

УДК 681.3

## **КЛЕТОЧНЫЕ АВТОМАТЫ В ИСТОРИЧЕСКОМ КОНТЕКСТЕ И ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ**

*Коноплева А.П., Аноприенко А.Я.*

*Донецкий национальный технический университет*

Теория клеточных автоматов (КА) прошла долгий путь становления от работ по самовоспроизводящимся структурам фон Неймана до современных работ в самых различных областях науки.

Из-за большого количества разновидностей КА достаточно полная их систематизация является нетривиальной задачей. В данной работе авторами предложен вариант наиболее общей классификации КА, который учитывает основные свойства входных параметров КА. А также проведена определенная работа в области систематизации КА в контексте их исторического развития.

### **Развитие теории КА**

Клеточные автоматы – дискретные динамические системы, поведение которых полностью определяется в терминах локальных зависимостей. КА являются своего рода математическими идеализациями физической системы, в которой время и пространство дискретны, а физические величины принимают конечное множество значений [6]. Основными компонентами КА являются: дискретное пространство, дискретное время, локальные зависимости, правила (рецепты).

Историю развития теории КА можно описать схемой, которая не претендует на научную новизну, однако наиболее наглядно и емко отражает основные тенденции в развитии КА (рис. 1).

Теория КА обязана своим появлением двум ученым: Джону фон Нейману и Конраду Цузе. Но, как видно на рисунке 1, работа интереснейшая работа Конрада Цузе «Вычислительное

пространство» (основная идея заключается в том, что Вселенная является огромным функционирующим КА («cellular automation» (СА)); особый интерес Цузе вызывало применение этих систем к задачам численного моделирования в механике и проблемам физики [4]), не получила столь широкого признания научных кругов, как работа Джона фон Неймана и Станислава Улама в области самовоспроизводящихся структур. Итогом многолетних трудов ученых стала книга Артура Беркса (1957 г.) «Клеточные автоматы» и разработанная модель самовоспроизведения на 300 000 ячеек, каждая ячейка которого включала 29 состояний [3]. Именно это направление теории КА стало развиваться, а работа Цузе, к сожалению, практически забыта.

Следующей тенденцией развития КА стало стремление исследователей упростить сложный КА фон Неймана. Здесь широко известны работы Эдгара Кодда (1968), Эдвина Роджера Бэнкса, Кристофера Лэнгтона (1984), Н.Н. Chou, J. Reggia (1993), Бул (1999) и др. исследователей, результатами работы которых стало появления множества КА с количеством состояний от 8 до 64 [5].

Важный вклад в развитие КА внесли ученые: Мартин Гарднер и Джон Хортон Конуэй. Известнейшая их работа игра «Жизнь» (1970) стала широко даже за пределами научных кругов [5].

В 1990 году вышла в переводе на русский язык в издательстве «Мир» книга «Машины клеточных автоматов» американских ученых из Массачусетского технологического института Тома Тоффоли и Нормана Марголуса, в которой систематично изложены основные достижения в области КА. Авторы описывают машину КА САМ-6, которая была создана в Массачусетском технологическом институте на основе языка FORTH. Машина работала на базе IBM-PC с памятью 256 К. С ее помощью можно было моделировать сложные модели физических процессов в газах и твердых телах. Также важное место отведено фундаментальным свойствам КА: параллельности и локальности [7].

