

О.Ф. Михаль, д-р техн. наук, доц.,
Харьковский национальный университет радиозлектроники, г. Харьков, Украина
oleg.mikhal@gmail.com

Исследование поведения ресурсно-ограниченных клеточных автоматов для моделирования жизненного цикла биологической системы

Для моделирования жизненного цикла биологической системы предложен описательный аппарат ресурсно-ограниченных клеточных автоматов. Представлен алгоритм, продемонстрирована работоспособность, обсуждены параметры моделирования и перспективы использования получаемых результатов.

Ключевые слова: клеточные автоматы, ресурсная ограниченность, жизненный цикл
DOI: 10.31474/1996-1588-2018-2-27-72-79

Введение

Изучение (моделирование) поведения живых систем (ЖС) - важная задача в связи с тем, что «в конструктивном отношении» они существенно превосходят (в настоящее время) творения рук человеческих. Следовательно, имеются перспективы, возможно связанные с развитием нанотехнологий и геной инженерии, а так же соответствующие области применения, включая медицину. Устройства, системы и технологии человеческой цивилизации развиваются в направлении повышения качества условий жизни (т.е. повышения вероятности выживания) вида *Homo sapiens* [1]. В связи с этим, отличным прототипом являются ЖС, каждая из которых так же эволюционирует (конкурентно развивается и «конструктивно совершенствуется») в направлении повышения вероятности выживания своего вида. Минимальной ЖС является клетка, а сколь либо значительные (реально интересные в прикладном плане) ЖС (организмы) есть клеточные сообщества (КС). Живая клетка относительно автономна. В ходе жизнедеятельности КС, каждая клетка взаимодействует с окружающими её соседними клетками по фиксированному набору правил. В связи с этим, для изучения работы живых КС, в качестве аппарата описания и моделирования целесообразны клеточные автоматы (КА). Средствами КА реализуются единообразные логически детерминированные межклеточные взаимодействия [2], происходящие локально в пространстве и параллельно во времени [3], совокупность которых позволяет воспроизводить модели долговременного (продолжительного) поведения тех или иных КС [4]. Особенностью ЖС является ресурсозависимость - конечное время функционирования, обусловленное ограниченностью ресурсов, расходуемых в ходе жизненного цикла. В связи с этим интересна проблематика исследований по оценке и регулированию темпов расходования ресурсов в соответствии с развитием и продолжи-

тельностью существования КС. Поэтому следует промоделировать поведения КС при воздействии на них различных влияющих факторов. Использование для этого КА-моделей предполагает разработку соответствующих классов КА, поддерживающих ресурсность.

Цель настоящей работы – демонстрация формального аппарата ресурсных (ресурсно-ограниченных) клеточных автоматов (РКА) применительно к моделированию поведения КС.

Задачей исследования в целом - является разработка методов моделирования, адекватно воспроизводящих и позволяющих прогнозировать элементы функционирования КС.

1. Ограниченность ресурсов

По поводу понятия ресурса, может быть высказано следующее неформальное суждение. Ресурсность (обусловленность наличием, количеством, качеством и достижимостью ресурсов) – есть фундаментальное свойство (особенность) мира вообще. Любые процессы, протекающие в мире, есть преобразования одного вида материала (материи, энергии) в другой вид. Процессы преобразования могут возникнуть только при наличии достаточного (требуемого порогового) количества (ресурса) исходного материала; могут продолжаться (самоподдерживаться) только при доступности исходного материала в требуемом количестве; и неизбежно прекращаются (затухают) при исчерпании ресурса. Подобное представление является базовыми для понятия ресурса, поэтому оно достаточно универсально для любых аспектов рассмотрения окружающего мира. Понятие ресурса применимо для наблюдаемых физических явлений любого пространственного и временного масштаба (астрофизика, планетарный уровень, объекты реального мира непосредственно человеческого окружения, химические и физические процессы, физика микромира, субатомный уровень, уровень элементарных частиц), для объектов живой и неживой природы, для процессов груп-

пового (стайного) поведіння у живих, а також для соціальних процесів в людському суспільстві. Данне перерахування не претендує на повноту або системність опису створення. Воно наведено виключно в ілюстративних цілях, в якості очерка загальної характеристики *ресурсності*, як фундаментального властивості світу.

