

САМОВОСПРОИЗВОДЯЩАЯСЯ СТРУКТУРА КАК ИСКУССТВЕННЫЙ МНОГОКЛЕТОЧНЫЙ ОРГАНИЗМ

Аннотация. Две модели искусственной биологической клетки строятся в мелкозернистой структуре в виде самовоспроизводящейся петли. Модели разработаны на основе алгоритма параллельных подстановок — системы моделирования пространственных мелкозернистых параллельных алгоритмов и архитектур. Модель биологической клетки строится из искусственного генома, поданного на входную ленту. Построенная модель содержит фенотип в виде совокупности фиксированных данных и генотип в виде совокупности мобильных данных. Такая клетка может быть элементом искусственного многоклеточного организма, который имитирует свойства живых организмов: рост, самовоспроизведение, самовосстановление.

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

ВВЕДЕНИЕ

Джон фон Нейман использовал понятие клеточного автомата для представления и изучения логических моделей процессов самовоспроизведения [1]. Он ставил цель — выделить из природного процесса самовоспроизведения его логическую форму. Клеточный автомат как математическая основа позволяет изучать механизмы самовоспроизведения в упрощенной среде с тем, чтобы наконец можно было применить процесс самовоспроизведения в реальных вычислительных устройствах.

Интересно заметить, что за несколько лет до открытия Дж. Уотсоном и Ф. Криком структуры ДНК в виде двойной спирали [2, 3] фон Нейман сформулировал необходимость существования одномерного описания (генома) для самовоспроизводящейся структуры, которое подается на входную ленту и затем порождает эту структуру в клеточно-автоматном пространстве. Подчеркнем, что это демонстрирует свойства клеточного автомата как универсального конструктора. 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 быть скопирована в материнскую структуру (транскрипция генома) для того, чтобы далее могли быть порождены дочерние структуры.

Затем изучение самовоспроизведения было связано с петлей Лангтона [4–6]. Эта структура лишена свойства универсального конструктора и способна воспроизводить только саму себя, это прямоугольная петля, помещенная в двумерное клеточно-автоматное пространство и созданная на основе периодического излучателя, который является фрагментом клеточного автомата Кодда [7], 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 использовалась в качестве модели при проверке гипотез, относящихся к возникновению биологической жизни [8–10]. Петля наделялась способностью взаимодействовать с внешним наблюдателем [11]. Делались попытки создавать на основе петли «полезный репликатор» [12, 13], т.е. клеточную структуру, кото-

рая вместе с построением копий выполняет некоторую вычислительную программу. При успешном развитии такого направления самовоспроизводящуюся структуру можно рассматривать как новую парадигму параллельных мелкозернистых алгоритмов и архитектур.

Тема настоящей статьи навеяна работами [14–16]. В них, а также в [17–19] строится самовоспроизводящаяся петля нового типа (авторы называют ее искусственной биологической клеткой), которая, становясь компонентой искусственного многоклеточного организма, обеспечивает ему имитацию свойств живых организмов: рост, самовоспроизведение, самовосстановление.

В статье представлены две модели искусственной биологической клетки: еж-1 и еж-2, и на их основе — искусственный многоклеточный организм в виде самовоспроизводящейся структуры, который может быть моделью вычислительных устройств, имитирующих свойства живых организмов: рост, самовоспроизведение, самовосстановление. Искусственная биологическая клетка строится из генома, поданного на входную ленту. Результатом построения является модель искусственной клетки, в которой записан фенотип в виде совокупности фиксированных данных и генотип в виде совокупности мобильных данных. Фенотип может участвовать в выполнении задания, предложенного искусственному многоклеточному организму, генотип способен порождать дочерние клетки.

Модели построены на основе схемы «Алгоритма параллельных подстановок» (АПП) — универсальной системы моделирования пространственных мелкозернистых параллельных алгоритмов и архитектур [20, 21]. Опыт построения на основе АПП петли Лангтона представлен в [22, 23].

АЛГОРИТМ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ПОДСТАНОВОК

АПП, являясь расширенной парадигмой классического клеточного автомата (КА), имеет по сравнению с КА новые свойства, усиливающие его функциональные и выразительные возможности. Эти свойства состоят в следующем. Допускается произвольный шаблон подстановки. В каждом такте одна подстановка может изменять состояния одновременно нескольких клеток. Введен новый тип подстановки — функциональная подстановка, в ней новые состояния клеток являются функциями от состояний соседних клеток. Эти свойства АПП дают возможность создавать лаконичное, легко обозримое и структурированное описание процесса построения мелкозернистых моделей.

