

CELLULAR AUTOMATA SELF-REPLICATING MATRIX OF ARTIFICIAL BIOLOGICAL CELLS

S. M. Achasova

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics of SB RAS
630090, Novosibirsk, Russian Federation

John von Neumann used the concept of cellular automaton for presenting and studying the logical form of self-reproduction. His goal was to describe the fundamental principles and algorithms of information processing involved in the process of self-reproduction, in other words, to separate the logical form from the natural process of self-reproduction. It is interesting to note, a few years before J. Watson and F. Crick discovered the DNA double helix von Neumann formulated the need for a one-dimensional description (genome) of the self-replicating structure, which is fed on the input tape, and then generates the structure in the cellular automata space. In addition, von Neumann formulated the principle of the dual use of the genome that is fed on the input tape: it serves as a program for construction of the mother structure (translation of the genome), and is also copied to the mother structure (transcription of the genome) so that a daughter structure could then be produced.

Further study of self-reproduction was associated with Langton loop. This is a cellular automaton incapable of universal construction, but capable exclusively of self-replication. Originally Langton loop was a rectangular loop in a two-dimensional cellular automata space. The self-description (genome) of the mother loop circulates in Langton loop in the form of a sequence of cell states. Simultaneously with construction of the daughter loop the genome is rewritten into it, and then this loop creates its daughter. Langton loop was used as a model for verification hypotheses relating to the emergence of biological life. Langton loop was endowed with the ability to interact with the external observer. Attempts were made to create „useful replicator“ on the basis of Langton loop; this is the cellular structure which executes a computational program together with constructing a copy. Subject to the successful development of such direction self-replicating structures can be considered as a new paradigm for designing fine-grain parallel algorithms and architectures.

In the paper the self-replicating cellular automaton structure in the form of a matrix of artificial biological cells “Star,” is presented. The simple program for constructing this structure is based on the Parallel substitution algorithm (PSA) that is a spatial system for representing fine-grain parallel algorithms and architectures. An artificial biological cell is constructed from a genome that is fed on the input tape. The result is a model of an artificial biological cell, which contains the phenotype as a set of fixed data and the genotype as a set of mobile data. The structures of artificial biological cells can be the components of computer system that mimic the properties of living organisms — growth, self-replicating, self-repair.

The PSA is an expanded paradigm of the classical cellular automaton (CA) and has some new properties compared with CA, which enhances its functional and expressive abilities. These properties are as follows. An arbitrary substitution template is admitted. At each clock cycle, one substitution can change the states of several cells. New type of a substitution is introduced. This is the functional substitution, in which the new states of the cells are functions of the states of the adjacent cells. These properties of the PSA enable to create compact, easily foreseeable and structured description of the process of building fine-grain models of artificial biological cells. The devices possessing such properties can be used in space research, in radioactive environments, avionics, etc.

Key words: cellular automaton, self-replicating structure, parallel substitution algorithm, artificial biological cell, artificial multicellular organism.

References

1. Von Neumann J. Theory of self-replication automata / Burks A. W. (ed.) University of Illinois Press, 1966.
2. Watson J., Crick F. A structure for deoxyribose nucleic acid. // Nature. 1953. V. 171. P. 737–738.
3. Watson J. D. The Double Helix. New York: Atheneum, 1968.
4. Langton C. G. Self-replication in cellular automata // Physica D. 1984. V. 10. P. 135–144.
5. Langton C. G. Studying artificial life with cellular automata // Physica D. 1986. V. 22. P. 120–149.
6. Codd E. F. Cellular automata. New York: Academic Press, 1968.
7. Chou H.-H., Reggia J. A. Emergence of self-reproducing structures in a cellular automata space // Physica D. 1997. V. 110. P. 252–276.
8. Azpeitia I., Ibanez J. Spontaneous emergence of robust cellular replicators // Lect. Notes in Comput. Sci. 2002. V. 2493. P. 132–143.
9. Stauffer A., Sipper M. Externally controllable and destructible self-replicating loops // Lect. Notes in Artificial Intelligence. 2001. V. 2159. P. 282–291.
10. Chou H.-H., Reggia J.A. Problem solving during artificial selection of self-replicating loops // Physica D. 1998. V. 115. P. 293–312.
11. Petraglio E., Henry J.-M., Tempesti G. Arithmetic operations on self-replicating cellular automata // Lect. Notes in Artificial Intelligence. 1999. V. 1674. P. 447–456.
12. Mange D., Stauffer A., Petraglio E., and Tempesti G. Embryonic machines that divide and differentiate // Lect. Notes in Comput. Sci. 2004. V. 3141. P. 201–216.
13. Mange D., Stauffer A., Petraglio E., Tempesti G. Self-replicating loop with universal construction // Physica D. 2004. V. 191. P. 178–192.
14. Mange D., Stauffer A., Peparolo L., Tempesti G. A macroscopic view of self-replication // Proc. IEEE. 2004. V. 92, Iss. 12. P. 1929–1945.
15. Stauffer A., Mange D., and Tempesti G. Bio-inspired computing machines with self-repair mechanisms // Lect. Notes in Comput. Sci. 2006. V. 3853. P. 128–140.
16. Stauffer A., Mange D., Rossier J. Self-organizing systems based on bio-inspired properties // Lect. Notes in Artificial Intelligence. 2007. V. 4648. P. 1171–1181.
17. Stauffer A., Mange D., Vannel F. Bio-inspired self-organizing cellular systems // Biosystems. 2008. V. 94, Iss. 1–2. P. 164–169.
18. Tempesti G., Mange D., Stauffer A. Self-replicating and cellular automata / In Encyclopedia of Complexity and Systems Science. Springer Science Business Media New York. 2013. P. 8066–8084.
19. Dighe S. G., Kanawate M. T. Field Programmable Gate Array Technique's // International Journal of Computing and Technology. 2015. V. 2, Iss. 12. P. 521–527.
20. Achasova S. M. Modeling Artificial Biological Cell in Fine Grained Structure // Programming and Computer Software. 2014. V. 40, N 6. P. 354–361.
21. Achasova S. M. Self-replicating structure as an artificial multicellular organism // Cybernetics and Systems Analysis. 2014. V. 50, Iss. 2. P. 316–323.
22. Achasova S. M., Bandman O. L. Korrektnost parrallelnykh vychislitelnykh protsessov. [Validity of Parallel Computational Processes] Novosibirsk: Nauka. 1990.
23. Achasova S. M., Bandman O. L., Markova V. P., Piskunov S. V. Parallel substitution algorithm. Theory and application. Singapore: World Scientific. 1994.
24. Achasova S. M. Simple Self-Reproduction Programs in a Cellular Space Based on the Parallel substitution algorithm // Programming and Computer Software. 2004. V. 30. N 4. P. 181–188.
25. Achasova S. M. Program Constructor of Cellular Self-Reproducing Structures // Programming and Computer Software. 2009. V. 35. N 4. P. 190–197.

