

Модели теории искусственной жизни и их классификация

Аннотация. В статье приводится обзор и классификация моделей теории искусственной жизни – междисциплинарного научного направления, целью которого является выявление принципов динамики, присущих биологическим системам, и воспроизведение их в системах (и в том числе технических), созданных человеком. Рассматриваются программные и аппаратно-программные модели. Особое внимание уделяется моделям искусственной химии, в особенности классическим моделям и моделям сообществ эволюционирующих ассемблерных программ. Отмечена важность моделей искусственной химии для развития теоретической информатики и теории программирования.

Ключевые слова: искусственная жизнь, самоорганизация, эволюция, хаос, эмерджентность.

Введение

Теория искусственной жизни как отдельное междисциплинарное научное направление сформировалась в конце 80-х годов XX века. Целью исследований в области теории искусственной жизни является воспроизведение принципов динамики, присущей живым системам, в виртуальной компьютерной среде [1, 2]. Появлению теории искусственной жизни способствовало, с одной стороны, становление кибернетики как науки и создание вычислительных машин, с другой стороны, развитие биологии, появление новых теорий абиогенного происхождения жизни.

Целостное логически обоснованное и подтвержденное экспериментами учение об абиогенном происхождении жизни в условиях Земли (при отсутствии панспермии) было предложено Опариным [3]. Впоследствии абиогенез рассматривался в работах М. Эйгена и П. Шустера [4]. Ими была предложена теория гиперциклов: совокупности циклически связанных между собой автокаталитических реакций, которая также способна к автокаталитическому самовоспроизведению. Такое направление теории искусственной жизни, как искусственная химия, непосредственно восходит к работам М.Эйгена и П. Шустера в области самоорганизации гиперциклов.

С появлением кибернетики как науки сразу же возник вопрос о возможности наделения компьютеров или компьютерных программ свойствами, присущими живым организмам. В работе Дж. фон Неймана [5] была предложена модель клеточного автомата, который обладал одним из наиболее очевидных свойств живых организмов: способностью к самовоспроизведению. Многие модели теории искусственной жизни являются дальнейшим развитием идей фон Неймана.

Еще одна автоматная модель, объясняющая происхождение генетических регуляторных систем, была предложена С.А. Кауффманом [6-10]. Это НК-автоматная модель, в которой исследуется динамика смены состояния автомата, то есть значений выходов N логических элементов, имеющих в среднем K -входов, соединенных с выходами других элементов.

Многие модели теории искусственной жизни представляют собой среды, или искусственные миры, с заданными “физическими”, “химическими”, иногда “социально-экономическими” законами. Эти миры населяются искусственными организмами, чье поведение определяется несложными алгоритмами.

В большинстве случаев исследования направлены на изучение явлений самоорганизации (эмерджентности; возникновения сложного из простого; образования структур; возникновения новизны) внутри искусственного мира благодаря

эволюции или обучению искусственных организмов. Эволюция искусственных организмов может исследоваться на различных уровнях: молекулярном, клеточном, организменном, популяционном и видовом. Общие проблемы теории искусственной жизни были выделены в [11].

Искусственный организм, в большинстве случаев, обладает следующими свойствами, сближающими его с биологическими объектами:

- открытость (обмен веществом-энергией или их модельными аналогами с внешней средой);
- гомеостаз (способность сохранения динамического равновесия);
- самореплицируемость (возможно, с некоторой вероятностью возникновения ошибки копирования);
- смертность (конечность существования).

Искусственные организмы могут быть представлены различным образом, например, как динамические конфигурации состояний клеток в пространстве клеточного автомата, или как множество активных единиц (головок машин Тьюринга), которые наблюдают состояние клеток пространства (многомерной ленты машины Тьюринга), считывают и изменяют находящиеся в клетках символы. В моделях искусственной химии искусственный организм задается символьной последовательностью, которая одновременно рассматривается и как лента, и как программа машины Тьюринга. В физических моделях искусственные организмы – это роботы, обладающие сенсорной системой, исполнительными механизмами и программой поведения.

Характерными чертами моделей искусственной жизни являются *имплицитность* и *открытость по отношению к результатам эксперимента* (*open-ended evolution*). Имплицитность означает отсутствие явно заданных критериев и направленности отбора, т.е. фитнес-функции и функции селекции. Открытость по отношению к результатам эксперимента означает, что завершение эволюционного эксперимента может быть любым, уровень сложности и разнообразие полученных решений никак не ограничиваются.

1. Классификация моделей теории искусственной жизни

В настоящей работе представляется классификация моделей теории искусственной жизни и дается обзор различных моделей выделенных

классов. Классификации моделей теории искусственной жизни предлагались и раньше в работах других авторов [12-14]. Однако эти классификации либо узконаправленные [12, 13], либо строятся исходя из специфических критериев, например с позиций применения моделей теории искусственной жизни в биологии, исходя из природы среды, в которой производится моделирование: “влажной”, то есть биохимической (*wetware*), программной (*software*) или аппаратной (*hardware*) [14].

В этой работе рассматривается широкий спектр моделей, относящихся к так называемой “сильной” искусственной жизни (*strong artificial life*), т.е. таких моделей, где воспроизведение динамики биологических систем производится в аппаратной, программной, либо аппаратно-программной среде. Классификация строится исходя из основных целей моделирования и назначения моделей.

