

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ СТАТИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ

Н. Э. Лепп

Сибирский государственный университет науки и технологий им. ак. М.Ф. Решетнева, 660049, Красноярск

УДК 519.63

Работа посвящена численной реализации неотрицательных случайных полей и их последующему использованию для прогнозирования и анализа динамики природного пожара. Представлена модификация авторегрессионной схемы моделирования однородных гауссовых случайных полей, состоящая во включении в схему формирования отчетов поля случайных величин, имеющих гамма-распределение. Методом Монте-Карло проведено численное исследование динамики пожара на случайных полях скоростей, построены вероятностные контуры, получены оценки осредненной модели развития пожара.

Ключевые слова: моделирование случайных полей, лесной пожар, скорость распространения, оценка площади.

Введение

Стохастический подход к моделированию природных пожаров является актуальным и перспективным направлением исследований [1]–[3]. Задача такого подхода состоит в получении дополнительной информации о процессе распространения, оценке его интегральных характеристик с учетом погрешности во входных данных, характеризующих среду пожара.

Случайные поля используют при вероятностном описании флуктуационных явлений в системах с распределенными параметрами, в частности при описании флуктуации плотности, температуры, диэлектрической проницаемости и других параметров различных сред. Необходимость в моделировании случайных полей возникает при поиске и разработке эффективных алгоритмов анализа динамики процессов различной природы, распространяющихся в случайно-неоднородных средах. Как отмечено в [4], задачи имитационного моделирования случайных полей, да и сами модели полей, как правило, сопрягаются с моделями динамики управляемых объектов, процессов. Поэтому к трудоемким самим по себе задачам имитации полей добавляются системные требования, с позиций которых модели полей являются лишь частью более общей модели функционирования стохастической системы в целом.

1 Построение моделей неотрицательных случайных полей

Построение пространственных двумерных полей как математических моделей пространственных данных (моделей внешней среды) относится к активно развивающемуся направлению статистического моделирования. Сбор и анализ таких данных представляет интерес для многих научных и инженерных областей, в том числе науки о земле, проектирование материалов, астрономия и др. Так как в большинстве реальных информационных систем данные формируются в виде дискретных массивов, поэтому в работе рассматриваются методы описания дискретных полей, заданных на прямоугольных многомерных сетках.

Случайные возмущения, действующие на процесс распространения природного пожара, могут быть разделены на внутренние, такие как изменение параметров теплопередачи при горении неоднородно распределенного по поверхности растительного горючего материала (РГМ), и внешние, такие как изменение скорости

и направления ветра, топографии местности. В общем, внутренние и внешние возмущения, не являются независимыми, они коррелируют до некоторой степени: например, небольшое увеличение скорости ветра увеличивает приток кислорода в зону горения, в результате будет сожжено больше РГМ, что приводит к увеличению площади пожара. Таким образом, для учета влияния стохастических возмущений на развитие пожара, детерминированная модель может быть модифицирована путем включения случайной составляющей, которая отражает влияние как внутренних, так и внешних возмущений с произвольной степенью корреляции.

Случайное поле скорости распространения призвано отразить совместное влияние внутренних (неравномерное пространственное расположение комплексов РГМ на поверхности) и внешних (вариации скорости и направления ветра в зоне пожара) возмущений на динамику природного пожара.

В данной работе представлена модификация авторегрессионной схемы моделирования однородных гауссовых случайных полей [5], состоящая во включении в схему формирования отсчетов поля случайных величин, имеющих гамма-распределение с параметром формы k ($0 < k < 1$). Построение модели поля проводилось согласно специфике решаемых задач, скорость распространения не может быть отрицательной.

