

УДК 630.43:662.519.6

ББК 43.4 в6

Д69

Работа выполнена при финансовой поддержке Федеральной целевой программой «Интеграция», проект T0270/680 по направлению 2.7

Издание осуществлено при финансовой поддержке Красноярского краевого фонда науки, проект 13F 022.

Доррер, Г.А. Динамика лесных пожаров/ Г.А. Доррер; Ин-т вычислительного моделирования СО РАН, М-во образования и науки РФ, Федеральное агентство по образованию, Сиб. гос. технологический ун-т – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. – 404 с., 85 илл., 16 табл.

ISBN 978-5-7692-0985-7

Монография посвящена математическому моделированию процессов распространения и локализации лесных пожаров как управляемых волновых процессов. Особенностью работы является то, что она написана в значительной мере с точки зрения специалиста по механике и процессам управления. Рассматривается комплекс проблем, связанных с моделированием процессов распространения и локализации лесных пожаров. Предложен ряд моделей этого процесса, позволяющих решать важные прикладные задачи. Показана связь процессов распространения с классической гамильтоновой механикой и теорией управляемых динамических систем. Предлагается использование индикатрис и фигуротрис в качестве рабочего аппарата для исследования и расчета таких процессов. Разработана модель волновых процессов с диссипацией на основе теории обобщенных уравнений Гамильтона – Якоби. Создана теория локализационного управления, позволяющая определять стратегию как борьбы с пожарами, так и уклонения от них. Рассмотрены вопросы практического создания систем моделирования и управления борьбой с лесными пожарами: разработки эффективных алгоритмов, информационного и картографического обеспечения таких систем. Описаны управляющие и обучающие системы, реализованные на основе данной теории.

Книга предназначена для научных работников, аспирантов и разработчиков информационных систем, связанных с проблемами моделирования систем охраны лесов. Она может быть также полезна студентам соответствующих специальностей.

Рис. 85, табл. 16, библиогр. 315 назв.

Рецензенты:

А.М. Гришин, доктор физико-математических наук, профессор

Ю.В. Захаров, доктор физико-математических наук, профессор

Утверждено к печати Ученым советом Института вычислительного моделирования СО РАН

ISBN 978-5-7692-0985-7

© Г.А. Доррер, 2008

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	9
Введение	11
Глава 1. Математическое описание динамики	
лесных пожаров	23
1.1. Проблема математического моделирования	
лесных пожаров	23
1.1.1. Обзор работ, посвященных изучению	
лесных пожаров	23
1.1.2. Характеристика леса как объекта горения	28
1.1.3. Классификация математических моделей	
лесных пожаров	31
1.2. Модель лесного пожара как динамической системы типа	
бегущей волны	45
1.2.1. Основные соотношения процесса распространения	
горения	45
1.2.2. Учет слоистой структуры горючих материалов	53
1.2.3. Модель теплопередачи из зоны горения к горючим	
материалам.	56
1.2.4. Учет переноса горящих частиц	61
1.2.5. Описание управляющих воздействий	67
1.3. Динамика локальных фронтов	70
1.3.1. Распространение процесса горения по тонкому	
слою горючего	71
1.3.2. Локальный участок фронта, имеющий параболическую	
форму	73
1.3.3. Стационарное движение фронта	82
1.3.4. Уравнение автомодельного фронта...,	89
1.3.5. Условие перехода процесса горения через разрыв	
в слое горючего	92
1.3.6. Вероятности перехода фронтов горения через	
разрывы в слое горючего	100
1.3.7. Взаимодействие фронтов горения,	
распространяющихся по двум параллельным слоям	106
1.3.8. О моделировании дымового шлейфа лесного пожара ...	112
Глава 2. Динамика фронтов и области достижимости	
динамических систем	117
2.1. Определение и основные свойства областей	
достижимости управляемых динамических систем	118