КЛЕТОЧНО-АВТОМАТНАЯ САМОВОСПРОИЗВОДЯЩАЯСЯ МАТРИЦА ИЗ ИСКУССТВЕННЫХ БИОЛОГИЧЕСКИХ КЛЕТОК

С. М. Ачасова

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
630090, Новосибирск, Россия

УДК 681.32

Описывается самовоспроизводящаяся клеточно-автоматная структура в форме матрицы из искусственных биологических клеток „звезда“. Простая программа построения этой структуры базируется на Алгоритме параллельных подстановок — пространственной модели мелкозернистых параллельных алгоритмов и архитектур. Искусственная биологическая клетка строится из генома, который подается на входную ленту. Структуры из искусственных биологических клеток могут быть компонентами вычислительных устройств, имитирующими свойства живых организмов — рост, самовоспроизведение, самовосстановление.

Ключевые слова: клеточный автомат, самовоспроизводящаяся структура, алгоритм параллельных подстановок, искусственная биологическая клетка, искусственный многоклеточный организм.

Введение. Джон фон Нейман, работая в Американском атомном (Манхэттенском) проекте (1940-е годы), столкнулся с низкой надежностью вычислительных машин и обратился к природным явлениям, чтобы найти путь построения отказоустойчивых вычислителей. Природные системы или, как называл их Джон фон Нейман, природные автоматы — биологические организмы, в отличие от искусственных автоматов — вычислительных машин, являются наиболее надежными среди всех сложных систем, известных человеку. Их надежность — следствие не какой-нибудь особой робастности (живучести, запаса прочности, устойчивости к внешним воздействиям), но их экстремальной избыточности. Основной природный механизм, который обеспечивает такую надежность, это самовоспроизведение: на клеточном уровне — выживание отдельного организма и на уровне организмов — выживание вида. Самовоспроизведение в широком смысле связано с процессами самоорганизации, роста, самовосстановления.

Целью Джона фон Неймана было понять и описать на логическом уровне фундаментальные принципы и алгоритмы переработки информации, включенные в процессы самовоспроизведения, другими словами, выделить из природного процесса самовоспроизведения его логическую форму.

В качестве математической конструкции для изучения самовоспроизведения Джон фон Нейман принял клеточный автомат (КА) [1], предложенный ему польским математиком Станиславом Уламом — коллегой фон Неймана по Манхэттенскому проекту, который изучал рост кристаллов в решеточных моделях. Считалось, что эта конструкция, кроме того что удобна для строгого математического представления процессов самовоспроизведения,

была удобной и для практической реализации. К сожалению, интерес к приложению самовоспроизведения в электронике не реализовался из-за неготовности технологии, и исследования, начатые фон Нейманом, ограничивались чистой теорией. Как математическая конструкция КА позволяет изучать механизмы самовоспроизведения в упрощенных средах, с тем чтобы затем использовать этот процесс в реальных системах — электронных или, в общем смысле, в вычислительных.

Самовоспроизводящаяся клеточная модель фон Неймана, как на трех китах, стоит на трех компонентах:

1. Лента памяти — одномерная строка, содержащая описание машины.
2. Конструктор, способный читать ленту памяти.
3. Конструирующая рука, управляемая конструктором и используемая для построения структуры, описанной на ленте памяти.

С точки зрения биологии ленту памяти можно связать с геномом. Интересно заметить, что за несколько лет до открытия Уотсоном и Криком структуры ДНК в виде двойной спирали [2, 3] фон Нейман сформулировал целесообразность существования одномерного описания (генома) для самовоспроизводящейся структуры, которое подается на входную ленту и затем порождает эту структуру в клеточно-автоматном пространстве. Кроме того, фон Нейман сформулировал принцип двойственного использования информации, которая подается на входную ленту, т. е. генома: информация должна служить программой для построения материнской структуры (трансляция генома) и должна быть скопирована в материнскую структуру (транскрипция генома), для того чтобы далее могли быть порождены дочерние структуры.

В течение больше чем 50 лет с тех пор, как появилась пионерская работа фон Неймана по самовоспроизводящимся автоматам [1], исследования на платформе клеточного автомата шли по самым разным направлениям. К теме самовоспроизведения исследования вернулись с появлением петли Лангтона [4, 5], который предложил простой КА, способный только к самовоспроизведению, в отличие от автомата фон Неймана, который является универсальным конструктором, способным произвести любую конструкцию, описанную на ленте памяти. Автомат Лангтона — это прямоугольная петля в двумерном клеточно-автоматном пространстве; петля создана на основе периодического излучателя, который является фрагментом клеточного автомата Кодда [6], в свою очередь полученного путем упрощения автомата фон Неймана. Внутри материнской петли Лангтона циркулирует самоописание (геном) петли в виде последовательности состояний автомата. Одновременно с построением дочерней петли геном переписывается в нее, и эта петля затем порождает свою дочку.

Петля Лангтона дала основной толчок исследованиям самовоспроизведения в более абстрактных терминах, поместив таким образом эти исследования в область, известную как „Искусственная жизнь“. В этом контексте сам процесс самовоспроизведения становится объектом изучения.