В предлагаемой классификации выделяются следующие классы моделей теории искусственной жизни:

- модели самовоспроизводящихся клеточных автоматов (автоматы Дж. фон Неймана [5, 15] и К.Г. Лангтона [16, 17], “самореплицирующиеся черви” Х. Саяма [18, 19]);
- модели, исследующие динамику систем “на границе порядка и хаоса” (λ -параметр К.Г. Лангтона [16, 20-23], NK-автоматы [6-10], модель К. Канеко [24]);
- модели эволюции индивидуальных стратегий поведения (модель “*Evolutionary Reinforcement Learning*” (ERL) [9, 10, 25, 26], модель “*Polyworld*” [8-10, 27], модель “*Кузнечик*” [9, 10], модели самообучающихся роботов [28, 29]);
- модели формирования коллективного поведения (модель “*Boids*” [30], различные модели “муравейников” [31-33], в том числе *MANTA* [34-36]);
- визуальные модели эволюционного морфогенеза (*L*-системы [37, 38], модель “*Biomorph*” [39], модель К. Симса [40], модель “*Framsticks*” [41]) и искусственного эмбриогенеза [42];
- модели эволюционирующего и самоорганизующегося аппаратного обеспечения [43-47];
- модели искусственной химии [2, 12, 48-57] (в том числе классические модели [48-50] и модели сообществ эволюционирующих ассемблерных программ [2, 12, 52-57]).

Множество моделей теории искусственной жизни, как рассматриваемых, так и не рассматриваемых в данной работе, сочетают в себе черты различных классов из выше перечисленных.

2. Модели самовоспроизводящихся клеточных автоматов

К данному классу отнесены модели, являющиеся непосредственным развитием и усовершенствованием самовоспроизводящегося клеточного автомата Дж. фон Неймана [5]. В этой модели организм представляет собой динамическую совокупность состояний множества смежных клеток автомата.

Основным недостатком автомата фон Неймана является большое количество возможных состояний клетки (их 29), следствием чего является огромное количество правил перехода: 29^{29^5} . Поэтому последующие исследования велись в плане уменьшения количества состояний и упрощении автомата при сохранении способности к самовоспроизведению и универсальности вычислений [2, 15-17].

Первая упрощенная модель была предложена Е.Ф. Коддом [2], в его автомате клетка могла находиться в 8 возможных состояниях. Впоследствии К.Г. Лангтоном была создана еще одна модель клеточного автомата с 8 возможными состояниями клетки и упрощенными требованиями к вычислительным возможностям автомата [16, 17]. Модель получила название “*Q-loops*” (или “*Langton’s loops*”), поскольку в процессе работы автомат строит в клеточном пространстве *Q*-образные петли, быстро заполняющие пространство.

В модели “самореплицирующихся червей” Х. Саяма (“*Self-replicating worms*”)[18, 19] самовоспроизводящиеся автоматы представлены линейными структурами, перемещающимися в клеточном пространстве благодаря самокопированию, и внешне напоминающими червей. Одновременно с перемещением происходит и самовоспроизведение автомата. При этом непрерывно с “хвоста” червя начинается кодирование генотипа, определяющего его будущую форму. Генотип передается в “голову” червя и используется им при формировании потомка. Реализации модели выполнены для случаев двумерного и трехмерного клеточного пространства.

3. Модели, исследующие динамику систем “на границе порядка и хаоса”

Данное направление связано с развитием нелинейной динамики, в частности, обнаружением явления детерминированного хаоса, когда функция, имеющая детерминированное несложное аналитическое описание при изменении управляющего параметра через удвоение периода порождает полностью непериодические непредсказуемые последовательности [58]. Такой функцией может быть логистическое отображение $x_{n+1} = r(N - x_n)$.

Здесь и далее под хаосом будем понимать максимально неупорядоченное состояние, при этом отсутствует как пространственная, так и временная и функциональная упорядоченность. Хаос фактически является необходимым условием процессов самоорганизации, так как хаос обеспечивает генерацию разнообразных вариантов структур и их эволюцию, он же является источником сложности. В свою очередь, результатом деятельности открытых самоорганизующихся структур является отвод ими энтропии во внешнюю среду, то есть генерация хаоса.

Исследование явлений на границе порядка и хаоса важно с точки зрения теории вычислений, так как предполагается, что сложные вычисления может производить система, обладающая в свою очередь сложным поведением [23].

Термин “на границе порядка и хаоса” (“*at the edge of chaos*”) был впервые употреблен в отношении обнаруженного К.Г. Лангтоном режима функционирования клеточных автоматов, переходного между упорядоченным поведением и хаотическим. Рассматривая клеточный автомат в одномерном пространстве, Лангтон ввел параметр $0 \leq \lambda \leq 1$ [16, 20-23], характеризующий долю правил перехода автомата, переводящих клетку в состояние покоя. Этот параметр имеет критическое значение λ_c , при достижении которого поведение автомата может рассматриваться как переходное от хаоса к порядку. Модели с $\lambda = \lambda_c$ были охарактеризованы Лангтоном как приблизительно соответствующие 4 классу клеточных автоматов по классификации С. Вольфрама [59, 60]. Однако предположение К.Г. Лангтона о том, что величина λ может служить универсальной мерой сложности поведения автомата, было поставлено под сомнение в работах М.Митчелл и соав-

торов [23], так как не подтвердилось в ходе экспериментов [23].

К исследованиям динамики систем “на границе порядка и хаоса” можно отнести и проведенное С.А. Кауффманом изучение поведения НК-автоматов [6-10]. НК-автомат состоит из N элементов, каждый из которых имеет один выход и в среднем K ($K < N$) входов, соединяющих автомат с выходами других элементов. Связи между элементами устанавливаются случайно. Элементы вычисляют булевы функции, входные значения также являются булевыми величинами.

Так как все элементы связаны между собой, система замкнута, и множество значений входов конечно и ограничено, в процессе функционирования автомата последовательности его состояний начинают повторяться, что соответствует выходу системы на аттрактор (в данном случае предельный цикл). В ряде случаев длина цикла аттрактора либо длина последовательности состояний, предшествующей выходу на аттрактор, могут быть бесконечно большими, что можно рассматривать как свидетельство хаотического поведения.

Кауффман выявил параметр, который определяет тип поведения автомата: упорядоченное, хаотическое либо “на границе порядка и хаоса”. Этим параметром является среднее количество входов K . При $K > 2$ наблюдается хаотическое поведение автомата, при $K < 2$ – упорядоченное. Поведение автомата при $K = 2$ Кауффман охарактеризовал как поведение на границе порядка и хаоса, так как оно в целом устойчиво к незначительным изменениям, только некоторые из них приводят к смене аттрактора.