В межах представлень про *ресурсність*, протікання будь-яких процесів супроводжується витратою (вироботою) деяких *ресурсів*. Важлива особливість: *ресурс* (чого угодно) - завжди обмежений. *Ресурс* може бути дуже великим. Він може бути (казатися) безмежним в межах існуючого (налічного на даний момент) людського досвіду. В дійсності ж це означає лише обмеженість людського досвіду. Глобально-історичний контекст розвитку цивілізації - є послідовна зміна технологій на основі постійного виснаження старих *ресурсів* енергії та сировини [1]. Виснажливістю фактором розвитку людської цивілізації, оскільки кожен раз для виживання (підтримання старого життєвого рівня), людству потрібні нові *ресурси*: нові джерела енергії та сировини, взаємозамінювані старими. Але *Homo sapiens* - всього лише один з видів в величезній різноманітності живої природи; а зміна видів *ресурсообеспечення* - всього лише специфічне для даного виду динамічне змінення умов зовнішнього середовища. Причому це нічого не суперечить тезису акад. Вернадського [5] про геологічні масштаби змін, вносимих видом *Homo sapiens* в навколишнє середовище. Отже, і в глобальному масштабі не втрачається єдиність об'єктів живої природи, обмеженість витрат *ресурсів*; завдання інваріантне відносно масштабу розгляду, змінюється тільки інтерпретація, але зберігається актуальність вивчення поведінки *ресурсно-обмежених* КС.

Далі, в розрізі побудови моделей КС з використанням формального апарату РКА, розглянемо предметну область і об'єкт моделювання - клітку.

2. Клітинна структура об'єктів живої природи

Клітка - мінімальним елементом живої природи. Вона складається з мембранної оболонки, ядра, цитоплазми та органел. Клітка забезпечує підтримку гомеостазу (стійкого саморегулюючого стану); енергетичний та інформаційний обмін з зовнішнім середовищем; здатність до розмноження (самовипроизведення, репродукції); здатність до розвитку (росту,

функціональної диференційованості, формоутворення).

В прикладному плані найбільш цікавими КС або тканинами - сукупності клітин, схожих за будовою, функціями та походженням, спільно виконують загальні функції. В частині, у людини в складі чотирьох основних груп тканин (епітеліальної, з'єднаної, м'язової та нервової) існує близько 200 різних типів спеціалізованих клітин. Тканини, в свою чергу, утворюють органи системи органів. При цьому, живою організм починається з клітини - структурної, функціональної та генетичної одиниці живої.

Важливою властивістю клітини є генетична інформація - набір молекул ДНК - повний «комплект конструкторської документації», за яким будується дана ЖС (організм). Молекули ДНК мають спіральну структуру. «Конструктивні елементи», що утворюють «каркас спіралі», з'єднані парами амінокислот, в комбінаціях яких закодована генетична інформація.

Відома інформація генетичної інформації - не здійснюється. Точніше, в самій клітині немає «устрою вводу» нової генетичної інформації. Кожен народжується організм отримує «повний комплект конструкторської документації» при народженні. Вспочатку - в нульовій фазі свого життєвого циклу - новий організм є одноклітинним. За міри росту - клітини, що складають організм, діляться та функціонально обособлюються (диференціюються, спеціалізуються). Але при кожному діленні кожна нова клітка отримує власний повний набір ДНК - екземпляр «повного комплекта конструкторської документації», який зберігається в ядрі клітини.

В процесі ділення клітини, відбувається копіювання набору ДНК. Устрійство (елемент клітини), що здійснює копіювання ДНК, називається *реплікатором*. В клітині передбачені системи (об'єкти молекулярного рівня), які захоплюють окремі ДНК за їх «хвости», транспортують їх та фіксують в *реплікаторах*. Механізм *реплікатора* (об'єкт молекулярного рівня) працює подібно застібці «Молнія». Спіраль ДНК розділяється на дві половинки. Далі, на кожній з них наростає недостаюча частина. В результаті - з'являються дві ідентичні екземпляри молекули ДНК. Таким чином, *реплікується* весь комплект молекул ДНК і формується два ядра.

Далі мембранна оболонка та вміст первинної клітини перерозподіляються: частина матеріалу групується навколо одного ядра, друга частина - навколо іншого. Таким чином усуваються можливі колізії - предмет продовжуваних наукових досліджень в цитології (наука про устрійство та роботу клітин та клітинних

структур). Но известен конечный результат – образование пары клеток из одной исходной.

Сравнительно недавно (соответствующая Нобелевская премия была присуждена в 2009 г. [6]) было обнаружено, что молекулы ДНК имеют «технологические хвосты», состоящие из «ноликов» (однотипных повторяющихся элементов) не несущих информацию. Было показано, что каждый акт деления клетки (каждая репликация ДНК) сопровождается утратой «одного нолика». «Кончик хвоста» молекулы ДНК, захватываемый и фиксируемый в *репликаторе* – не дублируется. Две полученные идентичные молекулы ДНК – короче исходной молекулы на один «технологический нолик». Результат: конечное ограниченное число делений клетки. Полных и безошибочных делений может быть столько, сколько имеется «технологических ноликов» в хвосте ДНК. Если «технологические нолики» израсходованы, возможны три варианта.

- Молекула ДНК не будет захвачена и транспортирована. Следовательно, данная молекула не будет *реплицирована*, т.к. не попадёт на *репликатор*.