Клеточный автомат Лангтона использовался в качестве модели при проверке гипотез, относящихся к возникновению биологической жизни [7, 8]. Петля наделялась способностью взаимодействовать с внешним наблюдателем [9]. Делались попытки создавать на основе петли „полезный репликатор“ [10, 11], т. е. клеточную структуру, которая вместе с построением копий выполняет некоторую вычислительную программу.

Системы фон Неймана и Лангтона представляют собою главные ориентиры в изучении самовоспроизведения в вычислительных структурах. Другие подходы относятся,

прямо или косвенно, к этим двум системам. Один из таких подходов изложен в работах [12, 13, 14]. В них строится самовоспроизводящаяся петля нового типа (авторы называют ее искусственной биологической клеткой), которая, становясь компонентой искусственного мультিকлеточного биологического организма, может обеспечить ему имитацию свойств живых организмов — рост, самовоспроизведение, самовосстановление [15, 16, 17]. Искусственная биологическая клетка строится из генома, приходящего на входную ленту. Результатом построения является модель, в которой записан фенотип в виде совокупности фиксированных данных и генотип в виде совокупности мобильных данных. Фенотип может участвовать в выполнении задания, предложенного искусственному биологическому организму, генотип способен порождать дочерние клетки. Такой подход удобен для аппаратной реализации самовоспроизведения в программируемом логическом устройстве или FPGA (Field Programmable Gate Array) [18, 19].

Искусственная биологическая клетка сохранила некоторые черты петли Лангтона. Так в клетке динамически хранится информация. Такое хранение удобно в КА из-за локальности правил. Также сохраняется концепция конструирующей руки в традиции фон Неймана. Сохранены элементы оболочки, используемой Лангтоном. При этом, в отличие от петли Лангтона, новая петля не умирает, когда она реплицирована, это нужно для выполнения предложенных искусственному биологическому организму функций после того, как он построен.

В [20, 21] представлены клеточно-автоматные модели искусственных биологических клеток — „звезда“ и „еж“. При их построении использовалась идея алгоритма Тома Тамба [14, 15] (Tom Thumb — Мальчик-с-пальчик из сказки Шарля Перро). Фиксированные данные, захваченные клеткой, направляют дальнейшее построение клетки и напоминают гальку, оставленную Томом Тамбом для запоминания своего пути в той сказочной истории, эта аналогия дает алгоритму его имя.

Модели искусственных биологических клеток „звезда“ и „еж“ построены на основе Алгоритма параллельных подстановок (АПП) — системы моделирования пространственных мелкозернистых параллельных алгоритмов и архитектур — [22, 23]. Алгоритм параллельных подстановок, являясь расширенной парадигмой классического клеточного автомата (в АПП подстановка соответствует правилу перехода в классическом КА), имеет по сравнению с КА новые свойства, усиливающие его функциональные и выразительные возможности. Допускается произвольный шаблон подстановки. В каждом такте одна подстановка может изменять состояния сразу нескольких клеток. Введен новый тип подстановки — функциональная подстановка, в ней новые состояния клеток являются функциями от состояний клеток, входящих в шаблон. Эти свойства АПП дают возможность строить лаконичное, легко обозримое и структурированное описание процесса построения мелкозернистых моделей искусственных биологических клеток. Опыт построения на основе АПП клеточно-автоматных моделей самовоспроизводящихся структур представлен в [20, 21, 24, 25].

В статье описывается самовоспроизводящаяся клеточно-автоматная структура в виде матрицы из искусственных биологических клеток „звезда“. Можно назвать такую матрицу многоклеточным искусственным организмом. Простая программа построения этой структуры базируется на АПП.

1. Алгоритм параллельных подстановок. В данной работе АПП функционирует в двумерном пространстве, разделенном на клетки (в смысле клеточно-автоматного пространства), и в дискретном времени. Каждая клетка может находиться в одном со-

стоянии из набора возможных и изменять свое текущее состояние согласно локальному правилу или подстановке, в которой новое состояние клетки определяется ее текущим состоянием и состояниями клеток, входящих в шаблон подстановки. Подстановки могут иметь произвольный шаблон — геометрический образ в дискретном пространстве. Левая часть подстановки определяет условие ее применимости и состоит из двух частей — базы и контекста. Правая часть подстановки задает новые состояния клеткам базы. Состояния клеток своего контекста подстановка не изменяет. Новые состояния базовых клеток могут быть либо просто состояниями из множества возможных (тогда подстановка называется *символьной*), либо функциями от состояний клеток левой части подстановки (в этом случае подстановка называется *функциональной*). Все применимые в некотором такте дискретного времени подстановки выполняются одновременно. Поскольку в АПП допускается произвольный шаблон подстановки, то возможна ситуация, в которой одна и та же клетка оказывается в зоне применимости двух подстановок. Если эта клетка в обеих подстановках является контекстной, или в одной — контекстной, а в другой — базовой, то не возникает проблемы с изменением ее состояния. Не возникает проблемы и в том случае, когда клетка является базовой в обеих подстановках и ее новое состояние является одним и тем же в этих подстановках. Противоречие в применимости подстановок возникает, если состояние общей клетки изменяется двумя подстановками по-разному. Алгоритм параллельных подстановок должен содержать непротиворечивое множество подстановок. В [22, 23] сформулированы критерии непротиворечивости и даны способы проверки множества параллельных подстановок на непротиворечивость.

2. Искусственная биологическая клетка „звезда“. К сожалению, возникает терминологическая коллизия: один и тот же термин „клетка“ применяется к биологической единице и к математической единице как элементу клеточно-автоматного пространства. Предлагается эту коллизию преодолеть следующим образом. Элемент клеточно-автоматного пространства или мелкозернистой структуры будем называть, как и принято, клеткой, и прилагательное „клеточный“ относить только к математической клетке. При упоминании искусственной биологической клетки будем использовать либо полное ее название „искусственная биологическая клетка“, либо немного усеченное — „искусственная клетка“, либо просто „звезда“. Итак, в этом разделе будет представлен алгоритм параллельных подстановок STAR, с помощью которого строится искусственная биологическая клетка „звезда“.