Фундаментальные исследования в области КА были

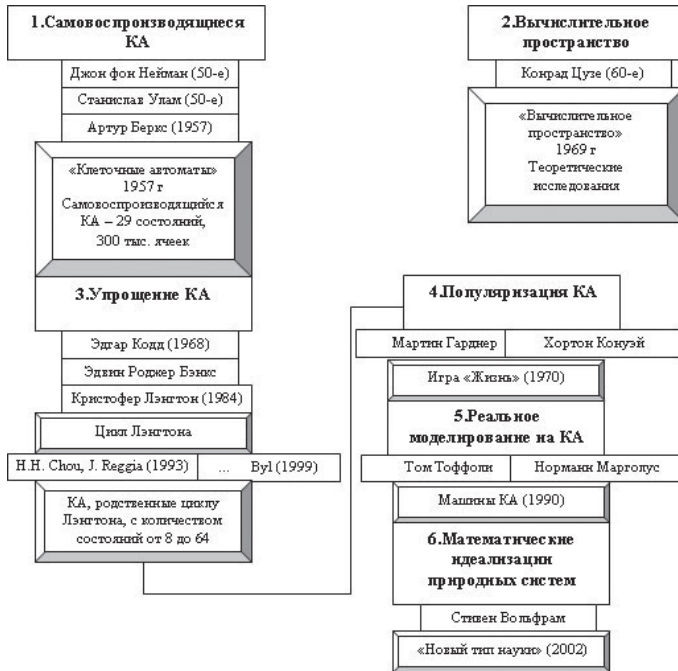


Рисунок 1 – Развитие теории клеточных автоматов

проведены Стивеном Вольфрамом. В 2002 году выходит большой труд ученого «Новый тип науки», объемом 1200 страниц, который посвящен КА.

Вольфрам делает акцент на возможности использования КА в качестве математических моделей физических, биологических и вычислительных систем благодаря простоте конструкции, возможности точного математического анализа и способности к сложному поведению [6].

С момента появления теории КА интерес к этой проблеме возрастает. Об этом свидетельствуют исследования, которые проводятся по всему миру учеными разных отраслей науки: в химии, физике, математике, биологии, экологии, социологии, криптографии, философии, компьютерной инженерии и нейронных сетях [5, 8-10].

Авторами работы предложен и разработан новый вид КА, базирующийся на логике гиперкодов или расширенного кодо-логического базиса.

Основная идея заключается в применении концепций расширенного кодо-логического базиса [2] к моделированию клеточных автоматов [1, 3-10].

### **Классификация КА**

Из современных классификаций КА наиболее известна классификация Вольфрама, основанная на анализе возможной сложности поведения КА. Положительным моментом классификации Вольфрама является осмысленность получаемых групп, которые характеризуют возможности по распространению и обработке информации КА. Но у этого подхода есть и отрицательные моменты – сложность определения класса для большинства КА.

Кроме возможной сложности поведения КА есть и другие признаки, по которым можно систематизировать КА. Предлагаемая ниже классификация базируется на принципе варьирования таких параметров КА, как состояние элементов, геометрия КА, тип соседства, локальные правила, способы организации автомата по времени.

Некоторые типы КА получаются путем совмещения различных вариантных параметров. Приведенная схема классификации сложна для восприятия, однако наиболее полно и точно отображает взаимосвязи различных параметров КА и их влияние на работу КА.

По пространственным характеристикам КА делятся на одномерные и многомерные в зависимости от количества пространственных координат сетки автомата. Одномерным является класс элементарных КА, наиболее полно изученный и описанный Стивеном Вольфрамом. Элементарный КА – одномерный массив, состоящий из конечных автоматов, каждый из которых может находиться в двух состояниях: 0 или 1, – и изменять свое состояние

в дискретный момент времени в зависимости от своего состояния и состояния двух ближайших соседей (слева и справа). Все клетки обновляют состояния одновременно.

На практике из многомерных КА используются двумерные и реже трехмерные.

Из геометрических характеристик очень условно выделены окрестность и изометрия. Окрестность, которая состоит из клеток, имеющих общую вершину с данной, называется окрестностью Мура. Окрестность, которая состоит из клеток, имеющих общую сторону с данной, называется окрестностью фон Неймана.

Окрестность и изометрия взаимосвязаны и зависят также от временных характеристик (рис.2). В зависимости от того меняется ли геометрия автомата во времени, КА делятся на динамические и статические.

