

*Ильичев Владимир Юрьевич, к.т.н., доцент кафедры «Тепловые двигатели и гидромашины», Калужский филиал ФГОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), г. Калуга, Россия*

*Каширин Дмитрий Сергеевич, студент кафедры «Тепловые двигатели и гидромашины», Калужский филиал ФГОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), г. Калуга, Россия*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПОВЕДЕНИЯ КЛЕТОЧНЫХ АВТОМАТОВ**

**Аннотация:** В статье рассмотрены понятия, используемые при работе с клеточными автоматами, сферы применения данных структур, а также описаны созданные авторами программы, способные рисовать клеточные автоматы двух типов. Первая программа создаёт клеточный автомат в виде матрицы чисел; вторая программа предназначена для наблюдения за динамикой рисуемого на экране компьютера двумерного клеточного автомата, проявляющего как признаки хаотичного, так и признаки упорядоченного поведения. Делается попытка объяснить данный, не исследованный пока, феномен. Даются рекомендации по дальнейшему развитию данного направления исследований, способному объяснить многие факты окружающего мира.

**Ключевые слова:** клеточный автомат, детерминированность, динамика системы, теория хаоса, язык Python.

**Annotation:** The article discusses the concepts used when working with cellular automata, the scope of these structures, and also describes programs created by the authors that can draw cellular automata of two types. The first program creates

a cellular automaton in the form of a matrix of numbers; the second program is designed to observe the dynamics of a two-dimensional cellular automaton drawn on a computer screen, showing both signs of chaotic and signs of ordered behavior. An attempt is being made to explain this phenomenon, which has not yet been investigated. Recommendations are made for the further development of this area of research, which can explain many facts of the surrounding world.

**Keywords:** cellular automaton, determinism, system dynamics, chaos theory, Python language.

## **Введение**

Клеточный автомат представляет из себя разделённую на «квадраты» или ячейки одинакового размера модель какой-либо системы [1]. Самые простые автоматы бывают двумерными и используются для математического моделирования динамических систем [2]. Они и будут достаточно подробно рассмотрены в данной статье.

Клеточные автоматы обладают набором правил [3], описывающих как состояние их ячеек изменяется с течением времени. Если эти правила являются сложными, а система разбита на большое количество ячеек, то клеточный автомат способен описать развитие, «эволюцию» достаточно комплексной системы. Изменение такой системы с течением времени возможно рассматривать только с применением специально разработанных программ и вычислительной техники [4]. Если правила изменения ячеек представлены строгими формулами, то при одинаковом начальном состоянии ячеек развитие системы проходит при запуске программы по одинаковому пути; в этом случае клеточный автомат называется детерминированным [5]. У недетерминированных автоматов развитие подчиняется каким-либо изменяющимся условиям, либо происходит случайным образом; соответственно изменяются промежуточные и конечные состояния их ячеек.

Проблема исследования клеточных автоматов разных типов является актуальной, поскольку способна описать большое количество процессов в

системах, причём изменения параметров ячеек системы можно визуализировать, что делает динамические процессы очень наглядными [6].

В 80-х гг. С. Вольфрам рассматривал клеточные автоматы (так называемые, простейшие автоматы), в которых состояние каждой из ячеек связано с состоянием трёх соседних ячеек предыдущей строки [7]. Данные правила можно записать в виде таблицы (в табл. 1 приводится пример):

Таблица 1. Пример правил для простейшего клеточного автомата.

Состояние предыдущей ячейки	111	110	101	100	011	010	001	000
Состояние текущей ячейки	0	0	1	1	0	0	1	0

Развитие (изменения значений ячеек) клеточных автоматов очень эффективно можно моделировать с помощью средств языка программирования Python, в том числе графических [8].

Автором данной статьи был написан код, позволяющий визуализировать конечное состояние любого клеточного автомата с заданной конфигурацией клеток первого ряда (в каждую клетку записывается значение 0 или 1; первоначальное значение остальных клеток таблицы можно автоматически задать равными 0 или 1) и с заданным набором правил. Размеры поля клеточного автомата (длина каждой строки и количество генерируемых строк также является одним из исходных данных).

