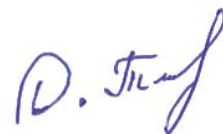


На правах рукописи



ТЕРЕНТЬЕВА ОЛЬГА АНАТОЛЬЕВНА

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

1.2.2. Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Омск – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Омский государственный университет им. Ф. М. Достоевского».

Научный руководитель:

Гуц Александр Константинович

доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры информационной безопасности Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Омский государственный университет им. Ф. М. Достоевского».

Официальные оппоненты:

Доррер Георгий Алексеевич

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационно-управляющих систем Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», г. Красноярск.

Голубятников Владимир Петрович

доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории обратных задач математической физики Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт математики им. С. Л. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук», г. Новосибирск.

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва.

Защита состоится «13» февраля 2024 г. в 15-00 на заседании диссертационного совета 24.2.350.05, созданного на базе Омского государственного технического университета по адресу: 644050, г. Омск, пр. Мира, д. 11, Главный корпус, ауд. П-202.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Омского государственного технического университета и на официальном сайте <http://www.omgtu.ru>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью учреждения, просим направлять по адресу: 644050, г. Омск, пр. Мира, д.11, ОмГТУ, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.350.05. Тел.: (3812) 65-24-79, E-mail: dissov_omgtu@omgtu.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2023 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета 24.2.350.05,
доктор технических наук, доцент



Варепо Л.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность диссертационной работы. Проблема лесных пожаров остается для Российской Федерации чрезвычайно актуальной. 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. Согласно Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации одним из актуальных направлений 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.

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. В соответствии со статьями 51 и 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».

Для того чтобы потушить лесные пожары, нужно использовать большое количество средств и сил. С целью устранения негативных последствий лесных пожаров необходимо систематически проводить профилактические мероприятия, чтобы предупредить условия, при которых лесные пожары возникают.

В настоящее время роль математического моделирования в процессе изучения лесных пожаров приобретает особое значение, так как антропогенное воздействие на лесные массивы увеличивается. 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. 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.

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. Вопросами моделирования и изучением лесных пожаров занимались такие ученые как, Н. П. Курбатский, Э. Н. Валендик, Л. А. Володченкова, А. М. Гришин, Г.А. Доррер, Д.О. Логофет, R.R.Linn, W. Mell, D. Morgan и другие ученые. В качестве наиболее эффективных математических моделей таких процессов, используемых для моделирования ситуации поведение системы со многими состояниями, служат марковские процессы. Однако в известных работах показатели, лежащие в основе математического моделирования профилактики лесных пожаров задаются на основе экспертной оценки с частичной научной основой, а ситуация подготовки лесной системы к риску возгорания

остаётся малоизученной. Для успешного решения этой проблемы требуется дальнейшее совершенствование методов охраны лесов от пожаров с использованием математического и компьютерного моделирования.

Объектом исследования являются лесные пожары и способы их предупреждения.

Предмет исследования – математические методы моделирования систем предупреждения лесных пожаров.

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.

Теоретическая и 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. 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.

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);
- Федеральный исследовательский центр «Субтропический научный центр Российской академии наук» (г. Сочи);
- Учебный процесс ФГАОУ ВО «ОмГУ им. Ф.М. Достоевского».

Методы исследования. В работе применяются математические методы с использованием теории марковских процессов, метод дискретизации (для решения уравнений Колмогорова), 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 натурального 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 алгоритмы и методы моделирования, разработанные численные (вычислительные) методы предупреждения лесных пожаров разработаны автором работы, программная реализация, вычислительные эксперименты выполнены в соавторстве.

В диссертации в соавторстве выполнены исследования для постпожарной сукцессии растительности, программная реализация данной задачи реализована автором лично.

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приводится общая характеристика диссертационной работы, обоснована актуальность, сформулированы цели и задачи исследования, указывается ее научная новизна, представлена практическая значимость, основные положения, выносимые на защиту, описана структура диссертации.

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. Дается обзор экспериментальных исследований, проводимых на момент становления лесопирологической науки по настоящее время. В ходе анализа отечественных и зарубежных источников было обнаружено, что большой акцент направлен на развитие математических моделей лесных пожаров, описывающих возникновение и распространение пожаров, а также рассмотрены подходы по созданию противопожарных мероприятий по охране лесов от пожаров, дана их классификация. 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. Под степенью готовности лесной системы будем понимать вероятность того, что система окажется в состоянии завершения мероприятий по противостоянию пожарам или возобновления мероприятий в случае отказа соответствующего компонента.

Рассмотрены вопросы экологического прогнозирования состояния лесов Омской области. Отмечено, что одной из главных причин гибели лесов являются пожары.

Приводятся данные Главного управления лесного хозяйства Омской области, касающиеся лесных пожаров и анализируется их статистика.

Площадь лесов, погибших от пожаров на территории Омской области за период с 2017 г. по 2022 г.¹ составила 63935,11 га. Максимальное количество пожаров произошло в 2021 г., их количество составляет 555 пожаров, а площадь 22988,72 га.

В 70 % случаев пожары произошли по вине населения и в 30 % случаев по причине сельскохозяйственных палов. Такой показатель является одним из худших по Сибирскому Федеральному округу в 2020 г. В 2022 г. 50,6 % всех пожаров возникло по причине неосторожного обращения с огнём местного населения, а по причине сельскохозяйственных палов – 43,5 %.

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. В основу метода исследования положена теория марковских процессов.

Рассмотрен метод определения возможности возникновения лесных пожаров, в основе которого лежит методика В.Г. Нестерова для определения горимости леса. Согласно комплексному показателю горимости, выделяется пять классов пожарной опасности.