- Молекула ДНК будет захвачена и транспортирована, но процесс *репликации* «зависнет».

- *Репликация* будет завершена, но вместо «технологического нолика» будет потерян очередной стоящий в ДНК «смысловый элемент» информации.

Результат – либо деления клетки не произойдёт, либо деление произойдёт с ошибкой и полученные клетки не будут полностью функциональны. Следствие – сокращение числа клеток организма, сокращение функциональности и последующий «полный выход организма из строя».

«Выход из строя» произойдёт, разумеется, не при отказе от деления последней клетки организма, а значительно раньше. Как отмечалось, по мере роста организма происходит функциональная специализация отдельных его клеток. Специализация предполагает разделение функций, выполняемых в организме. Утрата части клеток, выполняющих определённые функции, приводит к тому, что в медицине называется *недостаточностью*. Любая *недостаточность* (*недостаточность* по выполнению функций любой из составляющих системы) негативно сказывается на функционировании системы в целом и, подобно «эффекту домино», приводит к новым (другим) *недостаточностям* в нарастающем темпе. Когда *недостаточность* какого-либо органа (элемента системы) становится фатальной для дальнейшего функционирования организма (системы) в целом, - система «выходит из строя».

Процесс деления предположительно является случайным. Или возможно этот процесс детерминированный, но столь многофакторный, что наблюдателю он представляется как процесс случайный. В любом варианте, может представлять

интерес воспроизведение этого процесса в рамках парадигмы случайного моделирования. Варьируя влияющие факторы, можно модифицировать случайный процесс и наблюдать соответствующие изменения в динамике его течения.

Таким образом, представляет интерес изучение средствами компьютерного моделирования ограниченной жизнедеятельности в связи с расходом ресурса КС. Цель и ожидаемый результат – демонстрация процесса во времени, и изучение влияющих системных факторов.

3. Ресурсные клеточные автоматы

Одним из перспективных средств дискретного моделирования являются КА. Они позволяют абстрагироваться от несущественных черт рассматриваемого объекта, сосредоточивая преимущественное внимание на цикличности процессов, пространственной распределённости (обособленности) объектов, фиксированном наборе правил взаимодействия, дискретности и взаимной независимости событий.

КА-модель включает регулярную решётку ячеек (клеток). Каждая из клеток может находиться в одном из конечного множества состояний. Решетка может быть 2D или 3D. Для каждой клетки определено множество клеток, называемых окрестностью. В частном случае, окрестностью могут быть непосредственно соседствующие клетки. Другой вариант окрестности - множество всех ячеек на расстоянии не более 2 от текущей (окрестность фон Неймана ранга 2). Для работы клеточного автомата требуется задание начального состояния всех ячеек и набора правил перехода ячеек из одного состояния в другое. На каждой итерации, для каждой ячейки определяется её новое состояние, используя правила перехода и состояния окрестных ячеек. Правила перехода одинаковы для всех ячеек и применяются сразу (параллельно и одновременно) ко всей решётке.

Возможно великое множество обобщений концепции КА. Применительно к моделированию объектов живой природы нами используются *ресурсно-обусловленные (ресурсные)* клеточные автоматы (РКА), позволяющие отслеживать изменение (расходование) определённых значений параметров отдельных элементов. В РКА принимается во внимание временная ограниченность процессов: сокращение возможностей для последующего их продолжения. Совокупность указанных качеств создаёт формальную причинно-следственную среду, удобную для воспроизведения изучаемых объектов (явлений).

Ресурс – есть значение определённого параметра (нескольких параметров), критичное для продолжения функционирования определённого элемента клеточного автомата. Ресурс может задаваться изначально и убывает в процессе функционирования КА. В частных случаях, ресурс мо-

жет быть восполнимым. Он может «пополняться извне», в зависимости от потребностей моделируемой ситуации. При моделировании объектов живой природы, ресурс связан с жизненным циклом и является невосполнимым. Как отмечено выше, в живых клетках заложена некоторый генетический механизм, определяющий безвозвратное расходования жизненного ресурса. Задача, непосредственно решаемая разрабатываемой моделью – изучение процесса расходования жизненного ресурса. При этом общая целевая направленность — оптимизация этого процесса, выработка возможных рекомендаций по экономному расходованию, увеличению продолжительности расходования, т.е. продолжительности жизни моделируемого объекта живой природы.

4. Структура РКА-модели

Основные требования к разрабатываемой модели определяются характером, объёмом и мерой информативности моделирования. В рассматриваемом случае предметом изучения являются темпы выработки ресурса КС. Назначение данной первой версии модели - демонстрация её информативности. Т.е. результат – не конкретное поведение модели при конкретных параметрах, а общая оценка разнообразия поведения вариантов модели для оценки допустимых диапазонов параметров. В связи с этим, целесообразен ряд ограничений.