„Звезда“ строится из четырех полей, каждое поле представляет собою прямоугольник, составленный из четырех клеток, два соседних поля перпендикулярны друг другу (рис. 1). Искусственный геном для звезды состоит из восьми символов — [W1 N 2 E 3 S 4]. Буквы символизируют собою управляющие флаги, которые необходимы для построения скелета искусственной клетки, для установления соединения между ее полями на запад, север, восток и юг. Цифры — функциональные коды искусственной биологической клетки. К звезде подается два экземпляра генома с тем, чтобы построить фенотип в виде множества фиксированных символов и генотип в виде множества мобильных символов.

На рис. 1 показана „звезда“ в нулевом такте ($t = 0$), где клетки полей „звезды“ пронумерованы, а также „звезда“ в виде условного образа в финальном такте ($t = 16$), когда построение ее завершено. В третьих и четвертых клетках четырех полей „звезды“ при $t = 16$ (клетки с крестами внутри) записан фенотип, в первых и вторых клетках полей циркулирует генотип.

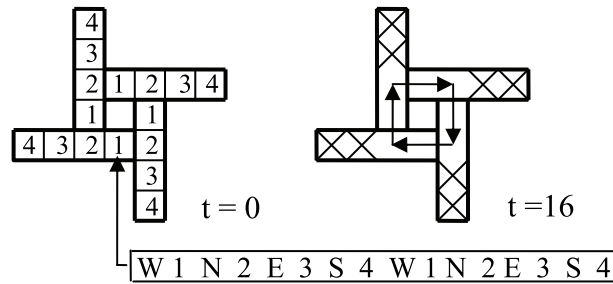


Рис. 1. Скелет искусственной биологической клетки „звезда“

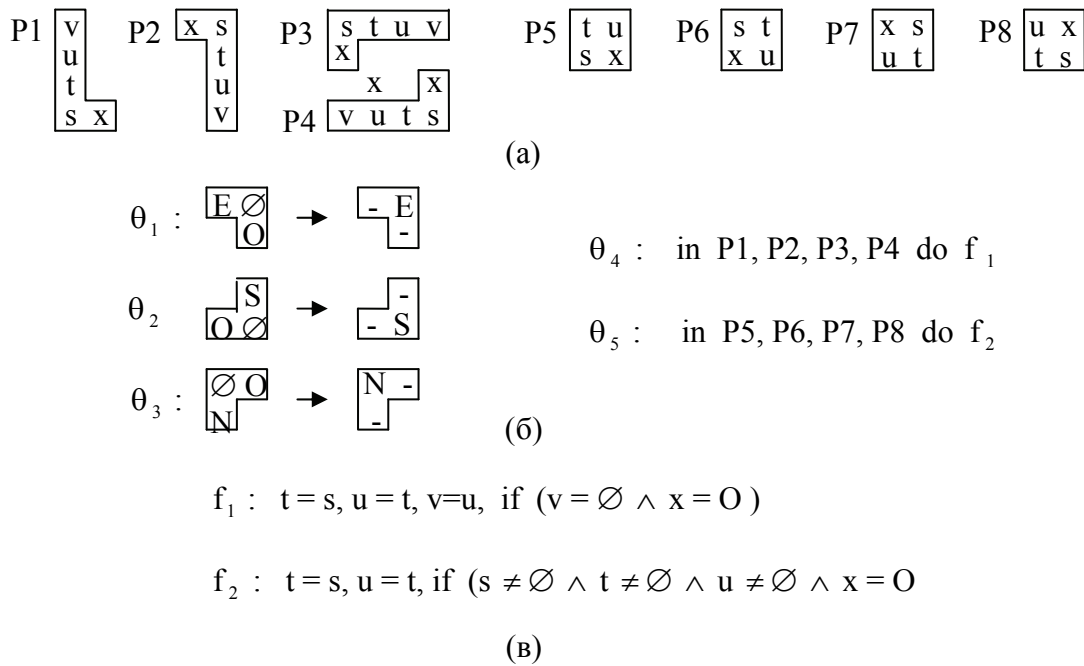


Рис. 2. Алгоритм параллельных подстановок STAR

Клетки мелкозернистой структуры, в которой строится „звезда“, могут находиться в одном из десяти состояний $\{W, 1, N, 2, E, 3, S, 4, \emptyset, O\}$. Восемь состояний — элементы генома, \emptyset — состояние покоя, в нем клетки находятся изначально (на рисунках клетки в состоянии \emptyset остаются пустыми), O — дополнительный управляющий флаг. Он образует внутреннюю оболочку „звезды“, состоящую из одного элемента. Это вырожденная внутренняя оболочка петли Лангтона, которая служит направляющей при построении искусственной биологической клетки.

Алгоритм параллельных подстановок STAR состоит из трех символьных подстановок и двух функциональных. На рис. 2, а, показаны шаблоны для функциональных подстановок. На рис. 2, б, показаны подстановки: в левой колонке символьные, в правой — функциональные. На рис. 2, в, даны функции, используемые в функциональных подстановках.

