов «Наука и образование» (ОФЭРНиО) зарегистрирована программа: «Вычисление функциональной готовности технической системы при подготовке ее к противоборству в конфликтной ситуации и продолжению противоборства после отказов компонентов системы с учетом надежности человека-оператора» [52].

Разработанная программа применима для проведения расчетов относительно и лесной системы, а именно вычисления степени готовности такой системы к ситуации наличия риска возгорания.

В процессе рассмотрения моделирования лесных пожаров на основе описанного во второй главе метода решения была разработана программная реализация приближенного вычисления степени готовности лесной системы к ситуации наличия риска возгорания.

Кроме, указанного выше программного приложения, автором в соавторстве с Потаповым В.И. разработаны и получены свидетельства о государственной регистрации программы [50,51,54,53,55], которые в дальнейшем изучение вопросов моделирования, могут также использоваться для лесных систем.

**Спецификация программного комплекса, реализующего решение поставленных задач в п.2.3.1.** На основе описанных выше математических

моделей разработан программный комплекс, который предназначен для приближенного вычисления функциональной готовности конфликтующей системы при подготовке ее к противоборству в конфликтной ситуации и при восстановлении работоспособности после отказов компонентов в процессе противоборства при абсолютной и конечной надежности человека – оператора [52].

Для заданной системы в программном комплексе выполняются следующие функции:

- ввод исходных параметров;
- расчет вероятности безотказной работы;
- расчет среднего времени восстановления;
- расчет функциональной готовности;
- графическая иллюстрация вывода изменения вероятности безотказной работы системы [10].

В программном комплексе предусмотрено три окна:

- окно ввода данных системы (рисунок 17);
- окно «графики», которое служит для вывода графиков вероятности безотказной работы системы в зависимости от выбранной модели (рисунок 18);
- окно «вычисленные характеристики», предназначенное для вывода расчетов среднего времени восстановления системы и коэффициентов функциональной готовности системы в определенный момент времени (рисунок 19) [10].

«Вкладка «Входные данные» включает ввод исходных данных конфликтующей системы и человека-оператора (рисунок 15):

- «интенсивности переходов», которая позволяет задать следующие параметры:
  - $\lambda$  интенсивность отказов системы контроля и восстановления

конфликтующей системы;

- $\mu$  интенсивность восстановления системы после отказов;
- $\xi$  интенсивность отказов человека оператора;
- $\nu$  интенсивность восстановления человека-оператора;
- $\mu_i$  интенсивность выполнения  $i$ -ой операции подготовки восстановления

после отказов системы;

– количество шагов подготовки (восстановления) конфликтующей системы» [52].

Входные данные    Графики    Вычисленные характеристики

Исходные данные

Интенсивности переходов

$\mu$	$\lambda$	$\mu_i$
1	1	1

Число шагов восстановления

2

Прочие параметры

Тип модели

Первая модель

Рассчитываемый период

10

Число отсчётов

1000

Размер шага: 0.01

Произвести вычисления

Очистить графики

Рисунок 17 – Интерфейс программного комплекса

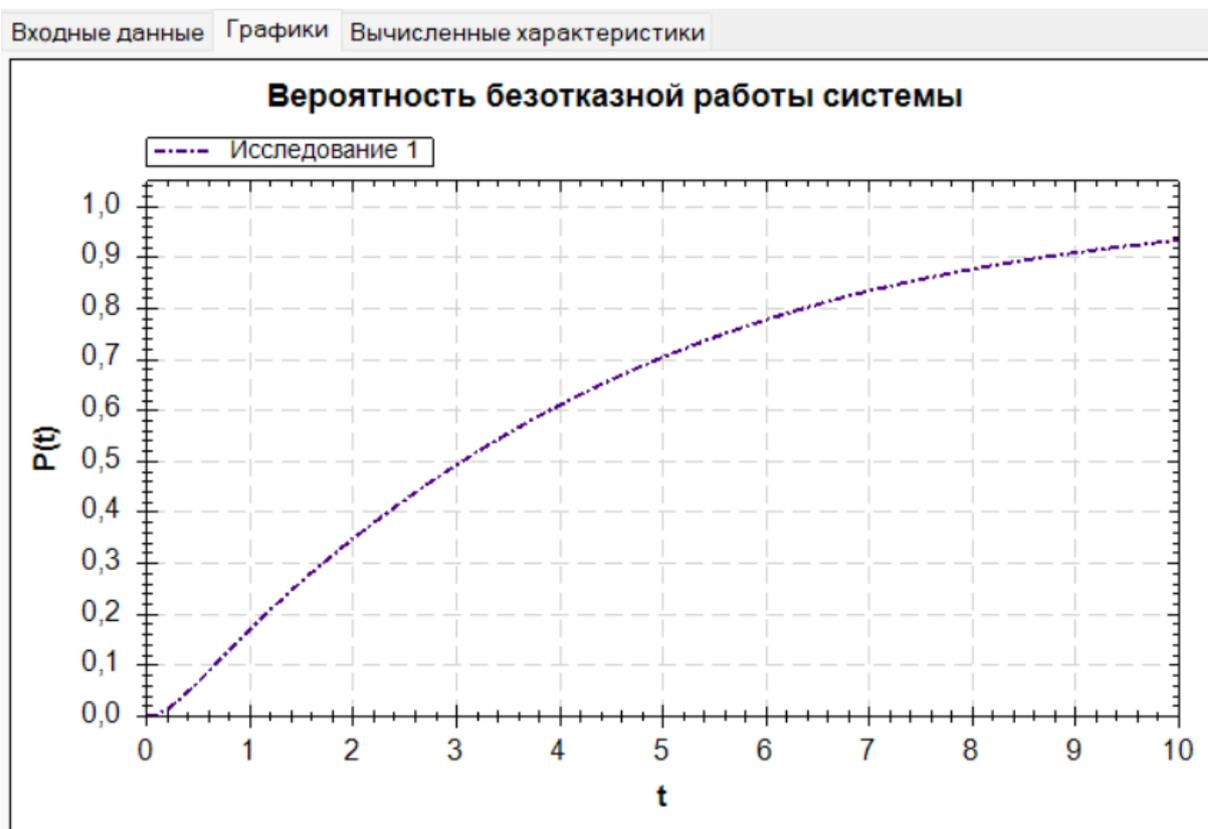


Рисунок 18 – Пример окна программного комплекса на вкладке «Графики»

Входные данные   Графики   Вычисленные характеристики

Момент времени	Коэффициент функциональной готовности	Погрешность
0	0,000000	0,000000
0,01	0,000049	0,000000
0,02	0,000195	0,000000
0,03	0,000432	0,000000
0,04	0,000759	0,000000
0,05	0,001170	0,000000
0,06	0,001663	0,000000
0,07	0,002235	0,000000
0,08	0,002881	0,000000
0,09	0,003600	0,000000
0,1	0,004388	0,000000
0,11	0,005242	0,000000
0,12	0,006160	0,000000
0,13	0,007139	0,000000
0,14	0,008176	0,000000
0,15	0,009268	0,000000
0,16	0,010415	0,000000

Среднее время восстановления системы:  
3,863424

Рисунок 19 – Пример окна программного комплекса на вкладке «Вычисленные характеристики»

На рисунке 20 представлена схема, реализующая общий алгоритм работы программного комплекса. Метод Calculating выполняет основные расчеты, его алгоритм работы представлен на рисунке 21.

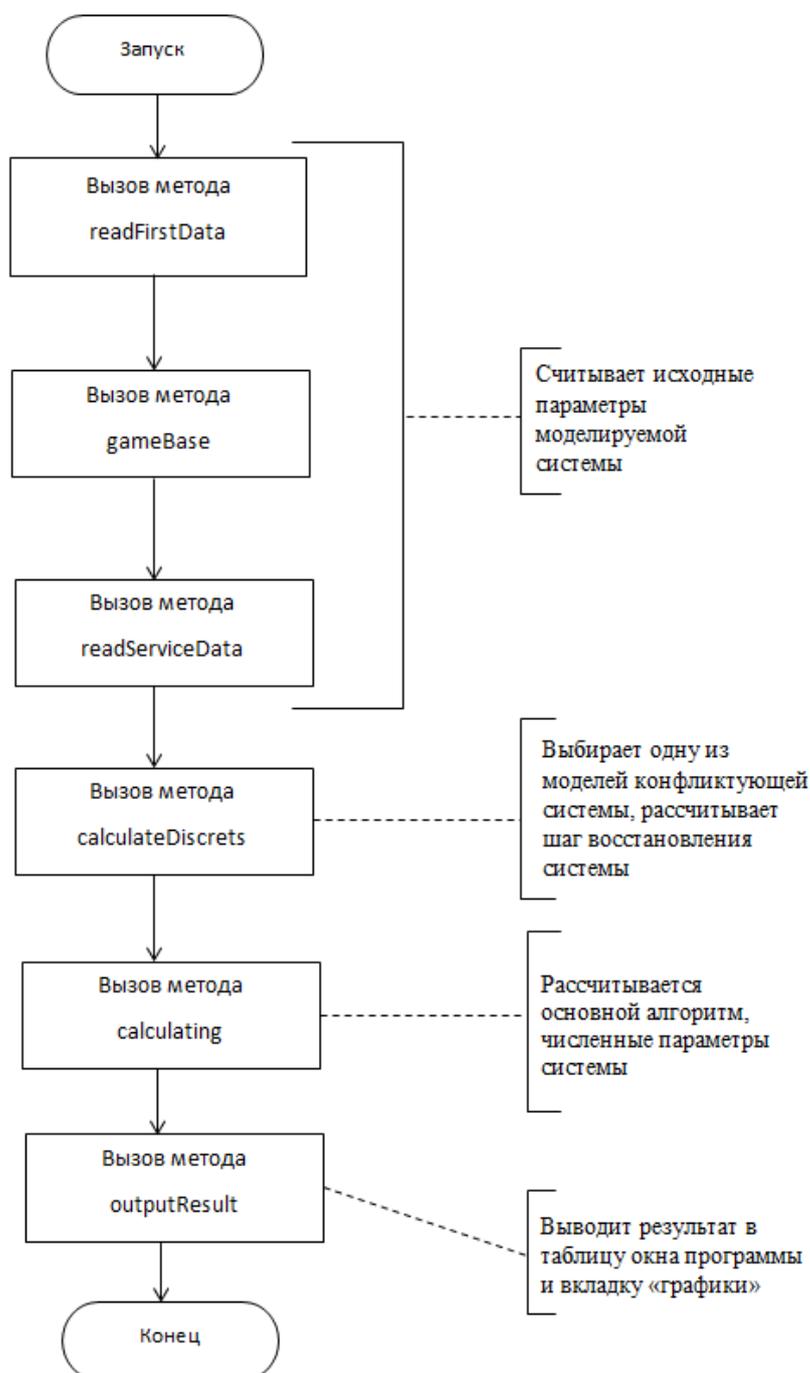


Рисунок 20 – Схема, реализующая общий алгоритм работы программного комплекса

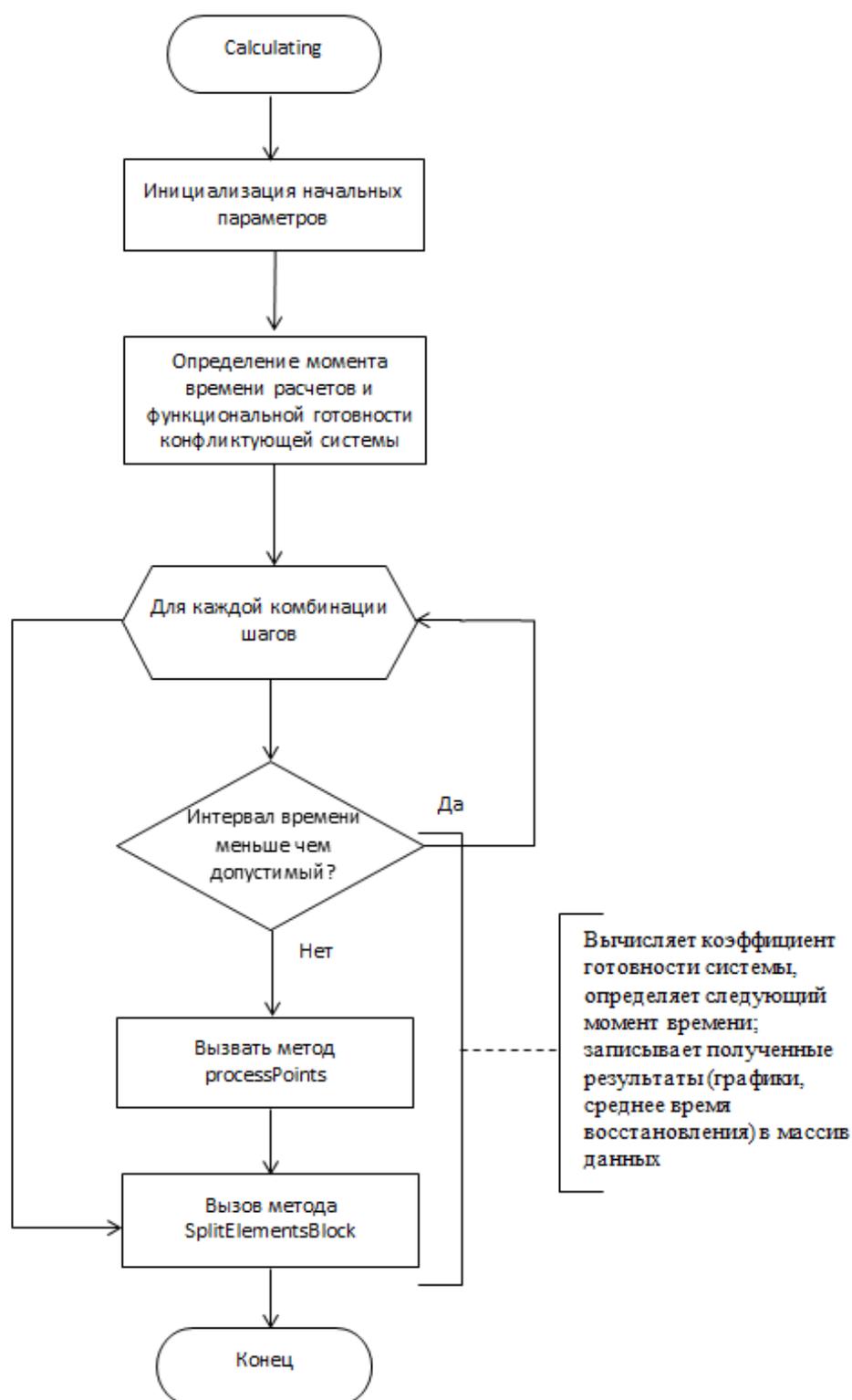


Рисунок 21 – Алгоритм работы метода Calculating

Поведение каждой из моделей технической системы описано графом переходов, которые для визуального восприятия наглядно представлены во вкладке «входные данные» (рисунок 22).

Входные данные    Графики    Вычисленные характеристики

Исходные данные

Интенсивности переходов

$\mu$	$\lambda$	$\mu_i$
1	1	1

Число шагов восстановления	$\xi$	$\nu$
2	1	1

Прочие параметры

Тип модели

Вторая модель

Рассчитываемый период

10

Число отсчетов

1000

Размер шага: 0.01

Произвести вычисления

Очистить графики

Рисунок 22 – Пример окна программного комплекса на вкладке «Входные данные» для второй модели системы

Область вывода данных представлены второй и третьей вкладкой программы (рисунок 22, 23) и служат соответственно для вывода графиков вероятностей безотказной работы системы и таблицы основных расчетов.