После этого в цикле по строкам производится расчёт автомата по заданным правилам. Все данные (исходные, промежуточные, конечные) размещаются в матрице.

На рис. 1 в качестве примера работы программы приведено конечное состояние клеточного автомата с начальным состоянием всех ячеек, равным 0 (кроме первой строки со значениями ячеек [1,1,1,0,1,1,1,0,1,0,1,1,0,0,1]) и с набором правил из табл. 1, имеющем 15 строк и 15 столбцов.

```
[[1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 1],
[0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 0],
[0, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 0],
[0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0],
[0, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0],
[0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0],
[0, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0],
[0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0],
[0, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0],
[0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0],
[0, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0],
[0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0],
[0, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0],
[0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0],
[0, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0],
[0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0],
[0, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0]]
```

Рис. 1. Результат вычисления простейшего клеточного автомата с набором правил, заданным в табл. 1.

В приведённом на рис. 1 примере не следует обращать внимание на значение первой и последней ячеек каждой строки, т.к. они не могут быть вычислены по правилам табл. 1 (не хватает значения первой или последней ячейки предыдущей строки) – они остаются равными первоначальному значению 0.

Простейшие клеточные автоматы успешно используются в следующих отраслях знаний:

1. криптографии (науке о шифровании и расшифровке данных) [9],
2. при моделировании биологических процессов (т.к. организмы, как и клеточные автоматы, состоят из клеток) [10];
3. в социологии (т.к. поведение людей подчиняется определённым правилам) [11];
4. при моделировании различных физических процессов [12].

Во введении мы рассмотрели только простейший клеточный автомат и объяснили принципы его работы. Основная часть работы будет посвящена изучению клеточного автомата, который называется «муравьём Лэнгтона», работающего по более сложным правилам.

### **Материал и методы исследования**

Муравей Лэнгтона является двухмерным клеточным автоматом, и в то же

время некой математической абстракцией, изображаемой графически, и способной продемонстрировать разное поведение динамической системы в различные периоды времени – вначале движение системы кажется полностью хаотичным, а потом приобретает упорядоченность. Изучение данного клеточного автомата позволяет продемонстрировать некоторые принципы теории хаоса. Но его поведение учёные до сих пор только пытаются объяснить (так же, как и многие другие явления природы).

Целью данной работы является создание программы-симулятора на популярном и бесплатном языке программирования Python [13], позволяющей изображать на экране компьютера модель движения Муравья Лэнгтона. С помощью данной программы будут продемонстрированы некоторые особенности поведения изучаемого клеточного автомата.

Прежде, чем создавать программу, необходимо сформулировать правила работы данного клеточного автомата:

1. Автомат начинает своё «движение» с заданной клетки поля некоторого, также заданного, размера.

2. Если текущая клетка имеет белый цвет, то муравей перекрашивает её в чёрный цвет, поворачивает на  $90^\circ$  по часовой стрелке и перемещается вперёд на одну клетку.

3. Если текущая клетка имеет чёрный цвет, то муравей перекрашивает её в белый цвет, поворачивает на  $90^\circ$  наоборот, против часовой стрелки, и перемещается вперёд также на одну клетку.

4. При достижении границ клеточного поля движение прекращается.

Созданная на Python программа состоит из следующих блоков:

1. для рисования решено было использовать модуль Python «черепашка» (turtle), так как он позволяет осуществлять как раз поклеточный вывод изображения, поэтому на первом этапе осуществляется его импорт;

2. логичным являлось создание двух отдельных функций: для присвоения, заданного цвета клетке на данном шаге и для возвращения текущей позиции курсора (по которой необходимо выполнять действия

согласно вышеизложенным правилам);

3. задаются желаемые атрибуты окна «черепашки»: размер в клетках по горизонтали и вертикали и цвет фона, а также временной промежуток до создания очередной клетки;

4. реализация правил работы клеточного автомата с помощью функций пункта 2, а именно изменение координаты и цвета клетки на каждом шаге рисования;

5. для упрощения кода решено было не производить остановку автомата при выходе за края поля; просто задавать поле достаточно большого размера, чтобы такого выхода не происходило (при выходе код программы продолжает выполняться).