В данной работе АПП функционирует в двумерном клеточно-автоматном пространстве и в дискретном времени. Каждая клетка может находиться в одном состоянии 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 — геометрический образ в дискретном пространстве. Подстановки могут иметь произвольный шаблон. Левая часть подстановки определяет условие применимости ее 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 символической), 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 подстано-

вок. 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 одно и то 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 [20, 21] сформулированы критерии непротиворечивости и даны способы проверки множества параллельных подстановок на непротиворечивость. Для имитационного моделирования алгоритмов параллельных подстановок создана система моделирования мелкозернистых алгоритмов и структур WinALT [24] (сайт системы WinALT. — <http://winalt.sccc.ru/>).

ИСКУССТВЕННАЯ БИОЛОГИЧЕСКАЯ КЛЕТКА ЕЖ-1

К сожалению, возникает терминологическая коллизия: один и тот же термин — «клетка» — применяется к биологической 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 пользоваться названием, данным здесь модели искусственной биологической клетки, — еж, или употреблять полное выражение — искусственная биологическая клетка, или немного усеченное — искусственная клетка. Итак, в этом разделе представлен алгоритм параллельных подстановок YOZH-1, по которому из четырех полей строится искусственная биологическая клетка еж-1. Каждое поле имеет вид уголка и включает в себя четыре клетки (рис. 1). Искусственный геном состоит из восьми символов [N 1 E 2 S 3 W 4]. Буквы представляют собой управляющие флаги (North, East, South, West), которые необходимы при построении скелета искусственной клетки для установления соединения между ее полями на север, восток, юг и запад, а цифры — функциональные коды искусственной биологической клетки.

К ежу-1 подается два экземпляра генома с тем, чтобы построить фенотип в виде множества фиксированных символов и генотип в виде множества мобильных символов. На рис. 1 показан еж-1 в нулевом такте (клетки полей пронумерованы) и в виде условного образа в финальном такте. В третьих и четвертых клетках полей записан фенотип (клетки с крестами внутри), в первых и вторых клетках полей циркулирует генотип.

Клетки мелкозернистой структуры, в которой строится еж-1, могут находиться в одном из 11 состояний {N, 1, E, 2, S, 3, W, 4, ∅, O, I}. Восемь состояний — элементы генома, ∅ — состояние покоя, O и I — состояния, являющиеся дополнительными управляющими флагами.

Алгоритм параллельных подстановок YOZH-1 состоит из трех функциональных подстановок: $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ и шести символьных: $\theta_4, \dots, \theta_9$. На рис. 2, а показаны шаблоны для функциональных подстановок. Ради лаконичности мы объединили в одну подстановку разные шаблоны, которые работают с одной и той же функцией.