После ввода всех параметров технической системы и человека-оператора, пользователю необходимо нажать на кнопку «Произвести вычисления». Начнется этап расчет. В этот момент кнопки «Произвести вычисления» и «Очистить графики» станут недоступными. На вкладке «Графики» после выполнения вычислений будут отображаться графики вероятности безотказной работы системы. На вкладке «Вычисленные характеристики» будет отображаться следующее (рисунок 19): среднее время восстановления системы; таблица,

отображающая коэффициент функциональной готовности конфликтующей системы и соответствующая погрешность в определенный момент времени работы конфликтующей системы [10,56].

Для очистки вкладки «Графики» от большого количества отображенных графиков необходимо зайти во вкладку «Входные данные» и нажать кнопку «Очистить графики».

Входные данные    Графики    Вычисленные характеристики

Исходные данные

Интенсивности переходов

$\mu$	$\lambda$	$\mu 1$
1	1	1
Число шагов восстановления	$\xi$	$\nu$
2	1	1
$\mu 2$	$\mu 3$	$\mu 4$
1	1	1

Прочие параметры

Тип модели  
Третья модель

Рассчитываемый период  
10

Число отсчетов  
1000

Размер шага: 0.01

Произвести вычисления    Очистить графики

Рисунок 23 – Пример окна программного комплекса на вкладке «Входные данные» для третьей модели конфликтующей системы [10]

### Описание программного комплекса

Программный комплекс написан на языке программирования C#. Также в качестве технологии для разработки Desktop-приложений была выбрана Windows Presentation Foundation – аналог WinForms, система для построения клиентских

приложений Windows с визуально привлекательными возможностями взаимодействия с пользователем, и графическая подсистема в составе .NET Framework, использующая язык XAML [43, 60]. При начальном проектировании программы именно эта техническая основа выбрана по следующим причинам:

- язык C# является достаточно простым, но, в то же время, выразительным, что обеспечивает высокую скорость разработки без снижения качества кода;
- платформа Microsoft.NET обеспечивает достаточно высокую производительность вычислительных приложений.

Различные компоненты программы имеют вид исполняемых файлов (как с графическим интерфейсом, так и консольным), разделяемых библиотек, встраиваемых модулей и веб-приложений. Дополнительно к C# используется внешняя библиотека ZedGraph.

**ZedGraph** – это библиотека классов, Windows Forms UserControl и доступных элементов управления ASP для создания двумерных строк, столбцов и круговых диаграмм произвольных наборов данных. Классы обеспечивают высокую степень гибкости – почти каждый аспект графика может быть изменен пользователем. В то же время использование классов упрощается, предоставляя значения по умолчанию для всех атрибутов графа. Классы включают код для выбора соответствующих диапазонов шкалы и размеров шагов, основанных на диапазоне значений данных, которые строятся. ZedGraph поддерживается как проект разработки с открытым исходным кодом на SourceForge.

### **Основные возможности ZetGraph**

1. Поддерживает различные типы графиков: линейные, круговые, столбчатые, точечные и другие. Все типы графиков можно настроить для отображения данных по вашему выбору.

2. Обладает гибкостью в определении визуальной конфигурации: ZetGraph предоставляет широкий спектр опций, которые можно настроить для создания графика, соответствующего предпочтениям. Некоторые из настраиваемых параметров включают цвета, заголовки, легенды, оси и т.д.

3. Поддерживает несколько форматов вывода. С помощью ZetGraph можно сохранить график в различных форматах, включая изображения (например, PNG, JPEG) и векторные форматы (например, SVG).

4. Простота использования: библиотека предоставляет простой API для создания и настройки диаграмм. Также имеется документация и примеры кода, которые помогут для дальнейшей работы.

Перейдем к структурному описанию программного комплекса. Основные классы, используемые при написании программы, приведены в таблице 5.

Таблица 4 – Классы программного комплекса

<b>Название класса</b>	<b>Назначение класса</b>
ContainerFactory	Создание контейнера выбранной модели.
ControllerFactory	Создание контроллера выбранной модели.
FirstController	Выполнение вычислений для построения первой модели.
FirstDataContainer	Контейнер данных первой модели.
IController	Наследование для контроллеров вычислений первой, второй и третьей моделей.
IDataContainer	Наследование для контейнеров данных первой, второй и третьей моделей.
ResultContainer	Создание контейнера результата.
SecondController	Выполнение вычислений для построения второй модели.
SecondDataContainer	Контейнер данных второй модели.
ThirdController	Выполнение вычислений для построения третьей модели.
ThirdDataContainer	Контейнер данных третьей модели.
FirstConstructor	Конструктор первых объектов первой модели.

P	Вычисление надежности конфликтующей системы.
SecondConstructor	Конструктор первых объектов второй модели.
ThirdConstructor	Конструктор первых объектов третьей модели.
Drawer	Инициализация цвета, отрисовка графиков и системы координат, очистка графика.
Form1	Построение интерфейса и алгоритма программного комплекса, проверка значений периода и шага программного комплекса.
Program	Точка входа в программный комплекс.

Таким образом, архитектура программного комплекса достаточно модульна и организована в соответствии с объектно-ориентированными принципами. Каждый класс выполняет определенные функции и взаимодействует с другими классами, что способствует удобству и эффективности разработки и сопровождения программного комплекса.

Диаграмма классов программы, которая представлена на рисунке 24, использует концепцию наследования. Она позволяет одному классу наследовать все атрибуты, операции и связи другого.

Использование диаграммы классов в данном случае целесообразно, так как они являются центральным звеном методологии объектно-ориентированного анализа и проектирования.

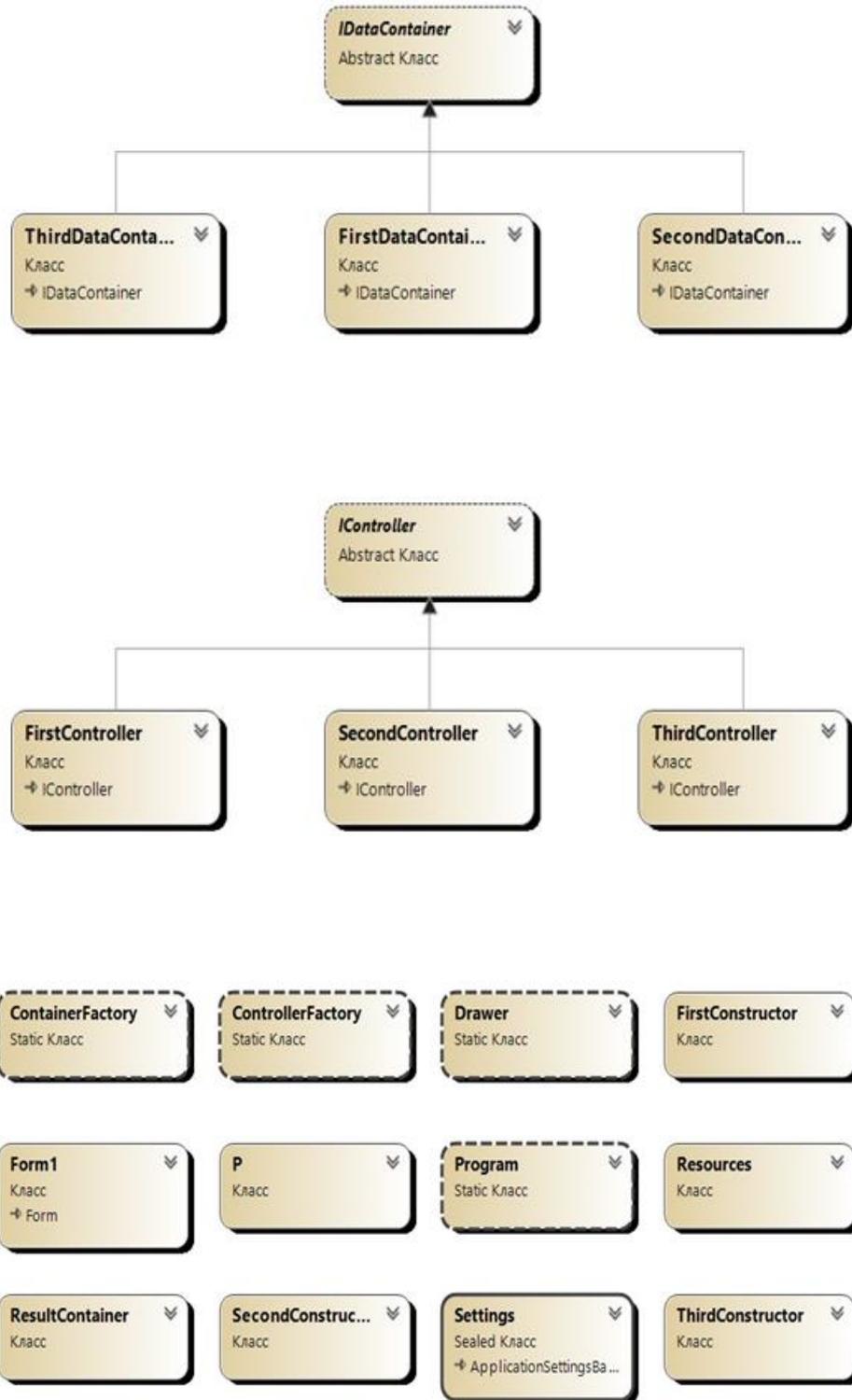


Рисунок 24 – Диаграмма классов программы

### 3.2. Расчеты для оценки готовности лесной системы к ситуации наличия риска возгорания

Воспользуемся разработанным программным комплексом для проведения вычислительных экспериментов расчета коэффициента готовности лесной системы, к ситуации наличия риска возгорания.

Будем использовать первую модель программного комплекса, так как именно она соответствует описанию модели, применимой для лесной системы.

Предварительно, введем обозначения.

Пусть

- $\lambda$  интенсивность отказов подразделений системы подготовки к работе;
- $\mu$  интенсивность возобновления мероприятия после отказа [8];
- $\mu_i$  интенсивность выполнения каждой стадии подготовки к противостоянию леса пожарам;
- количество шагов подготовки (восстановления) лесной системы.

#### Вычисления

Для проверки работоспособности и адекватности вычислений программного обеспечения, реализующего решения задачи оценки готовности лесной системы к наличию риска возгорания, введем следующие данные, описанные в п.2.3. необходимые для вычислительных расчетов [57].

- 1)  **$Pr$**  единый коэффициент противопожарных мер:

$$Pr = \frac{0,2 A + 0,1 Gs + 0,3 Pf + 0,4 P}{100},$$

где  $A_p$  – авиапатрулирование,  $G_s$  – наземная охрана,  $P_f$  – противопожарное обустройство лесов,  $P$  – пропаганда охраны лесов среди населения.

Каждому классу противопожарных мероприятий, характерных для Омского лесничества Омской области, согласно данным Главного управления Лесного

хозяйства Омской области введен коэффициент значимости. Суммарное значение коэффициентов равно единице.

Коэффициент противопожарных мер может принимать значение равно 0 или 1, в зависимости будет ли происходить отказ подразделений системы подготовки к работе. Например, если из строя выйдет какое-либо мероприятие, например, наземная охрана, то  $G_s=0$ . Тогда

$$Pr = \frac{0,2 * 1 + 0,1 * 0 + 0,3 * 1 + 0,4 * 1}{100} = 0,009.$$

2) Величина **К** – класс пожарной опасности (горимости). Для оценки пожарной опасности в лесу будем использовать формулы и соответствующие шкалы, предложенные В.Г.Нестеровым и рассмотренные в параграфе 2.2.

Для расчета показателя пожарной опасности – температуры воздуха и точки росы воспользуемся данными Информационной системы дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства ИСДМ-Рослесхоз. На рисунке 25 приведены данные для Омского лесничества Омской области.

Сибирский ФО  
Омская область

Группировать по авиаотделениям

Наименования авиаотделений, авиагрупп, оперативных точек	Часовой пояс	Крайний срок поступления данных по ночным осадкам	Т° воздуха	Точка росы	Время измерения температуры и точки росы (местное)	Суточные осадки на 9 час. мест. вр. (день+ночь)	Высота снежного покрова
1		UTC - MSK - мест.	3	4	5	6	7
Омское	GMT+6:00	1:00 - 4:00 - 7:00	+27.2 °C	+2.1 °C	...	0 мм	0 см
	GMT+6:00	1:00 - 4:00 - 7:00	+23.8 °C	+3.4 °C	...	0 мм	0 см
	GMT+6:00	1:00 - 4:00 - 7:00	+26.5 °C	-0.3 °C	...	0 мм	0 см
	GMT+6:00	1:00 - 4:00 - 7:00	+21.1 °C	-1.9 °C	...	0.1 мм	0 см
	GMT+6:00	1:00 - 4:00 - 7:00	+26.2 °C	+4.7 °C	...	0 мм	0 см
	GMT+6:00	1:00 - 4:00 - 7:00	+25.9 °C	+3.8 °C	...	0 мм	0 см
	GMT+6:00	1:00 - 4:00 - 7:00	+25.3 °C	+2.1 °C	...	0 мм	0 см

Рисунок 25 – Показатели пожарной опасности по условиям погоды, согласно данным ИСДМ-Рослесхоз

Зная, входные данные можем вычислить показатель пожарной опасности по формуле 2.

Вычисленное значение показателя пожарной опасности можем перевести по шкале (таблица 2) в класс пожарной опасности и определить необходимую степень пожарной опасности.

Таблица 6 – Распределение площади лесного фонда Омской области

№ № п/п	Участковое лесничество	Классы природной пожарной опасности					Итого	Средний класс
		1	2	3	4	5		
1	Большереченское	17386	1240	4080	84159	6458	113323	3,5
2	Большеуковское	6328	53	18221	355820	343187	723609	4,4
3	Васисское	22559	7560	112308	722811	289264	1154502	4,1
4	Знаменское	14479	8448	3259	165313	37056	228555	3,9
5	Исилькульское	2334	-	5987	69037	16	77374	3,8
6	Калачинское	8073	391	9328	130882	12463	161137	3,9
7	Крутинское	8518	1	3384	153486	35694	201083	4,0
8	Любинское	4915	77	3822	84594	5758	99166	3,9
9	Муромцевское	27300	11137	7981	255505	13802	315725	3,7
10	Называевское	14432	-	21799	96668	22559	155458	3,7
11	Омское	5857	86	18157	61980	1487	87567	3,6
12	Саргатское	7824	15	3799	47664	5966	65268	3,7
13	Седельниковское	15635	961	25765	361598	20919	424878	3,9
14	Степное	1432	-	443	36421	3246	41542	4,0
15	Тарское	16349	6753	5808	280800	16175	325885	3,8
16	Тевризское	42196	10212	46976	475751	274624	849759	4,1
17	Тюкалинское	6671	19	6081	138369	7987	159127	3,9
18	Усть-Ишимское	12214	4471	52330	487960	128985	685960	4,0
19	Черлакское	4285	-	251	47818	4305	56659	3,8
<b>Всего по области</b>		<b>238787</b>	<b>51424</b>	<b>349779</b>	<b>4056636</b>	<b>1229951</b>	<b>5926577</b>	<b>4,0</b>

Степень пожарной опасности лесов Омской области оценивалась на основании классификации природной пожарной опасности лесов, утвержденной приказом Федерального агентства лесного хозяйства (Рослесхоз) от 5 июля 2011 года. № 287 «Об утверждении классификации природной пожарной опасности лесов и классификации пожарной опасности в лесах в зависимости от условий погоды». Данные распределения площади лесного фонда Омской области по классам природной пожарной опасности приведены в таблице 6.