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

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

где 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 1).

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

Согласно данным лесничеств Омской области основными мероприятиями, проводимыми с целью профилактики возникновения лесных пожаров являются: устройство противопожарных минерализованных полос; прочистка и обновление противопожарных минерализованных полос; эксплуатация лесных дорог, предназначенных для охраны лесов от пожаров; 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 профи-

¹ По данным Главного Управления лесного хозяйства Омской области.

лактического контролируемого противопожарного выжигания хвороста, лесной подстилки, сухой травы и других лесных горючих материалов; иные мероприятия.

Таблица 1 – Шкала пожарной опасности в лесу по условиям погоды

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

Перечисленные мероприятия являются шагами $i = 1, 2, \dots, n$ в процессе подготовки лесного фитоценоза к противостоянию пожару. Им соответствуют стадии готовности S_i . Любой из указанных шагов может не выполняться по вине людей или той или иной организации. Под организациями будем считать лесные хозяйства, которые могут ошибаться, делать сбои и даже отказывать, а их возможности имеют конечную надежность.

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»); $\mu_i = const (i = 0, 1)$ – 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 ; λ – интенсивность отказов подразделений системы подготовки к работе, μ – интенсивность возобновления мероприятия после отказа, p_i – вероятность пребывания в состоянии S_i , p_{ij} – вероятность перехода из S_i в S_j .

Иллюстрация возможных переходов между состояниями системы может быть представлена графом переходов, изображённом на рисунке 1.

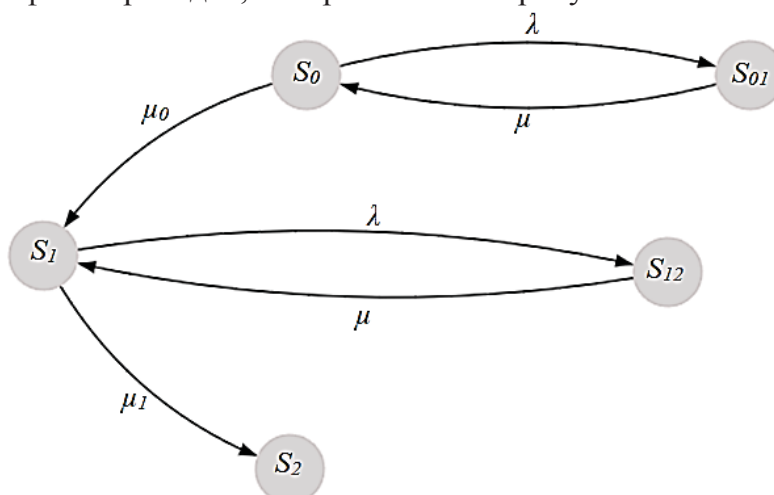


Рисунок 1 – Граф состояний системы

Система подготовки к противостоянию пожарам описывается дифференциальными уравнениями Колмогорова

$$\begin{aligned} p'_0 &= \mu p_{01}(t) - (\mu_0 + \lambda)p_0(t), \\ p'_1 &= \mu_0 p_0(t) - \mu_1 p_1(t), \\ p'_2 &= \mu_1 p_1(t), \\ p'_{01} &= \lambda p_0(t) - \mu p_{01}(t), \\ p'_{12} &= \lambda p_1(t) - \mu p_{12}(t), \\ \sum_0^2 p_i + p_{01} + p_{12} &= 1. \end{aligned}$$

При заданных начальных условиях и решений уравнений Колмогорова получен коэффициент готовности леса к ситуации наличия риска пожара:

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

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

$$\mu_i = Pr \cdot K,$$

где Pr является единым коэффициентом противопожарных мер, K – класс пожарной опасности (горимости).

Для оценки пожарной опасности в лесу использованы формулы и соответствующие шкалы, предложенные В.Г. Нестеровым, которые рассмотрены выше. Таким образом, зная исходные данные, будет вычислена степень готовности лесной системы к ситуации наличия риска пожара. В главе 3 разработано программное приложение, вычисляющее данное выражение.

Предложенное 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. В работе рассмотрены модели, решающие задачи готовности конфликтующей системы к конфликтным ситуациям и представленные их программная реализация.

Имея дело с лесными системами, мы фактически имеем конфликтующую систему, состоящую собственно из лесной экосистемы и человеко-организационного комплекса в лице лесных управлений, при функционировании которого необходимо решать во многом те же задачи, что и при функционировании человеко-машинного комплекса.

Схема алгоритма такого программного комплекса представлена на рисунке 2.

В главе дана постановка и метод решения задачи для вычисления количества лесных участков, находящихся в различных состояниях горения.