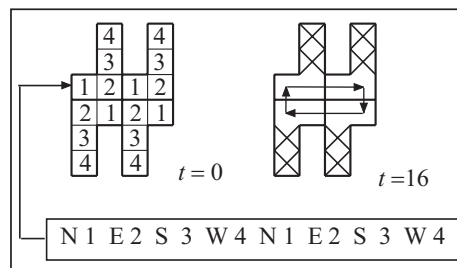


Рис. 1

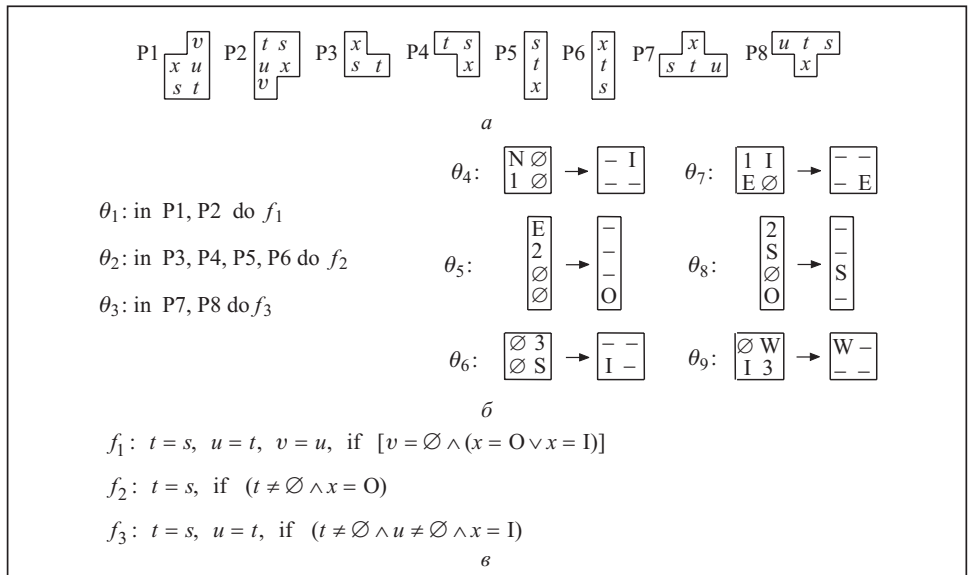


Рис. 2

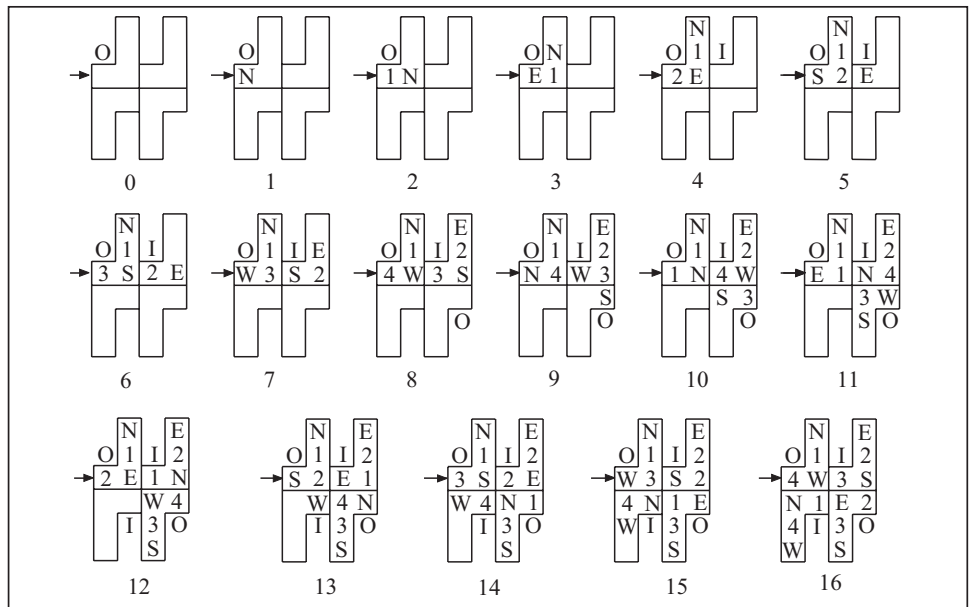


Рис. 3

На рис. 2, б показаны подстановки: в левой колонке — функциональные, в центральной и правой колонках — символьные. На рис. 2, в даны функции, используемые в функциональных подстановках. Все множество подстановок в соответствии с функциями, выполняемыми ими, можно разделить на три группы. Одну группу назовем группой флагов, ее составляют подстановки $\theta_4, \theta_5, \theta_6$, которые вводят управляющие флаги O и I. Подмножество подстановок $\theta_1, \theta_7, \theta_8, \theta_9$ образует группу собственно построения ежа-1. Подстановки θ_2, θ_3 составляют группу движения.

Флаг O слева от третьей клетки левого верхнего поля ставится в нулевом такте, затем в такте 4 вместе с завершением формирования левого верхнего поля

флаг I ставится слева от третьей клетки правого верхнего поля. И далее O появляется в такте 8 справа от третьей клетки правого нижнего поля, I — в такте 12 справа от третьей клетки левого нижнего поля. Подстановка θ_1 отвечает за построение полей ежа-1 и за формирование фенотипа. Подстановки $\theta_7, \theta_8, \theta_9$ обеспечивают переход информации от одного поля ежа-1 (после того, как это поле построено) к другому. От второй клетки левого верхнего поля происходит соединение на восток к правому верхнему полю и построение его, от второй клетки правого верхнего поля — соединение на юг к правому нижнему полю и построение его и далее — на запад от второй клетки правого нижнего поля к левому верхнему полю и построение его. Подстановки θ_2, θ_3 организуют циркуляцию генома в еж-1. На рис. 3 представлен алгоритм параллельных подстановок YOZH-1.