Трехточечная авторегрессионная схема формирования поля имеет вид (1),

$$x_{i,j} = \rho_1 x_{i-1,j} + \rho_2 x_{i,j-1} - \rho_1 \rho_2 x_{i-1,j-1} + \sigma \sqrt{(1 - \rho_1^2)(1 - \rho_2^2)} \xi_{i,j}, \quad i, j \geq 1, \quad (1)$$

где i, j — дискретные пространственные координаты, $\xi_{i,j}$ — независимые случайные величины, имеющие гамма-распределение с параметром формы k ($0 < k < 1$), σ^2 — дисперсия поля, ρ_1 и ρ_2 — коэффициенты корреляции соседних элементов поля по столбцу и строке соответственно, ρ_1, ρ_2 выбираются из диапазона от 0 до 1.

Плотность гамма-распределения с параметрами $k, \mu > 0$ задается формулой

$$P_{k,\mu} = \frac{\mu^k x^{k-1} e^{-\mu x}}{\Gamma(k)}, \quad x > 0. \quad (2)$$

Число k называют параметром формы, а число μ — параметром масштаба. Задача моделирования случайных величин $\Gamma(k, 1)$ с параметром $k < 1$ решается с использованием свойств гамма-распределения согласно [6]. Для изучения предложенной модифицированной модели были проведены компьютерные эксперименты, основной задачей которых было определение таких значений параметров, при которых вероятностные характеристики полей соответствовали бы значениям скорости распространения пожара в определенных лесорастительных условиях. По результатам экспериментов было решено при формировании поля на каждом шаге рекуррентных вычислений, в качестве аргумента, использовать случайную величину с параметром формы $k = 2/3$. Варьируя значения среднеквадратического отклонения и коэффициентов корреляции были получены модели полей скорости распространения, отражающие различные варианты пространственной неоднородности РГМ.

В таблице 1 приведены вероятностные характеристики сгенерированных полей при значении $\sigma = 1,6$ в модели (1). Вычислительные эксперименты показали, что увеличение корреляционной зависимости приводит к увеличению среднего значения по полю.

Таблица 1: Вероятностные характеристики сгенерированных полей.

Коэффициент корреляции	Среднее значение по полю	Дисперсия	Коэффициент вариации (%)
0,6	4,22	1,77	31,5
0,7	5,93	1,93	23,25
0,8	9,29	2,75	17,75

На рис. 1, 2, 3 представлены фрагменты (100×100) сгенерированных полей на решетке (200×200) при различной степени корреляционной зависимости соседних отсчетов поля.

2 Имитационное моделирование процесса распространения пожара

На ландшафт, в котором моделируется развитие пожара, накладывается регулярная сетка ($m \times n$). Моделирование процесса распространения проводилось волновым алгоритмом Ли, окрестность горящего узла

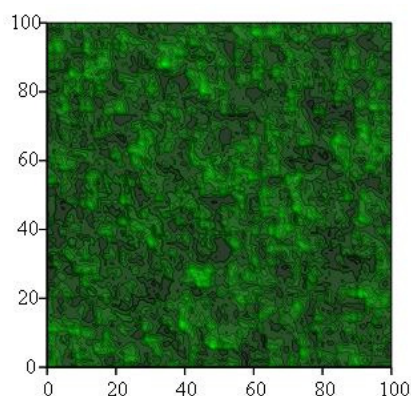


Рис. 1: Фрагменты реализации имитационной модели случайного поля скорости распространения $\rho_1 = \rho_2 = 0,6$

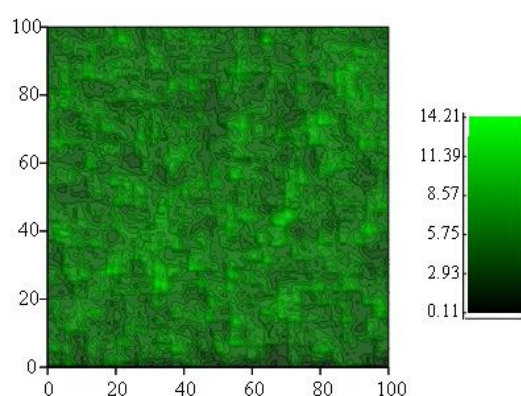


Рис. 2: Фрагменты реализации имитационной модели случайного поля скорости распространения $\rho_1 = \rho_2 = 0,7$