Значение среднего класса пожарной опасности будет являться величиной **K**.

3) Вычислим значение интенсивности выполнения каждой стадии подготовки к противостоянию леса пожарам по формуле  $\mu_i = Pr K$ .

4) Интенсивность отказов подразделений системы подготовки к работе  $\lambda$  задается также, как и коэффициент противопожарных мер для случая, когда будет или нет происходить отказ подразделений системы подготовки к работе.

Таким образом, зафиксированы все необходимые данные для эксперимента.

ПРИМЕР. Вычислим для данных значений Омского лесничества Омской области. Как сказали выше, Омскому лесничеству характерны следующие противопожарные меры с коэффициентом

$$Pr = \frac{0,2 Ap + 0,1Gs + 0,3Pf + 0,4P}{100} = 0,01.$$

Согласно данным ИСДМ – Рослесхоз, представленным на рисунке 25, вычислим показатель пожарной опасности

$$\text{ППО} = \sum_{1}^{n} t(t - r) = 1878,44.$$

В соответствие с таблицей 2, величине показателя пожарной опасности соответствует 3 класс пожарной опасности.

Тогда  $\mu_i = Pr K = 0,03$ .

Предположим, что в процессе выполнения работ будут происходить отказы, а именно не выполнится профилактическая работа в виде наземной охраны  $G_s$ , тогда интенсивность отказов подразделений системы подготовки к работе  $\lambda$  для первого эксперимента примет значение равное 0,009. Для второго эксперимента отказ произойдет для  $A_p$  и  $P_f$ , тогда  $\lambda=0,005$ .

Третий эксперимент – отказ  $A_p$ ,  $P_f$ ,  $G_s$  в этом случае  $\lambda=0,004$ .

Четвертый эксперимент – отказ  $P$ ,  $P_f$  в этом случае  $\lambda=0,003$ .

На процесс восстановления величины  $\mu$ , влияет параметр, который будет возвращать систему в исходное положение. Примем, что интенсивность возобновления мероприятия после отказа  $\mu$  будет равным 0,002 (таблица 7).

Таблица 7 – Значение коэффициента готовности лесной системы в зависимости от отказа противопожарных мер

№	Единый коэффициент противопожарных мер $Pr$ (при условии выполнения всех мероприятий)	Класс пожарной опасности ( $K$ )	Интенсивность выполнения каждой стадии подготовки к противостоянию лесам пожарам ( $\mu_i$ )	Интенсивность отказов подразделений системы подготовки к работе ( $\lambda$ )	Интенсивность возобновления мероприятия после отказа ( $\mu$ )	Коэффициент готовности лесной системы ( $G$ )	Среднее время восстановления ( $T$ )
1	0,01	3	0,03	0,009	0,002	0,83	9,18
2	0,01	3	0,03	0,005	0,002	0,79	9,44
3	0,01	3	0,03	0,004	0,002	0,76	9,65
4	0,01	3	0,03	0,003	0,002	0,72	9,8

Из расчетов видно, чем меньше значение принимает интенсивность отказов  $\lambda$ , т.е. чем больше профилактических мероприятий не выполняется, тем меньше коэффициент готовности системы, а время на восстановление лесной системы потребуется больше.

На рисунках 26, 27 приведены расчеты, которые выполняет программа.

Входные данные			Графики	Вычисленные характеристики
Момент времени	Коэффициент функциональной готовности	Погрешность		Среднее время восстановления системы 9,186925
9	0,258537	0,000000		
10	0,294649	0,000000		
11	0,330426	0,000000		
12	0,365623	0,000000		
13	0,400039	0,000000		
14	0,433518	0,000000		
15	0,465939	0,000000		
16	0,497211	0,000000		
17	0,527268	0,000000		
18	0,556068	0,000000		
19	0,583587	0,000000		
20	0,609813	0,000000		
21	0,634752	0,000000		
22	0,658417	0,000000		
23	0,680829	0,000000		
24	0,702019	0,000000		
25	0,722020	0,000000		

Рисунок 26 – Расчеты программы

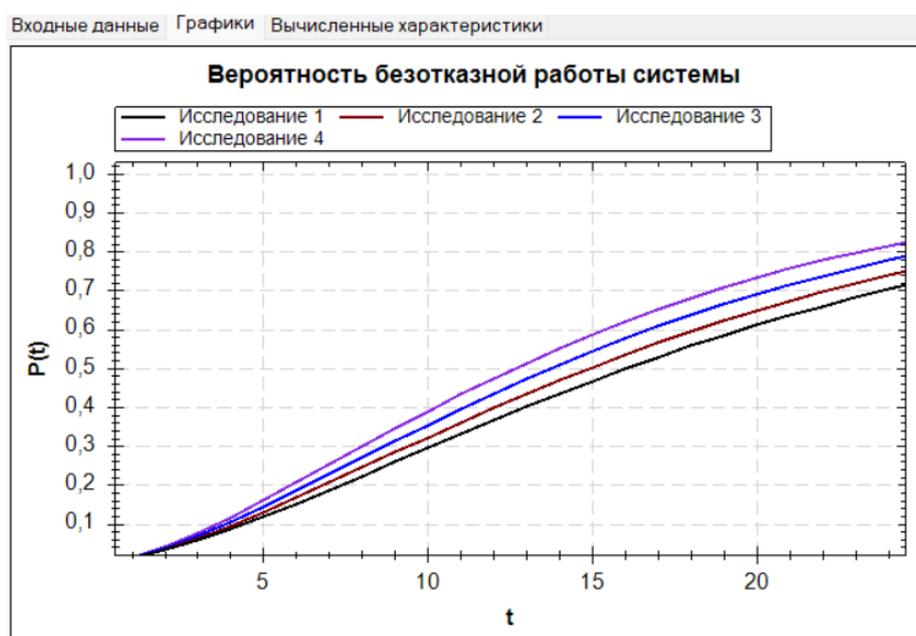


Рисунок 27 – Графические вычисления программы

### 3.3. Программное приложение, визуализирующее расчёты постпожарной сукцессии мхов в заповеднике Утриш

Созданное программное приложение находит графическое решение рассматриваемых на участках  $Us$ ,  $Uw$  систем дифференциальных уравнений (28, 30) после ввода исходных величин  $\mu_1$ ,  $V$ ,  $Z$  описанных ниже, и:

- осуществляет графический вывод значений вероятности состояний (стадий) сукцессии  $p_0(t)$ ,  $p_1(t)$ ,  $p_2(t)$  (зелёная линия – вероятность нахождения в стадии  $S_0$ , красная – в стадии  $S_1$ , синяя – в стадии  $S_2$ );

- рассчитывает среднее время этапа сукцессии  $T$ , интенсивности  $\mu_0$  переходов растительности с начальной стадии  $S_0$  в первую  $S_1$  [21].

Интенсивность  $\mu_0$  вычисляем, используя формулу из [20]:

$$\mu_0 = \frac{1}{2} e^{\left(\frac{1Z_c}{4V_c}\right)} \text{ (в годах)}, \quad (45)$$

где через  $Z_c$  обозначено суммарное превышение содержания элементов в почве относительно фонового, а через  $V_c$  – суммарное превышение содержания элементов в растениях почве относительно фонового.

Среднее время (в годах) переходов  $S_0^s \rightarrow S_2^s$  и  $S_0^w \rightarrow S_2^w$  можно оценить соответственно по формулам:

$$T_s = \frac{1}{\mu_0^s} + \frac{1}{\mu_1^s}, \quad (46)$$

$$T_w = \frac{1}{\mu_0^w} + \frac{1}{\mu_1^w}. \quad (47)$$

Алгоритм основных расчетов программного приложения, представлен на рисунке 28.

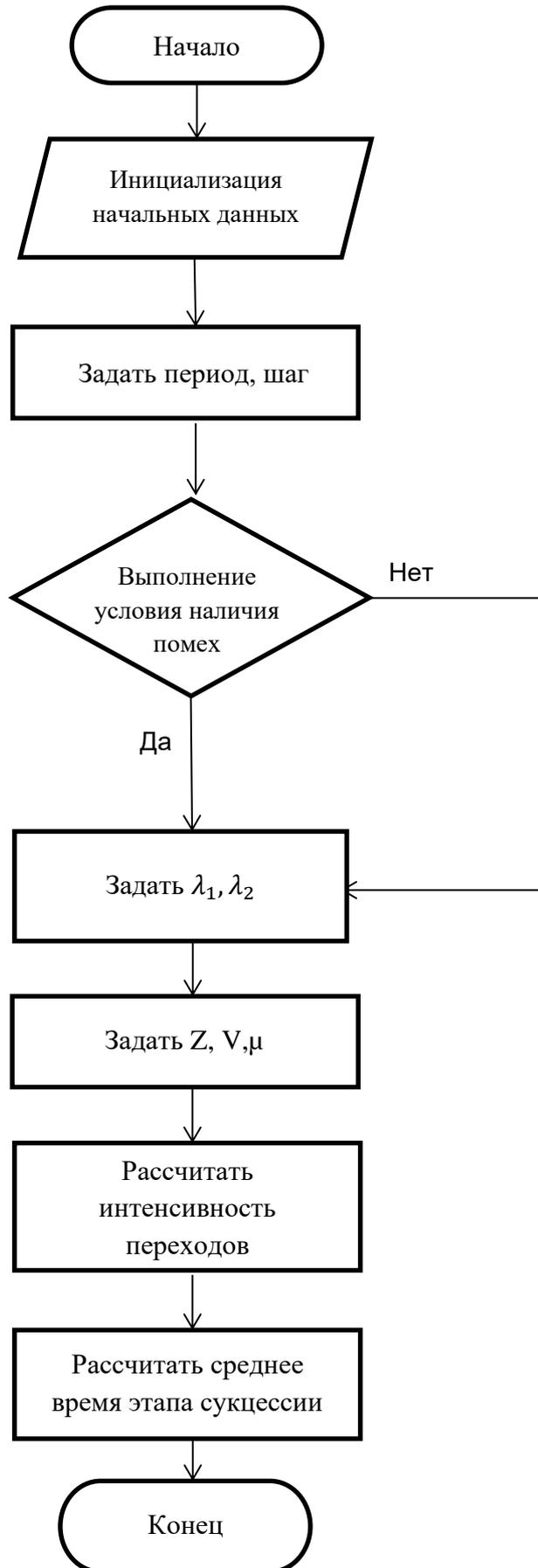


Рисунок 28 – Алгоритм программного приложения для расчетов  
постпожарной сукцессии

Интерфейс приложения изображён на рисунках 29, 30.

Пользователь может:

- менять шаг интегрирования и отрезок интегрирования  $[0, \text{период}]$  на оси  $OX$  (шаг интегрирования лучше брать с сотыми долями, например, 0,01, 0,05 и т.д.);
- навести мышь на график и наблюдать надписи (каждая кривая подписана);
- после ввода данных запускать приложение нажатием кнопки «Вычислить».

### Вычислительный эксперимент, подтверждающий наблюдения

Был проведён вычислительный эксперимент, который численно повторяет результат статьи [20] (таблица 8), т. е. при  $Z_c^S = 31$ ,  $V_c^S = 8$  для участка  $U_s$  величины,  $Z_c^W = 6$ ,  $V_c^W = 20$ .

Для  $U_w$ , а также для  $\mu_1^S = \mu_1^W = \mu_1 = 5$  имеем:

$\mu=5 > \mu_0^S = 1,32 > \mu_0^W = 0,54$  и  $T_s = 0,95 < T_w = 2,05$  (в годах), и дополняет его графическим представлением вероятностей  $p_i(t)$  (рисунок 29 и 30).

Таблица 8 – Результаты вычислительного эксперимента

	<b>Z</b>	<b>V</b>	<b><math>\mu_1</math></b>	<b><math>\mu_0</math></b>	<b>T</b>
Пожар повышенной интенсивности	31	8	5	1,32	0,96
Пожар пониженной интенсивности	6	20	5	0,54	2,05

### Вариант «подпитки» растений на участке с пониженной интенсивностью горения

Рассмотрим подробнее сукцессию на участках пожара с пониженной интенсивностью горения, вводя дополнительные состояния  $S_{01}$  и  $S_{12}$ , за счёт

которых растения будут дополнительно «подпитываться». Переход к таким состояниям «подпитки» обозначим через  $\lambda_0$ , а обратный переход в исходную стадию – через  $\lambda_1$ .

Растения (мхи) участка  $U_w$  в постпожарной стадии  $S_0^w$  оказались после пожара в более щадящей ситуации, чем мхи на участке  $U_s$ . Избытка упомянутых выше химических элементов здесь нет, и для восстановления они требуется использовать некие дополнительным ресурсы  $S_{01}^w$  и  $S_{12}^w$ , необходимые для жизнедеятельности. В случае обращения к ним, растения получает силы к восстановлению, скажем «подпитываются» перед переходом к стадии  $S_1^w$  и  $S_2^w$  соответственно.

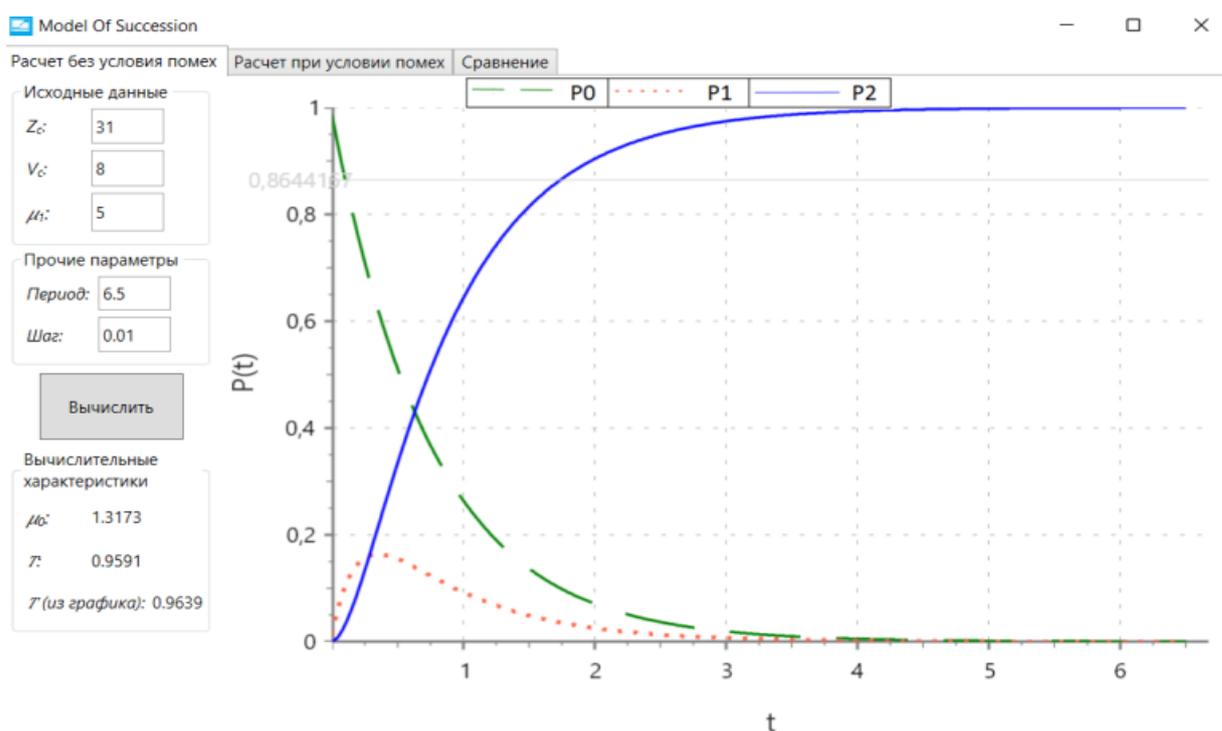


Рисунок 29 – График изменения вероятности состояний для условия пожара с повышенной интенсивностью

Вероятности ресурсов  $S_{01}^w$  и  $S_{12}^w$ , а точнее обращение к ним с целью «подпитки», обозначаем как  $p_{01}$  и  $p_{12}$ . При этом обращение к ним идёт с интенсивностью  $\lambda_0$ , а «подпитка» – с интенсивностью  $\lambda_1$  (рисунок 16).