Исследования Кауффмана позволили понять процесс образования регуляторных систем, в том числе генетических [6-10].

В отличие от предыдущих моделей, в модели К. Канеко рассматривается переход от порядка к хаосу (“*to the edge of chaos*”), то есть от единообразия к многообразию [24]. Изначальной целью исследования было моделирование эволюции пения птиц. Птица со сложной песней обладает более сильными позициями при защите своей территории, при этом важны способности птицы к имитации чужих песен. Песня птицы моделируется последовательностью значений функции, которую можно рассматривать как модификацию логистического отображения, при этом учитываются начальные условия. В системе, содержащей N имитирующих

друг друга птиц, присутствуют глобальные взаимодействия, и ее эволюция проходит последовательно через следующие фазы: фаза когерентности; фаза упорядоченности; фаза частичной упорядоченности; турбулентность. Автор вводит понятие *гомеохаоса* (*homeochaos*) – механизма обеспечения разнообразия и динамической стабильности, поддерживаемой слабым хаосом высокой размерности. Также предлагается концепция *открытого хаоса* (*open chaos*), необходимого для создания нестабильности в динамической системе с увеличивающимся числом степеней свободы.

Результаты исследования позволяют понять такие процессы, как детерминация и специализация клеток в живом организме, образование новых видов в экологических системах.

4. Модели эволюции индивидуальных стратегий поведения

Целью моделей данного класса является исследование процессов формирования индивидуальных стратегий сложного адаптивного поведения автономных мобильных агентов, исходя из текущего состояния окружения и собственных целей и мотиваций агента, которые могут изменяться с течением времени. Агенты могут быть реализованы как программно, так и физически, т.е. аппаратно-программно. Часто по отношению к агентам в таких моделях используют термин *анимат* (*animal+robot*, робот-животное).

В программных моделях рассматриваемого класса создается некоторая искусственная среда, фактически искусственный мир, для которого задаются начальные условия и законы существования и развития. Мир населяется искусственными существами, в роли которых выступают программные агенты. Агенты имеют запас внутренней энергии, которую они тратят на выполнение различных действий, и восполняют путем совершения действий-аналогов питания. Как правило, агенты располагают сенсорной системой (например, цветовым зрением в модели “*Polyworld*” [8-10,27]) и нейросетью. Агент может совершать некоторые простейшие действия, например, перемещаться, нападать, сражаться, воспроизводить потомство. Задача агента состоит в том, чтобы выжить самому и оставить как можно большее количество потомков.

Адаптация агента к внешней среде происходит в процессе взаимодействия с находящимися

в ней объектами, которые могут, как способствовать удовлетворению текущих потребностей агента, так и препятствовать этому или даже угрожать существованию агента.

Типичными представителями программных моделей данного класса являются модель “*Evolutionary Reinforcement Learning*” (ERL) [9,10,25,26], демонстрирующая связь эволюции и обучения (в биологии это явление известно как *эффект Болдуина* [61]), модель “*Polyworld*” [8-10, 27], модель “*Кузнечик*” [9, 10].

Сходные принципы используются в аппаратно-программных моделях самообучающихся роботов (физических агентов) [28, 29], основное отличие состоит в том, что обучение проводится в условиях реального мира. Следствием этого является больший по сравнению с программными моделями объем информации, поступающей к роботу от внешней среды. Отсюда особое значение получают методы и средства получения и обработки сенсорной информации.

5. Модели формирования коллективного поведения

С помощью этих моделей исследуются процессы образования коллектива, действующего как разумное целое, на основе исходного множества несложных неинтеллектуальных агентов с простыми программами поведения. Агенты зачастую действуют асинхронно, общаясь друг с другом не непосредственно, а лишь через информационные метки. Разумность, целенаправленность и слаженность поведения коллектива возникают как системный эффект, никаких явных правил в моделях не задается. Иногда в отношении явлений, наблюдаемых в компьютерных моделях этого класса, используют понятие роевого интеллекта (“*swarm intelligence*”). Задачи, решаемые с помощью моделей данного класса, близки к задачам теории оптимизации и искусственного интеллекта.

К данному классу отнесены модель образования стай “*Boids*” К.У. Рейнольдса [30] и модели “муравейников” [31-36].

Модель “*Boids*” [30] (от “*flocking birds*”, стая птиц) описывает образование согласованно перемещающихся коллективов элементарных агентов, каждый из которых определяет параметры своего движения (направление движения, угол поворота, скорость) исходя из информации о по-

ложении в пространстве ближайшего к нему соседа так, чтобы оказаться как можно ближе к соседу, но не столкнуться с ним. В результате особи, находящиеся на периферии стаи, тяготеют к ее центру, и стая не распадается. Образовавшаяся стая действует как единый организм, обладающий собственным разумным поведением. Стая способна огибать препятствия, избегать хищников, изгонять чужака, вторгшегося на ее территорию. “*Boids*” является примером модели с когерентным типом самоорганизации.

Модели “муравейников” довольно многочисленны [31-36]. “Муравейник” представляет собой сообщество простых автоматов (“муравьев”), которые могут перемещаться в пространстве, реагируют на аналоги феромонов (в модели *MANTA* используется понятие “стимулы”) и сами могут оставлять феромонные метки для других муравьев. Метки могут быть как постоянными, так и постепенно исчезающими (это соответствует ослаблению “стимула”). Как правило, основной задачей индивидуального “муравья” является отыскание пищи.

Цели создания моделей “муравейников” могут быть различными.

В модели *ACO* (“*Ant Colony Optimization meta-heuristic*”, метаэвристическая оптимизация на основе колонии муравьев) [31] целью является отыскание пути в графе, отвечающего заданным критериям оптимальности. Модель имеет многочисленные практические применения, например, для решения задач маршрутизации в глобальных компьютерных сетях [32]. Существуют и другие оптимизационные модели, подобные *ACO* [33].