ИСКУССТВЕННАЯ БИОЛОГИЧЕСКАЯ КЛЕТКА ЕЖ-2

Искусственная клетка еж-2 порождается геномом из 16-ти элементов [N 1 E 2 E 3 E 4 S 5 W 6 W 7 W 8]. К ежу-2 так же, как и к ежу-1, подается два экземпляра генома. Еж-2 состоит из восьми полей того же вида, что и еж-1: четыре поля сверху и четыре снизу. В третьих и четвертых клетках полей формируется фенотип, в первых и вторых клетках полей циркулирует генотип. Опишем алгоритм параллельных подстановок YOZH-2, по которому строится искусственная биологическая клетка еж-2. Клетки мелкозернистой структуры, в которой строится еж-2, могут находиться в одном из 15-ти состояний $\{N, 1, E, 2, 3, 4, S, 5, W, 6, 7, 8, \emptyset, O, I\}$. Алгоритм параллельных подстановок YOZH-2 состоит из восьми функциональных подстановок: $\theta_1, \dots, \theta_8$ и двух символьных: θ_9, θ_{10} . На рис. 4, а показаны шаблоны для функциональных подстановок, на рис. 4, б — подстановки, на рис. 4, в даны функции, используемые в функциональных подстановках.

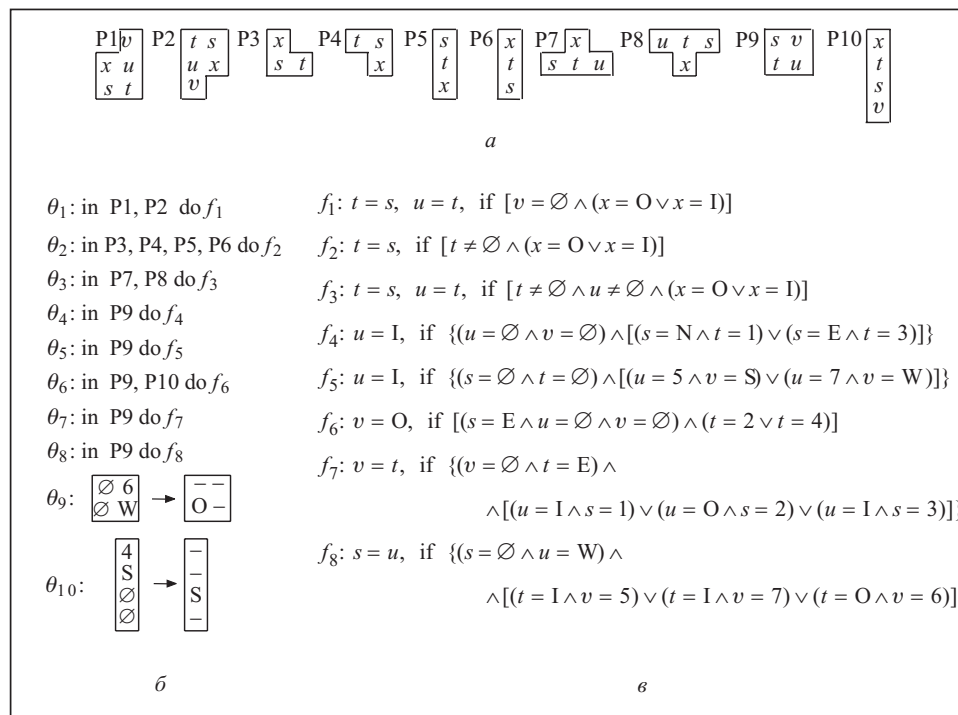


Рис. 4

В программе YOZH-2 группу флагов составляют подстановки $\theta_4, \theta_5, \theta_6, \theta_9$. Подмножество подстановок $\theta_1, \theta_7, \theta_8, \theta_{10}$ образует группу построения ежа-2. Подстановки θ_2, θ_3 составляют группу движения. Флаг О слева от третьей клетки первого верхнего поля ставится в нулевом такте, затем в такте 4 вместе с завершением формирования первого верхнего поля флаг I ставится слева от второго верхнего поля, как при построении ежа-1. И далее, О появляется в такте 8 слева от третьего верхнего поля, I — в такте 12 слева от четвертого верхнего поля, О — в такте 16 справа от нижнего поля крайнего справа, I — в такте 20 справа от следующего нижнего поля и т.д. (рис. 5). Подстановка θ_1 отвечает за построение полей ежа-2 и в том числе за формирование фенотипа. Подстановки θ_7, θ_8 и θ_{10} обеспечивают переход информации от одного поля ежа-2 к другому. От второй клетки крайнего левого верхнего поля происходит соединение на восток (θ_7).