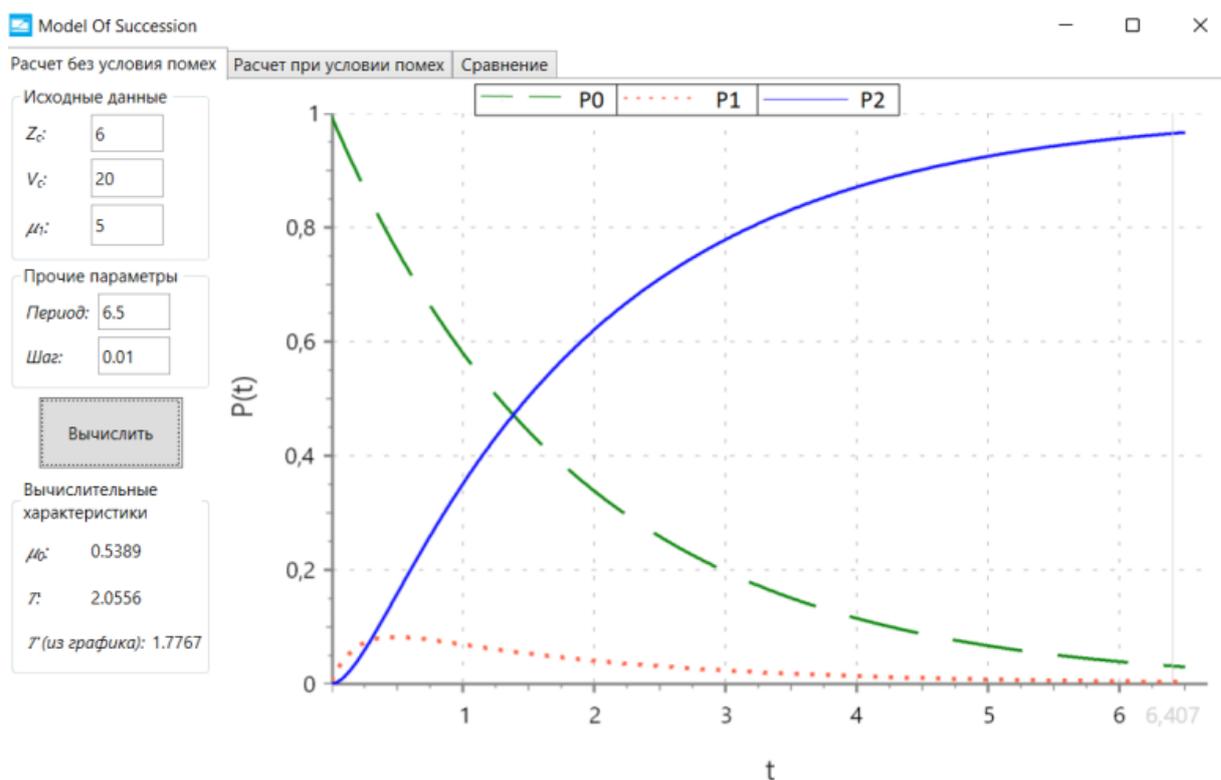


Рисунок 30 – График изменения вероятности состояний для условия пожара с пониженной интенсивностью

### Вычислительные эксперименты. Время сукцессии

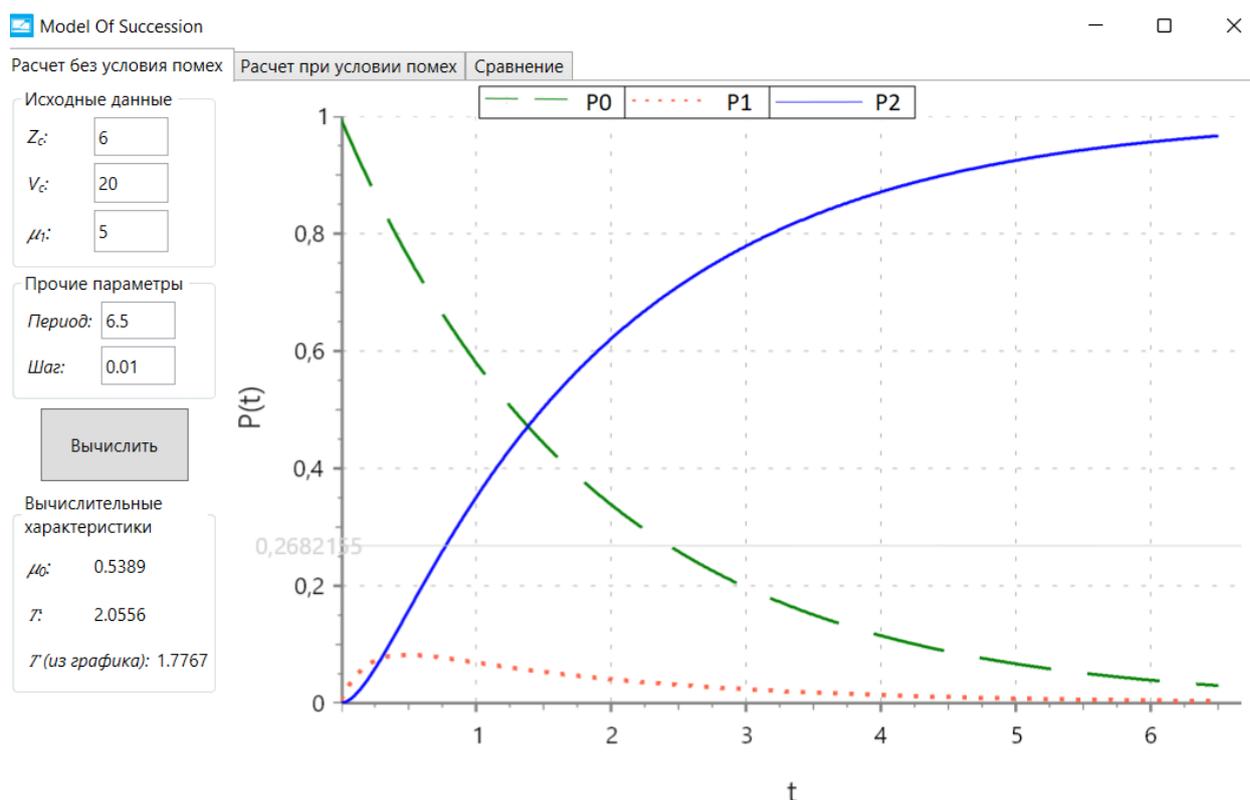
Для случая «подпитки» проинтегрируем дифференциальные уравнения (39-43) с начальными данными (таблица 9) и вычислим среднее время сукцессии по формуле

$$T_w = \frac{1}{\mu_0} + \frac{1}{\mu_1} + \frac{1}{\lambda_0} + \frac{1}{\lambda_1}. \quad (48)$$

Результаты приведены в таблице 9 и на рисунках 28–33. На рисунках 29–33 при различных значениях  $\lambda_0$  и  $\lambda_1$ .

Таблица 9 – Данные для вычислительного эксперимента

№		Z	V	$\mu_1$	$\mu_0$	$\lambda_0$	$\lambda_1$	T
1	Пожар пониж инт. Рисунок 31	6	20	5	0,54	-	-	2,05
2	Пожар пониж инт. Рисунок 32	6	20	5	0,54	5	3	2,59
3	Пожар пониж инт. Рисунок 33	6	20	5	0,54	5	4	2,5056
4	Пожар пониж инт. Рисунок 34	6	20	5	0,5389	5	5	2,4556
5	Пожар пониж инт. Рисунок 35	6	20	5	0,5389	3	5	2,589
6	Пожар пониж инт. Рисунок 36	6	20	5	0,5389	4	5	2,5056

Рисунок 31 – Участок  $U_w$ . Отсутствие «подпитки»

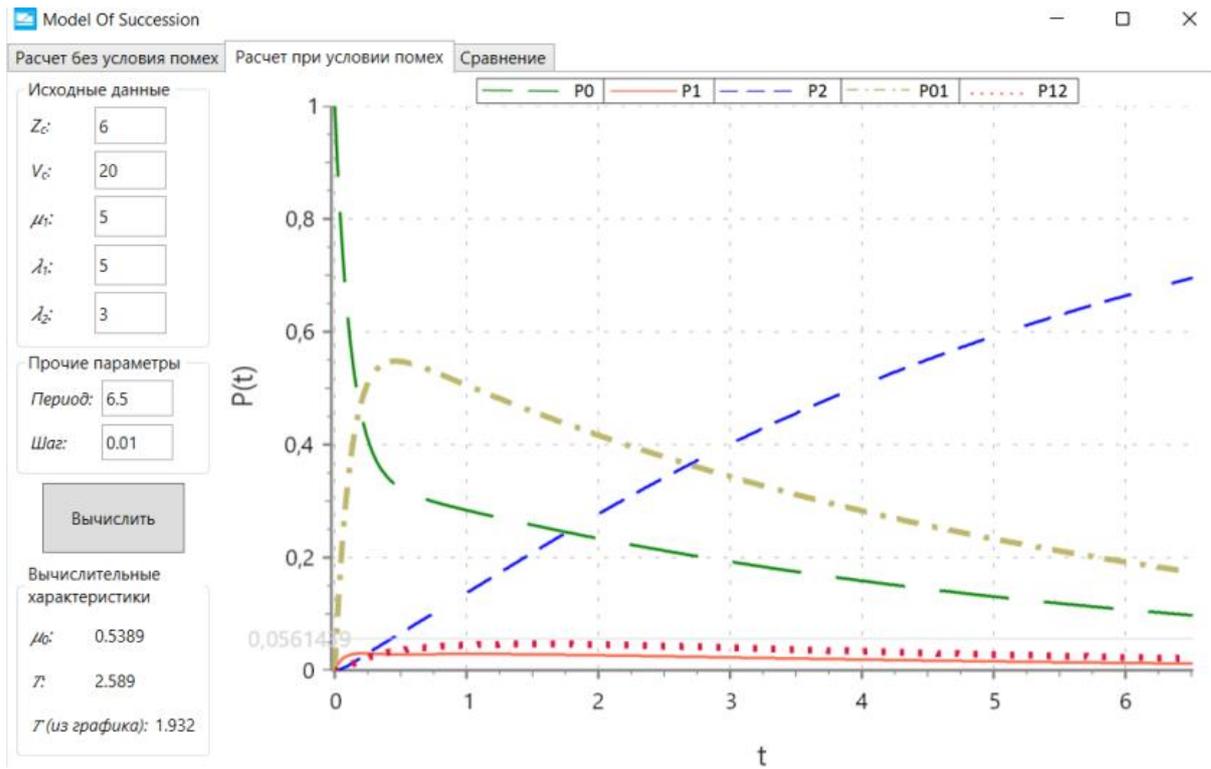


Рисунок 32 – Участок  $U_w$ . Наличие «подпитки» при  $\lambda_0 = 5, \lambda_1 = 3$

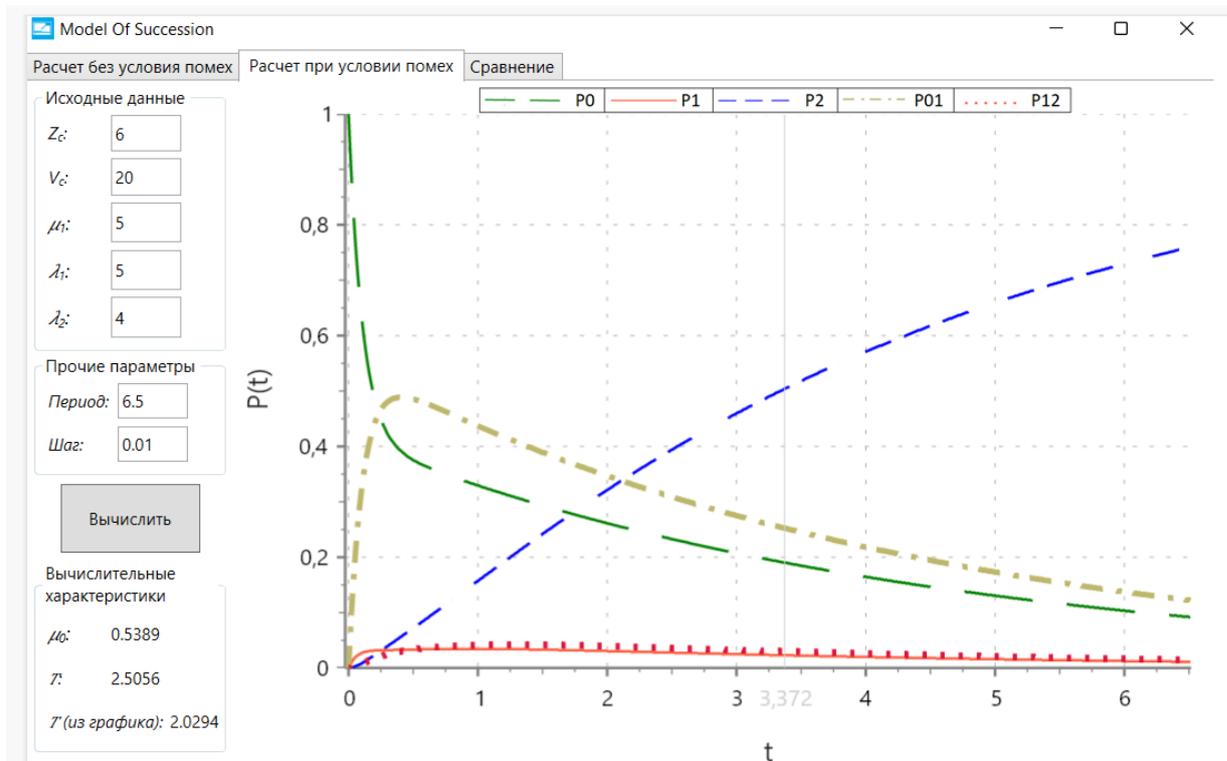


Рисунок 33 – Участок  $U_w$ . Наличие «подпитки» при  $\lambda_0 = 5, \lambda_1 = 4$