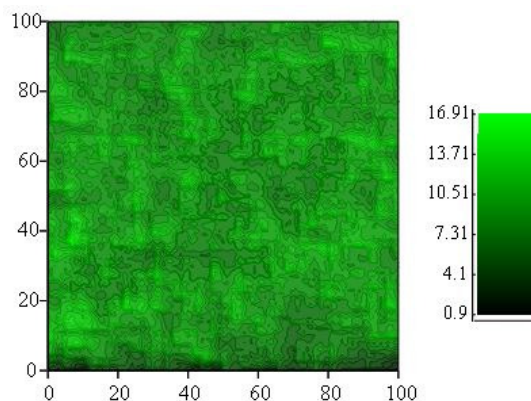


Рис. 3: Фрагменты реализации имитационной модели случайного поля скорости распространения $\rho_1 = \rho_2 = 0,8$

содержит 32 точки. В качестве исходной информации о процессе распространения алгоритм использует либо времена перехода из некоторой точки, занятой процессом, в соседние точки, либо величины скоростей движения фронта. Скорость распространения для этого алгоритма должна задаваться в узлах регулярной сетки, аппроксимирующей лесную территорию. Для изучения влияния флуктуаций скорости распространения на параметры природного пожара были проведены вычислительные эксперименты по моделированию процесса распространения на случайных полях скоростей.

На рис. 4 представлены результаты вычислительных экспериментов, соответствующих моделированию распространения лесного пожара на случайных полях скоростей, вероятностные характеристики которых приведены в таблице 1. Линии уровня соответствуют временам достижимости процесса распространения и показывают площадь, пройденную огнем в последовательные моменты времени. В первом, втором и третьем ряду на рисунке представлены две независимые реализации процесса распространения на случайных полях скоростей с коэффициентами корреляции $\rho = 0,6$, $\rho = 0,7$ и $\rho = 0,8$ соответственно. Увеличение корреляционной зависимости элементов поля скоростей приводит к модели развитого процесса распространения: быстрому росту площади, сглаживанию контура пожара.

Были проведены подобные вычислительные эксперименты по моделированию процесса распространения на случайных полях скоростей при значениях параметра $\sigma = 0,8$ и $\sigma = 1,2$ в модели (1) в трех вариантах корреляционной зависимости элементов поля.

На рис. 5, 6, 7 представлены результаты оценки площади, пройденной огнем для осредненной модели процесса распространения, шаг дискретизации по пространственным переменным $\Delta x = \Delta y = 2\text{м}$, расчетная область 200×200 , что соответствует 16 га лесной территории.