В правых частях символьных подстановок черточки соответствуют клеткам контекста. Ради лаконичности мы посчитали целесообразным объединить в одну подстановку разные шаблоны, которые работают с одной и той же функцией, тем более что эти шаблоны различаются только ориентацией в пространстве. Символьные подстановки $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ и

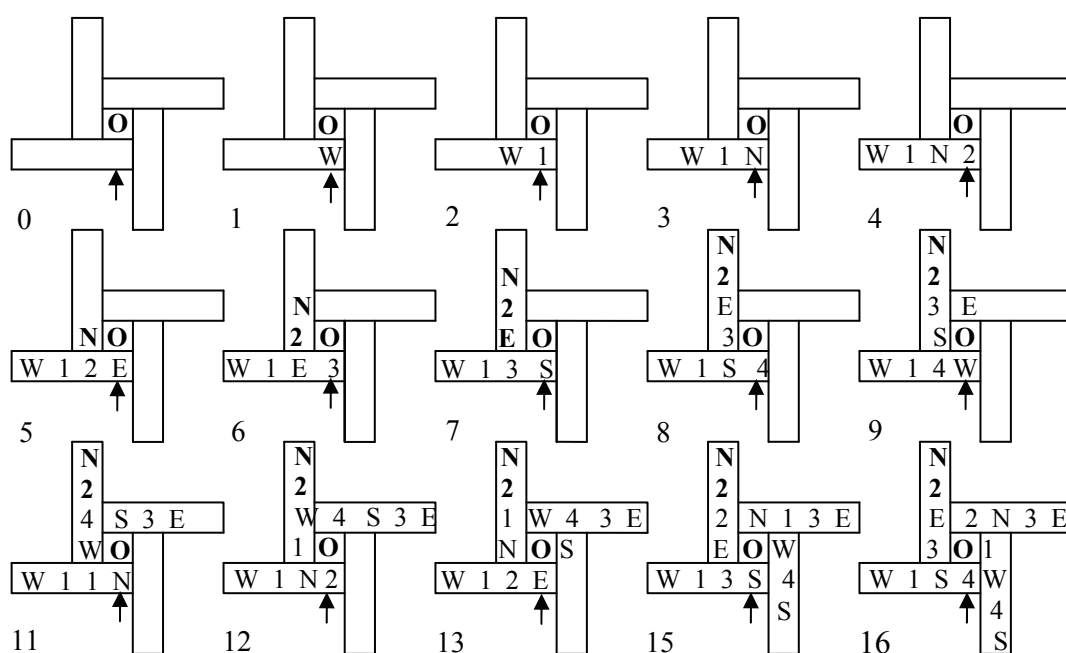


Рис. 3. Работа алгоритма STAR — построение искусственной биологической клетки „звезда“

функциональная подстановка θ_4 строят „звезду“, функциональная подстановка θ_5 обеспечивает движение генома в „звезде“. Подстановка θ_4 отвечает за построение полей „звезды“ и за формирование фенотипа. Сначала строится западное поле (смотрящее на запад), в первую клетку которого поступает шаг за шагом геном, затем — северное, восточное и южное поля. Подстановки θ_1 , θ_2 , θ_3 обеспечивают переход информации от одного поля „звезды“ (после того как это поле построено) к другому, от западного к северному, от северного к восточному, от восточного к южному. Поле считается построенным, когда в его третьей и четвертой клетках зафиксированы элементы фенотипа, а в первой и второй клетках продолжается движение. От второй клетки западного поля происходит соединение на север и построение северного поля, от второй клетки северного поля — соединение на восток и построение восточного поля, от второй клетки восточного поля — соединение на юг и построение южного поля. Подстановка θ_5 организует циркуляцию генома в первых и вторых клетках полей „звезды“ по часовой стрелке.

На рис. 3 представлена работа алгоритма STAR. На каждом такте к первой клетке западного поля поступает очередной символ генома. „Звезда“ полностью строится за 16 тактов. На рис. 3 два такта пропущены (восстановить их по логике построения нетрудно) ради гармоничности вида рисунка.

3. Программа MATRIX-C построения столбца искусственных биологических клеток „звезда“. Основой для программы MATRIX-C (Column) является программа STAR. Множество состояний дополняется еще одним управляющим флагом Y, который используется для построения вертикального мостика к месту, где родится дочерняя искусственная клетка „звезда“. Заметим, что мостик может восприниматься с одной стороны как элемент внешней оболочки, аналогичной оболочке петли Лангтона, с другой стороны как конструирующая рука.