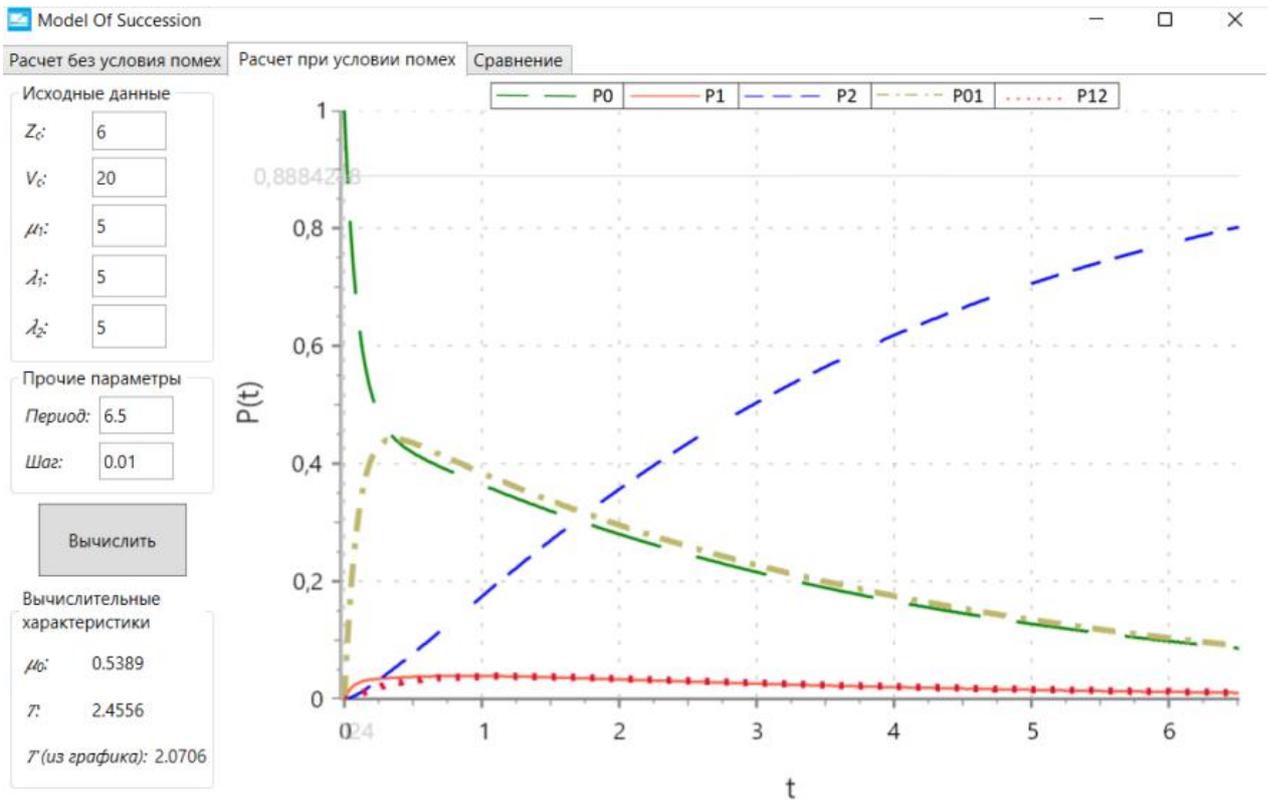


Рисунок 34 – Участок  $U_w$ . Наличие «подпитки» при  $\lambda_0 = 5, \lambda_1 = 5$

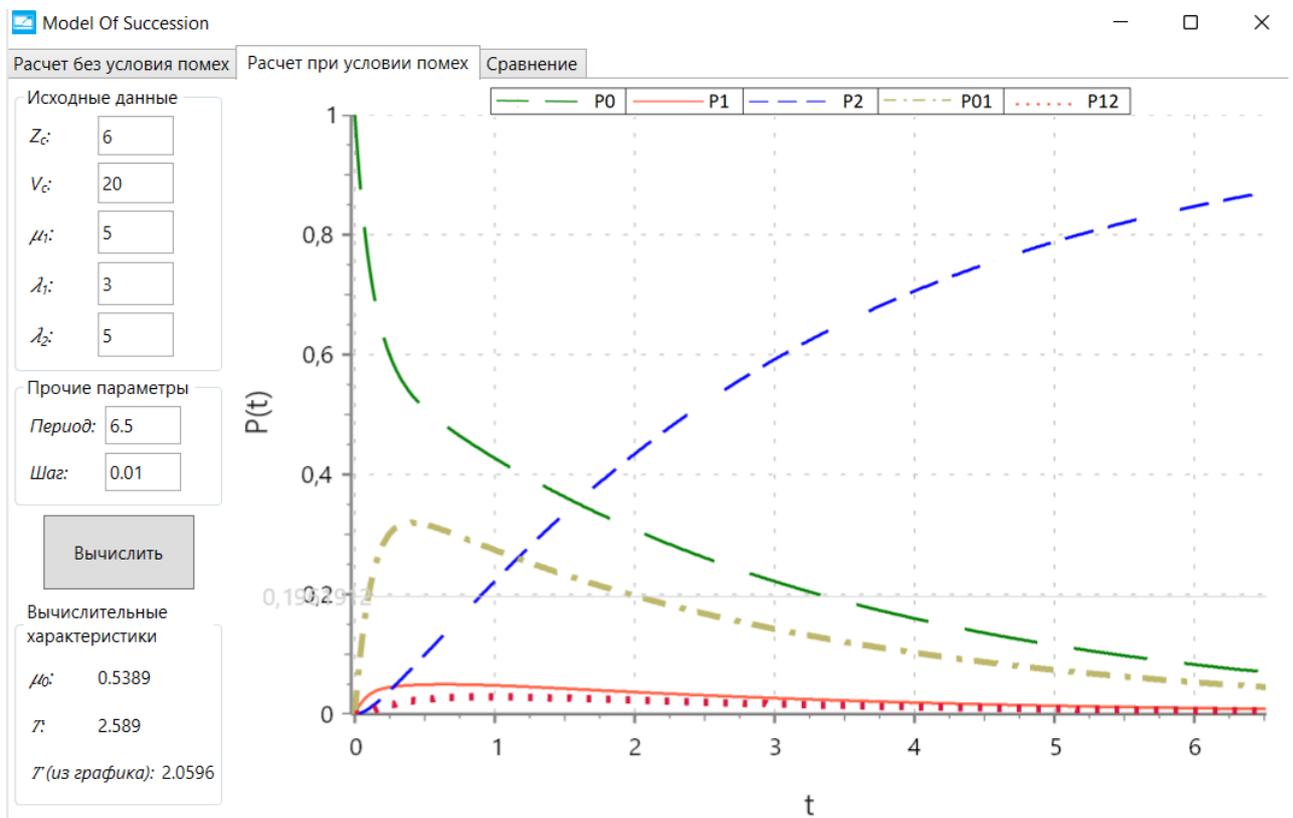


Рисунок 35 – Участок  $U_w$ . Наличие «подпитки» при  $\lambda_0 = 3, \lambda_1 = 5$

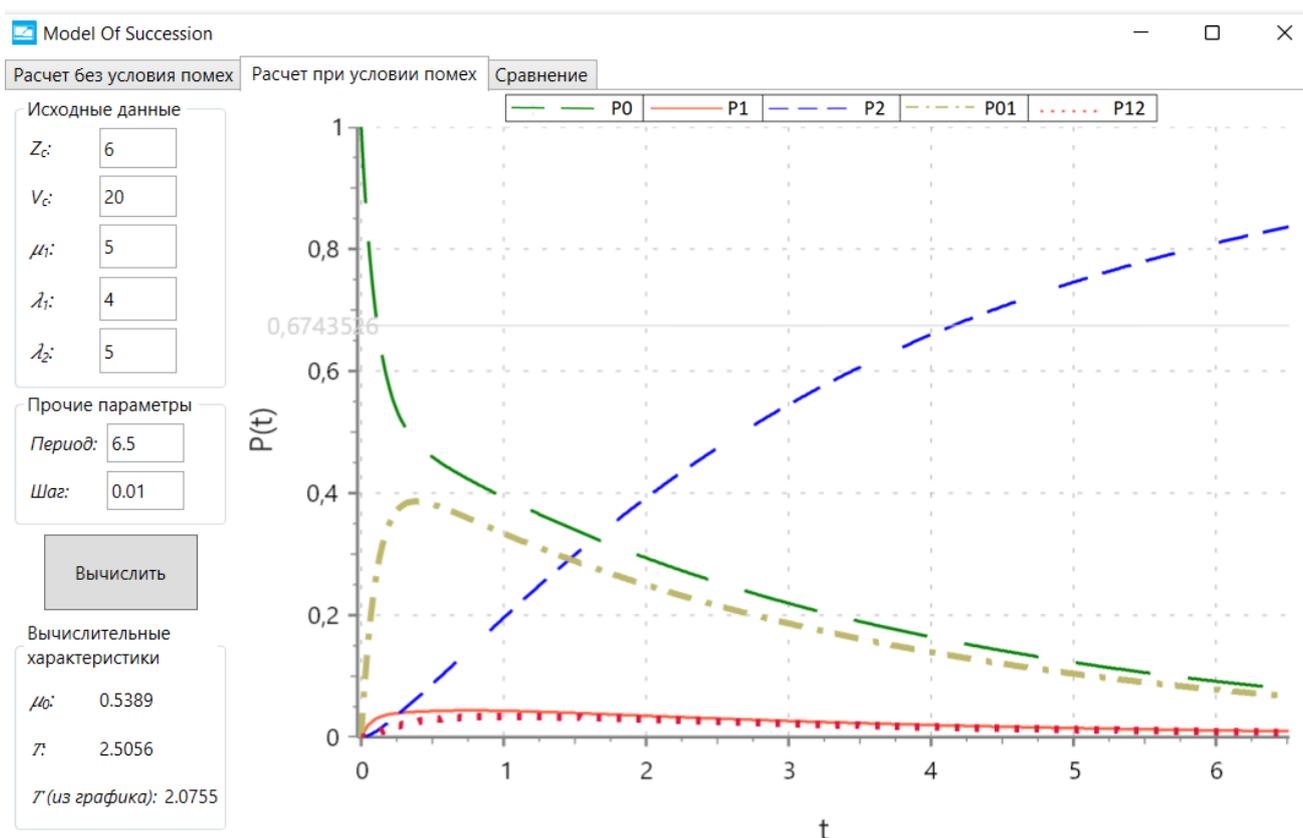


Рисунок 36 – Участок  $U_w$ . Наличие «подпитки» при  $\lambda_0 = 4, \lambda_1 = 5$

Графические решения уравнений (рисунок 29, 30), описывающих сукцессию, визуализируют и подтверждают выводы статьи [20]. В данном параграфе мы более подробно рассмотрели сукцессию на участках  $U_w$  с пониженной интенсивностью пожара. Растения на них не имели возможности использовать тот избыточный набор химических элементов, что имелся на участках с повышенной интенсивностью горения. Поэтому мы рассмотрели модель обращения растений участка  $U_w$  к дополнительным источникам, условно обозначенным как стадии  $S_{01}$  и  $S_2$  и названным «подпиткой».

«Подпитка» – это «попытки» ущербных растений участка  $U_w$  уйти к «успешной» стадии  $S_1$  и к конечной стадии  $S_2$  за счёт замены дефицита элементов на участке  $U_w$  чем-то иным, иным ресурсом, что способствовало бы их выживанию, восстановлению. Поэтому мы и добавили в модели стадии  $S_{01}^w$  и  $S_{12}^w$ .

Вероятности перехода к ним, как видно из рисунков 32-36, минимальны, что отвечает их промежуточности, «вспомогательности» для сукцессии на участках с пониженной интенсивностью горения. На всех рисунках мы видим стремление растений на всех участках восстановиться – кривая  $p_2(t)$  везде монотонно возрастает, хотя время восстановления разное.

### **3.4. Программа для вычисления количества лесных участков, находящихся в различных состояниях горения**

Для реализации модели численного решения задачи вычисления количества лесных участков, находящихся в различных состояниях горения, которая подробно описана в параграфе 2.4, разработано программное приложение для проведения вычислительных расчетов данной задачи.

Программа разработана в среде C#, для которой характерны универсальность, широкие возможности решения инженерных задач и удобство работы с интерфейсом.

Общий вид интерфейса программы имеет следующий вид (рисунок 37).

Пользовательское меню программы состоит из одного окна, которому характерна простота в использовании и понятность в работе для пользователей, знакомых с работой в операционной системе Windows.

Программа реализует следующие функции:

- ввод входных данных модели;
- вычисление интенсивностей перехода участков из состояния горения в тления, из тления в прекращения пожара;
- расчет количества участков в состояниях горения, тления и прекращения горения соответственно.

Работа программы осуществляется следующим образом. После входа в меню программы, необходимо ввести исходные параметры и нажать кнопку

«Вычислить». Программа запустит алгоритм, реализующий основные вычисления.

Затем в программе выполняется проверка входных данных на соответствие необходимому формату. После того как корректный ввод соответствующих элементов будет подтвержден, программа начинает расчет количества участков в соответствующих состояниях.

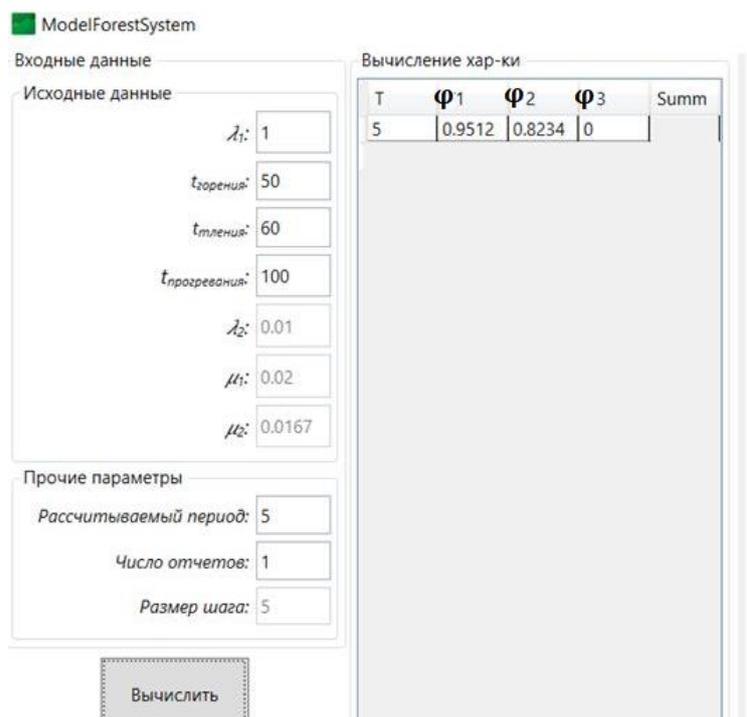


Рисунок 37 – Интерфейс программы

Для того чтобы программа смогла произвести вычисления, пользователю необходимо ввести следующие параметры:

- $\lambda_1$  – количество смежных участков, которые возгораются от одного горящего;
- $t_{горения}$  – среднее время горения;
- $t_{тления}$  – среднее время тления;
- $t_{прогрева}$  – среднее время прогрева растительности лесного участка.

Значения  $\mu_1$  – интенсивность перехода участка из состояния горения в тления,  $\mu_2$  – интенсивность перехода участка из состояния тления в прекращения,

являются параметрами, которые вычисляются в программе после ввода исходных данных.

### Проверим работоспособность программы.

ПРИМЕР. Влияние количества смежных участков, возгорающихся от одного горящего на величину участков в стадии горения.

Будем увеличивать количество участков  $\lambda_1$ . Согласно расчетам программы получаем, чем больше количество участков, которые будут возгораться, тем большее значение принимает величина  $\varphi(t_1)$  – количество участков, находящихся в стадии горения (таблица 10).