2.2. Индикатрисы и фигуротрисы скоростей управляемых динамических систем	124
2.2.1. Определение фигуротрис	124
2.2.2. Некоторые свойства фигуротрис	127
2.3. Применение обобщенных уравнений Гамильтона–Якоби для описания процессов с диссипацией	136
2.3.1. Обобщенные уравнения Гамильтона–Якоби для процессов с диссипацией	136
2.3.2. Индикатрисы скоростей для процессов с диссипацией	139
2.4. Задачи идентификации динамических систем по их областям достижимости	144
2.4.1. Постановка задач. Определения	145
2.4.2. Идентификация параметров линейной системы	146
2.4.3. Оценка областей допустимых управляющих воздействий	147
2.4.4. Использование плоских сечений областей достижимости	149
2.4.5. Использование оптимальных гарантированных оценок областей достижимости	152
Глава 3. Процессы распространения на плоскости	155
3.1. Классификация процессов распространения по степени подвижности	156
3.2. Описание движения контуров пожара	159
3.2.1. Уравнения движения контура	161
3.2.2. Индикатрисы скоростей фронтов	171
3.2.3. Геометрическая интерпретация и решение уравнений движения контуров	175
3.2.4. Формулы для некоторых индикатрис	186
3.2.5. Периметр контура и площадь, пройденная пожаром	191
3.2.6. Процесс распространения и времена достижимости	193
3.2.7. Процесс распространения на плоскости с диссипацией	199
3.3. Процессы распространения со случайными параметрами	203
3.3.1. Оценка влияния случайных возмущений скорости на движение фронта пожара	204
3.3.2. Сглаживание границ процесса распространения	210
3.3.3. Эллиптические гарантированные оценки	

процессов распространения	214
3.4. Идентификация процессов распространения	
по экспериментальным данным	218
3.4.1. Привязка контуров пожара к местности и	
сглаживание их границ	219
3.4.2. Оценка значений нормальной скорости и	
ширины горящей кромки	224
3.4.3. Оценка нормальных скоростей и параметров	
фигуротрис	230
3.4.4. Идентификация на основе эллипсоидных оценок	235
Глава 4. Модели взаимодействия человека с	
лесным пожаром	241
4.1. Математическая модель процесса локализации	242
4.2. Простейшие задачи локализационного управления	246
4.2.1. Структура локализационных кривых в задачах	
о максимальном быстродействии	246
4.2.2. Задача оптимального быстродействия в схеме	
с одним центром	252
4.3. Алгоритмы решения некоторых задач локализационного	
управления	256
4.3.1. Задача об одностороннем охвате процесса $X_R(X_0, t)$	
при наименьшем числе локализационных кривых	257
4.3.2. Задача о двустороннем охвате процесса $X_R(X_0, t)$	260
4.3.3. Задача о локализации процесса $X(X_0, t)$ по критерию	
наименьшего времени	263
4.4. Задача об уклонении от встречи с лесным пожаром	264
Глава 5. Задачи реализации систем моделирования	
лесных пожаров	269
5.1. Численные методы расчета процессов	
распространения	269
5.1.1. Алгоритм построения горящей кромки	271
5.1.2. Алгоритмы, описывающие процесс распространения	
на множестве узлов решетки	274
5.1.3. Алгоритм, основанный на методе подвижных сеток	277
5.1.4. Исследование точности алгоритма, основанного	
на методе подвижных сеток	282
5.1.5. Экспериментальная проверка точности	
прогнозирования контуров лесных пожаров	291

5.2. Модели свойств лесных горючих материалов	295
5.2.1. Описание физических свойств лесных горючих материалов.....	297
5.2.2. Модели динамики влаго содержания лесных горючих материалов	304
5.2.3. Упрощенная оценка влаго содержания лесных горючих материалов	318
5.3. Описание пространственной структуры лесных горючих материалов	324
5.3.1. Математическая модель горизонтальной структуры слоев горючих материалов.....	327
5.3.2. Методика оценки структуры наземного слоя лесных горючих материалов по инфракрасным снимкам	334
5.4. Программные разработки, связанные с моделированием динамики лесных пожаров.....	338
5.4.1. Система моделирования процессов распространения и локализации лесных пожаров в рамках проекта «Прогноз»	339
5.4.2. Система планирования тушения лесных пожаров.....	342
5.4.3. Учебно-игровая программа «Тайга»	348
Заключение	350
Приложение 1. Структура решения обобщенного уравнения Гамильтона–Якоби.....	353
Приложение 2. Некоторые характеристики лесных горючих материалов и их компонентов	358
Приложение 3. Компьютерная обучающая программа «Тайга-2»	364
Литература	375