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

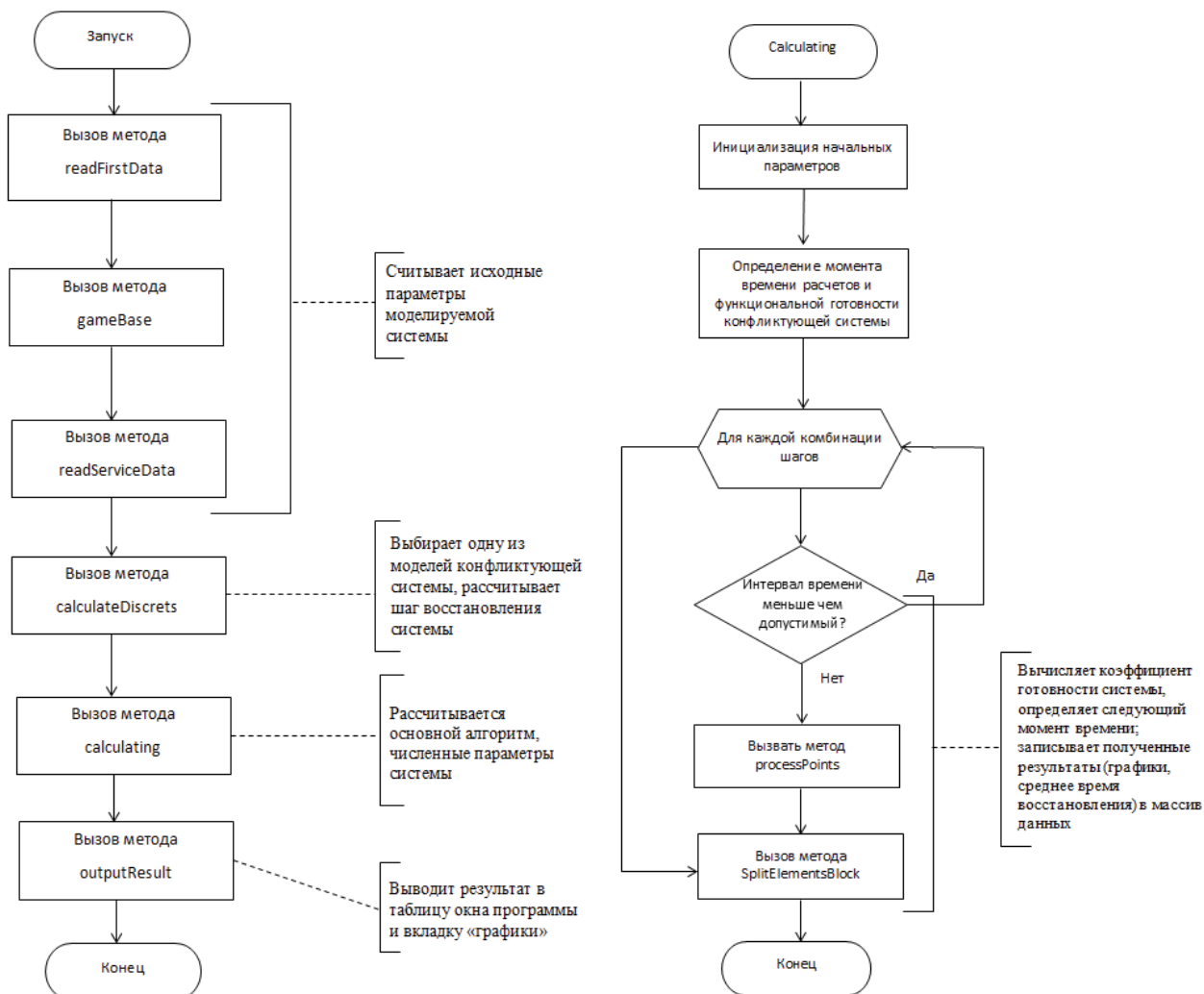


Рисунок 2 – Схема алгоритма работы программного комплекса

Граф переходов для такой модели выглядит следующим образом:

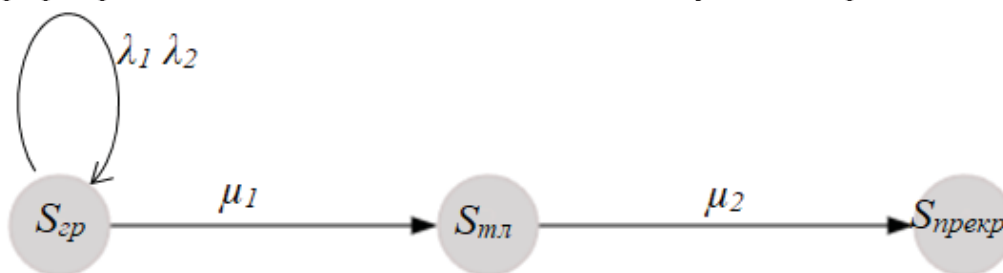


Рисунок 3 – Граф переходов между состояниями системы

Величины μ_1 , μ_2 – интенсивности перехода участка из состояния горения в тления, из тления в прекращение горения, и задаются формулами:

$$\mu_1 = \frac{1}{t_{\Gamma}}, \mu_2 = \frac{1}{t_{\text{ТЛ}}},$$

где t_{Γ} – среднее время горения, $t_{\text{ТЛ}}$ – среднее время тления, λ_1 определяется как количество смежных участков, которые возгораются от одного горящего, λ_2 величина, обратная среднему времени прогревания, которая задается формулой:

$$\lambda_2 = \frac{1}{t_{\text{прогр}}}.$$

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

$$\begin{aligned} \frac{d\varphi(t_1)}{dt} &= \varphi(t_1)(\lambda_1\lambda_2 - \mu_1), \\ \frac{d\varphi(t_2)}{dt} &= \mu_1\varphi(t_1) - \mu_2\varphi(t_2), \\ \frac{d\varphi(t_3)}{dt} &= \mu_2\varphi(t_2). \end{aligned}$$

Решая дифференциальные уравнения, получим:

$$\begin{aligned} \varphi(t_1) &= e^{(\lambda_1\lambda_2 - \mu_1)t}, \\ \varphi(t_2) &= \frac{\mu_1}{\mu_2 - \mu_1} (e^{(\lambda_1\lambda_2 - \mu_1)t} - e^{\mu_2 t}), \\ \varphi(t_3) &= 1 + \frac{1}{\mu_2 - \mu_1} (\mu_1 e^{\mu_2 t} - \mu_2 e^{(\lambda_1\lambda_2 - \mu_1)t}). \end{aligned}$$

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.