Модель *MANTA* [34-36] (“*Modelling an ANThest Activity*”, моделирование деятельности муравьиной колонии) описывает процесс образования колонии муравьев *Ectatomma ruidum*, фактически - примитивный социогенез: образование общества агентов, каждый из которых специализируется на выполнении определенного круга задач. При этом определяющую роль в социогенезе и возникновении разделения труда играет поведение отдельных агентов, никаких явных иерархических связей в модели не задается.

6. Модели эволюционного морфогенеза и искусственного эмбриогенеза

Рассматриваемые в этом подразделе модели происходят не от *RD*-модели морфогенеза

А.М. Тьюринга [62], которая используется при описании процессов морфогенеза в химических и биологических системах, а от *L*-систем А. Линденмайера [37, 38] и моделей фрактальной геометрии. Большинство рассматриваемых далее визуальных моделей морфогенеза ставят целью описание эволюции несложных дискретных структур, часто самоподобных. Первыми моделями подобного рода стали визуальные модели растений А. Линденмайера и П. Прусинкевича [37, 38].

Широкую известность получила модель “*Biomorphs*” Р. Докинза [39]. Докинз показал, что с помощью простого алгоритма и малого количества искусственных генов могут быть построены сложные и непохожие друг на друга структуры, происходящие от общего примитивного предка - графической точки. Фенотип искусственных организмов рассчитывается по фракталоподобной схеме на основе параметров, задаваемых генотипом. С течением поколений на основе генотипа предка по определенным правилам формируются организмы, состоящие из *Y*-образных сегментов. Незначительные вариации генотипа приводят к широкому разнообразию формирующихся структур, которые напоминают деревья, людей, животных, насекомых или даже буквы латинского алфавита.

В работе К. Симса [40] рассматривается модель построения трехмерных изображений из элементарных стандартных блоков на основе графовой структуры, закодированной в генотипе. Выполнение генетических операций над графовой структурой приводит к изменению внешнего вида искусственной особи. Помимо внешнего вида, генотип задает также систему управления искусственного существа: нейросеть, сенсоры и эффекторы. Эволюция происходит в заданной трехмерной среде. Отличительной чертой модели К. Симса является то, что она описывает эволюцию типа “тело-мозг”.

Модель “*Framsticks*” [41] основана на сходных принципах и рассматривает эволюцию особей, представляющих собой набор соединенных между собой палочковидных органов: туловища, конечностей, рецепторов, эффекторов. Существа могут иметь нейросеть, которая способна развиваться и совершенствоваться в ходе эволюции. Внешний вид и основные возможности особи определяются ее хромосомой, задаваемой на специальном языке в виде спиновой структуры. Особи существуют и эволю-

ционируют в средах с разными моделируемыми физическими характеристиками, например, в воде и на суше.

В работе К.О. Стенли и Р. Мииккулайнена [42] было предложено выделить в отдельное направление эволюционных вычислений эволюционный эмбриогенез, рассматривающий фенотип как результат фазы развития из малой начальной структуры. При этом были выделены следующие основные подходы искусственного эмбриогенеза:

- грамматический (высокоуровневый, основанный на *L*-системах);
- клеточной химии (низкоуровневый, вдохновленный *RD*-моделью Тьюринга, хотя и не являющийся ее воплощением);
- гибридный.

Подход клеточной химии близок к моделям искусственной химии, которые будут рассмотрены в дальнейшем.

7. Модели эволюционирующего и самоорганизующегося аппаратного обеспечения

К этому классу отнесена модель эволюционной разработки схемных решений, предложенная А. Томпсоном [43, 44]. Томпсон рассматривал задачу “выведения” новых электронных устройств с помощью эволюции без наложения каких-либо предварительных ограничений на структурные свойства схемы.

В качестве среды, в которой протекала эволюция, были использованы *FPGA* (“*Field Programmable Gate Array*”, электрически программируемая матрица вентиляей). *FPGA* представляет собой интегральную схему, состоящую из множества логических элементов. Связи между элементами не являются жесткими, а устанавливаются программно. Таким образом, каждый элемент можно рассматривать как ген, а всю логическую схему - как хромосому.

В эксперименте Томпсона все ограничения на структуру результирующей схемы были сняты, более того, *FPGA* можно было рассматривать как аналоговое устройство. В итоге была получена работоспособная, состоящая из минимального числа логических элементов, но совершенно нетривиальная по своим структурным свойствам схема [44]. К сожалению, полученные в результате опытов Томпсона схемы

оказались очень чувствительными к изменению внешних условий, в частности, температуры, что ограничивает возможность их применения.

В качестве примеров моделей самоорганизующегося аппаратного обеспечения можно также привести модели самособирающихся роботов [45, 46], разработки в области химических вычислений [47], основанные на *RD*-модели Тьюринга или реакции Белоусова-Жаботинского.

8. Модели искусственной химии: история и отличительные особенности

Принципы искусственной химии как направления исследований были сформулированы в работе У.Фонтана [48], предложившего концепцию “алгоритмической химии” (“*Algorithmic Chemistry*”), сокращенно “*AlChem*”. Сам термин “искусственная химия” появился впоследствии, отражая связь с теорией искусственной жизни и проблемой происхождения жизни.

Модель искусственной химии определяется в [12] как тройка вида (S, R, A) , где S - множество возможных типов молекул, R - набор правил столкновения, представляющих взаимодействие между молекулами, A - алгоритм, описывающий камеру химического реактора, то есть пространственную область, в которой происходят реакции, и то, как применяются правила к молекулам внутри химического реактора.

Цель искусственной химии изначально формулировалась как построение абстрактной теории систем, описывающей любые процессы, в которых происходит образование, расхождение или распад взаимодействующих компонентов (молекул) [48, 49]. При этом особый интерес представляют динамические системы, в которых могут происходить акты творчества: появление новых структур, не предусмотренных изначальными правилами [48].