Существуют и другие способы реализации движения Муравья Лэнгтона; например, путём замены квадратной сетки шестиугольной или восьмиугольной, а два состояния цвета клеток при этом можно заменить большим числом, каждое из которых соответствует выбранному направлению движения в соседнюю ячейку (рис. 2).

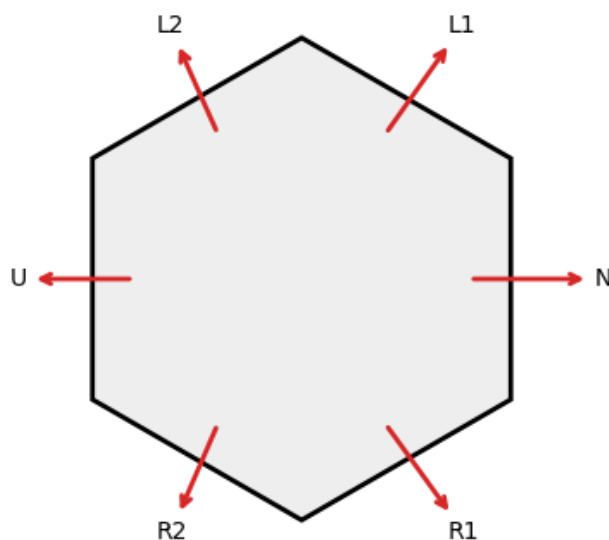


Рис. 2. Вариант перемещения клетки автомата при очередной итерации.

### Пример расчёта

Рассмотрим работу созданной программы отрисовки Муравья Лэнгтона. Движение начнём с начала координат поля клеточного автомата.

Вначале закрашивание клеток в тот или иной цвет, а также направление движения не подчиняются какой-либо строгой последовательности, однако происходят в пределах ограниченного участка поля клеточного автомата (с помощью созданной программы-симулятора было определено, что данный участок имеет размер всего лишь приблизительно 40x40 клеток). На экране компьютера рисуется картина, одна из промежуточных итераций которой представлена на рис. 3.

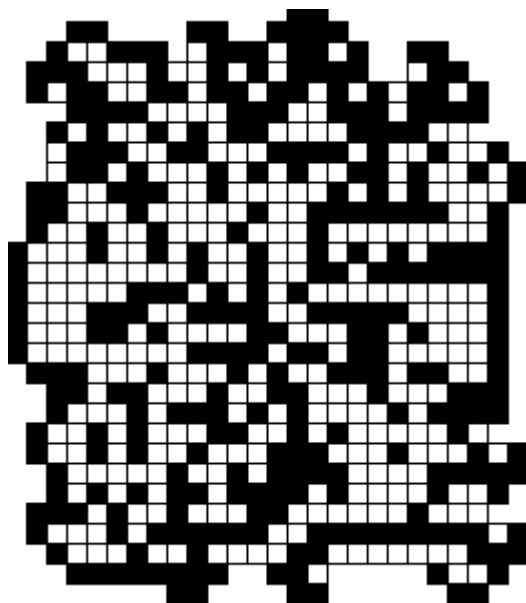


Рис. 3. Одна из итераций рисования двумерного автомата Лэнгтона на первых стадиях работы созданной программы

После длительного наблюдения за аттрактором (примерно после 10000 итераций), «муравей» постепенно начинает покидать пределы указанного поля, передвигаясь при этом на маленьком его участке. Через каждые 104 итерации этот участок, однако, перемещается по диагонали (эта картина наглядно показана на рис. 4).



Рис. 4. Демонстрация упорядоченного участка движения двумерного автомата Лэнгтона

В результате продолжающегося упорядоченного перемещения рассматриваемого клеточного автомата, он покидает поле исследования.