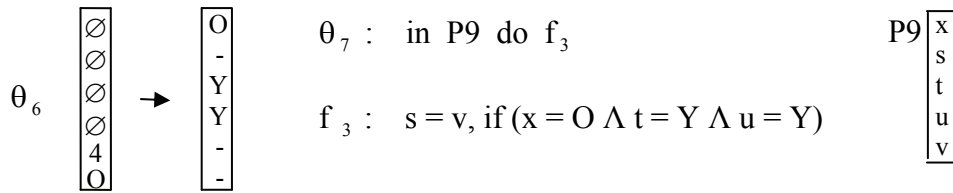


Рис. 4. Подстановки, дополняющие программу STAR до программы MATRIX-C

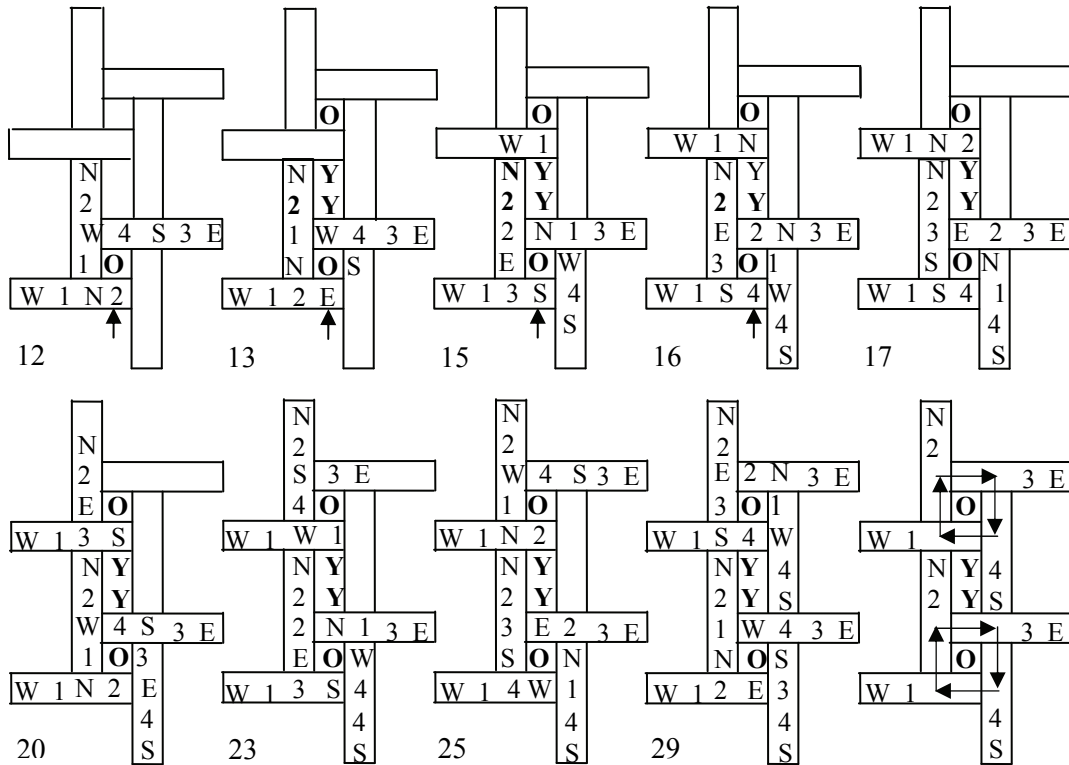


Рис. 5. Работа алгоритма MATRIX-C — построение столбца искусственных биологических клеток „звезда“

Программа STAR дополняется двумя подстановками — символьной θ_6 и функциональной θ_7 . Подстановка θ_6 строит вертикальный мостик. Подстановка θ_7 по этому мостику осуществляет доставку генома к новой „звезде“, того генома, который в виде мобильных данных циркулирует в материнской искусственной клетке. Подстановки, дополняющие STAR до MATRIX-C, даны на рис. 4.

На 12-м такте рождения „звезды“ (она еще полностью не родилась на этом такте (рис. 3), но уже может служить материнской структурой) может начаться построение дочерней искусственной клетки в вертикальном направлении. На рис. 5 построение столбца из искусственных биологических клеток „звезда“ начинается сразу с 12-го такта, 29-й такт является завершающим при построении столбца из двух „звезд“.

4. Программа MATRIX-R построения строки искусственных биологических клеток „звезда“. Основой для программы MATRIX-R (Row), как и для MATRIX-C (Column), является программа STAR. Для MATRIX-R используется тот же управляющий флаг Y, что и для MATRIX-C, только в MATRIX-R он используется для построения

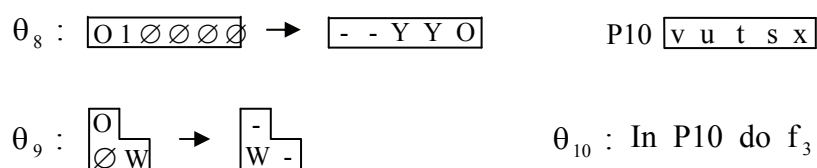


Рис. 6. Подстановки, дополняющие программу STAR до программы MATRIX-R

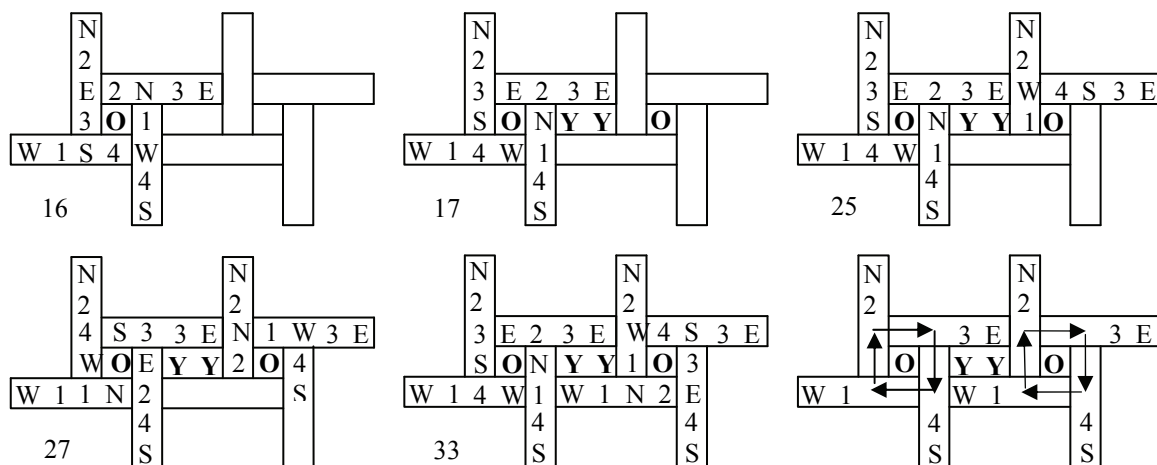


Рис. 7. Работа алгоритма MATRIX-R — построение строки искусственных биологических клеток „звезда“