Методы и средства искусственной химии сходны с генетическим программированием, причем как на основе ЛИСП-подобных древовидных структур (λ -исчисление) [63, 64], так и ассемблероподобных линейных (μ -исчисление) [65]. Отличие состоит в том, что в генетическом программировании программа рассматривается как хромосома, к которой применяются типичные операции эволюционных вычислений и генети-

ческих алгоритмов: скрещивание, мутация, селекция. В случае же искусственной химии программа рассматривается как молекула (не обязательно ДНК), которая может участвовать в достаточно широком спектре реакций с другими молекулами. При этом в модели в явном виде может отсутствовать реакция саморепликации [50].

Для моделей искусственной химии характерно то, что сама молекула одновременно является и объектом, и правилом реакции, то есть присутствует единство вычисляемой функции и символической последовательности, ее представляющей. В сущности, модели искусственной химии можно рассматривать как грамматики [48, 50, 51], некоторые из них близки к клеточным автоматам [51].

В дальнейшем здесь мы будем выделять следующие подклассы моделей искусственной химии:

- классические модели [48-51];
- модели сообществ эволюционирующих ассемблерных программ [2, 12, 52-57];
- прочие модели, которые далее рассматриваться не будут.

Более полный обзор и подробную классификацию моделей искусственной химии, отличную от приведенной здесь, можно найти в [12].

8.1. Классические модели

В наиболее общем виде цель классических моделей искусственной химии состояла в построении конструктивной теории систем, которая бы допускала появление новизны: новых состояний и объектов, заранее не определенных исходными правилами взаимодействия [48-50].

Чтобы построить такую теорию, предлагалось рассматривать не переходы от состояния к состоянию, а движение от одного множества молекул к другому [49]. Так же, как в классическом анализе, аттракторы играют важную роль при изучении динамики, причем одни аттракторы более важны, чем другие, так и в конструктивной теории систем одни множества молекул признаются более важными, чем другие [49].

Для отыскания этих множеств были введены понятия замыкания, самоподдерживающегося множества, полуорганизации, поддержания массы и организации [49, 50].

Также вводятся и рассматриваются понятия систем реакций различных видов: каталитиче-

ских потоковых, реакционных потоковых, устойчивых, общих. Рассматриваются организации систем реакций, а также движение во множестве организаций, причем фиксированные точки также являются организациями.

К сожалению, действенную конструктивную теорию систем, в которой возможно возникновение новых, изначально не заданных правилами структур, построить пока не удалось. Однако не исключено, что дальнейшее развитие идей, предложенных в работах [48-50], способно привести к этому.

8.2. Модели сообществ эволюционирующих ассемблерных программ

В моделях этого подкласса рассматриваются уже не отдельные молекулы, а молекулярные организмы, обладающие запасом внутренней энергии и способные к саморепликации. Непосредственным предшественником моделей этой группы считается игра “*Core Wars*” (“бои в памяти”) на базе программы “*MARS*” (“симулятор ассемблера Redcode в пространстве памяти”) [12, 57].

Первой моделью теории искусственной жизни, в которой исследовались сообщества эволюционирующих программ на упрощенном ассемблероподобном коде, была модель С. Расмуссена “*Coreworld*” (“мир в памяти”) на базе программы “*VENUS*” (“виртуальная эволюция в модели не стохастической вселенной”) [2, 12]. В этой модели самокопирующиеся программы не имели границ расположения в памяти, а потому могли взаимно друг друга затирать, в результате чего популяция быстро погибала [52, 57].

Наиболее характерными и известными представителями моделей данной группы являются “*Tierra*” [2, 52, 53] и “*Avida*” [54-57], реализуемые одноименными компьютерными программами. В них исследуется эволюция ассемблерных программ, исполняемых виртуальной ЭВМ. Язык ассемблера, на котором пишутся программы, является усеченным и распознается только виртуальной ЭВМ, а не реальным процессором, что является гарантией безопасности моделей данной группы. Виртуальная ЭВМ - это программа, моделирующая виртуальный процессор, нескольких внутренних регистров и стеков, а также буферы ввода-вывода.

Модель “*Tierra*” первоначально создавалась с целью исследования принципов динамики, присущих биологическим системам, и явлений, возникающих в биологических системах, например, “кембрийского взрыва” разнообразия видов. Отличительной чертой модели “*Tierra*” является *инстанцирование*, т.е. структуры, присутствующие в модели, рассматриваются как живые организмы и представляют самих себя, а не являются модельными аналогами других объектов [52].

В качестве аналога энергии, необходимой организмам для существования, то есть выполнения, в “*Tierra*” рассматривается процессорное время, источником энергии является центральное процессорное устройство виртуальной машины. Время жизни организмов определяется, с одной стороны, их возрастом и населенностью пространства модели, а с другой стороны, количеством ошибочно выполненных инструкций. При очередном неправильном выполнении инструкции организм штрафует путем перемещения к началу очереди организмов, подлежащих уничтожению.

Набор ассемблерных команд, составляющих молекулярный организм, рассматривается как генотип, подверженный действию генетических операций, в первую очередь, спонтанных мутаций при размножении, перестановок команд, обмена участками кода с какими-либо другими программами, не обязательно соседними (аналог примитивного полового процесса у бактерий). В результате дочерняя программа может отличаться от программы-предка и выполнять операции, ранее не свойственные ее родителю.

При экспериментах с “*Tierra*” наблюдались следующие эффекты:

- эволюция организмов в сторону уменьшения количества команд под воздействием естественного отбора;
- видообразование с формированием экологических систем, состоящих из хозяев, паразитов и гиперпаразитов;
- возникновение аналогов полового размножения;
- симбиоз.