- Графический интерфейс для моделирующей программы не нужен. Достаточен вывод в Протокол с последующей off-line обработкой.

- Статистическая оценка результатов на данном этапе достаточна по построению гистограмм распределения числа клеток КА по значению их ресурса, по нескольким запускам модели.

- Построение графиков гистограмм on-line - так же не нужно. Моделирующая программа должна выдать числовые данные в Протокол, а графики допустимо строить в табличном процессоре (Excel, Libre Office...).

- Рассматривается (моделируется) только двумерный КА. Многомерное расширение, если потребуется, может быть доработано по двумерному аналогу.

- Рассматриваются поля квадратной формы с вариантами соседства 4, 6 и 8. Если потребуется, могут быть реализованы другие значения функции соседства, но это ведет к увеличению числа параметров модели.

На рис. 1 представлена структурная схема алгоритма, комментируемая далее пошаговым описанием.

Шаг 1. Пуск. Запуск программы. Параметры запуска (исходные данные согласно плану эксперимента) хранятся в отдельном файле – стартовом Протоколе, доступном при запуске. Этим обеспечивается относительная автоном-

ность: запуск модели без корректировки текста программы всякий раз при вводе новых начальных данных. Корректировка исходного текста программы может потребоваться только для модифицирования параметров модели, что по существу эквивалентно созданию новой модели, т. к. предполагает другой формат плана эксперимента.

Шаг 2. Ввод числа N реализаций модели и других параметров. Инициализация Протокола эксперимента. Здесь N - число последовательных рестартов модели для набора требуемой (статистически достоверной) выборки результатов. Важными вводимыми параметрами являются так же конфигурация и размер поля КА. Протокол создаётся на дозапись, остаётся открытым всё время работы программы и закрывается только при завершении (Шаг 14 - Стоп).

Шаг 3. Запуск очередной реализации модели. Модель в программе запускается N-кратно, т.е. после первого прохождения модели, в точку Шаг 3 будет ещё (N-1) возвратов. При этом, всякий раз заново устанавливаются исходные значения ресурсов клеток КА и обнуляется массив гистограммы.

Шаг 4. Инициация очередного шага КА - увеличение на единицу счётчика циклов работы. Далее (Шаги 5 и 6) производится очередное деление клетки.

Шаг 5. Выбор клетки А в поле КА осуществляется с использованием генератора случайных чисел (ГСЧ). В данной версии модели процедура продолжается до первого обнуления ресурса клетки. Поэтому выбор клетки А всегда «срабатывает с первого раза», без повторных обращений к ГСЧ, и работа модели «не тормозится» по мере выработки ресурса КА.

Шаг 6. Выбор В одного из соседей А осуществляется так же с помощью ГСЧ. Число соседей - есть параметр модели, вводимый из стартового Протокола. В рассматриваемой версии - КА с двумерными полями с функцией соседства 4, 6 и 8. Значение 6 - гексагональная симметрия; 4 и 8 – квадратная без учёта и с учётом диагональных (угловых) клеток, соответственно.

Шаг 7. Уменьшение на единицу ресурсов А и В, что соответствует ситуации: клетка А погибает, а клетка В, делится и заполняет вакансию. В результате - обе клетки (клетка В и её клон, заполняющий место клетки А) теряют по одной единице значения своего ресурса. Т.е. они становятся «старее» на одну единицу (на один «тик внутренних часов») «индивидуального биологического времени жизни», ход которого (обратный отсчёт) и воспроизводится моделью.

Шаг 8. Мониторинг поля КА. Заполнение массива гистограммы. Клетки поля КА последовательно просматриваются, подсчитывается число клеток каждого «возраста», массив гистограммы обнуляется и заново заполняется.

Шаг 9. Вывод гистограммы в Протокол. После завершения просмотра поля КА, в массиве гистограммы содержится текущий временной срез распределения клеток КА по возрастам. Массив сбрасывается в Протокол. Ценность этой информации - текущее состояние модели. Информация (последовательность гистограмм) может быть полезна если требуется проследит «динамику старения» КА. Объём этой информации - весьма значительный; поэтому ниже в рассмотрении (п. х) мы ограничиваемся только конечными картинками распределений, соответствующими моментам появления первой клетки с нулевым ресурсом.