Таким образом, мы определим средние численности лесных участков, которые находятся в состоянии $\varphi(t_1)$ горения, $\varphi(t_2)$ тления или в $\varphi(t_3)$ потушенном состоянии в любые моменты времени, а также получены при известных размерах лесных участков количественные оценки параметров процесса распространения лесного пожара. Полученные данные позволяют обоснованно подходить к проведению противопожарных профилактических мероприятий в лесных массивах, прогнозировать развитие лесных пожаров, разрабатывать планы их тушения.

В главе также излагается метод моделирования с помощью марковских процессов успешной сукцессии в заповеднике Утриш на участке U_s с повышенной интенсивностью горения по сравнению с участком пониженной интенсивности горения U_w из-за преимущества в наличии микроэлементов, необходимых растениям², для которого было создано программное приложение, представленное в главе 3. Оно позволяет рассчитывать вероятности состояний, вероятности переходов при различных интенсивностях и при дополнительной «подпитке», к которой обращаются растения на участке U_w , чтобы также поддержать процесс восстановления.

В главе 3 «Комплексы программ и проверка их адекватности для расчета моделирования процессов лесных пожаров» описаны разработанные в рамках диссертационного исследования три программных приложения, реализующие основные методы исследования: программа для оценки готовности лесной системы к ситуации наличия риска возгорания; программа для вычисления количества лесных участков, находящихся в различных состояниях горения; программа для расчета сукцессии растительности постпирогенных зон различной интенсивности горения.

² Гуц, А.К. Математическое моделирование геохимической трансформации почвенно-растительного покрова пспирогенных зон различной интенсивности горения / А.К. Гуц, Л.В. Захарихина, Е.А. Виноцкая, С.П. Черненко, В.В. Керимзаде // Математические структуры и моделирование. – 2023. – № 1 (65). – С. 55–62.

Для проверки работоспособности и адекватности вычислений программного приложения, реализующего решения задачи оценки готовности лесной системы к ситуации наличия риска возгорания, введем следующие данные, необходимые для вычислительных расчетов:

1) Pr – единый коэффициент противопожарных мер:

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

где Ap – коэффициент профилактического мероприятия авиапатрулирования, Gs – коэффициент профилактического мероприятия наземной охраны, Pf – коэффициент профилактического мероприятия противопожарного обустройства лесов, P – коэффициент профилактического мероприятия пропаганды 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 профилактических мероприятий равно единице: значимость коэффициента $Ap = 0,2$; значимость коэффициента $Gs = 0,1$; значимость коэффициента $Pf = 0,3$; значимость коэффициента $P = 0,4$.

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, скажем, наземная охрана, то $Gs = 0$. Тогда

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

2) Величина K – 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 диссертационной работы.

Для расчета показателя пожарной опасности – температуры воздуха и точки росы воспользуемся данными Информационной системы дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства ИСДМ-Рослесхоз. В таблице 2 приведены данные для Омского лесничества Омской области.

Зная входные данные, можем вычислить показатель пожарной опасности, используя вышеприведенную формулу Нестерова, указанную на странице 7.

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». Данные распределения площади лесного фонда Омской области по классам природной пожарной опасности приведены в таблице 3.

3) Величина μ_i – интенсивность выполнения каждой стадии подготовки к противостоянию леса пожарам, которое вычисляется по формуле $\mu_i = Pr \cdot K$. Алгоритм вычисления представлен на рисунке 4.

Таблица 2³ – Показатели пожарной опасности по условиям погоды, согласно данным ИСДМ-Рослесхоз

Сибирский ФО Омская область

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

Таблица 3 – Распределение площади лесного фонда Омской области, га

№ 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
Всего по области		238787	51424	349779	4056636	1229951	5926577	4,0

³ По данным Информационной системы дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства ИСДМ-Рослесхоз.