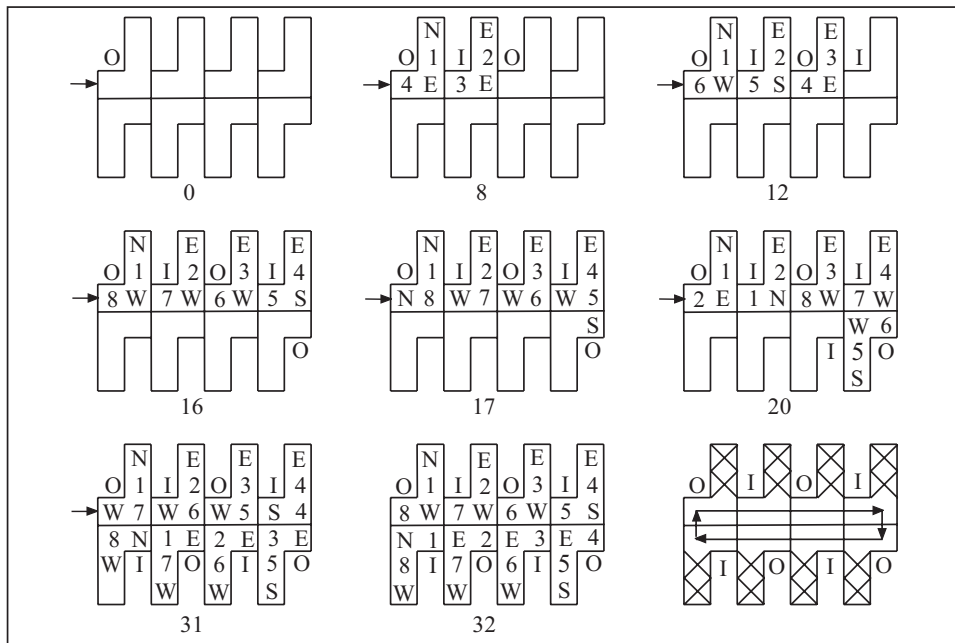


Рис. 5

Далее еще два раза идет соединение на восток (θ_7). От второй клетки крайнего правого верхнего поля осуществляется соединение на юг (θ_{10}). От второй клетки крайнего правого нижнего поля делается соединение на запад (θ_8). Далее еще два раза идет соединение на запад (θ_8). Подстановки θ_2, θ_3 организуют циркуляцию генотипа в первых и вторых клетках восьми полей ежа-2. На рис. 5 представлена работа алгоритма YOZH-2.

ИСКУССТВЕННЫЙ МНОГОКЛЕТОЧНЫЙ ОРГАНИЗМ

Построенная из генома искусственная биологическая клетка способна породить дочек в вертикальном и горизонтальном направлениях, те далее порождают своих дочек и, заполняя таким образом доступное 2D клеточно-автоматное пространство, образуют искусственный многоклеточный организм. На рис. 6 даны подстановки, которые нужно добавить в программы YOZH-1 и YOZH-2, чтобы они стали программами построения многоклеточного организма на основе искусственных клеток еж-1 и еж-2.