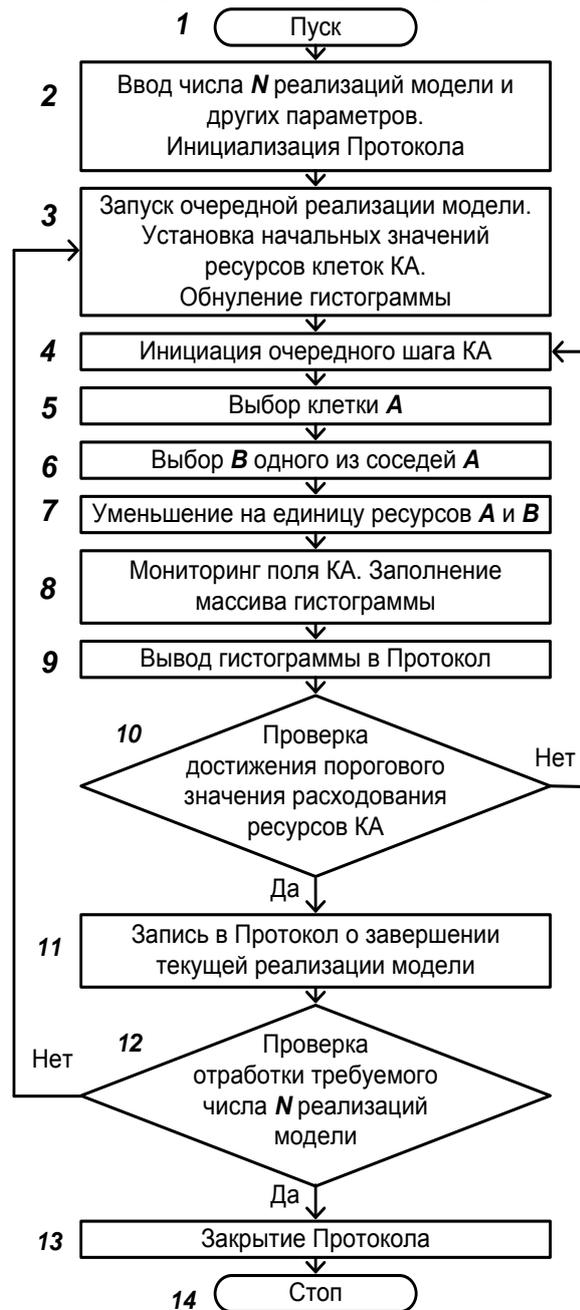


Рисунок 1 – Структурная схема ресурсной клеточно-автоматной модели.

Полный набор картинок гистограмм, построенных в едином масштабе, может составить

«фильм о жизни, старении и смерти» данного «виртуального организма». Введением дополнительных параметров, например позитивными и негативными внешними влияющими факторами, (т.е. усложнением модели), «картина жизни» может быть обогащена «подарками судьбы» и «превратностями бытия». В целом, в зависимости от интерпретации и целей моделирования, это может иметь определённую прикладную ценность.

Шаг 10. Проверка достижения порогового значения расходования ресурсов КА. В рассматриваемом варианте модели пороговым значением (сигналом для завершения очередной реализации модели) является появление первой клетки с нулевым ресурсом. В конкретных приложениях, при моделировании поведения конкретных биологических организмов, возможно, критерий завершения будет другой. В интерпретационном плане, первая клетка с нулевым ресурсом может быть только сигналом к началу редукции определённого организма. Процедура редукции – отдельный предмет возможной разработки, а модель, дополненная процедурой редукции, возможный отдельный предмет исследования.

Шаг 11. Производится запись в Протокол о завершении текущей реализации модели - фиксация финального состояния гистограммы.

Шаг 12. Проверка отработки заданного числа N реализаций модели. Как отмечалось, при каждом запуске программы обрабатывается последовательно N полных проходов модели. На данном Шаге проверяется факт отработки всех N реализаций.

Шаг 13. Закрытие Протокола. Регистрируется продолжительность работы программы. Фиксация продолжительности интересна в плане накопления информации для планирования последующих машинных экспериментов с моделью.

Шаг 14. Стоп. Останов программы. Результат работы программы – Протокол – хранится в отдельном файле.

5. Машинные эксперименты

Расчётная часть модели распределённой системы РКА реализована на языке Python 2.7. Проведена серия машинных экспериментов, получены оценочные значения продолжительности функционирования и динамики старения «виртуального организма», воспроизводимого моделью.

Рассмотрены варианты модели с коэффициентами соседства 6 и 8 при исходных значениях ресурса 10 и 20 с размерами клеточного поля (20×20), (100×100) и (200×200). Указанные значения параметров модели выбраны как компромиссные. Критерий компромисса — получение содержательных результатов за приемлемое время на имеющихся вычислительных средствах (ПК, AMD Athlon, 2,9 ГГц, ОЗУ 6 Гб). При применении более информационно-мощных вычислительных

средств, разумеется, объём модели может быть повышен.