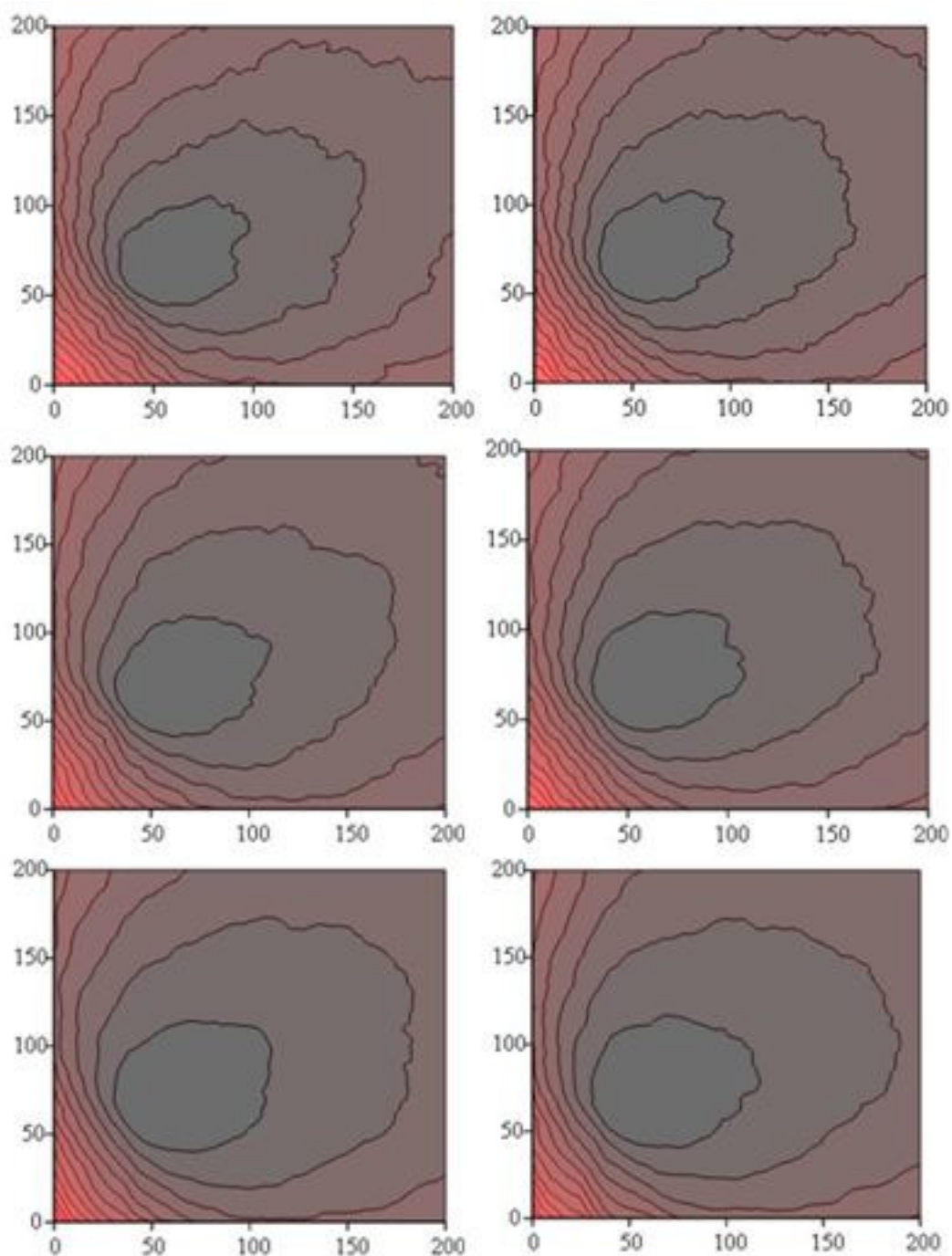


Рис. 4: Реализации процесса распространения пожара на случайных полях скоростей, шаг дискретизации по пространственным переменным ($\Delta x = \Delta y = 2\text{м}$); первый, второй и третий ряд - две независимые реализации процесса распространения на случайных полях скоростей с коэффициентом корреляции $\rho = 0,6$, $\rho = 0,7$ и $\rho = 0,8$ соответственно.

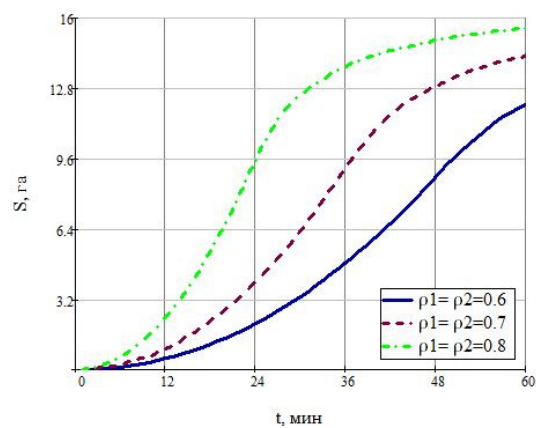


Рис. 5: Площадь пожара в последовательные моменты времени при $\sigma = 0,8$.