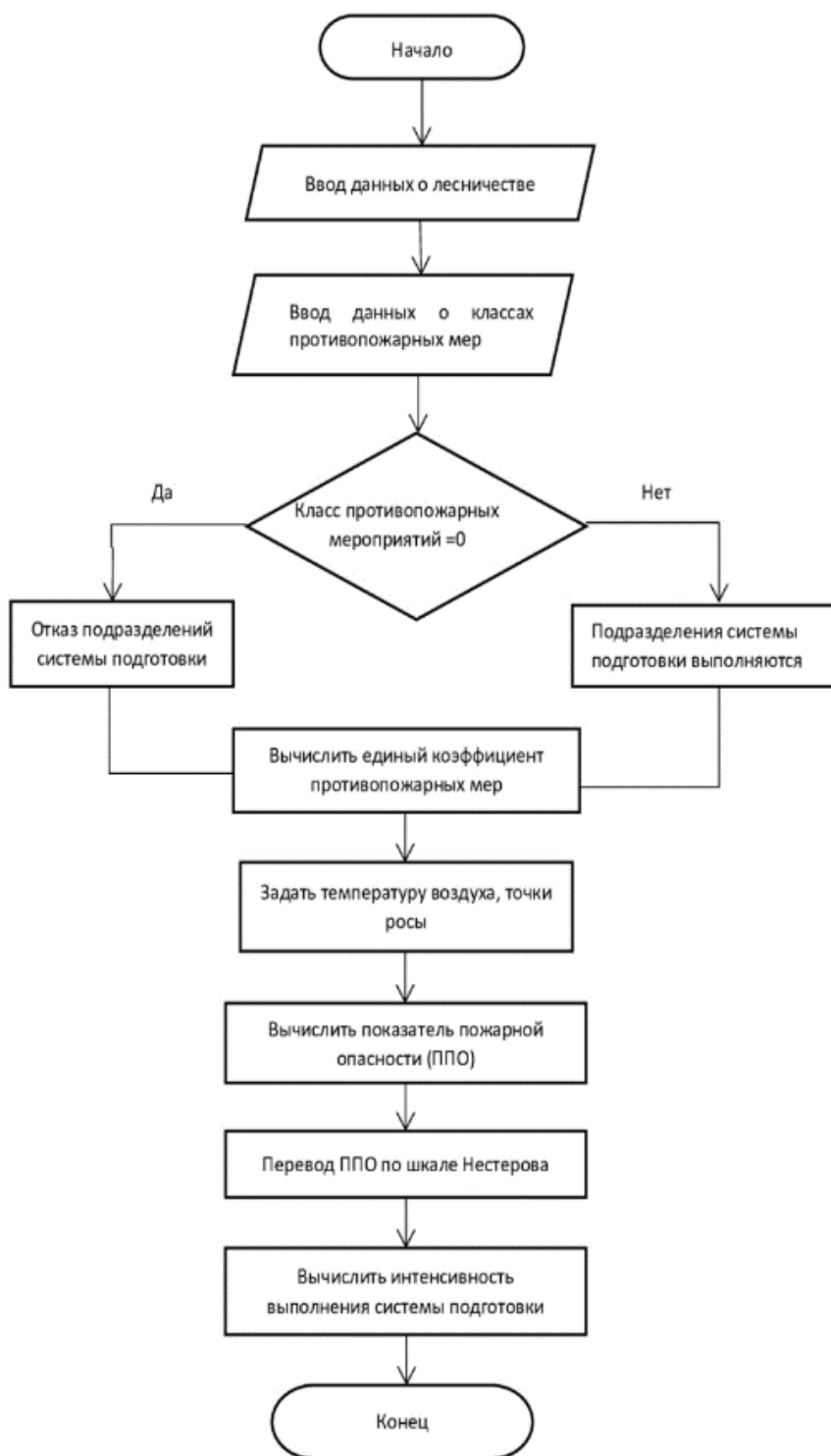


Рисунок 4 – Схема алгоритма вычисления интенсивности выполнения стадии готовности лесной системы к пожару

Значение среднего класса пожарной опасности будет являться величиной K .

4) Значение интенсивности отказов подразделений системы подготовки к работе λ 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.

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

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

Согласно данным ИСДМ-Рослесхоз, представленным в таблице 2, вычислим показатель пожарной опасности (ППО).

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

В соответствие с таблицей 1 величине показателя пожарной опасности соответствует 3 класс пожарной опасности.

Тогда $\mu_i = Pr \cdot K = 0,03$.

Предположим, что в процессе выполнения противопожарных работ будут происходить отказы, а именно не выполнится профилактическое мероприятие в виде наземной охраны Gs , тогда интенсивность отказов подразделений системы подготовки к работе λ для первого эксперимента примет значение равное 0,009. Для второго эксперимента отказ произойдет для профилактических мероприятий авиапатрулирования Ar и противопожарного обустройства лесов Pf , тогда $\lambda = 0,005$.

Третий эксперимент – отказ профилактических мероприятий авиапатрулирования Ar , противопожарного обустройства лесов Pf , наземной охраны Gs в этом случае $\lambda = 0,004$.

Четвертый эксперимент – отказ профилактических мероприятий пропаганды охраны лесов среди населения P , противопожарного обустройства лесов Pf , в этом случае $\lambda = 0,003$.

На процесс восстановления величины μ – интенсивности возобновления мероприятия после отказа, влияет параметр, который будет возвращать систему в исходное положение. Примем, что интенсивность возобновления мероприятия после отказа μ будет равным 0,002 (таблица 4).

Таблица 4 – Исходные данные и результаты расчетов

№	Единый коэффициент противопожар. мер Pr (при условии выполнения всех мероприятий)	Класс пожарной опасности (K)	Интенсивность выполнения каждой стадии подготовки к противостоянию леса пожарам (μ_i)	Интенсивность отказов подразделений системы подготовки к работе (λ)	Интенсивность возобновления мероприятия после отказа (μ)	Коэффициент готовности лесной системы (Γ)	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

Согласно расчетам, приведенным в таблице 4, можно сделать следующий вывод: уменьшая значения интенсивностей отказов подразделений системы подготовки к работе λ , а это достигается путем наибольшего невыполнения количества профилактических мероприятий, получаем, что коэффициент готовности системы уменьшается, а время на восстановление лесной системы потребуется больше. Таким образом, коэффициент готовности лесной системы прямо пропорционально зависит от количества невыполненных профилактических мероприятий.

На рисунках 5–6 приведены расчеты, иллюстрирующие выполнение работы программы.

В главе также представлено программное приложение, визуализирующее расчеты постпожарной сукцессии мхов в заповеднике Утриш, которое находит графическое решение систем дифференциальных уравнений, описывающих математическую модель, рассматриваемых на участке Us с повышенной интенсивностью горения, участке Uw с пониженной интенсивностью горения и осуществляет графический вывод значений вероятности состояний (стадий) сукцессии, рассчитывает среднее время этапа сукцессии T , интенсивности μ_0 переходов растительности с начальной стадии S_0 в первую S_1 (рисунок 7). А также программа имеет второй вариант решения – сукцессия на участках Uw при условии, что растения имеют возможность дополнительной «подпитки» (рисунок 8). На рисунках 7 и 8 на оси Ox задан отрезок интегрирования $[0, \text{период}]$, на оси Oy значение вероятности состояний (стадий) сукцессии.