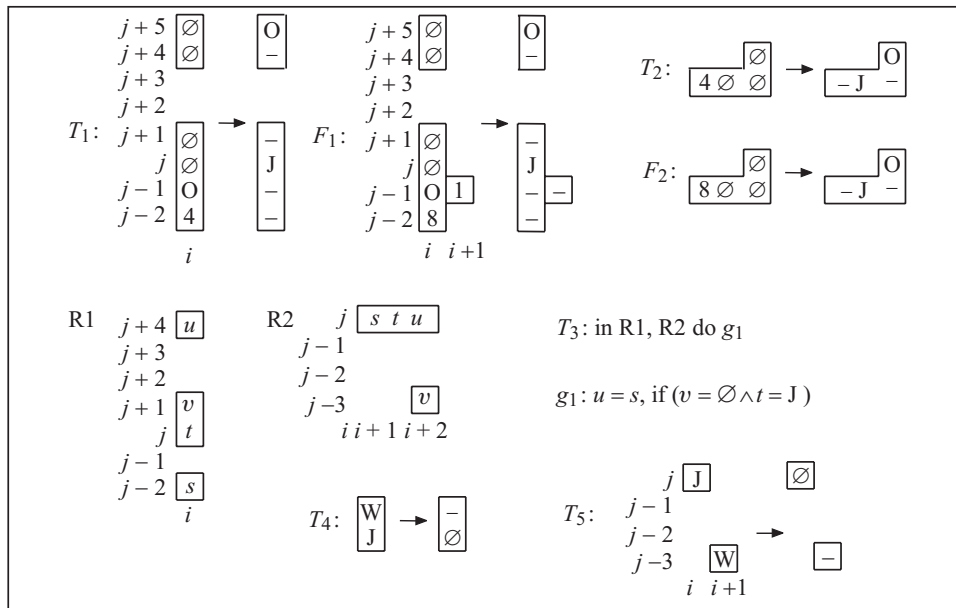


Рис. 6

Геном из материнской клетки должен быть передан в вертикальном и горизонтальном направлениях для построения дочерних клеток. Прежде всего нужно построить мостики для движения генома. Мостики представляют собою флаг J и строятся символьными подстановками: T_1 и T_2 , F_1 и F_2 : T_1 и T_2 строят мостик от ежа-1 по вертикали и горизонтали соответственно, F_1 и F_2 — от ежа-2 также по вертикали и горизонтали. Подстановки T_1 , T_2 и F_1 , F_2 дополняют группы флагов в программах YOZH-1 и YOZH-2. Шаблоны подстановок T_1 и F_1 имеют разрывы, состояния клеток с координатами $(i, j+2)$ и $(i, j+3)$ не учитываются при работе подстановок T_1 и F_1 , т.е. эти клетки не входят ни в базу, ни в контекст подстановок. В шаблоне подстановки F_1 дополнительная контекстная клетка $(i+1, j-1)$ вставлена для того, чтобы не возникла коллизия на 20-м такте построения ежа-2 (см. рис. 5), т.е. не был построен мостик из середины ежа-2, не предусмотренный алгоритмом. Функциональная подстановка: T_3 осуществляет движение генома из материнской клетки в вертикальном и горизонтальном направлениях для построения дочерних клеток. Она действует в шаблонах R_1 (в вертикальном направлении) и R_2 (в горизонтальном направлении), которые имеют разрывы. В группы движения как программы YOZH-1, так и программы YOZH-2 добавляется одна и та же подстановка T_3 , она годна для обеих программ. Также для обеих программ годны подстановки T_4 и T_5 ; T_4 разрушает вертикальный мостик после того, как из материнской клетки в дочернюю поступило два экземпляра генома в вертикальном направлении, T_5 разрушает горизонтальный мостик после того, как из материнской клетки в дочернюю поступило два экземпляра генома в горизонтальном направлении. Эти подстановки составляют еще одну группу в программах YOZH-1 и YOZH-2 — группу разрушения.

После выполнения дополненных новыми подстановками программ YOZH-1 или YOZH-2 оказывается построенным искусственный многоклеточный организм на основе искусственной биологической клетки еж-1 или еж-2 соответственно. На рис. 7 показано несколько шагов построения искусственного организма на основе ежа-1. Условие для построения вертикальной дочерней клетки еж-1 появляется в процессе построения самой материнской клетки еж-1 на 8-м

такте (см. рис. 3). Поэтому иллюстрацию построения многоклеточного организма начинаем с 8-го такта. Далее одновременно продолжается построение материнской клетки и начинается построение дочерней клетки в вертикальном направлении. В 11-м такте построения материнской клетки (см. рис. 3) возникает условие для построения дочерней клетки в горизонтальном направлении. В 9- и 12-м тактах появляются флаги О и J для вертикальной и горизонтальной дочерних клеток. Для построения ежа-1 нужно 16 тактов (см. рис. 3). Построение дочерней клетки по вертикали начинается в 10-м такте и заканчивается в 25-м. В 26-м такте подставка T_4 разрушает вертикальный мостик между материнской и дочерней клетками, т.е. убирает флаг J. Дочерняя клетка по горизонтали начинает строиться в 13-м такте и в 28-м ее построение заканчивается. В 29-м такте подставка T_5 разрушает горизонтальный мостик между материнской и дочерней клетками, т.е. убирает флаг J. Правая верхняя клетка еж-1 начинает строиться в 22-м такте и заканчивается ее построение в 37-м такте. В 20-м такте возникает условие построения этой клетки одновременно по вертикали и горизонтали.