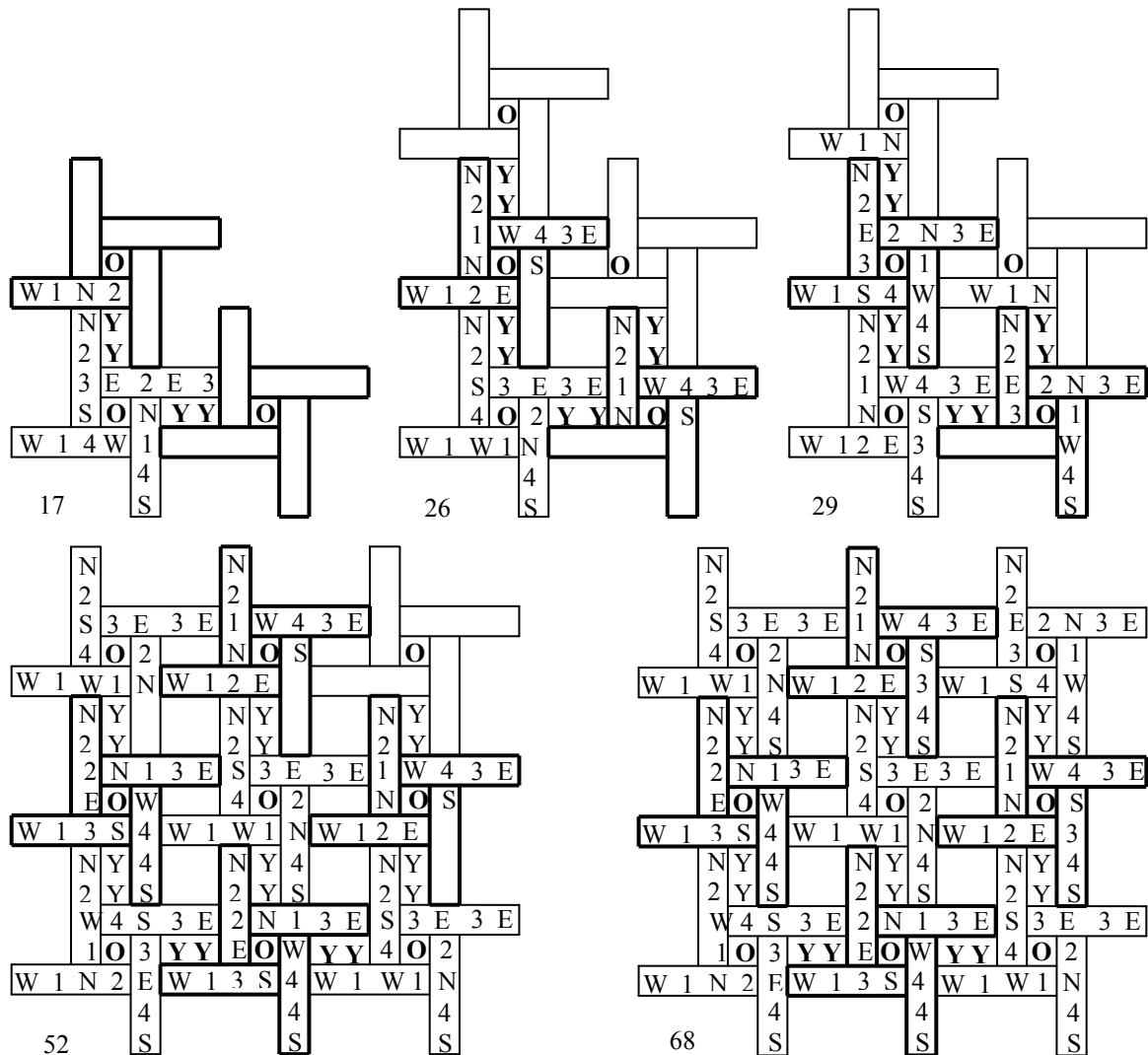
горизонтального мостика для порождения дочерней искусственной клетки справа от материнской.

Программа STAR дополняется тремя новыми подстановками: символьными θ_8 и θ_9 и функциональной θ_{10} . Подстановка θ_8 строит горизонтальный мостик. Подстановка θ_9 обеспечивает переход информации от южного поля „звезды“ к западному. Функциональная подстановка θ_{10} отвечает за доставку к новой „звезде“ по горизонтальному мостику генома из мобильных данных, что циркулируют в материнской искусственной клетке. Подстановки, дополняющие программу STAR до MATRIX-R, даны на рис. 6.

Условие зарождения дочерней „звезды“ в горизонтальном направлении возникает на 16-м такте рождения материнской „звезды“ (рис. 3). Геном от материнской „звезды“ приходит на северное поле дочерней структуры, расположенной справа от материнской „звезды“. На 33-м такте завершается построение строки из двух „звезд“. На рис. 7 схематически дается порядок построения строки из двух „звезд“ по программе MATRIX-R.

5. Программа MATRIX построения матрицы искусственных биологических клеток „звезда“. Объединение программы построения одиночной „звезды“ STAR с подстановками θ_6 , θ_7 и θ_8 , θ_9 , θ_{10} , дополняющими STAR до программ MATRIX-C и MATRIX-R соответственно, дает программу MATRIX построения в клеточно-автоматном пространстве матрицы из искусственных биологических клеток „звезда“. Заметим, что программа очень проста, она состоит всего из 9 подстановок, поскольку подстановки θ_7 и θ_{10} можно объединить в одну — **In P9, P10 do f_3** .

На рис. 8 показано очень крупными мазками построение матрицы 3×3 из клеток „звезда“. Такая матрица строится за 68 тактов. Для того чтобы „звезды“ не терялись в мно-

Рис. 8. Построение матрицы 3×3 из клеток „звезда“ по программе MATRIX

жестве линий, и глаз мог выделить любую из них, их контуры выделены линиями разной толщины.

Целью построения матрицы из искусственных биологических клеток или искусственного многоклеточного организма является надделение такой структуры способностью выполнять определенные функции. „Звезда“ может показаться слишком простым элементом для построения функциональной структуры, однако все начинается с малого. На „звезде“ показаны принципы и простая технология построения искусственной биологической клетки на основе АПП, которые применимы в более сложных конструкциях. Кстати, для более сложных конструкций может использоваться искусственная биологическая клетка „еж“ [20, 21], в отличие от „звезды“, „еж“ может адаптироваться к геному любой длины.

Заключение. Описывается самовоспроизводящаяся клеточно-автоматная структура в форме матрицы из искусственных биологических клеток „звезда“. Простая программа построения этой структуры базируется на Алгоритме параллельных подстановок — пространственной модели мелкозернистых параллельных алгоритмов и архитектур.

Искусственная биологическая клетка строится из генома, который подается на входную ленту. Структуры из искусственных биологических клеток могут быть компонентами вычислительных устройств, имитирующими свойства живых организмов — рост, самовоспроизведение, самовосстановление. Устройства, наделенные такими свойствами, могут быть полезны в исследовании космического пространства, в радиоактивных средах, авионике и т. п. Кроме того, самовоспроизведение может стать полезным инструментом при построении схем большой плотности, когда обычные методы проектирования становятся громоздкими. И тогда целесообразно разработать единый обрабатывающий элемент как часть чрезвычайно большого массива, который будет строить себя за счет дублирования исходной структуры.