Входные данные		Графики		Вычисленные характеристики	
	Момент времени	Коэффициент функциональной готовности	Погрешность	Среднее время восстановления системы 9,186925	
	9	0.792307	0.000000		
	10	0.801972	0.000000		
	11	0.808768	0.000000		
	12	0.813572	0.000000		
	13	0.816995	0.000000		
	14	0.819458	0.000000		
	15	0.821255	0.000000		
	16	0.822590	0.000000		
	17	0.823604	0.000000		
	18	0.824395	0.000000		
	19	0.825032	0.000000		
	20	0.825560	0.000000		
	21	0.826014	0.000000		
	22	0.826416	0.000000		
	23	0.826782	0.000000		
	24	0.827122	0.000000		
	25	0.827445	0.000000		

Рисунок 5 – Расчеты программы при $\lambda = 0,009$

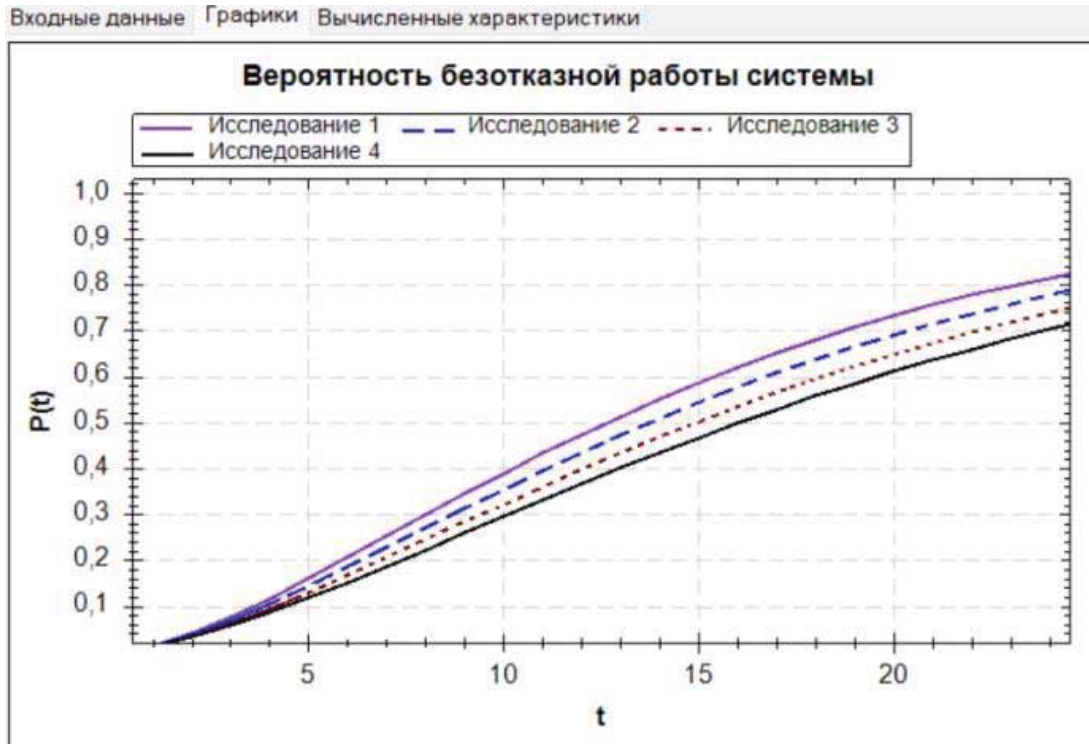
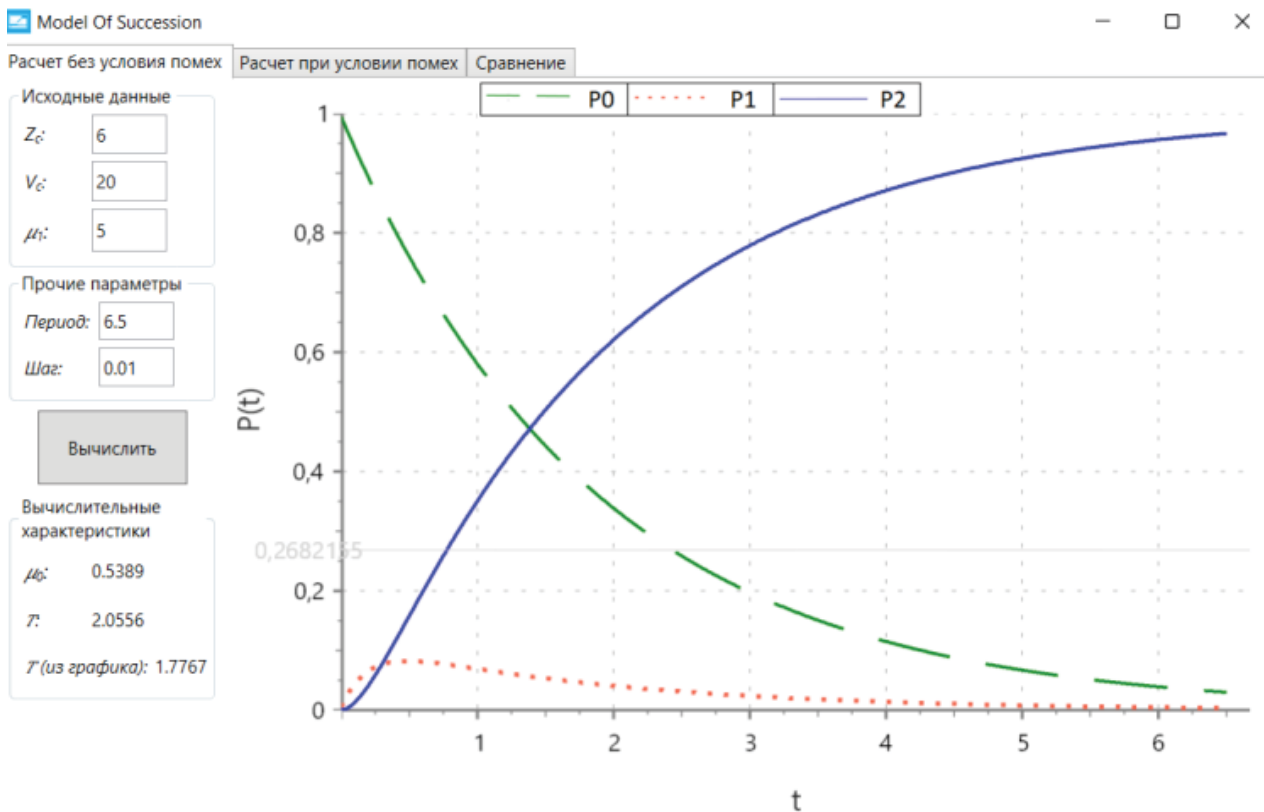