Изометрической характеристике присуще большое разнообразие различных вариантов. На рис. 2 приведено для примера лишь малое количество видов изометрий (статические: квадратная, треугольная, гексагональная; динамические: Вольфрама, «Кирпичная стена», «Триумфатор», «Q-Bert», Марголуса).

По временным характеристикам КА подразделяются на синхронные, асинхронные, статические и динамические (о последних двух было сказано выше). В синхронных КА переход в новое состояние для всех клеток осуществляется одновременно по сигналу глобального таймера. В асинхронных КА клетки переходят в новое состояние в случайном порядке.

По способу формирования законов-рецептов КА данной классификацией выделяются детерминированные (последующее состояние ячейки однозначно определяется состоянием этой ячейки и ее ближайших соседей в предыдущий момент времени), вероятностные (состояния ячеек в последующий момент времени определяются на основе некоторых вероятностей), обобщающие (правила зависят только от общего числа значений соседних ячеек). По признаку однородности КА делятся на однородные и неоднородные. В однородных КА локальные функции переходов и

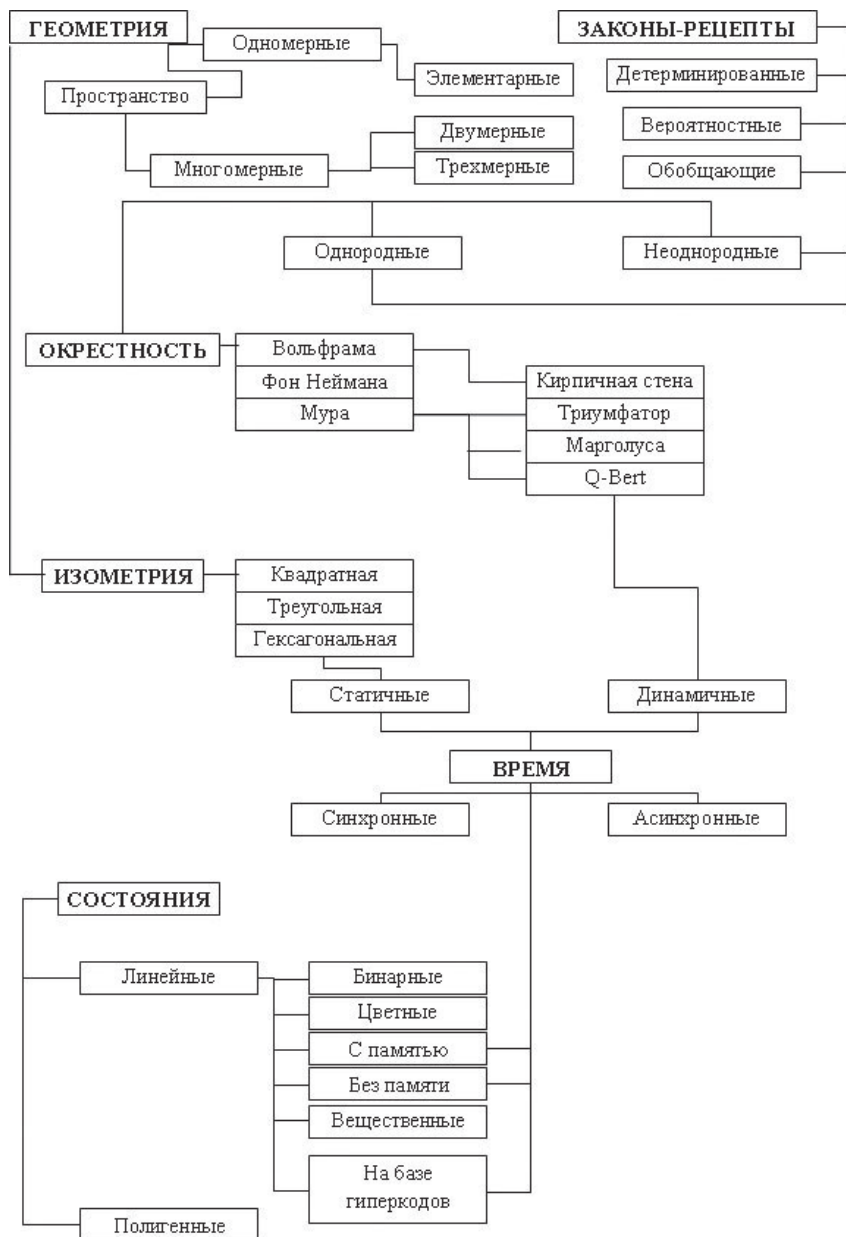


Рисунок 2 – Классификация клеточных автоматов

индексы соседства одинаковы для каждой клетки. В неоднородных КА клетки могут иметь различные функции перехода или различные индексы соседства. Таким образом, в формировании этого признака участвуют два параметра: принцип формирования законов-рецептов и способ организации окрестности.

По типу состояний КА делятся на полигенные, элементы которого содержат различное множество возможных состояний  $E_n$  в разные моменты времени. На практике используются ячейки с эквивалентными состояниями в каждый момент времени – линейный КА. К линейным КА относятся бинарные (ячейке присущи состояния 0, 1), цветные (от двух до 224 состояний), вещественные (состояние ячеек описывается набором вещественных переменных), КА с памятью (добавляются свойства памяти к ячейке  $x_i$  из ее собственной истории), КА без памяти (традиционные КА), КА на базе гиперлогики [1].