В отличие от “*Tierra*”, цели создания модели “*Avida*” не связаны с биологическими исследованиями. “*Avida*” предназначена для исследования процессов эволюции в сторону увеличения сложности в информационно-наполненной среде [56]. С помощью “*Avida*”

делается попытка формирования популяции цифровых организмов, способных производить полезные с точки зрения экспериментатора вычисления, в частности, вычислять логически функции. Цифровые организмы в “*Avida*” устроены проще, чем в “*Tierra*”, фактически, они сохранили только главное свойство: способность к самокопированию.

В модели “*Avida*” молекулярный цифровой организм снабжается счетчиком внутренней энергии, который переводится в единицы процессорного времени. Значение счетчика увеличивается при выполнении “полезных” вычислений (логических операций). Организмы, обладающие меньшей энергией, не успевают размножиться, гибнут и не передают свой генотип потомству. Фактически, организмы должны “открывать” информацию [56], и только те, кому это удастся, выживают и размножаются.

Общим интересным свойством моделей “*Tierra*” и “*Avida*” является непосредственная связь между пространством-временем и энергией: чем больше у организма энергии, тем большее количество потомков своего вида он оставит после себя, и чем большее количество энергии принадлежит виду, тем меньше энергии, пространства и времени остается в распоряжении конкурирующих видов.

Заключение

Теория искусственной жизни, как видно из вышеизложенного, представляет собой интенсивно развивающееся направление, представленное разнообразными моделями. Настоящая работа может рассматриваться как одно из первых приближений к построению общей классификации моделей данного направления.

В настоящей работе особое внимание было уделено моделям искусственной химии, в особенности классическим моделям и моделям сообществ эволюционирующих ассемблерных программ. По мнению автора, модели этих групп особенно важны для последующего развития теоретической информатики и теории программирования. Результаты исследований в этих направлениях позволят, во-первых, создать аналог термодинамики для информационных процессов в компьютерных системах, во-вторых, перейти к созданию систем обработки информации на основе процессов самоорганизации.

Первая из выделенных задач будет решена

еще не скоро, так как потребуется введение аналогов физических величин, таких как энергия, работа, температура и т.д. Однако результаты работы автора в направлении решения второй задачи, создания самоорганизующихся программных систем, можно найти в [66-68].

Литература

1. Langton C.G. Artificial Life//Artificial Life - Vol. IV of Santa Fe Institute Studies in Science of Complexity. - Reading, MA: Addison-Wesley, 1988. - Pp. 1 -47.
2. Эвери Д. Теория информации и эволюция.- М.-Ижевск: НИЦ “Регулярная и хаотическая динамика”, Институт компьютерных исследований, 2006. - 252 с.
3. Опарин А.И. Происхождение жизни.- М.: Воениздат, 1959.- 132 с.
4. Эйген М., Шустер П. Гиперцикл: принципы самоорганизации молекул. - М.: Мир, 1982.- 272 с.
5. Нейман, Дж. фон. Теория самовоспроизводящихся автоматов: Пер. с англ. - М.:Мир, 1971.- 382 с.
6. Kauffman S.A. The Origin of Order: Self-Organization and Selection in Evolution.-New York-Oxford: Oxford University Press, 1993.- 710 p.
7. Кауфман С.А. Антихаос и приспособление//В мире науки.-№10, 1991.- С. 58-65.
8. Редько В.Г. Эволюционная биокбернетика //Компьютерра.- №11 [289] от 16 марта 1999.- С. 27-31.
9. Редько В.Г. Эволюционная кибернетика.- М.: Наука, 2001.- 156 с.
10. Редько В.Г. Эволюция, нейронные сети, интеллект: Модели и концепции эволюционной кибернетики/ Предисл. Г.Г. Малинецкого .- Изд. 4-е, стереотипное.М.: КомКнига, 2006. - 244 с.
11. Bedau M.A., McCaskill J.S., Packard N.H., Rasmussen S., Adami C., Green D.G., Ikegami T., Kaneko K., Ray T.S. Open Problems in Artificial Life// Artificial Life. - Vol. 6 (No. 4), 2000.- Pp. 363-376.
12. Dittrich P., Ziegler J., Banzhaf W. Artificial Chemistries - A Review//Artificial Life.- Vol. 7(No. 3), 2001. - Pp. 225-275.
13. Stanley K.O., Miikkulainen R. A Taxonomy for Artificial Embryogeny//Artificial Life.- Vol. 9 (No. 2) , 2003.- Pp. 93-130.
14. Taylor C., Jefferson D. Artificial Life as a Tool for Biological Inquiry//Artificial Life: an overview/ edited by Christopher G. Langton. – Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 1997. – Pp 1-13.
15. Pesavento U. An Implementation of von Neumann’s Self-Reproducing Machine //Artificial Life.- Vol. 2 (No. 4), 1995.-Pp. 337-354
16. Langton C. G. Studying Artificial Life with Cellular Automata// Physica D: Nonlinear Phenomena.- Vol. 22 (Iss. 1-3), 1986.-Pp. 120-149.
17. Perrier J.-Y., Sipper M., Zahnd J. Toward a Viable, Self-Reproducing Universal Computer//Physica D: Nonlinear Phenomena. - Vol. 97 (Iss. 4), 1996.- Pp. 335–352.
18. Sayama H. Self-replicating Worms that Increase Structural Complexity Through Gene Transmission//Artificial Life VII: Proceedings of the Seventh International Conference on Artificial Life. Eds. Bedau M. A., McCaskill J. S.,