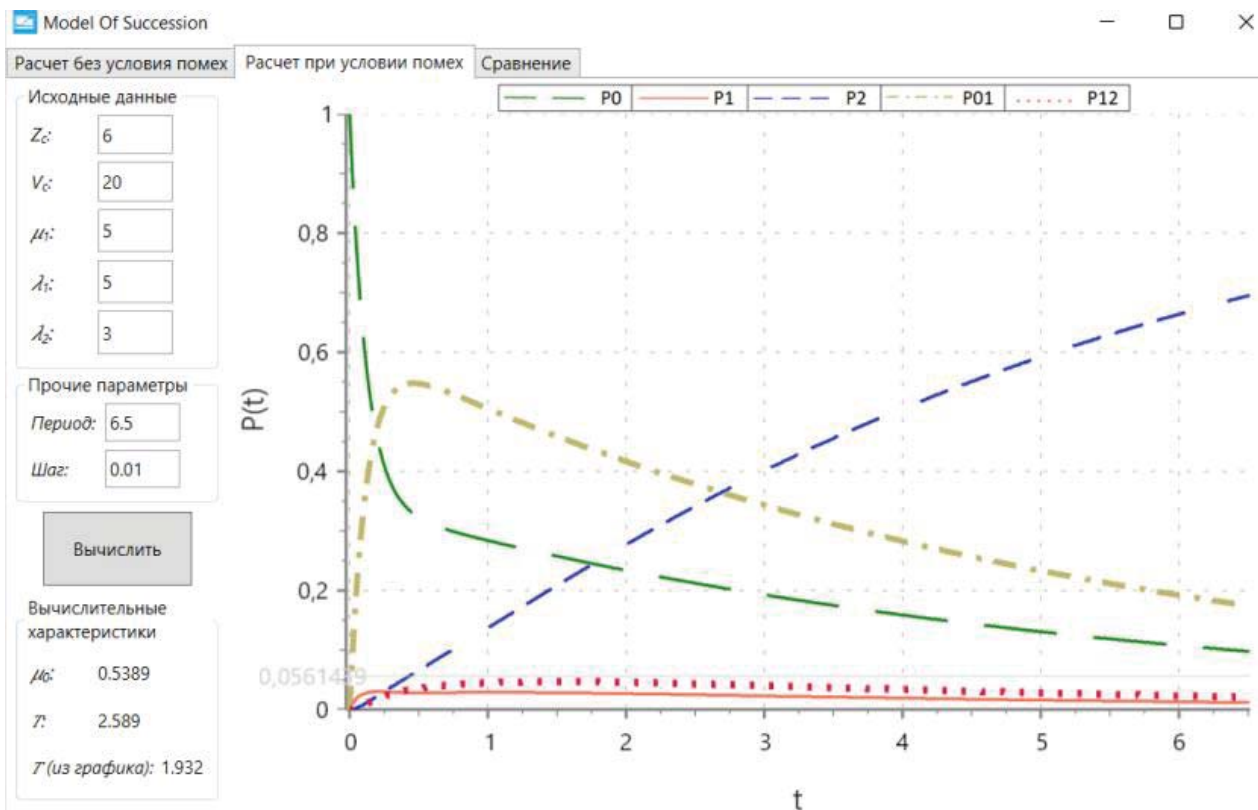


Рисунок 6 – Графические вычисления программы

Рисунок 7 – Участок U_w . Отсутствие «подпитки»

Рисунок 8 – Участок Uw . Наличие «подпитки»

В работе приведена схема алгоритма программного приложения для расчетов постпожарной сукцессии, а также вычислительные эксперименты, подтверждающие наблюдения.

В главе разработана автором работы программа для вычисления количества лесных участков, находящихся в различных состояниях горения. При заданном среднем времени горения, тления и прогревания растительности лесного участка, а также количестве смежных участков, которые возгораются от одного горящего, в программе осуществлены соответствующие расчеты. В частности, рассмотрен пример тушения лесного пожара.