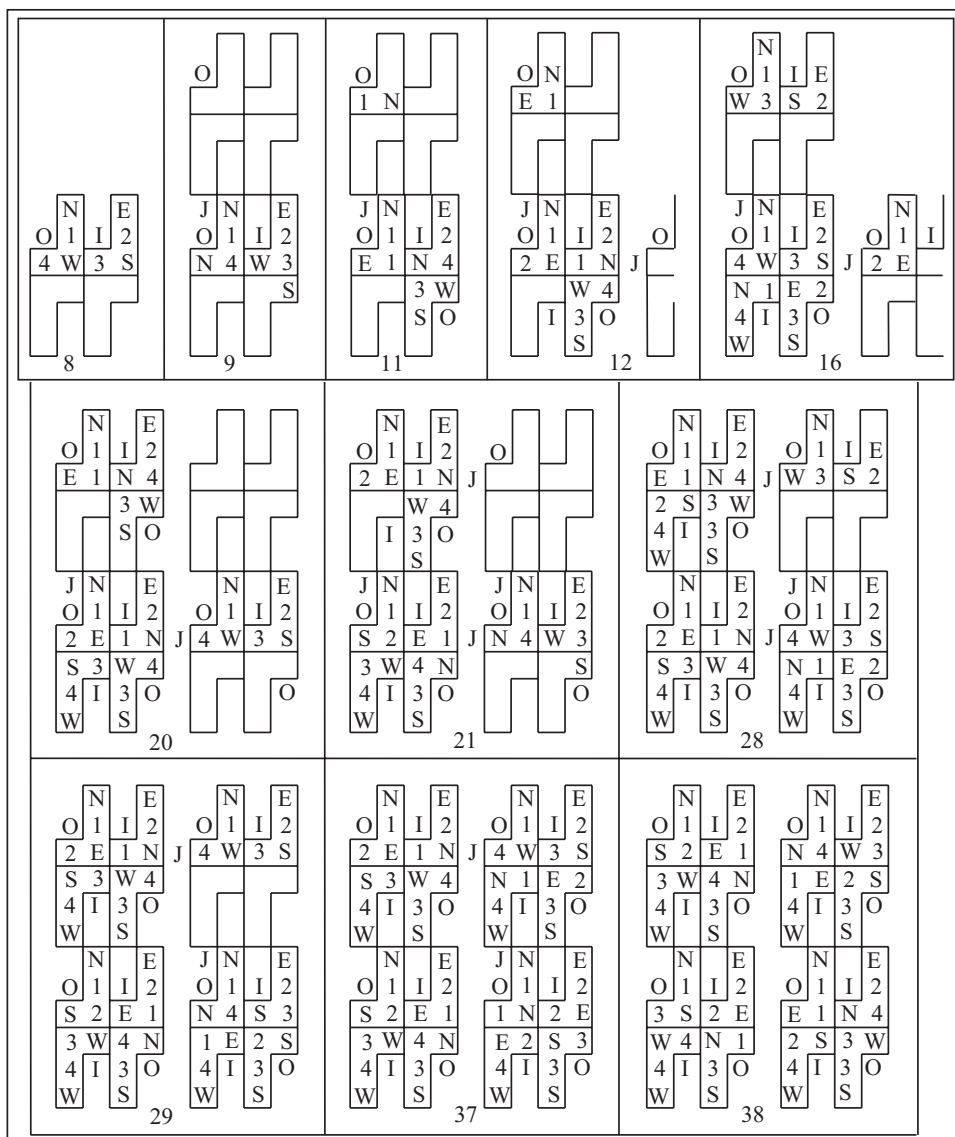


Рис. 7

В 21-м такте подстановки T_1 и T_2 ставят флаг J одновременно по горизонтали от верхнего левого и по вертикали от правого нижнего ежа-1. Геном в строящуюся верхнюю правую клетку поступает одновременно по горизонтали и вертикали. Это избыточно, и можно было бы введением еще одной подстановки устранить избыточность, т.е. позволить поступать геному только по одному направлению. Но это не сделано, поскольку не возникает противоречивой ситуации, которая могла бы возникнуть, если бы в одном и том же такте правого верхнего ежа-1 поступали разные элементы генома.