Таблица 10 – Зависимость участков в стадии горения от количества участков, возгорающихся от одного горящего

№	$\lambda_1$	$t_{\text{горения}}$	$t_{\text{тления}}$	$t_{\text{прогрева}}$	$\varphi(t_1)$
1	1	50	60	100	0,95
2	2	50	60	100	1
3	3	50	60	100	1,01
4	6	50	60	100	1,04
5	10	50	60	100	1,08

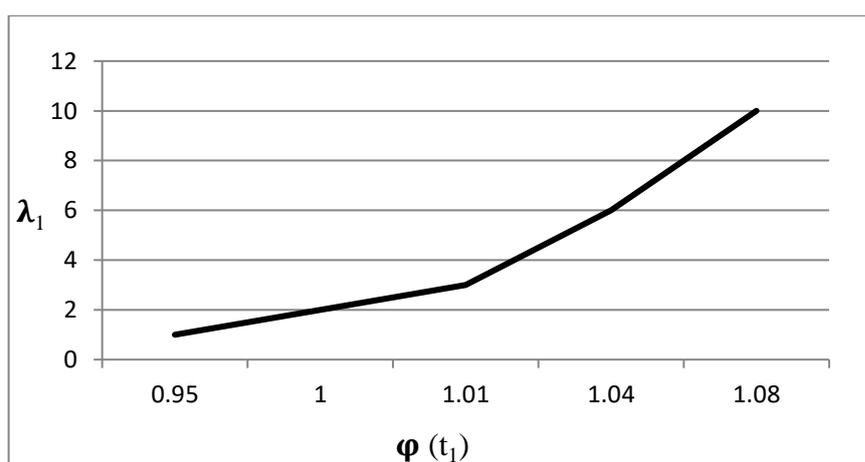


Рисунок 38 – Зависимость количества лесных участков, находящихся в стадии горения от количества смежных участков, которые возгораются от одного горящего

Интерфейс программы, которая проводит данные вычисления, выглядит следующим образом (рисунок 39):

Рисунок 39 – Интерфейс программы

### ПРИМЕР. Тушение пожара

Рассмотрим теперь процесс тушения пожара.

В процессе ликвидации природного пожара, вычисленные характеристики интенсивностей перехода  $\mu_1$  и  $\mu_2$  будут увеличивать свое значение, а величина, обратная среднему времени прогрева  $\lambda_2$  будет уменьшаться. В таком случае, значение количества участков  $\lambda_1$  может принимать отрицательное значение.

Таблица 11 – Тушение лесного пожара

№	$\lambda_1$	$t_{горения}$	$t_{тления}$	$t_{прогрева}$	$\varphi(t_1)$	$\varphi(t_2)$	$\varphi(t_3)$
1	-2	30	15	100	0,95	-	2,005
2	-2	25	15	100	0,94	-	2,54
3	-2	20	15	100	0,93	-	4,14

Проверим экспериментально. Вычисленные характеристики и входные данные представлены в таблице 11.

Из таблицы видно, если среднее время горения и время тления будет уменьшаться, то количество участков находящихся в стадии  $\varphi(t_3)$  прекращения пожара будет увеличиваться.

Предложенное программное приложение, как видно из изложенного выше, достаточно адекватно отражает стадии горения леса. Осуществлен анализ и прогноз количества смежных участков, возгорающихся от одного горящего на величину участков в стадии горения. Найденные потенциалы легко можно использовать для составления профилактических планов.

Согласно Таксационному описанию лесничеств Омской области, такими участками могут быть кварталы и выделы лесничеств.

На рисунке 41 представлено таксационное описание Большекулачинского лесничества квартала 1, выделов №№ 1–8, на рисунке 42 – квартал 40 выделы №№26-33. Для каждого выдела указана занимаемая площадь, класс пожарной опасности и другие характеристики.

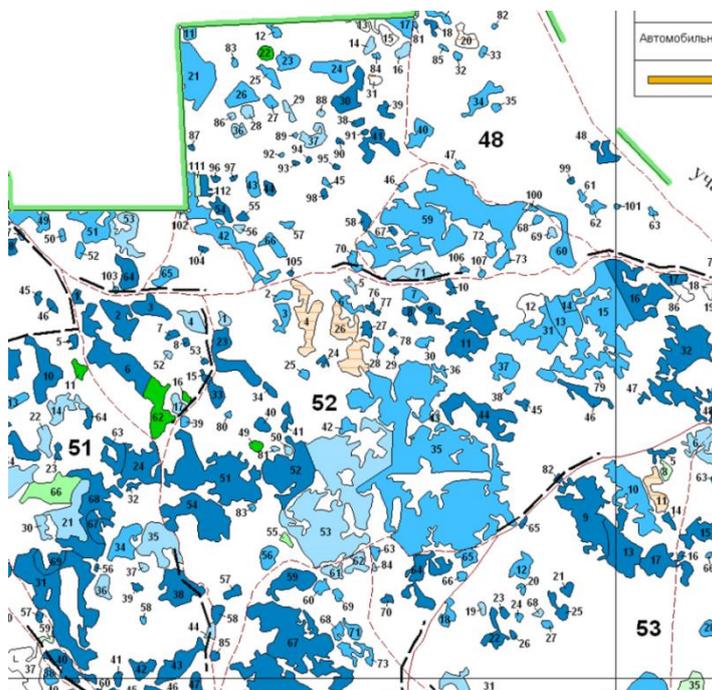


Рисунок 40 – План лесонасаждений Большекулачинского лесничества кварталов 48,51,52

Участковое лесничество БОЛЬШЕКУЛАЧИНСКОЕ ЗЕЛЕННЫЕ ЗОНЫ		Таксационное описание										Квартал: 1	
№	Площадь, м2	Вид	Возраст	Высота	Диаметр	Тип леса	Плотность	Запас сырья	Класс	Запас на выдел	МЗ	Хозяйственные распоряжения	
№	Площадь, м2	Вид	Возраст	Высота	Диаметр	Тип леса	Плотность	Запас сырья	Класс	Запас на выдел	МЗ	Хозяйственные распоряжения	
1	7 10Б	1 Б	20 10	8 2 1 2	РТ	5123	4 30	21	21	14	УБОРКА ЗАХЛ. КУЛЬТ. П/ПОЛОГ		
культуры-83 г., состояние погибшие, повреждение пожаром													
класс пожар.опасности-4													
2	2,2	насаждение с породами искуств. происхождения	1 Б	20 8 6 2 1 3	РТ	6 35	77	62	15				
8 С													
культуры-83 г., состояние погибшие, повреждение пожаром													
класс пожар.опасности-3													
3	2,6 10Б+С	1 Б С	20 10	8 2 1 2	РТ	5 40	104	104	52	УБОРКА ЗАХЛ. КУЛЬТ. П/ПОЛОГ			
культуры-83 г., состояние погибшие, повреждение пожаром													
класс пожар.опасности-4													
4	9	Сенокос											
суходольный, среднего качества, чистый, урожайность 1,5 т/га, фонд адм.													
класс пожар.опасности-4													
5	2 10Б+Б	1 Б Б	65 21	24 7 3 2	РТ	8 200	40	40	4	ВЫБОР. САНР. 30%			
повреждение низовым пожаром, БЕРЕЗА, сильная поврежденность													
класс пожар.опасности-4													
6	29,4	насаждение с породами искуств. происхождения	1 Б	20 10 8 2 1 2	РТ	4 30	882	706	176	УБОРКА ЗАХЛ. КУЛЬТ. П/ПОЛОГ			
8Б2С													
культуры-91 г., состояние погибшие, повреждение пожаром													
пройден пожаром, класс пожар.опасности-3													
7	17,7	Сенокос											
суходольный, среднего качества, чистый, урожайность 1,5 т/га, фонд адм.													
класс пожар.опасности-4													
8	5,9 9Б1С	1 Б С	20 10	8 2 1 2	РТ	6 50	295	265	59	УБОРКА ЗАХЛ.			
10 С													
класс пожар.опасности-3, пройден пожаром													

Рисунок 41 – Таксационное описание Большекулачинского лесничества квартала 1

## Таксационное описание

Участковое лесничество БОЛЬШЕКУЛАЧИНСКОЕ  
ЗЕЛЕННЫЕ ЗОНЫ

Квартал: 40

26	1,0	Сенокос суходольный, среднего качества, чистый , урожайность 0,5 т/га, фонд адм класс пожар. опасности-4	Д : К : Г : Б : Тип : П : Запас сарораств. : К : Запас на выделе, мЗ	К : Запас на выделе, мЗ
27	,2	Сенокос суходольный, среднего качества, чистый , урожайность 0,5 т/га, фонд адм класс пожар. опасности-4	Д : К : Г : Б : Тип : П : Запас сарораств. : К : Запас на выделе, мЗ	К : Запас на выделе, мЗ
28	,3	Сенокос суходольный, среднего качества, чистый , урожайность 0,5 т/га, фонд адм класс пожар. опасности-4	Д : К : Г : Б : Тип : П : Запас сарораств. : К : Запас на выделе, мЗ	К : Запас на выделе, мЗ
29	,1	Сенокос суходольный, среднего качества, чистый , урожайность 0,5 т/га, фонд адм класс пожар. опасности-4	Д : К : Г : Б : Тип : П : Запас сарораств. : К : Запас на выделе, мЗ	К : Запас на выделе, мЗ
30	2,6	лесные культуры 10С	Д : К : Г : Б : Тип : П : Запас сарораств. : К : Запас на выделе, мЗ	К : Запас на выделе, мЗ
31	1,4	несомкнувшиеся культуры Е С 7Е3С	Д : К : Г : Б : Тип : П : Запас сарораств. : К : Запас на выделе, мЗ	К : Запас на выделе, мЗ
32	,6	вырубка- 00 г. пней 100 шт/га, диаметр 30 см ,вейниковый	Д : К : Г : Б : Тип : П : Запас сарораств. : К : Запас на выделе, мЗ	К : Запас на выделе, мЗ
33	1,1	Дорога лесохозяйственная, грунтовая, ширина 5,0 м, ширина проезжей части 4,0 м, протяженность 1,5 км, состояние удовлетворительное, круглогодично	Д : К : Г : Б : Тип : П : Запас сарораств. : К : Запас на выделе, мЗ	К : Запас на выделе, мЗ

Рисунок 42 – Таксационное описание Большекулачинского лесничества квартала 40

План лесонасаждений Большекулачинского лесничества представлен на рисунках 40,43.

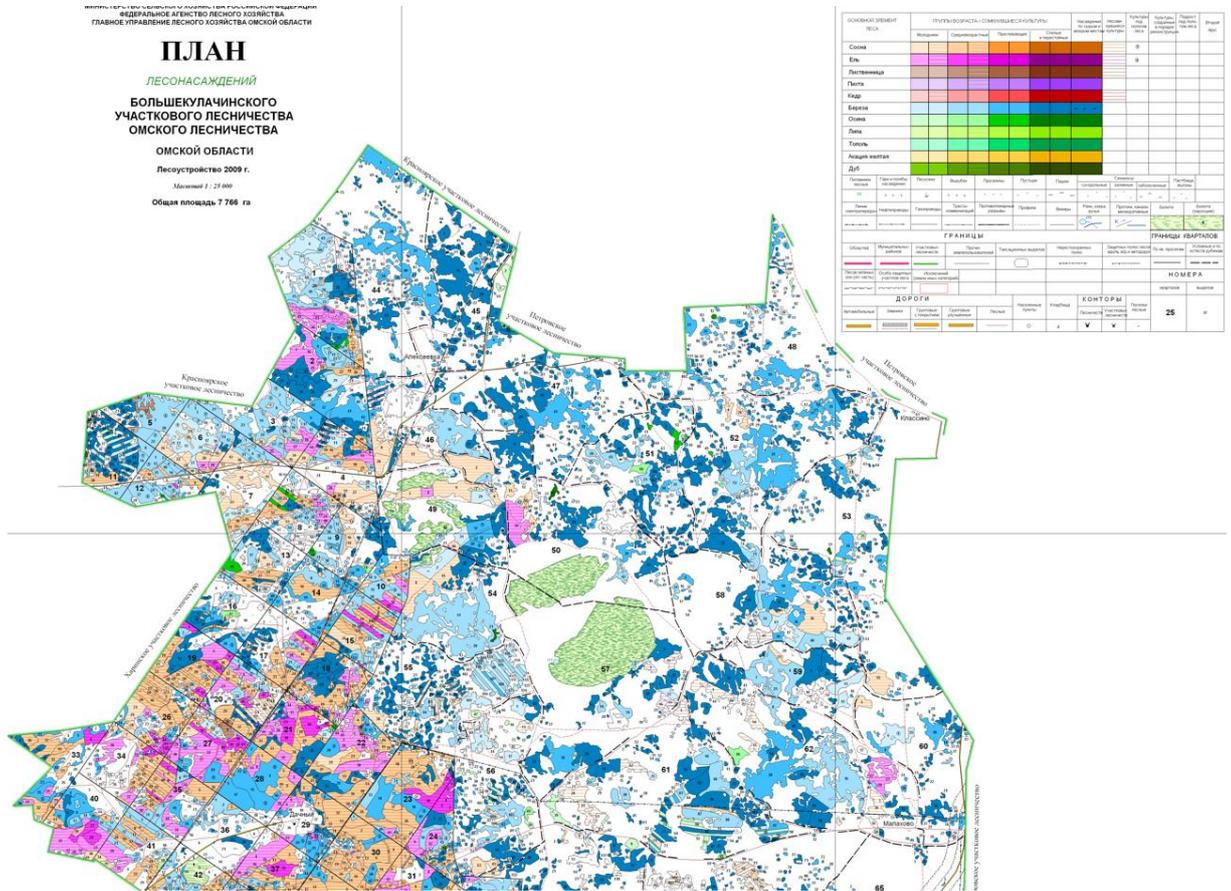


Рисунок 43 – План лесонасаждений

## Заключение

В ходе проведенных в диссертационной работе исследований получены следующие результаты:

1. С целью развития методов моделирования системы предупреждения лесных пожаров на основе теории марковских процессов:

– предложен метод решения задачи для оценки готовности лесной системы к ситуации наличия риска возгорания;

– предложена формула вычисления степени готовности лесной системы к ситуации возникновения пожара;

– решена задача вычисления количества лесных участков, находящихся в различных состояниях горения. Вычисленные параметры могут быть использованы при разработке лесных планов к проведению и прогнозированию противопожарных профилактических мероприятий.

2. На основе исследованной марковской модели постпирогенных зон различной интенсивности пожара, описана ситуация успешности первого этапа сукцессии мхов в зоне максимального по интенсивности пожара по сравнению с ходом сукцессии в зоне малоинтенсивного горения. Разработано программное приложение, позволяющее графически отобразить динамику вероятностей стадий сукцессии и вычисляющее соответствующее время сукцессии. Проведённые вычислительные эксперименты иллюстрируют и визуализируют результаты наблюдения постпожарной сукцессии в заповеднике Утриш Черноморского побережья России.

3. На основе исследованной модели решения задачи вычисления функциональной готовности, участвующей в конфликтной ситуации человеко-организационной системы в процессе ее подготовки к работе и в процессе восстановления работоспособности после отказов компонентов и с учетом

участия в этих процессах человека-оператора, разработано программное приложение для численного решения поставленной задачи. Программа используется для проведения вычислительных экспериментов для оценки готовности лесной системы к ситуации наличия риска возгорания. При этом под конфликтующей системой в программе понимается лесная система, а соответствующие входные данные интенсивностей отказов и восстановления системы – это входные параметры, характеризующие лесную систему.

4. Разработана программа для вычисления количества лесных участков, находящихся в различных состояниях горения.

Предложенные в работе математические методы моделирования, алгоритмы и программы позволяют решить ряд актуальных задач, связанных с процессом предупреждения лесных пожаров, а также наиболее эффективным способом планировать противопожарные мероприятия, заранее промоделировать возникающие проблемные ситуации и противопожарное состояние лесных объектов.

