

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОСТПОЖАРНОЙ СУКЦЕССИИ ЛЕСОВ НА ОСНОВЕ МАРКОВСКИХ МОДЕЛЕЙ

О.А. Терентьева

к.т.н., доцент, e-mail: Anatole4ka@yandex.ru.ru

Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, Омск, Россия

Аннотация. В работе представлена программная реализация марковской модели на Python для прогнозирования восстановления лесов после пожаров. Разработанное решение автоматизирует расчёт динамики сукцессии растительности с использованием уравнений Колмогорова–Чепмена. Программное приложение включает в себя численное решение уравнений модели, визуализацию результатов и интерактивный ввод параметров. Приведены примеры валидации модели на данных заповедника Утриш, демонстрирующие её точность и практическую применимость для планирования восстановительных мероприятий. Решение сокращает время расчётов в 3–5 раз по сравнению с ручными методами.

Ключевые слова: лесные пожары, прогнозирование, программное приложение, сукцессия, Марковский процесс.

Введение

Прогнозирование восстановления лесов после пожаров является важной задачей в экологическом мониторинге и управлении природными ресурсами. Современные методы автоматизации позволяют значительно ускорить и повысить точность таких прогнозов. Процесс постпожарного состояния леса включает в себя комплекс биологических, экологических и геохимических изменений, которые определяют дальнейшее развитие леса.

Одним из ключевых этапов восстановления является формирование пирогенных ландшафтов, которые включают в себя гибель растительности, изменение структуры почвы и являются стартовой точкой для сукцессии. Последний показатель носит положительный характер экологического последствия, так как пожар устраняет «больные» деревья и способствует обновлению экосистемы, а также создаёт мозаичность ландшафта, повышая биоразнообразие [1, 2].

Так, в работе учёных Черненко С.П. и Рогожиной Е.В. исследована произошедшая геохимическая трансформация 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 [3].

Максимальные накопления химических элементов в почвах обнаружались в местах интенсивного пожара. Был зафиксирован первый этап сукцессии для мхов в месте малоинтенсивного пожара, и установлен проход данного этапа сукцессии в месте максимального по интенсивности пожара.

В работе [4] предложена математическая модель, описывающая ситуацию успешности первого этапа сукцессии для мхов в зоне максимального по интенсивности пожара по сравнению с ходом сукцессии в зоне малоинтенсивного горения. В данной работе показано, что интенсивность пожара существенно влияет на скорость восстановления растительности. Однако существующие решения часто требуют ручного ввода параметров и не обеспечивают достаточной автоматизации расчётов [4, 5].

В данной работе рассмотрена марковская модель, учитывающая вероятностные переходы между стадиями сукцессии, и реализовано программное обеспечение для анализа динамики восстановления растительности. Модель была апробирована на данных заповедника Утриш, где в 2021–2023 гг. наблюдались пожары различной интенсивности.

1. Постановка задачи

Сукцессия моделируется на постпожарных участках посредством марковских процессов с непрерывным временем. Для каждого типа участка вводится конечное множество состояний, соответствующих стадиям восстановления растительности, и задаются интенсивности переходов между ними, а также задаётся матрица интенсивностей переходов Q .

Для участка с высокой интенсивностью пожара U_s :

$$Q_s = \begin{pmatrix} -\mu_0 & \mu_0 & 0 \\ 0 & -\mu_1 & \mu_1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

где строки и столбцы соответствуют состояниям S_0, S_1, S_2 в указанном порядке.

Для участка с низкой интенсивностью пожара U_w состояния упорядочены как $S_0, S_{01}^w, S_1, S_{12}^w, S_2$:

$$Q_w = \begin{pmatrix} -\lambda_0 & \lambda_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\mu_0 & \mu_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\lambda_1 & \lambda_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\mu_1 & \mu_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Здесь:

- U_s – участок, подвергшийся пожару повышенной интенсивности;
- U_w – участок, подвергшийся соответственно пожару пониженной интенсивности;
- S_0 – начальная стадия сукцессии, послепожарная;

- S_1 – первая стадия, имевшая место через 1 год;
- S_2 – стадия сукцессии через 2 года, время наблюдений которой мы не фиксируем;
- S_{01}^w и S_{12}^w – стадии «подпитки» растений;
- λ_0, λ_1 – интенсивности перехода к стадиям подпитки.