Список литературы

1. Von Neumann J. Theory of self-replication automata / Burks A.W. (ed.) University of Illinois Press, 1966. Русский перевод: Фон Нейман Дж. Теория самовоспроизводящихся автоматов. М.: Мир, 1971.
2. Watson J., Crick F. A structure for deoxyribose nucleic acid // Nature. 1953. V. 171. P. 737–738.
3. Watson J. D. The Double Helix. StateplaceNew York: Atheneum, 1968. Русский перевод: Уотсон Дж. Д. Двойная спираль. М.: Мир, 1969.
4. Langton C. G. Self-replication in cellular automata // Physica D. 1984. V. 10. P. 135–144.
5. Langton C. G. Studying artificial life with cellular automata // Physica D. 1986. V. 22. P. 120–149.
6. Codd E. F. Cellular automata. New York: Academic Press, 1968.
7. Chou H.-H., Reggia J. A. Emergence of self-reproducing structures in a cellular automata space // Physica D. 1997. V. 110. P. 252–276.
8. Azpeitia SnI., Ibanez J. Spontaneous emergence of robust cellular replicators // Lect. Notes in Comput. Sci. 2002. V. 2493. P. 132–143.
9. Stauffer A., Sipper M. Externally controllable and destructible self-replicating loops // Lect. Notes in Artificial Intelligence. 2001. V. 2159. P. 282–291.
10. Chou H.-H., Reggia J. A. Problem solving during artificial selection of self-replicating loops // Physica D. 1998. V. 115. P. 293–312.
11. Petraglio E., Henry J.-M., Tempesti G. Arithmetic operations on self-replicating cellular automata // Lect. Notes in Artificial Intelligence. 1999. V. 1674. P. 447–456.
12. Mange D., Stauffer A., Petraglio E., and Tempesti G. Embryonic machines that divide and differentiate // Lect. Notes in Comput. Sci. 2004. V. 3141. P. 201–216.
13. Mange D., Stauffer A., Petraglio E., Tempesti G. Self-replicating loop with universal construction // Physica D. 2004. V. 191. P. 178–192.
14. Mange D., Stauffer A., Peparolo L., Tempesti G. A macroscopic view of self-replication // Proc. IEEE. 2004. V. 92, Iss. 12. P. 1929–1945.
15. Stauffer A., Mange D., and Tempesti G. Bio-inspired computing machines with self-repair mechanisms // Lect. Notes in Comput. Sci. 2006. V. 3853. P. 128–140.
16. Stauffer A., Mange D., Rossier J. Self-organizing systems based on bio-inspired properties // Lect. Notes in Artificial Intelligence. 2007. V. 4648. P. 1171–1181.
17. Stauffer A., Mange D., Vannel F. Bio-inspired self-organizing cellular systems // Biosystems. 2008. V. 94, Iss. 1–2. P. 164–169.
18. Tempesti G., Mange D., Stauffer A. Self-replicating and cellular automata / In Encyclopedia of Complexity and Systems Science. Springer Science Business Media Stateplace. New York. 2013. P. 8066–8084.

19. Dighe S. G., Kanawate M. T. Field Programmable Gate Array Technique's // International Journal of Computing and Technology. 2015. V. 2, Iss. 12. P. 521–527.
20. Ачасова С. М. Моделирование искусственной биологической клетки в мелкозернистой структуре // Программирование. 2014. № 6. С. 3–11.
21. Ачасова С. М. Самовоспроизводящаяся структура как искусственный многоклеточный организм // Кибернетика и системный анализ. 2014. № 2. С. 175–184.
22. Ачасова С. М., Бандман О. Л. Корректность параллельных вычислительных процессов. Новосибирск: Наука. 1990.
23. Achasova S. M., Bandman O. L., Markova V. P., Piskunov S. V. Parallel substitution algorithm. Theory and application. Singapore: World Scientific. 1994.
24. Ачасова С. М. Простые программы самовоспроизведения в клеточном пространстве на основе алгоритма параллельных подстановок // Программирование. 2004. № 4. С. 3–11.
25. Ачасова С. М. Программа-конструктор клеточных самовоспроизводящихся структур // Программирование. 2009. № 4. С. 3–10.



В 1959 году С. М. Ачасова поступила на физический факультет Новосибирского государственного университета и окончила его в 1964 году. В 1980 году С. М. Ачасова получила степень кандидата технических наук в Институте математики Сибирского отделения Российской академии наук. В 1964–1980 гг. она работала в Институте математики. С 1980 года и по настоящее время С. М. Ачасова — старший научный сотрудник лаборатории синтеза параллельных программ в Институте вычислительной математики и математической геофизики СО РАН. Ею опубликовано около 70 работ в областях параллельных вычислительных технологий, корректности параллельных вычислительных процессов в мелкозернистых структурах и моделировании искусственных биологических клеток в виде самовоспроизводящихся структур. Текущие научные интересы С. М. Ачасовой включают моделирование искусственных биологических клеток и искусственных биологических ор-

ганизмов, которые могут имитировать свойства живых организмов — рост, самовоспроизведение, самовосстановление.

In 1959 Achasova S. M. entered the Faculty of Physics of Novosibirsk State University and finished it in 1964. In 1980 S. M. Achasova received Degree of Candidate of Technical Science from the Institute for Mathematics of the Siberian Branch of Russian Academy of Sciences in Novosibirsk. In 1964–1980 she worked at the Institute for Mathematics. Since 1980 and up to now S. M. Achasova is a Senior Researcher of the Laboratory of parallel program synthesis in the She published over 70 papers in the areas of parallel computing technologies, a validity of parallel computational processes in fine-grain structures and modeling artificial biological cells in the form of self-replicating structures. The current research interests of S. M. Achasova include modeling artificial biological cells and artificial biological organisms that can mimic the properties of living organisms – growth, self-replicating, self-healing.

Дата поступления — 19.07.2016