В работе рассмотрены базовые концепции, положенные в основу теории КА, которая на сегодняшний день не только продолжает развиваться, но и находит новые практические применения в различных областях науки.

Предложена классификация КА по основным параметрам, позволяющая более полно систематизировать весь сложный и многогранный мир КА.

Полученные результаты в области синтеза идей КА и расширенного кодо-логического базиса подтверждают актуальность дальнейших разработок в этом направлении.

## Литература

- [1] Аноприенко А. Я., Коноплева А. П. Опыт применения гиперкодов в моделировании клеточных автоматов // Научные труды Донецкого национального технического университета. Выпуск 6 (127). Серия «Проблемы моделирования и автоматизации проектирования динамических систем» (МАП-2007). – Донецк: ДонНТУ.

- 2007. – С.220-227.
- [2] Аноприенко А. Я. Эволюция алгоритмического базиса вычислительного моделирования и сложность реального мира // Научные труды Донецкого национального технического университета. Выпуск 52. Серия «Проблемы моделирования и автоматизации проектирования динамических систем» (ИКВТ - 2002). – Донецк: ДОНТУ. – 2002. – С. 6-9.
- [3] Von Neumann, J. (1966). Theory of Self-Reproducing Automata. Edited and completed by A.W. Burks. Urbana, IL: University of Illinois Press.
- [4] Konrad Zuse (1969). Calculating Space. Massachusetts Institute of Technology. Proj Mac. Cambridge, Mass 02139. – 1970– 74 p.
- [5] Joel L. Schiff Cellular automata. A Discrete View of the World. A John Wiley&Sons inc, Publication. University of Auckland.– 2008.– 279 p.
- [6] A New Kind of Science / S.Wolfram. Electronic recourse. Access mode: <http://www.wolframscience.com/nksonline/toc.html>
- [7] Тоффоли Т., Марголюс Н. Машины клеточных автоматов // Издательство «Мир», Москва, 1991. – 280 с.
- [8] Camazine, Deneubourg, Franks, Sneyd, Theraulaz, Bonabeau. Self-Organisation in Biological Systems, Princeton University Press, 2003.
- [9] Hulata, Volman. Self-regulated complexity in neural networks, Natural Comput, 4, 2005, 363-386.
- [10] Reiter, A local cellular model for snow crystal growth. Chaos, Soliton&Fractals. 23(4) – 2005. 1111-1119.