Сукцессия в рассмотренной модели предполагает переход растительности из стадии S_i к стадии S_j с определённой вероятностью $P(ij)$, которые описываются как интенсивности, обозначаемые символом μ_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 Δt :

$$P(ij)(\Delta t) = \mu_i \Delta t$$

при условии, что на отрезке времени Δt проявилось хотя бы одно событие из рассматриваемого потока событий [6].

Каждая стадия сукцессии наблюдается с некоторой вероятностью p_i . Динамика сукцессии описывается системой уравнений Колмогорова–Чепмена [7]:

$$\begin{aligned}\frac{dp_0}{dt} &= -\mu_0 p_0(t), \\ \frac{dp_1}{dt} &= -\mu_0 p_0(t) - \mu_1 p_1(t), \\ \frac{dp_2}{dt} &= -\mu_1 p_1(t),\end{aligned}$$

где $p_0(t), p_1(t), p_2(t)$ – вероятности нахождения в стадии S_0, S_1, S_2 , μ_0, μ_1 – интенсивности переходов, рассчитанные по данным [4].

2. Программная реализация

Программное приложение реализовано на языке программирования Python с использованием объектно-ориентированного подхода и состоит из трёх основных модулей:

- `markovmodel.py` – ядро расчётов. Функционал модуля реализует численный метод Рунге–Кутты 4-ого порядка для решения уравнений Колмогорова–Чепмена, а также поддерживает переменный шаг интегрирования для баланса точности и производительности;
- `visualization.py` – отрисовка графиков, а именно построение графиков динамики вероятностей;
- `interface.py` – пользовательский интерфейс для ввода данных и управления расчётами.

Схема взаимодействия описанных модулей представлена на рис. 1.

Алгоритм основных расчётов, которые реализованы и вычисляются программой, представлен на рис. 2.

Интерфейс приложения изображён на рис. 3.

Программа позволяет автоматизировать следующие этапы:

- ввод исходных параметров;

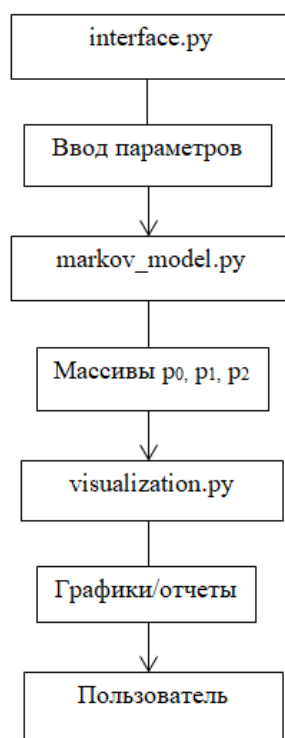


Рис. 1. Блок-схема взаимодействия модулей программы

- расчёт среднего времени этапа сукцессии T ;
- расчёт интенсивности μ_0 переходов растительности с начальной стадии S_0 в первую S_1 ;
- графическая иллюстрация вывода изменения вероятности состояний (стадий) сукцессии $p_0(t)$, $p_1(t)$, $p_2(t)$.

Программное приложение включает:

- окно для участков с высокой интенсивностью пожара – расчёт μ_0, μ_1 ;
- окно для участков с низкой интенсивностью – учёт стадий подпитки;
- окно сравнения – визуализация различий в динамике сукцессии.

Моделирование и вычислительные эксперименты апробированы автором на наблюдения постпожарной сукцессии в заповеднике Утриш (полуостров Абрау, Черноморское побережье России) пострадавшем от лесного пожара. Валидация модели проводилась по данным натурных наблюдений в заповеднике Утриш за 2021–2023 гг. Использовался поэтапный подход: интенсивности переходов оценивались методом максимального правдоподобия через минимизацию функции наблюдаемых и модельных вероятностей. Модель тестировалась на данных заповедника:

- для участков с высокой интенсивностью пожара U_s значения интенсивностей составили $\mu_0 = 0,35$, $\mu_1 = 0,25$;
- для U_w участков, подвергшихся соответственно пожару пониженной интенсивности $\mu_0 = 0,2$, $\mu_1 = 0,15$. Средняя ошибка между модельными и наблюдаемыми значениями не превысила 12,3 %, что подтверждает точность модели. Результаты