Наблюдаемое поведение двумерного автомата Лэнгтона можно поверхностно объяснить следующим образом: при формировании первоначальной «хаотичной» области система как бы формирует некую структуру; при окончании этого процесса «муравью» даётся возможность покинуть её путём выполнения бесконечного цикла действий.

### **Заключение**

Таким образом, цель исследования, заключающаяся в создании программы для рисования двумерного клеточного автомата (Муравья Лэнгтона) и выявления особенностей его поведения, была полностью выполнена. Кроме того, рассмотрены особенности и других клеточных автоматов, а также сферы их использования. Особенно хотелось бы отметить область биологии, так как белки в живых организмах ведут себя при



взаимодействии очень похоже на рассмотренный клеточный автомат, и поэтому возможно, что на основе Муравья Лэнгтона (либо более сложной модели) удастся понять и смоделировать жизненно важные процессы в организмах.

Читателю, изучающему среду программирования Python, предлагается самостоятельно реализовать модели клеточных автоматов с клетками, имеющими более 4 граней и окрашивающихся в большее двух количество цветов, а также произвести трёх- и более мерное движение. Это может создать не только интересные визуальные эффекты, но и выявить новые особенности клеточных автоматов, полезные для использования в научных исследованиях.

Также данное исследование наглядно демонстрирует принцип, что у каждого природного явления есть свои законы создания и развития.

В целом, можно сделать вывод, что описанные в статье программные эксперименты увенчались успехом, что наглядно продемонстрировано их результатами.

#### **Библиографический список:**

1. Shvedovskiy V.A. Cellular automaton with percolation as a dynamic system: entropy approach. // Computational Mathematics and Information Technologies. 2021. Т. 1. № 2. С. 61-71.

2. Ivanov D.V. Identification of linear dynamic systems of fractional order with errors in variables based on an augmented system of equations. // Journal of Samara State Technical University. Ser. Physical and Mathematical Sciences. 2021. Т. 25. № 3. С. 508-518.

3. Балукин Д.В., Титов П.Л. Нелинейная динамика клеточного автомата, основанного на простых правилах. // В сборнике: Образование и наука в современных реалиях. Сборник материалов Международной научно-практической конференции: в 2 томах. 2017. С. 270-276.

4. Plichev V.Yu. Development of procedure for determination of characteristics of heated polycarbonate greenhouses. // International Research Journal. 2021. № 2-1 (104). С. 132-135.

5. Киселева И.Э. Детерминированность и неопределенность. // В сборнике: Теоретические и прикладные вопросы науки и образования. Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции: в 16 частях. 2015. С. 54-55.

6. Ильичев В.Ю., Насонов Д.А. Экспериментально - аналитическое исследование и коррекция статических и динамических характеристик резинопальцевых муфт. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2011. № 3. С. 46-52.

7. Нормантас В. Использование компрессии данных для оценки энтропии простейших клеточных автоматов. // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. 2015. № 18. С. 265-269.

8. Ильичев В.Ю. Использование библиотеки ZenCAD языка Python для разработки универсальной методики создания объемных изделий. // Системный администратор. 2021. № 6 (223). С. 82-85.

9. Ильичев В.Ю., Каширин Д.С. Использование «ленивых вычислений» при создании программных продуктов на языке Python. // Вопросы науки. 2022. № 4. С. 17-21.

10. Витвицкий А.А. Клеточные автоматы с динамической структурой для моделирования роста биологических тканей. // Сибирский журнал вычислительной математики. 2014. Т. 17. № 4. С. 315-327.

11. Истратов Л.А., Смычкова А.Г., Жуков Д.О. Моделирование социальных процессов группового поведения на основе стохастических клеточных автоматов с памятью и систем дифференциальных кинетических уравнений с запаздыванием. // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2020. № 51. С. 45-54.

12. Колесников А.В., Сиренко С.Н., Малинецкий Г.Г. Хаос и трансформация категории времени в постнеклассической науке. // Философия науки. 2019. № 2 (81). С. 35-56.

13. Ilyichev V.Yu. Development of a program for Lorentz attractor research

and its use. // The Complex Systems. 2021. № 1 (11). С. 58-64.