Дальнейшее развитие рассмотренного в работе направления связано, на наш взгляд, с применением разработанных методов моделирования и алгоритмов исследования марковских процессов не только к решению актуальных задач природных пожаров, но также и к задачам из других областях знаний, применимым к ситуации с конфликтующими системами, описываемыми марковскими процессами. Такими могут выступать, например, процедуры восстановления компьютерной системы после успешных хакерских атак [9].

### Список использованных источников

1. Амосов, Г. А. Некоторые закономерности развития лесных низовых пожаров / Г. А. Амосов // Возникновение лесных пожаров : сб. ст. – Москва : Наука, 1964. – С. 152–183.
2. Володченкова, Л.А. Экологические катастрофы лесных экосистем: их моделирование и прогнозирование: специальность 03.02.08 «Экология» : дис. ... канд. биол. наук / Л.А. Володченкова. – Омск, 2011. – 150 с.
3. Валендик, Э. Н. Крупные лесные пожары / Э. Н. Валендик, П. М. Матвеев, М. А. Софронов. – Москва : Наука, 1979. – 198 с.
4. Валендик, Э. Н. Особенности распространения крупных лесных пожаров / Э. Н. Валендик // Лесные пожары и борьба с ними : сб. науч. тр. – Москва : ВНИИЛМ, 1987. – С. 28–42.
5. Вдовенко, М. С. Параллельные алгоритмы моделирования процессов распространения лесных пожаров на основе математических моделей различных типов / М. С. Вдовенко, Г. А. Доррер, П. С. Шаталов // Вычислительные технологии. – 2013. – Т. 18, № 1. – С. 3–14.
6. Вентцель, Е. С. Исследование операций / Е. С. Вентцель. – Москва : Советское радио, 1972. – 552 с.
7. Влияние низовых пожаров на возобновление в среднетаежных лиственничниках Красноярского края : моногр. / Е. О. Бакшеева, А. М. Матвеев, П. М. Матвеев, Д.А. Селин / Сиб. гос. технол. ун-т. – Красноярск : Изд-во СибГТУ, 2003. – 194 с. – ISBN 5-8173-0149-0.
8. Горн, О. А. Моделирование готовности лесного фитоценоза к риску возгорания посредством марковских процессов / О. А. Горн, А. К. Гуц // Математическое и компьютерное моделирование: сб. материалов VIII Междунар. науч. конф., посвящ. памяти А.Л. Йозефера (Омск, 20 нояб. 2020 г.) – Омск:

ОмГУ им. Ф.М. Достоевского, 2020. – С. 161-163.

9. Горн, О. А. Оценка готовности компьютерной системы в процессе восстановления после серии атак, приведших к отказам / О. А. Горн, А. К. Гуц // Омские научные чтения - 2020 : материалы IV Всеросс. науч. конф. (Омск, 30 нояб. – 05 дек. 2020 г.) – Омск: Изд-во Ом.гос.ун-та, 2020. – С. 380-382.

10. Горн, О. А. Программный комплекс для оценки функциональной готовности технической системы к противоборству в конфликтной ситуации продолжению противоборства после отказов компонентов системы с учетом абсолютной и конечной надежности человека-оператора / О. А. Горн // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность. – 2015. – № 2. – С. 233-237.

11. Горн, О. А. Решение задач конфликтных ситуаций при помощи аппарата теории игр / О. А. Горн // Россия молодая: Сборник материалов VI всеросс., 59-й науч.-практ. конф. молодых ученых с междунар. уч. (Кемерово, 22 апр. 2014 г.) – Кемерово: Кузбасский гос. Тех. Ун. им. Т.Ф. Горбачева, 2014. – С. 473- 479.

12. ГОСТ Р22.1.09-99. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Мониторинг и прогнозирование лесных пожаров. Общие требования : утв. и введ. в действие Постановлением Госстандарта России от 25 мая 1999 г. № 181 : дата введ. 2000-01-01. – Москва : Изд-во стандартов, 1999. – 18 с.

13. Гришин, А. М. Моделирование и прогноз катастроф : учеб. пособие / А. М. Гришин ; Том. гос. ун-т. – Томск : Изд-во ТГУ, 2003. – Ч. 1. – 521 с. – ISBN 5-7511-1740-9.

14. Гришин, А. М. О геоинформационной системе прогноза лесной пожарной опасности / А. М. Гришин, А. И. Фильков // Экологические системы и приборы. – 2004. – № 8. – С. 26–28.

15. Гришин, А. М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними / А. М. Гришин. – Новосибирск : Наука, 1992. – 407 с. – ISBN 5-02-029708-9.

16. Гришин, А. М. Общие математические модели лесных и торфяных

пожаров и их приложения / А. М. Гришин // Успехи механики. – 2002. – Т. 1, № 4. – С. 41–89.

17. Гундар, С. В. Характеристики воспламенения частицы лесного горючего материала в плоскопараллельном лучистом потоке / С. В. Гундар, Г. П. Телицын // Горение и пожары в лесу. – Красноярск : ИЛиД, 1973. – С. 146–153.

18. Гуц, А.К. Защита леса от болезней и вредителей с точки зрения теории игр / А.К.Гуц, Л.А.Володченкова// Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. - 2016.- №.1. -С.110-123.

19. Гуц, А.К. Прогнозирование состояний соснового леса при нарастании засухи или пожарной опасности / А.К.Гуц, Л.А.Володченкова // Вестник Челябинского государственного педагогического университета. - 2010. - №4. - С.331-337.

20. Гуц, А.К. Математическое моделирование геохимической трансформации почвенно-растительного покрова поспирогенных зон различной интенсивности горения /А.К. Гуц, Л.В. Захарихина, Е.А. Виноцкая, С.П. Черненко, В.В. Керимзаде – DOI 10.24147/2222-8772.2023.1.55-62// Математические структуры и моделирование. - 2023. - № 1(65). - С. 55–62.

21. Гуц, А. К. Программное приложение, визуализирующее расчёты постпожарной сукцессии мхов в заповеднике Утриш / А. К. Гуц, О. А. Терентьева – DOI 10.24147/2222-8772.2023.2.80-90// Математические структуры и моделирование. – 2023. – № 2(66). – С. 80-90.

22. Доррер, Г. А. Динамика лесных пожаров : моногр. / Г. А. Доррер. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2008. – 404 с. – ISBN 978-5-7692-0985-7.

23. Захаров, А. А. Особенности лесных пожаров и возобновления кедра в Читинской области / А. А. Захаров, И. В. Горбунов // Лесной и химический комплексы - проблемы и решения : сб. ст. по материалам Всерос. науч.-практ. конф. (Красноярск, 15–16 нояб. 2007 г.). – Красноярск : Изд-во Сиб. гос. технолог.

ун-та, 2007. – Т. 1. – С. 81–86.

24. Кимстач, И. Ф. Пожарная тактика : учеб. пособие для пожарно-техн. училищ и нач. состава пожарной охраны / И. Ф. Кимстач, П. П. Девлишев, Н. М. Евтюшкин. – Москва : Стройиздат, 1984. – 591 с.

25. Конфликт сложных систем. Модели и управление / Б. К. Нартов, С. Г. Братцев, Ф. А. Мурзин, А. А. Пунтус ; Моск. авиац. ин-т. – Москва : Изд-во МАИ, 2014. – 120 с. – ISBN 978-5-7035-0554-0.

26. Коровин, Г. Н. Методика расчета некоторых параметров низовых лесных пожаров / Г. Н. Коровин // Сборник научно-исследовательских работ по лесному хозяйству / ЛенНИИЛХ. – Москва : Лесная промышленность, 1969. – Вып. XII. – С. 244–262.

27. Курбатский, Н. П. Статистическая многофакторная модель кромки низового лесного пожара / И. П. Курбатский, Г. А. Иванова // Моделирование в охране лесов от пожаров / Ин-т леса и древесины им. В. Н. Сукачева. – Красноярск : Изд-во ИлиД, 1979. – С. 17–32.

28. Лесной кодекс Российской Федерации: от 04.12.2006 N 200-ФЗ (ред. от 29 декабря 2022 г.)// СПС «КонсультантПлюс» / (дата обращения: 07.02.2023).

29. Лефевр, В. А. Конфликтующие структуры / В. А. Лефевр. – Москва : Институт психологии РАН, 2000. – 131 с. – ISBN 5-9270-0012-6.

30. Литвинов, В. А. Контроль достоверности и восстановления информации в человеко-машинных системах / В. А. Литвинов, В. В. Крамаренков. – Киев : Техника, 1986. – 200 с.

31. Логофет, Д. О. Марковские цепи как модели сукцессии: новые перспективы классической парадигмы / Д. О. Логофет // Лесоведение. – 2010. – № 2. – С. 46–59.

32. Мелехов, И. С. Лесная пирология : учеб. пособие для студентов лесохозяйственных факультетов / И. С. Мелехов. – Москва: МЛТИ, 1978. – Вып. 3 – 80 с.

33. Нартов, Б. К. Управление подвижными объектами. Формализация и модели : моногр. / Б. К. Нартов ; Ом. гос. ун-т. – Омск : Изд-во ОмГУ, 2002. – 83 с. – ISBN 5-7779-0355-X.

34. Немчинова, А. В. Оценка структурной деградации лесных экосистем и их восстановительного потенциала с помощью марковской модели сукцессии / А. В. Немчинова // Вестник Костромского государственного университета им. Н. А. Некрасова. – 2014. – Т. 20, № 7. – С. 70–75.

35. Немчинова, А. В. Признаки стохастической детерминированности автогенной сукцессии лесных экосистем в марковских моделях / А. В. Немчинова // Компьютерные исследования и моделирование. – 2016. – Т. 8, № 2. – С. 255–265.

36. Нестеров, В. Г. Горимость леса и методы ее определения / В. Г. Нестеров. – Москва : Гослесбумиздат, 1949. – 76 с.

37. Овчинников, Ф. М. Моделирование распространения и тушения лесных пожаров / Ф. М. Овчинников, А. П. Латынцев // Охрана лесов от пожаров, лесовосстановление и лесопользование : сб. науч. ст. ФГУ «ВНИИПОМлесхоз». – Красноярск : ИПЦ КГТУ, 2003. – С. 138–150.

38. Основы теории пожарных рисков и ее приложения : моногр. / Н. Н. Брушлинский, С. В. Соколов, Е. А. Клепко [и др.]. – Москва : Академия ГПС МЧС России, 2012. – 192 с.

39. Оценки условий и параметров развития лесных пожаров : метод. рекомендации / С. М. Вонский, В. Г. Гусев, Е. В. Коленов, И. Ю. Корчунова. – Ленинград : ЛенНИИЛХ, 1985. – 99 с.

40. Перминов, В. А. О возникновении и распространении лесных пожаров / В. А. Перминов // Информационные технологии и математическое моделирование : материалы V Междунар. науч.-практ. конф. (Томск, 10–11 нояб. 2006 г.) / Том. гос. ун-т. – Томск : Изд-во ТГУ, 2006. – С. 45–47.

41. Перминов, В. А. Математическое моделирование возникновения

верховых и массовых лесных пожаров : специальность 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы» : дис. ... д-ра физ.-мат. наук / В. А. Перминов ; Том. гос. ун-т. – Томск, 2011. – 282 с.

42. Подольская, А. С. Применение метода пожарной оценки вероятности возникновения лесных пожаров в ИСДМ-Рослесхоз / А. С. Подольская, Д. В. Ершов, П. П. Шуляк // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2011. – Т. 8, № 1. – С. 118–126.

43. Потапов, В. И. Компьютерная реализация математического моделирования задач противоборства, участвующих в конфликтных ситуациях / В. И. Потапов, О. А. Горн // Информационные технологии в науке и производстве: Материалы Всероссийской молодежной науч.-тех. конф. (Омск, 09–10 февраля 2015 г.) – Омск: ОмГТУ, 2015. – С. 151-156.

44. Потапов, В. И. Компьютерная реализация математического моделирования задач противоборства, участвующих в конфликтных ситуациях / В. И. Потапов, О. А. Горн // Информационные технологии в науке и производстве: Материалы Всероссийской молодежной науч.-тех. конф. (Омск, 09–10 февраля 2015 г.) – Омск: ОмГТУ, 2015. – С. 151-156.

45. Потапов, В. И. Математическая модель, алгоритмическое и программное обеспечение для компьютерного исследования параметров надежности в процессе конфликта аппаратно-избыточной динамической системы / В. И. Потапов, О. А. Горн // Омский научный вестник. – 2017. – № 2(152). – С. 102-107.

46. Потапов, В. И. Математические модели и программный комплекс для анализа функциональной готовности человеко-машинной динамической системы в конфликтной ситуации / В. И. Потапов, О. А. Горн // Омский научный вестник. – 2016. – № 5(149). – С. 136-141.

47. Потапов, В. И. Противоборство двух технических систем в конфликтной ситуации / В. И. Потапов, О. А. Горн // Междисциплинарные исследования в области математического моделирования и информатики: Материалы 3-й науч.-

практ. internet-конф. (Ульяновск, 20 февр. 2014г.) – Ульяновск: SIMJET, 2014. – С. 73-81.

48. Проекты документов // Федеральное агентство лесного хозяйства : сайт. – URL: <https://rosleshoz.gov.ru/documents> (дата обращения:08.02.2023).

49. Самороковский, А. Ф. Использование теории марковских процессов при моделировании чрезвычайных ситуаций природного характера / А. Ф. Самороковский, В. В. Горлов // Охрана, безопасность, связь. – 2020. – № 5-2. – С. 81–86.

50. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017614897 Российская Федерация. Программное обеспечение для моделирования надежностных характеристик аппаратно-избыточной динамической системы, подверженной атакам противника в конфликтной ситуации: №: 2016662532: заявл.18.11.2016: опубл. 27.04.2017 / В.И. Потапов, О.А. Горн ; правообладатель ОмГТУ.

51. Свидетельство о регистрации электронного ресурса № 20939 от 01.06.2015. Программное обеспечение «Решение задачи противоборства двух избыточных, восстанавливаемых после отказов технических систем» / В.И. Потапов, О.А. Горн; Ом. гос. техн. ун-т. – Москва : ОФЭРНиО. – 1 с.

52. Свидетельство о регистрации электронного ресурса № 21209 от 06.10.2015. Программный комплекс «Вычисление функциональной готовности технической системы при подготовке ее к противоборству в конфликтной ситуации и продолжению противоборства после отказов компонентов системы с учетом надежности человека-оператора от 09.10.2015 / В.И. Потапов, О.А. Горн; Ом. гос. техн. ун-т. – Москва : ОФЭРНиО. – 1 с.

53. Свидетельство о регистрации электронного ресурса № 21210 от 06.10.2015. Программное обеспечение «Моделирование задач оптимального резервирования технической системы с возрастающей интенсивностью отказов элементов»/ В.И. Потапов, О.А. Горн; Ом. гос. техн. ун-т. – Москва: ОФЭРНиО. –

1 с.

54. Свидетельство о регистрации электронного ресурса № 21211 от 06.10.2015. Программа «Решение задачи оптимизации восстановления технической системы при регулярном контроле исправности резервных элементов»/ В.И. Потапов, О.А. Горн; Ом. гос. техн. ун-т. – Москва : ОФЭРНиО. – 1 с.

55. Свидетельство о регистрации электронного ресурса № 22230 от 25.10.2016. Программа для вычисления характеристик надежности аппаратно-избыточной системы, участвующей в конфликтной ситуации/ В.И. Потапов, О.А. Горн; Ом. гос. техн. ун-т. – Москва: ОФЭРНиО. – 1 с.