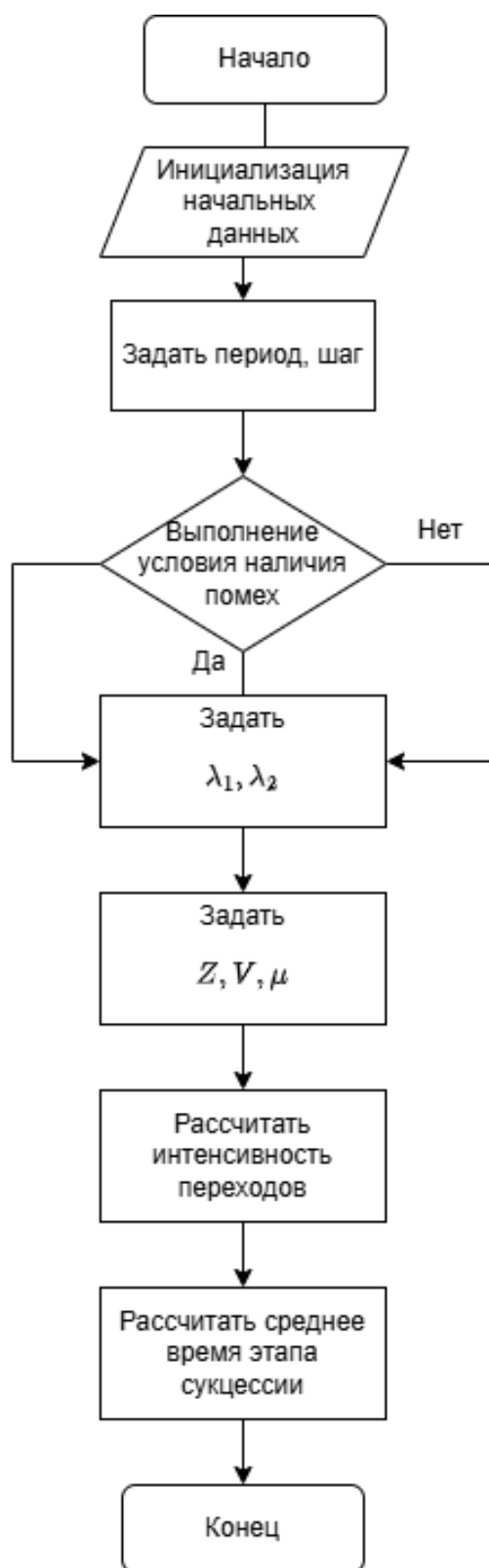


Рис. 2. Алгоритм программного приложения для расчётов постпожарной сукцессии

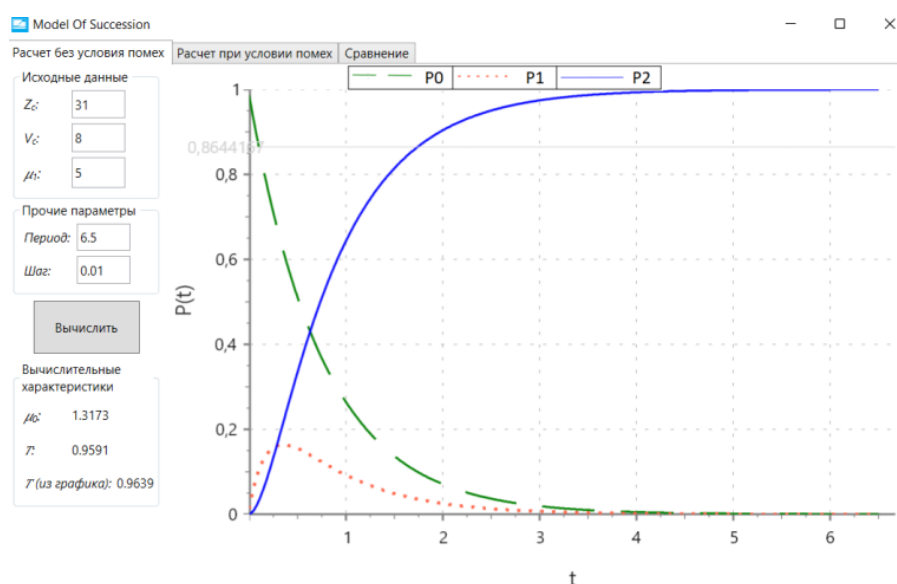


Рис. 3. Интерфейс программного приложения

эксперимента подробно представлены в работе [8].