Итак, построен искусственный многоклеточный организм из четырех ежей-1 (столько поместилось в заданное клеточно-автоматное пространство), в искусственных клетках циркулирует геном. Искусственный организм по программе YOZH-2 строится так же, как по программе YOZH-1, с той лишь разницей, что геном для ежа-2 в два раза длиннее, чем для ежа-1, и поэтому весь процесс построения по программе YOZH-2 берет в два раза больше тактов, чем процесс построения по программе YOZH-1.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе математической модели для представления мелкозернистых параллельных алгоритмов и архитектур — схема «Алгоритма параллельных подстановок» — разработаны две программы построения в клеточном пространстве двух вариантов модели искусственной биологической клетки в виде самовоспроизводящейся петли. Искусственная клетка строится из генома, поданного на входную ленту. Результатом построения является модель клетки, в которой записан фенотип как совокупность фиксированных данных и генотип как совокупность мобильных данных. Такая клетка может быть элементом искусственного многоклеточного организма, представляющего собой устройство, построение которого стартует от одномерного искусственного генома, далее способно расти и имитировать свойства живых организмов: самовоспроизведение, самовосстановление. Такие устройства, наделенные свойствами отказоустойчивости (робастности) и самоорганизации, целесообразно использовать в исследовании космического пространства, в радиоактивных средах, авионике и т.п. Дальнейшие исследования связаны с разработкой алгоритмов самовосстановления искусственного организма в случае повреждения его элементов и способов наделения его возможностями выполнения заданных функций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Von Neumann J. Theory of self-replication automata / A.W. Burks (ed.) — University of Illinois Press, 1966. Рус. перевод: Дж. фон Нейман. Теория самовоспроизводящихся автоматов. — М.: Мир, 1971. — 382 с.
2. Watson J., Crick F. A structure for deoxyribose nucleic acid // Nature. — 1953. — **171**. — P. 737–738.
3. Watson J.D. The double helix. — New York: Atheneum, 1968. Рус. перевод: Дж. Д. Уотсон. Двойная спираль. — М.: Мир, 1969. — 152 с.
4. Langton C.G. Self-replication in cellular automata // Physica D. — 1984. — **10**. — P. 135–144.
5. Bui J. Self-reproduction in small cellular automata // Ibid. — 1989. — **34**. — P. 295–300.
6. Reggia J.A., Armentrout S.I., Chou H.-H., Peng Y. Simple systems that exhibit self-directed replication // Science. — 1993. — **259**. — P. 1282–1287.
7. Codd E.F. Cellular automata. — New York: Academ. Press, 1968. — 122 p.
8. Langton C.G.. Studying artificial life with cellular automata // Physica D. — 1986. — **22**. — P. 120–149.

9. Chou H.-H., Reggia J.A. Emergence of self-reproducing structures in a cellular automata space // *Ibid.* — 1997. — **110**. — P. 252–276.
10. Azpeitia I., Ibanez J. Spontaneous emergence of robust cellular replicators // *Lect. Notes in Comput. Sci.* — 2002. — **2493**. — P. 132–143.
11. Stauffer A., Sipper M. Externally controllable and destructible self-replicating loops // *Lect. Notes in Artif. Intel.* — 2001. — **2159**. — P. 282–291.
12. Chou H.-H., Reggia J.A. Problem solving during artificial selection of self-replicating loops // *Physica D.* — 1998. — **115**. — P. 293–312.
13. Petraglio E., Henry J.-M., Tempesti G. Arithmetic operations on self-replicating cellular automata // *Lect. Notes in Artif. Intel.* — 1999. — **1674**. — P. 447–456.
14. Mange D., Stauffer A., Petraglio E., Tempesti G. Embryonic machines that divide and differentiate. // *Lect. Notes in Comput. Sci.* — 2004. — **3141**. — P. 201–216.
15. Mange D., Stauffer A., Petraglio E., Tempesti G. Self-replicating loop with universal construction // *Physica D.* — 2004. — **191**. — P. 178–192.
16. Stauffer A., Mange D., Tempesti G. Bio-inspired computing machines with self-repair mechanisms. // *Lect. Notes in Comput. Sci.* — 2006. — **3853**. — P. 128–140.
17. Stauffer A., Mange D., Rossier J. Self-organizing systems based on bio-inspired properties // *Lect. Notes in Artif. Intel.* — 2007. — **4648**. — P. 1171–1181.
18. Stauffer A., Mange D., Vannel F. Bio-inspired self-organizing cellular systems // *Biosystems.* — 2008. — **94**, Iss. 1-2. — P. 164–169.
19. Tempesti G., Mange D., Stauffer A. Self-replicating and cellular automata // *Encyclopedia of Complexity and Systems Science* (Ed. R.A. Meyers). — Berlin: Springer-Verlag, 2009. — P. 8066–8084.
20. Ачасова С.М., Бандман О.Л. Корректность параллельных вычислительных процессов. — Новосибирск: Наука, 1990. — 252 с.
21. Achasova S.M., Bandman O.L., Markova V.P., Piskunov S.V. Parallel substitution algorithm. Theory and application. — Singapore: World Sci., 1994. — 220 с.
22. Ачасова С.М. Простые программы самовоспроизведения в клеточном пространстве на основе алгоритма параллельных подстановок // *Программирование.* — 2004. — № 4. — С. 3–10.
23. Ачасова С.М. Программа — конструктор клеточных самовоспроизводящихся структур // *Там же.* — 2009. — № 4. — С. 1–9.
24. Остапкевич М.Б., Пискунов С.В. Система имитационного моделирования алгоритмов с мелкозернистым параллелизмом WinALT // *Вестн. НГУ.* — 2012. — **10**, № 3. — С. 34–45.

Поступила 22.05.2013