- Packard N. H., Rasmussen S.- Portland, Oregon: MIT Press, 2000. - Pp. 21-30.
19. Sayama H. A New Structurally Dissolvable Self-Reproducing Loop Evolving in a Simple Cellular Automata Space//Artificial Life.- Vol. 5 (No. 4), 1999.- Pp. 343-365.
 20. Langton C.G. Computation at the Edge of Chaos: Phase Transitions and Emergent Computation// Physica D: Nonlinear Phenomena. – Vol. 42 (Iss.1-3), 1990. – Pp. 12-37.
 21. Li W., Packard N., Langton, C.G. Transition Phenomena in Cellular Automata Rule Space// Physica D: Nonlinear Phenomena. - Vol. 45 (Iss. 1-3), 1990. - Pp. 77-94.
 22. Mitchell M. Computations in Cellular Automata: A Selected Review// Gramss T., Bornholdt S., Gross M., Mitchell M., Pellizzari T. Nonstandard Computation. - Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft, 1998. - Pp. 95-140.
 23. Mitchell M., Hraber P.T., Crutchfield J.P. Revisiting the Edge of Chaos: Evolving Cellular Automata to Perform Computations //Complex Systems.- Vol. 7, 1993.- Pp. 89-130.
 24. Kaneko K. Chaos as a Source of Complexity and Diversity in Evolution//Artificial Life: an overview/ edited by Christopher G. Langton. – Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 1997. – Pp. 163-177.
 25. Ackley D. H., Littman M. L. Interaction Between Learning and Evolution. // Artificial Life II, SFI Studies in the Sciences of Complexity, vol. X, edited by C.G. Langton, C. Taylor, J.D. Farmer, S. Rasmussen. - Redwood City, CA: Addison-Wesley, 1991. - Pp. 487-509.
 26. Mitchell M., Forrest S. Genetic Algorithms and Artificial Life//Artificial Life.-Vol. 1 (No. 3), 1994.-Pp. 267-289.
 27. Yaeger L.S. Computational Genetics, Physiology, Metabolism, Neural Systems, Learning, Vision and Behavior or Polyworld: Life in a New Context// Proceedings of Artificial Life III. Ed. Langton C.G.- Vol.XVII.- Redwood City, CA: Addison-Wesley, 1994.-Pp. 263-298
 28. Mondada F., Floreano D. Evolution and Mobile Autonomous Robotics//Towards Evolvable Hardware; The Evolutionary Engineering Approach. Eds. Sanchez E. Tomassini M. - Berlin: Springer-Verlag, 1996.- Pp. 221-249.
 29. Steels L. The Artificial Life Roots of Artificial Intelligence//Artificial Life: an overview/ edited by Christopher G. Langton. – Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 1997. – Pp. 75-110.
 30. Reynolds C. W. Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model// Computer Graphics (SIGGRAPH '87 Conference Proceedings).- Vol. 21, No. 4. - New York: ACM Press, 1987.- P. 25-34.
 31. Dorigo M., Di Caro G. The Ant Colony Optimization Meta-Heuristic/ New Ideas in Optimization. Eds. Corne D., Dorigo M., Glover F.- London: McGraw-Hill,1999.- Pp. 11-32.
 32. Di Caro G., Dorigo M. Mobile Agents for Adaptive Routing// Proceedings of the 31st Hawaii International Conference on Systems.- Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society Press,1998.- Pp. 74-83.
 33. Svenson P., Sidenbladh H. Determining Possible Avenues of Approach Using ANTS// 6th International Conference on Information Fusion.- Cairns, Australia, 2003.-Pp. 1110-1117.
 34. Drogoul A., Ferber J. From Tom-Thumb to Dockers: Some Experiments with Foraging Robots//From Animals to Animals II.- Cambridge: MIT Press, 1993. - Pp. 451-459.
 35. Drogoul A., Corbara B., Lalande S. MANTA: New Experimental Results on the Emergence of (Artificial) Ants Societies// Artificial Societies: the Computer Simulation of Social Life. Eds. Gilbert N., Conte R.- London: UCL Press, 1995.- Pp.190-211.
 36. Drogoul A. When Ants Play Chess (Or Can Strategies Emerge from Tactical Behaviours?)//From Reaction to Cognition. Fifth European Workshop on Modelling Autonomous Agents in a Multi-Agent World, “MAAMAW”-93 (LNAI Volume 957). Eds. C. Castelfranchi and J.-P. Muller. - Heidelberg:Springer-Verlag,1995.- Pp.13-27.
 37. Prusinkiewicz P., Lindenmayer A. The Algorithmic Beauty of Plants [Электронный документ].- Режим доступа: <http://algorithmicbotany.org/papers/abop/abop.pdf> (дата обращения 12.10.2012).
 38. Prusinkiewicz P. Visual Models of Morphogenesis//Artificial Life: an overview/ edited by Christopher G. Langton. – Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 1997. – Pp. 61-74.
 39. Dawkins R. Evolution of Evolvability// Artificial Life, ed. by C. Langton, 201. Santa Fe Institute Studies in Science of Complexity Proc. Vol. VI.- Redwood City, CA:Addison-Wesley, 1988.- Pp. 201-220.
 40. Sims K. Evolving Virtual Creatures// Proceedings of SIGGRAPH'94: Orlando, Florida, July 24-29.- Vol. 26.- New York:ACM Press,1994.-Pp.15-22.
 41. Komosinski M., Ulatowsky Sz. Framsticks: Towards a Simulation of a Nature-like World, Creatures and Evolution//Proceedings of 5th European Conference on Artificial Life (ECAL99). September 13-17, 1999, Lausanne, Switzerland. (LNAI 1674).-Heidelberg: Springer-Verlag, 1999. - Pp. 261-265.
 42. Stanley K.O., Miikkulainen R. A Taxonomy for Artificial Embryogeny//Artificial Life .- Vol. 9 (No. 2), 2003.- Pp. 93-130.
 43. Thompson A. An evolved circuit, intrinsic in silicon, entwined with physics//Proceedings of The First International Conference on Evolvable Systems: From Biology to Hardware (ICES96), Lecture Notes in Computer Sciences. Eds. Higuchi T., Iwata M. et al. -Vol. 1259. -Heidelberg: Springer-Verlag, 1997.- Pp. 390-405.
 44. Левкович-Маслюк Л. Он пришел дать им волю//Компьютерра.-№11 [289] от 16 марта 1999.- С. 24-36.
 45. Mondada F., Gambardella L.M., Floreano D., Nolfi S., Deneubourg J-L., Dorigo M. The Cooperation of Swarmbots: Physical Interactions in Collective Robotics// IEEE Robotics & Automation Magazine.- Vol. 12 (No 2), 2005. -Pp.21-28.
 46. Miyashita S., Casanova F., Lungarella M., Pfeifer R. Peltier-Based Freeze-Thaw Connector for Waterborne Self-Assembly Systems [Электронный документ].- Режим доступа: <http://www.intechopen.com/books/cutting-edge-robotics-2010/peltier-based-freeze-thaw-connector-for-waterborne-self-assembly-systems> (дата обращения 13.10.2012).
 47. Asai T., De Lacy Costello B., Adamatzky A. Silicon Implementation of Chemical Reaction-Diffusion Processor for Computation of Voronoi Diagram//International Journal of Bifurcation Chaos. – Vol. 5 (No. 10), 2005. - Pp. 3307-3320.