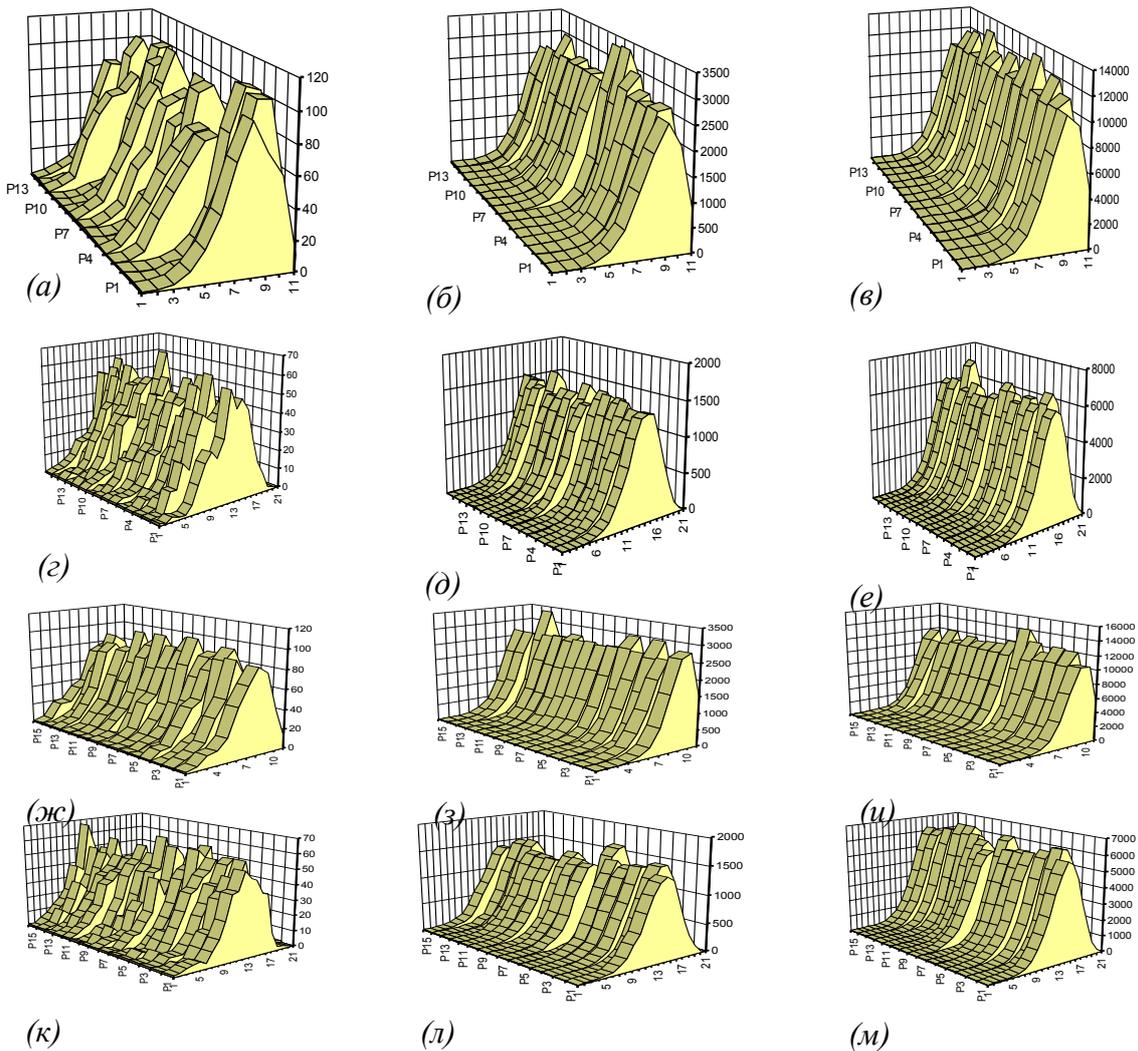


Рисунок 2 - Гистограммы распределений остаточных ресурсов клеток. Коэффициент соседства 6 (а-е) и 8 (ж-м); исходный ресурс 10 (а-в, ж-и) и 20 (г-е, к-м); размер поля 20×20 (а, г, ж, к), 100×100 (б, д, з, л) и 200×200 (в, е, и, м).

На рис. 2 представлены основные результаты - гистограммы распределений остаточных ресурсов клеток. Графики выполнены off-line, на основе Протоколов данных, сгенерированных расчётной частью модели. Две первые строки графиков рис. 2 соответствуют значению коэффициента соседства 6 (т. е. РКА с гексагональной симметрией), две нижние строки графиков — значению 8 (октагональная симметрия). Первая и 3-я строки — исходный ресурс 10; 2-я и 4-я строки — 20. Размеры КА-поля упорядочены по столбцам рис. 2: левый столбец (20×20), средний (100×100), правый столбец (200×200). На каждом из графиков горизонтальная ось гистограммы — значение остаточного ресурса клетки, вертикальная ось — число клеток, имеющих соответствующий остаточный ресурс. Цикл каждого запуска построения гистограммы (начало: Шаг 3) завершается при появлении первой клетки с нулевым ресурсом (проверка — Шаг 10). Интерпретация: клетка с

нулевым ресурсом «гибнет насовсем» и при этом гибнет так же весь моделируемый «виртуальный организм». Гистограмма показывает, каков при этом остаточный ресурс у других (остальных) клеток.