При тушении лесного пожара параметры интенсивности событий μ_1 и μ_2 (переход участка из состояния горения в тления и переход из состояния тления в прекращения) будут увеличиваться, а величина обратная среднему времени прогревания λ_2 – уменьшаться. При этом значение, количество участков λ_1 , которые возгораются от одного горящего может принимать значение равное нулю.

Вычисленные характеристики и входные данные представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Результаты вычисления

№	λ_1	$t_{\text{горения}}$	$t_{\text{тления}}$	$t_{\text{прогрева}}$	$\varphi(t_1)$	$\varphi(t_2)$	$\varphi(t_3)$
1	0	30	15	100	0,95	–	2,005
2	0	25	10	100	0,94	–	2,54
3	0	20	5	100	0,93	–	4,14

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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты и выводы, полученные при выполнении диссертационной работы, заключаются в следующем:

1. Разработан метод решения задачи для оценки готовности лесной системы к ситуации наличия риска возгорания. В рамках указанного метода процесс подготовки лесного фитоценоза к существованию в ситуации угрозы пожара рассмотрен в предположении, что возможности лесных хозяйств, которые осуществляют охрану лесов от пожаров, имеют конечную надежность. Таким образом, возникают отказы, выраженные в условии невыполнения противопожарных мероприятий, а люди, выполняющие противопожарные, так и восстановительные работы по завершению противопожарного мероприятия абсолютно надежны. Также создан комплекс программ, с помощью которых на основе данных мониторинга ИСДМ-Рослесхоз можно планировать противопожарные мероприятия, заранее промоделировать возникающие проблемные ситуации

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

3. Решена задача вычисления количества лесных участков, находящихся в различных состояниях горения. Результат вычисления позволяет определять средние численности лесных участков, которые могут находиться в состоянии горения, тления или в потушенном состоянии. Указанные расчеты могут быть использованы при разработке лесных планов к проведению и прогнозированию противопожарных профилактических мероприятий.

4. Рассмотрена задача анализа готовности системы, находящейся в конфликтной ситуации. Проведена аналогия в вычислениях между конфликтующей и лесной системой.

5. Описана ситуация успешности первого этапа сукцессии мхов в зоне максимального по интенсивности пожара по сравнению с ходом сукцессии в зоне малоинтенсивного горения, на основе исследованной марковской модели постпирогенных зон различной интенсивности пожара. 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.

Комплекс программ для численного моделирования процесса предупреждения лесного пожара включает следующие программы:

- программа для оценки готовности лесной системы к возгоранию;
- программа для вычисления количества лесных участков, находящихся в различных состояниях горения;
- программа для расчета постпирогенных зон различной интенсивности 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 областей знаний, применимым к ситуации с конфликтующими системами с аналогичными марковскими процессами. Такими могут выступать, например, процедуры восстановления компьютерной системы после успешных хакерских атак.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

а) Научные публикации в изданиях из перечня, рекомендованного ВАК:

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

2. **Терентьева, О.А.** Программные продукты для решения задач моделирования (оптимального управления) противоборствующих объектов, участвующих в конфликтной ситуации / О. А. Терентьева // Математические структуры и моделирование. – 2022. – № 3(63). – С. 79–86.

3. 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.

б) Научные публикации в других изданиях:

4. 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. (Тольятти, 20–21 февр. 2014 г.). – Ульяновск : SIMJET, 2014. – С. 73–81.

5. **Горн, О. А.** Решение задач конфликтных ситуаций при помощи аппарата теории игр / О. А. Горн // Россия молодая : сб. материалов VI Всерос., 59-й науч.-практ. конф. молодых ученых с междунар. участием (Кемерово, 22–25 апр. 2014 г.) / Кузбас. гос. техн. ун. им. Т. Ф. Горбачева. – Кемерово : Изд-во КузГТУ, 2014. – С. 473. – 1 CD-ROM.

6. **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.

7. **Горн, О. А.** Программный комплекс для численного решения задач оптимального управления в конфликтных ситуациях / О. А. Горн // Проблемы оптимизации и экономические приложения : материалы VI Междунар. конф. (Омск, 28 июня – 4 июля 2015 г.) / Ом. гос. ун-т им. Ф. М. Достоевского. – Омск : Изд-во ОмГУ им. Ф. М. Достоевского, 2015. – С. 170.

8. 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.

9. **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. Иозефера (Омск, 20 нояб. 2020 г.) – Омск : ОмГУ им. Ф.М. Достоевского, 2020. – С. 161-163.

10. **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.) / Ом. гос. ун-т им. Ф. М. Достоевского. – Омск : Изд-во ОмГУ им. Ф. М. Достоевского, 2023. – С. 208–210.

11. **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 Четвертой Всерос. науч. конф. (Омск, 30 нояб. – 5 дек. 2020 г.) / Ом. гос. ун-т им. Ф. М. Достоевского. – Омск : Изд-во ОмГУ им. Ф. М. Достоевского, 2020. – С. 380–382.

в) Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

12. 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» / В. И. Потапов, **О. А. Горн**. – Москва : ОФЭРНиО, 2015.

13. 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**. – Москва : ОФЭРНиО, 2016.

В авторской редакции
Подписано в печать 07.12.2023. Формат 60x84 1/16.
Усл. печ.л. 1,05. Тираж 100 экз. Заказ № 354.

Издательство ОмГУ им. Ф.М. Достоевского
644077, г. Омск, пр. Мира, 55а; т. 64-13-07
Типография ОмГУ