Разработанная программная реализация марковской модели для прогнозирования восстановления лесов после пожаров демонстрирует значительные преимущества автоматизации экологического моделирования. Программа позволяет сократить время расчётов в 3–5 раз по сравнению с ручными методами. Например, расчёт динамики сукцессии для десятилетнего периода выполняется за 0,5–2 с, а ошибки человеческого фактора минимизируются.

Заключение

Было показано, что моделирование лесных пожаров представляет собой сложную задачу описания геохимической трансформации почвенно-растительного покрова поспирогенных зон различной интенсивности горения. Показана важность использования полученных данных постпожарной сукцессии для формирования пирогенных ландшафтов, которые служат стартовой точкой для сукцессии, определяя будущий облик экосистемы. Предложенная модель точнее учитывает стохастичность переходов по сравнению с детерминированными моделями, что подтверждается меньшими значениями средней ошибки. Разработанная программная реализация марковской модели позволяет автоматизировать прогнозирование восстановления лесов после пожаров. Программное обеспечение может быть использовано для планирования восстановительных мероприятий в заповедниках и лесных хозяйствах.

Дальнейшие исследования будут направлены на адаптацию модели для различных географических условий и интеграцию с системами дистанционного зондирования.

Благодарности

Автор выражает глубокую признательность своему научному руководителю – доктору физико-математических наук, профессору Александру Константиновичу Гуцу, память о котором автор навсегда сохранит. Его идеи, лежащие в основе данного исследования, неизменное внимание к работе, поддержка на всех этапах подготовки и человеческое тепло останутся для автора ориентиром на долгие годы. Автор искренне благодарен за мудрые советы, терпение и веру в успех, которые во многом определили научный путь и помогли сформироваться как исследователю. Светлая память об Учителе навсегда останется в сердце.

Литература

1. Немчинова А.В. Признаки стохастической детерминированности автогенной сукцессии лесных экосистем в марковских моделях // Компьютерные исследования и моделирование. 2016. Т. 8, № 2. С. 255–265.
2. Лесной кодекс Российской Федерации : от 04.12.2006 N 200-ФЗ (ред. от 29 декабря 2022 г.) // Доступ из СПС «КонсультантПлюс».
3. Черненко С.П., Рогожина Е.В., Керимзаде В.В. Активность каталазы и уреазы как индикатор пирогенной нарушенности почв (заповедник Утриш, полуостров Абрау) // Субтропическое и декоративное садоводство. 2022. № 82. С. 222–236.
4. Гуц А.К., Захарихина Л.В., Виницкая Е.А., Черненко С.П., Керимзаде В.В. Математическое моделирование геохимической трансформации почвенно-растительного покрова поспирогенных зон различной интенсивности горения // Математические структуры и моделирование. 2023. № 1 (65). С. 55–62.
5. Самороковский А. Ф. Использование теории марковских процессов при моделировании чрезвычайных ситуаций природного характера // Охрана, безопасность, связь. 2020. № 5–2. С. 81–86.
6. Венцель Е.С. Исследование операций. М.: Советское радио, 1972. 550 с.
7. Логофет Д.О. Марковские цепи как модели сукцессии: новые перспективы классической парадигмы // Лесоведение. 2010. № 2. С. 46–59.
8. Гуц А. К., Терентьева О.А. Программное приложение, визуализирующее расчёты постпожарной сукцессии мхов в заповеднике Утриш // Математические структуры и моделирование. 2023. № 2 (66). С. 80–90.

AUTOMATED FORECASTING OF POST-FIRE FOREST SUCCESSION BASED ON MARKOV MODELS

O.A. Terentyeva

Ph.D. (Eng.), Associate Professor, e-mail: Anatole4ka@yandex.ru

Dostoevsky Omsk State University, Omsk, Russia

Abstract. This paper presents a software implementation of a Markov model in Python for predicting forest recovery after fires. The developed solution automates the calculation of vegetation succession dynamics using the Kolmogorov–Chapman equations. The software application includes a numerical solution of the model equations, visualization of results, and interactive parameter input. Examples of model validation using data from the Utrish Nature Reserve are provided, demonstrating its accuracy and practical applicability for planning restoration measures. The solution reduces calculation time by 3-5 times compared to manual methods.

Keywords: forest fires, forecasting, software application, succession, Markov process.

Дата поступления в редакцию: 14.05.2023