По каждой из указанных (показанных на рис. 2) комбинаций параметров модели проделано N=15 реализаций модели. Результаты запусков представлены на графиках в виде семейств гистограмм, упорядоченных вдоль осей с обозначениями P1, P3, P5 и др. Степень гладкости (единообразия, однородности, устойчивости) гистограмм в каждой из групп даёт *качественное* представление о мере репрезентативности соответствующего полученного набора данных, что достаточно для целей демонстрации аппарата РКА согласно данной версии модели.

6. Обсуждение результатов

Путём сопоставления графиков гистограмм

рис. 2, может быть сделан ряд содержательных выводов, на основе которых могут быть намечены направления дальнейшего изучения и отработки модели.

1. Исходный ресурс — весьма существенный влияющий фактор модели. При ресурсе 20 гистограммы более существенно смещаются от начала координат. На представленных на рис. 2 графиках 2-й и 4-й строк (ресурс 20) «устойчиво» и «полностью» видна «колоколообразность» гистограмм. В то же время на графиках 1-й и 3-й строк (ресурс 10) «колоколообразность» видна не полностью: «обрезан правый хвост» гистограмм по уровню порядка 0,3 — 0,6 от максимума. Соответственно, при ресурсе 10, матожидание (т. е. среднее значение расходуемого ресурса) составляет порядка 0,2, а при ресурсе 20 — порядка 0,4. Вывод: более высокий ресурс более полно используется. Конкретный характер зависимости целесообразно проследить на большем числе точек и с более полным набором статистики.

2. Размер поля РКА радикально влияет на устойчивость результатов. Площадь поля правого столбца графиков превышает площадь поля левого столбца на 2 порядка. Соответственно, растёт число реализаций до получения «первого нуля» модели, чем и обусловлена гладкость гистограмм. Вывод: зависимость точностных характеристик от площади поля РКА скорее всего прямопропорциональная, но при этом требуется дополнительно изучить влияние фактора исходного ресурса.

3. Представленные на рис. 2 графики не позволяют сделать содержательных заключений о влиянии коэффициента соседства: 3-я строка графиков качественно не отличается от 1-й, а 4-я от 2-й. Вывод: требуется более значительный набор статистики, а так же включение в рассмотрение вариантов со значениями коэффициентов соседства 4 и 2.

4. Вне рассмотрения в настоящей версии модели остались: повышение размерности, изменение (расширение и усложнение) правил взаимодействия между клетками, внесение неоднородности в структуру КА, неравномерное распределение параметра ресурса, асимметрия или анизотропия поля КА. При привлечении этих влияющих факторов, неизбежные ограничения, связанные с наличными вычислительными ресурсами, могут быть преодолены введением элементов параллельных и распределённых вычислений, в частности за счёт *локально-параллельного* (ЛП) пред-

ставления информации [4]. Применение принципов ЛП-обработки - влечёт за собой новое существенное преобразование модели и изменение принципов хранения (описания) информации. Вывод: подобное изменение может быть предметом отдельного изучения и целесообразно только при конкретной прикладной ориентации модели. Переход на ЛП-обработку предполагает новые компромиссные решения: соотношение между объёмом модели и форматом ЛП-представления информации в ней. Без решения подобных целевых интерпретационных вопросов, переход на ЛП-обработку мало целесообразен.

Заключение

Предложена концепция РКА Рассмотрены варианты реализации Представлена модель. Намечены пути дальнейшего развития

В прикладном (интерпретационном) плане возможности развития РКА-модели весьма широки. В поле рассмотрения может быть вовлечена дополнительная информация о специфике межклеточных взаимодействий, присущих живым КС реального мира, либо полученная на основе других модельных представлений.

Ожидаемое применение результатов моделирования связано с поддержанием оптимальных режимов функционирования систем, в состав которых входят объекты живой природы. Важным прикладным аспектом может явиться разработка на основе полученных модельных результатов — конкретных методик и практических рекомендаций применительно к экологии, оптимизации человеческой хозяйственной деятельности, а также к медицине.

Научная новизна предложенного метода моделирования заключается во введении и использовании параметров ресурса, индивидуально для каждого элемента КА. Продемонстрировано в машинном эксперименте, что варьирование правил работы с параметрами ресурса позволяет воспроизводить элементы поведения РКА, соответствующие динамике жизненного цикла ЖС.

Практическая значимость метода заключается в интерпретационной многовариантности вводимых параметров, что потенциально позволяет «конструировать» виртуальные ЖС с заданной динамикой жизненного цикла и изучать на таких моделях воздействие на них аналогов внешних влияющих факторов.