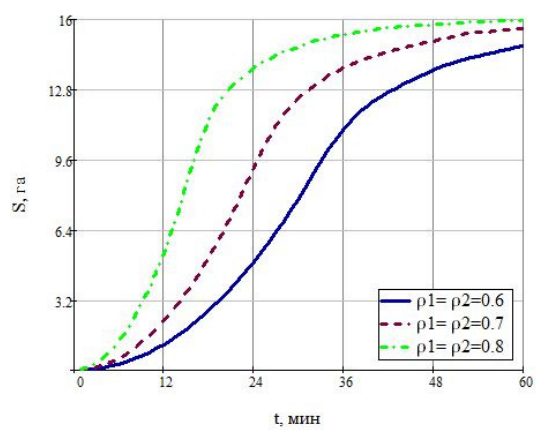


Рис. 6: Площадь пожара в последовательные моменты времени при $\sigma = 1,2$.

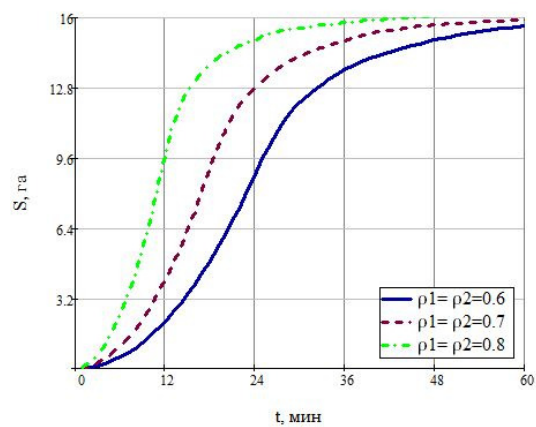


Рис. 7: Площадь пожара в последовательные моменты времени при $\sigma = 1,6$.

Результаты компьютерного моделирования процесса распространения пожара на случайных полях скоростей показали увеличение скорости продвижения горячей кромки, значительное увеличение площади, пройденной огнём при увеличении корреляционной зависимости отсчетов поля по пространственным координатам.

Заключение

Представлена модифицированная авторегрессионная схема формирования двумерного неотрицательного случайного поля, на основе которой построены модели случайных полей скорости распространения природного пожара. Полученные модели были использованы для расчета процесса распространения и оценки площади пожара в неоднородных условиях внешней среды.

Список литературы

- [1] Finney M.A. A Method for Ensemble Wildland Fire Simulation // Environ Model Asses. 2011, № 16. P. 153–167.
- [2] Хвостиков С.А., Барталев С.А., Лупян Е.А. Вероятностное прогнозирование развития природных пожаров методом Монте–Карло на основе интеграции в имитационную модель данных спутникового детектирования очагов горения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016, Т. 13. № 5. С. 145–156.
- [3] Лери М.М. Пожар на конфигурационном графе со случайными переходами огня по ребрам // Информатика и ее применение. 2015, Т. 9. № 3. С. 65–71.
- [4] Шалыгин А.С. Имитационные модели случайных полей. / А.С. Шалыгин, Ю.И. Палагин. БГТУ.— СПб., 1998. — 120с.
- [5] Хабиби А. Двумерная байесовская оценка изображений // ТИИЭР. 1972. № 7. С. 153–159.
- [6] Михайлов Г.А. Замечания о практически эффективных алгоритмах численного статистического моделирования // Сиб. журн. вычисл. математики. РАН. Сиб. отделение. — Новосибирск, 2014. Т.17. № 2. С. 177–190.

*Наталья Эвальдовна Лепп — ст. преподаватель Сибирского государственного
университета науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева;
e-mail: leppnatalia@mail.ru.*

Дата поступления — 31 мая 2017