48. Fontana W. Algorithmic Chemistry// Artificial Life II, SFI Studies in the Sciences of Complexity, vol. X, edited by C.G. Langton, C. Taylor, J.D. Farmer, S. Rasmussen.- Redwood City, CA: Addison-Wesley, 1991.-Pp. 159-209.
49. Dittrich P., Speroni di Fenizio P. Chemical organization theory: towards a theory of constructive dynamical systems// Bull. Math. Biol. - Vol. 69(No. 4), 2007. - Pp. 1199-1231.
50. Fontana W., Wagner G., Buss L.W. Beyond Digital Naturalism//Artificial Life: an overview/ edited by Christopher G. Langton. – Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 1997. – Pp. 211-227.
51. Hutton T.J. Evolvable Self-Reproducing Cells in a Two-Dimensional Artificial Chemistry// Artificial Life .-Vol. 13 (No. 1), 2007.- Pp 11-30.
52. Ray T.S. An Evolutionary Approach to Synthetic Biology: Zen and the Art of Creating Life//Artificial Life: an overview/ edited by Christopher G. Langton. – Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 1997. – Pp. 179-209.
53. Thearling K., Ray T. S. Evolving Multi-Cellular Artificial Life// Artificial Life IV, Proceedings of the Forth International Workshop on Synthesis and Simulation of Living Systems . Eds. R.A. Brooks, P. Maes. - Cambridge, MA: MIT Press, 1994.- Pp. 283-288.
54. Adami C. Sequence Complexity in Darwinian Evolution// Complexity.- Vol. 8, No. 2.- Wiley Periodicals, Inc., 2003.- Pp. 49-56.
55. Adami C. On Modelling Life//Artificial Life IV, Proceedings of the Forth International Workshop on Synthesis and Simulation of Living Systems . Eds. R.A. Brooks, P. Maes. - Cambridge, MA: MIT Press, 1994. - Pp. 269-276.
56. Adami C., Brown T. Evolutionary Learning in the 2d Artificial Life System “Avida”//Artificial Life IV, Proceedings of the Forth International Workshop on Synthesis and Simulation of Living Systems . Eds. R.A. Brooks, P. Maes.- Cambridge, MA: MIT Press, 1994. - Pp. 377-381.
57. Adami C. Ab Inito Modelling of Ecosystems with Artificial Life//Natural Resource Modelling.-Vol. 15, 2002. - Pp. 133-145.
58. Малинецкий Г.Г. Математические основы синергетики. Хаос, структуры, вычислительный эксперимент. Изд. 4-е, перераб. и доп. - М. КомКнига, 2005.- 312 с.
59. Wolfram S. Universality and Complexity in Cellular Automata//Physica D: Nonlinear Phenomena.- Vol.10 (Iss. 1-2), 1984. - Pp. 1-35.
60. Современный компьютер. Сб. науч.-попул. статей. Пер. с англ./Под ред. В.М. Курочкина; Предисл. Л.Н. Королева.-М.:Мир, 1986. - 212 с.
61. Baldwin J.M. A New Factor in Evolution//American Naturalist.- Vol. 30, 1896. - Pp. 441-451.
62. Turing A.M. The Chemical Basis of Morphogenesis//Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences.- Vol. 237, No. 641(Aug 14, 1952).-Pp. 37-72.
63. Koza J. R., Bennett F. H, Andre D., Keane M. A. Genetic Programming: Biologically Inspired Computation that Creatively Solves Non-Trivial Problems// Evolution as Computation, DIMACS Workshop, Princeton, January 1999 .- Heidelberg: Springer-Verlag, 2001.-Pp. 15–44.
64. Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М. Генетические алгоритмы/Под ред. В.М. Курейчика.- 2-е изд., испр. и доп.- М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006.- 320 с.
65. Corno F., Sanchez E., Squillero G. On the Evolution of Corewar Warriors //CEC2004, Congress on Evolutionary Computation, Portland (Oregon), June 20-23, 2004.- Pp. 2365-2371.
66. Кольчугина Е.А. Структура цифрового организма в самоорганизующихся программных системах// Программные продукты и системы.- №2, 2012. – Тверь: ЗАО НИИ ЦПС, 2012.- С. 51-54.
67. Кольчугина Е.А. Неравновесное программирование// Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки.- №3(11), 2009. – Пенза: ИИЦ ПГУ, 2009.- С. 25-31.
68. Кольчугина Е.А. Результаты эксперимента по созданию эволюционирующего программного обеспечения// Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки.- №1, 2007. – Пенза: ИИЦ ПГУ, 2007.- С. 54-60.

Кольчугина Елена Анатольевна. Доцент Пензенского государственного университета. Окончила Пензенский государственный университет в 1994 году. Кандидат технических наук. Автор более 86 печатных работ. Область научных интересов: искусственная жизнь, эволюционные вычисления, параллельные вычисления, теоретические основы информатики. E-mail: kea_sci@list.ru