Список литературы

1. Михаль О.Ф. Глобально-исторический контекст развития средств вычислительной техники / О.Ф. Михаль // Бионика интеллекта. - 2014. - Вып. 1(82). - С. 55-62.
2. Михаль О.Ф. Синтез модели клеточного автомата на сети Петри / О. Ф. Михаль // Бионика интеллекта. - 2014. - Вып. 1 (82). - С. 47-54.

3. Михаль О.Ф. Моделирование распределенных информационно-управляющих систем средствами локально-параллельных алгоритмов обработки нечеткой информации / О.Ф. Михаль // Проблемы бионики. – 2001. – Вып. 54. - С. 28-34.
4. Михаль О.Ф. Математическая модель динамики формирования и оценки опасности аневризмы / О.Ф. Михаль // Бионика интеллекта. - 2015. - Вып. 2 (85). - С. 67-73.
5. Вернадский В.И. Биосфера и ноосфера / В.И. Вернадский. - М.: Айрис-пресс, 2012. – 576 с.
6. <https://ru.wikipedia.org/wiki/Теломеры>

References

1. Michal, O. (2014) Global Historical Context of Development of Computing Technic Tools [Globalno-istoricheskyi kontekst razvitiya sredstv vichislitel'noy tehniki] Bionics of intelligence: scientific- technical magazine. Kharkiv, Issue 1(82), pp.55-62
2. Michal, O. (2014) Synthesis of Cell Automat Model by Petry Net [Syntez midely kletochnogo avtomata na sety Petry] Bionics of intelligence: scientific- technical magazine. Kharkiv, Issue 1(82), pp.47-54.
3. Michal, O. (2001) Simulation of Distributed Information- Control Systems by Local- Parallel Fuzzy Processing Algorithms [Modelirovanie raspredelennyh informacionno- upravlyayushchih system sredstvamy lokal'no- parallel'nyh algoritmov obrabotki informacii] Problems of Bionics, Issue 54, Kharkiv, pp.28- 34
4. Michal, O. (2015) Mathematical model of the dynamics of the formation and assessment of the risk of aneurysm [Matematicheskaya model' dinamiki formirovaniya i otsenki opasnosti anevrizmy]] Bionics of intelligence: scientific- technical magazine. Kharkiv, Issue 2(85), pp.67-734.
5. Vernadsky, V.I. (2012) Biosphere and noosphere [Biosfera i noosfera], Moscow, Iris-press, 576 p.
6. <https://ru.wikipedia.org/wiki/Теломеры>

Надійшла до редакції 08.11.2018

О.П. Михаль

Харківський національний університет радіоелектроніки (Україна)

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕДІНКИ РЕСУРСНО-ОБМЕЖЕНИХ КЛІТИННИХ АВТОМАТІВ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ БІОЛОГІЧНОЇ СИСТЕМИ

Для моделювання життєвого циклу біологічної системи запропоновано описовий апарат ресурсно-обмежених клітинних автоматів. Представлені алгоритми, продемонстрована їх працездатність, обговорені параметри моделювання та перспективи використання отриманих результатів.

Ключові слова: клітинні автомати, ресурсна обмеженість, життєвий цикл.

O.F. Michal

Kharkov National University of Radio Electronics (Ukraine)

THE STUDY OF THE BEHAVIOR OF RESOURCE-LIMITED CELLULAR AUTOMATA FOR MODELING THE LIFE CYCLE OF A BIOLOGICAL SYSTEM

Background: Biological objects have a cellular structure. A cell is a minimal element of the life, supporting the functions of metabolism, homeostasis, reproduction, etc. Reproduction (the division of the cell) is carried out a limited number of times, what is genetically determined. The exhaustion of the resource of divisions entails cell death, and the failure of the critical number of cells leads to the completion of the life cycle (death) of the organism. The modeling of this process is of interest in connection with the optimization of the functioning of living systems in the presence of external (aggressive) influencing factors.

Materials and methods: The cellular automaton initially (in its essence) corresponds to the paradigm of cellularity. With respect to biological objects, it remains only to supplement it with the properties and rules of a specific subject area. To simulate the behavior of living cellular structures, a descriptive apparatus of resource cellular automata was proposed, which reproduces the division procedure with limitations inherent in the real life cycle.

Results: Within the framework of the proposed paradigm of a resource cellular automaton, a model of a cellular community (a simple multicellular organism) with a regular cell arrangement and a fixed neighborhood function was developed. Performance of the model is demonstrated. Preliminary studies of the behavior of the model were carried out in the presence of three influencing factors: the symmetry of the cell location (neighborhood function), the volume of the cell community (size of the 2D field of the model), and the cell resource.

Conclusion: The model allows for the expansion of the number of influencing parameters and the variation of rule sets for different interpretations (features of the subject area). Essentially new and most productive in the model is the factor of limited resources, which sets the final lifetime of a cell community instance. The expected areas of application of the results of modeling are biology, medicine, ecology, sociology.

Key words: cell automatic systems, resource limited, life cycle.