56. Терентьева, О. А. Программные продукты для решения задач моделирования (оптимального управления) противоборствующих объектов, участвующих в конфликтной ситуации / О. А. Терентьева – DOI:10.24147/2222-8772.2022.3.79-86 // Математические структуры и моделирование. – 2022. – № 3(63). – С. 79-86.

57. Терентьева, О. А. Экспериментальное исследование возникновения лесных пожаров с учетом профилактических мероприятий / О. А. Терентьева // Математическое и компьютерное моделирование: сб. материалов X Междунар. науч. конф. (Омск, 10 февр. 2023 г.) – Омск: ОмГУ им. Ф.М. Достоевского, 2023. – С. 208-210.

58. Тихонов, В. И. Марковские процессы / В. И. Тихонов, М. А. Миронов. – Москва : Советское радио, 1977. – 488 с.

59. Указ губернатора Омской области от 17.01.2019 №4 (в ред. от 22.12.2022) «Об утверждении Лесного плана Омской области и признании утратившими силу отдельных указов Губернатора Омской области» // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов (дата обращения: 08.09.2023г).

60. Уткин, А. И. Влияние огня на природу и формирование

лиственничников Центральной Якутии / А. И. Уткин // Лесное хозяйство. – 1965. – № 1. – С. 46–50.

61. Ушанов, С. В. Математическое моделирование процессов распространения лесных пожаров и борьбы с ними / С. В. Ушанов, Г. А. Доррер, Н. Г. Бархатов // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2000. – № 2. – С. 31–36.

62. Фильков, А. И. О влиянии плотности и неоднородности состава РЕМ на скорость распространения пожара / А. И. Фильков, Т. Е. Сладкова, И. А. Горина // Математическое моделирование опасных природных явлений и катастроф : сб. материалов 7-й Междунар. конф. (Томск, 30 июня – 4 июля 2008 г.) / Том. гос. ун-т. – Томск : Изд-во ТГУ, 2008. – С. 112–113.

63. Ходаков, В. Е. Лесные пожары: методы исследования / В. Е. Ходаков, М. В. Жарикова. – Херсон: Гринь Д.С, 2011.- 470 с.

64. Черненко, С. П. Активность каталазы и уреазы как индикатор пирогенной нарушенности почв (заповедник Утриш, полуостров Абрау) / С. П. Черненко, Е. В. Рогожина, В. В. Керимзаде // Субтропическое и декоративное садоводство. – 2022. – № 82. – С. 222–237.

65. Шаталов, П. С. Система поддержки принятия решений по управлению природными пожарами с использованием высокопроизводительных вычислительных систем и данных космического мониторинга : специальность 05.13.01 «Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям)» : дис. ... канд. техн. наук / П. С. Шаталов. – Красноярск, 2015. – 161 с.

66. Шешуков, М. А. Виды, интенсивность пожаров и определяющие их факторы / М. А. Шешуков // Лесное хозяйство. – 1977. – № 5. – С. 68–72.

67. A physics-based approach to modeling grassland fires / W. Mell, M. A. Jenkins, J. Gould, Ph. Cheney // International Journal of Wildland Fire. – 2007. – Vol. 16, no. 1. – P. 1–22.

68. Albin, F. A. Computer-based models of wildland fire behavior: a users

manual / F. A. Albini ; USDA Forest Service. – Ogden, 1976. – 68 p.

69. Athreya, K. B. A new approach to the limit theory of recurrent Markov chains / K. B. Athreya, P. Ney // Transactions of the American Mathematical Society. – 1978. – Vol. 245. – P. 493–501.

70. Aversani, P. Case Base Exploration Tool / P. Aversani, A. Perini, F. Ricci // Fifth Congress of the Italian Association for Artificial intelligence. – Springer-Verlag, 1997. – P. 23–25.

71. Byram, G. M. The modeling of fire whirlwinds / G. M. Byram, R. E. Martin // Forest Science. – 1970. – Vol. 16, no. 4. – P. 386–398.

72. Curry, J. R. Forest Fire Behaviour Studies / J. R. Curry, W. L. Fons // Mechanical Engineering. – 1940. – Vol. 62, no. 3. – P. 219–225.

73. Firespread through fuel beds: modeling of wind-aided fires and induced hydrodynamics / B. Porterie, D. Morvan, J. C. Loraud, M. Larini // Physics of Fluids. – 2000. – Vol. 12, no. 7. – P. 1762–1782.

74. Frandsen, W. H. Rothermel's fire spread model programmed for the HewlettPackard 9820 / W. H. Frandsen. – Ogden, 1973. – 14 p.

75. Frandsen, W. H. Using the Effective Heating Numbers as a weighting factor in Rothermel's fire spread model / W. H. Frandsen. – Ogden, 1973. – 8 p.

76. Hayes, G. L. Where and when to measure forest fire danger / G. L. Hayes // Journal of Forestry. – 1944. – Vol. 42 (10). – P. 744–754.

77. Integrated national-scale assessment of wildfire risk to human and ecological values / M. P. Thompson, D. E. Calkin, M. A. Finney [et al.] // Stochastic Environmental Research and Risk Assessment. – 2011. – Vol. 25, no. 6. – P. 761–780.

78. Modeling interaction between fire and atmosphere in discrete element fuel beds / R. Linn, J. Winterkamp, C. Edminster [et al.] // International Journal of Wildland Fire. – 2005. – Vol. 14, no 1. – P. 37–48.

79. Morvan, D. Modeling of one dimensional fire spread in pine needles with opposing air flow / D. Morvan, M. Larini // Combustion Science and Technology. –

2001. – Vol. 164, no. 1. – P. 37–64.

80. Rothermel, R. C. A mathematical model for fire spread predictions in wildland fuels : Research Paper INT-115 / R. C. Rothermel. – Ogden, UT USA, 1972. – 44 p.

81. Simard, A. J. The moisture content of forest fuels – I: A review of the basic concept : Information report FF-X-14 / A. J. Simard ; Forest Fire Research Institute. – Ottawa, Ontario, 1968.

82. Veretennikova, M. A. On Markov-up processes and their recurrence properties / A. Yu. Veretennikov, M. A. Veretennikova // Reliability : Theory and Applications. – 2022. – Vol. 17 (3). – P. 273–291.

83. Williams, B. K. Markov decision processes in natural resources management: Observability and uncertainty / B. K. Williams // Ecological Modelling. – 2009. – Vol. 220, no. 6. – P. 830–840.

**ПРИЛОЖЕНИЕ А****АКТЫ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ****УТВЕРЖДАЮ**Начальник Главного управления  
лесного хозяйства Омской области

С.В. Максимов

16 / 02 / 2023г.

**АКТ****о внедрении результатов диссертационного исследования  
ТЕРЕНТЬЕВОЙ Ольги Анатольевны**

Основные результаты работы, полученные в ходе диссертационного исследования на соискание ученой степени кандидата технических наук Терентьевой О.А., позволяют оптимально планировать противопожарные профилактические мероприятия в лесных массивах, заранее промоделировать возникающие проблемные ситуации, прогнозировать развитие лесных пожаров и разрабатывать планы их тушения. Разработанные в диссертационной работе методы и модели процессов предупреждения лесных пожаров носят универсальный характер и могут быть использованы в практической деятельности при проведении противопожарных профилактических мероприятий в лесах.

Заместитель начальника отдела охраны,  
защиты, воспроизводства лесов и организации  
выполнения государственного задания Главного  
управления лесного хозяйства Омской области

М.М. Лещина

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
«Федеральный исследовательский центр «Субтропический научный центр Российской академии наук»  
(ФИЦ СНЦ РАН)

Яна Фабрициуса ул., д. 2/28, город Сочи, Краснодарский край, 354002,  
тел. (862) 200-18-22; e-mail: [subplod@mail.ru](mailto:subplod@mail.ru); <https://subtropras.ru>;  
ОКПО 00497746; ОГРН 1022302831154; ИНН/КПП 2319010293/231901001

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ФИЦ СНЦ РАН,  
академик РАН



*(подпись)* А.В. Рындин  
«24» 07 2023 г.

## АКТ О ВНЕДРЕНИИ

Программное приложение, визуализирующее расчеты постпожарной сукцессии, разработанное старшим преподавателем Омского государственного университета им. Ф.М. Достоевского Ольгой Анатольевной Терентьевой, используется в Лаборатории геоэкологии и природных процессов ФИЦ СНЦ РАН (г. Сочи) в исследованиях в рамках государственного задания «Эволюция окружающей среды и климата вследствие естественных причин и антропогенного воздействия» (FGRW-2021-0015, № госрегистрации 122032300363-3).

Созданное программное приложение позволяет графически отобразить динамику вероятностей стадий постпожарной сукцессии растительности в заповеднике Утриш и вычисляет соответствующее время сукцессии. Приложение дает возможность проводить вычислительные эксперименты, иллюстрирующие и визуализирующие результаты наблюдения постпожарной сукцессии в заповеднике Утриш.

Заведующая лабораторией геоэкологии  
и природных процессов ФИЦ СНЦ РАН,  
кандидат биологических наук

(руководитель структурного подразделения организации,  
ответственного за внедрение)

*(подпись)*

Е.В. Рогожина



**УТВЕРЖДАЮ**

Начальник отдела лесных отношений по  
Болотнинскому лесничеству  
(Болотнинское лесничество)

Кугаколов П.В.

2023г.

### **АКТ ВНЕДРЕНИЯ**

**материалов диссертационной работы ТЕРЕНТЬЕВОЙ Ольги Анатольевны, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук**

Результаты работы, полученные в ходе диссертационного исследования Терентьевой О.А. использованы в отделе лесных отношений по Болотнинскому лесничеству управления охраны, защиты и воспроизводства лесов Министерства природных ресурсов и экологии Новосибирской области, в качестве практических рекомендаций при проведении противопожарных профилактических мероприятий в лесных массивах.

В целом, разработанные в диссертации математические описания и программные комплексы процессов предупреждения пожаров, позволяют минимизировать возникновение лесных пожаров, а также моделировать противопожарное состояние лесных объектов.

Консультант отдела лесных отношений  
по Болотнинскому лесничеству

О.С. Кожехова

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «ОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Ф. М. ДОСТОЕВСКОГО»



УТВЕРЖДАЮ

Ректор по развитию

С.В. Ефимов

«15» мая 2023г.

**АКТ ВНЕДРЕНИЯ**

результатов диссертационной работы **Терентьевой Ольги Анатольевны** на тему «Математическое моделирование предупреждения лесных пожаров на основе теории марковских процессов», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Комиссия в составе:

- Председатель комиссии - Кабанов А.Н., канд.физ.-мат.наук, декан факультета цифровых технологий и кибербезопасности;
- Члены комиссии - Богаченко Н.Ф., канд.физ.-мат.наук, доцент, зав.кафедрой компьютерных технологий и сетей;
- Вахний Т.В., канд.физ.-мат.наук, доцент.

составила настоящий акт о следующем.

Результаты диссертационного исследования Терентьевой О.А. внедрены и используются в учебном процессе при изучении дисциплин «Проектный практикум», «Информационные технологии», «Математическое моделирование», «Алгоритмизация и программирование» студентами факультета цифровых технологий и кибербезопасности Омского государственного университета им. Ф.М. Достоевского. Теоретические разработки и результаты научных исследований применяются при проведении лекций и лабораторных работ для построения моделей, алгоритма вычисления вероятностей состояний марковских процессов, а также при руководстве научной деятельностью, учебной и производственной практикой.

Председатель комиссии Кабанов / Кабанов А.Н./

Члены комиссии: Богаченко / Богаченко Н.Ф. /

Вахний / Вахний Т.В. /

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

СВИДЕТЕЛЬСТВА О ГОСУДАРСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ  
ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное научное учреждение  
ИНСТИТУТ УПРАВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАНИЕМ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ  
ОБРАЗОВАНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННЫЙ ФОНД ЭЛЕКТРОННЫХ РЕСУРСОВ "НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ"  
(основан в 1991 году)

**СВИДЕТЕЛЬСТВО О РЕГИСТРАЦИИ  
ЭЛЕКТРОННОГО РЕСУРСА**

**№ 21209**



Настоящее свидетельство выдано на разработку:

**Программный комплекс «Вычисление функциональной готовности  
технической системы при подготовке ее к противоборству в конфликтной  
ситуации и продолжению противоборства после отказов компонентов  
системы с учетом надежности человека-оператора»**

Настоящее свидетельство выдано на электронный ресурс, отвечающий требованиям  
новизны и приоритетности.

Дата регистрации: **06 октября 2015 года**

Авторы: **Потапов В.И., Горн О.А.**

Организация-разработчик: **ФГБОУ ВПО Омский государственный  
технический университет**



Директор ФГБНУ ИУО РАО,  
д.экон.н., профессор \_\_\_\_\_ С.С. Неустроев

Руководитель ОФЭРНЮ, почетный  
работник науки и техники России \_\_\_\_\_ А.И. Галкина



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное научное учреждение  
 ИНСТИТУТ УПРАВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАНИЕМ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ  
 ОБРАЗОВАНИЯ  
 ОБЪЕДИНЕННЫЙ ФОНД ЭЛЕКТРОННЫХ РЕСУРСОВ "НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ"  
 (основан в 1991 году)

**СВИДЕТЕЛЬСТВО О РЕГИСТРАЦИИ  
 ЭЛЕКТРОННОГО РЕСУРСА**

*№ 22230*

ИУО РАО  
 ОФЭРНИО

Настоящее свидетельство выдано на электронный ресурс, отвечающий  
 требованиям новизны и приоритетности:

**Программа для вычисления характеристик надежности  
 аппаратно-избыточной системы, участвующей в конфликтной ситуации**

Дата регистрации: **25 октября 2016 года**

Авторы: **Потапов В.И., Горн О.А.**

Организация-разработчик: **ФГБОУ ВО «Омский государственный  
 технический университет»**

Директор ФГБНУ ИУО РАО,  
 доктор экономических наук  С.С. Неустроев

Руководитель ОФЭРНИО, почетный  
 работник науки и техники России  А.И. Галкина

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
**«Омский государственный университет  
им. Ф.М. Достоевского»**  
(ФГАОУ ВО «ОмГУ им. Ф.М. Достоевского»)  
пр. Мира, 55-А, г. Омск, 644077,  
+7 3812 670 104, rector@omsu.ru, http://www.omsu.ru  
ОГРН 1025500532947, ИНН/КПП 5501003925/550101001

начальнику ФБУ "Авиалесоохрана"  
Кривошееву Н.П.

\_\_\_\_\_ № \_\_\_\_\_  
20.12.2022 № Исх. 2022-5667  
На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Уважаемый Николай Павлович!

В настоящее время в РФ одним из актуальных направлений согласно Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации является возрастание антропогенных нагрузок на окружающую среду до масштабов, угрожающих воспроизводству природных ресурсов, и связанный с их неэффективным использованием рост рисков для жизни и здоровья граждан.

Омский государственный университет им. Ф. М. Достоевского проводит научно-исследовательские работы по разработке программного обеспечения прогнозирования возникновения пожарной ситуации на территории Омской области.

Для апробации математических моделей и поиска закономерностей требуется статистическая информация.

В связи с чем просим Вас разрешить доступ оператора просмотра данных к ИСДМ-Рослесхоз аспирантки Омского государственного университета по направлению «Информатика и вычислительная техника» Терентьевой Ольги Анатольевны.

Проректор по развитию



С.В. Ефимов