

УДК 004.8:57.087.1

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИСКУССТВЕННОЙ ЖИЗНИ

Додонов Н.А.

*Студент кафедры информационных систем и технологий,
Поволжский Государственный Университет Телекоммуникаций и
Информатики,
Россия, Самара.*

Лиманова Н.И.

*Д.т.н., заведующий кафедрой информационных систем и технологий,
Поволжский Государственный Университет Телекоммуникаций и
Информатики,
Россия, Самара.*

Аннотация

Статья посвящена анализу основных концептуальных и вычислительных подходов к моделированию искусственной жизни. Цель работы состоит в систематизации методов, применяемых для исследования самоорганизации, воспроизводства, адаптации и эволюции искусственных систем. Анализируются четыре основных направления моделирования: клеточные автоматы, цифровые организмы, агентное моделирование и искусственная химия. На примере систем Lenia, Tierra, Avida и Algorithmic Chemistry показаны особенности представления среды, организмов, генома, механизмов мутации, отбора и взаимодействия элементов модели. Отдельно рассмотрены российские исследования в области искусственной эволюции и самоорганизации. Проведённый обзор показывает, что рассмотренные методы существенно различаются по уровню абстракции и способу представления моделируемой системы, однако основываются на общем принципе возникновения сложного глобального поведения в результате локальных

взаимодействий элементов. Методы искусственной жизни позволяют проводить воспроизводимые вычислительные эксперименты и исследовать общие закономерности эволюции и самоорганизации независимо от конкретного биологического носителя.

Ключевые слова: Искусственная жизнь, компьютерное моделирование, самоорганизация, клеточные автоматы, цифровые организмы, агентное моделирование, искусственная химия, искусственная эволюция, эволюционное моделирование, сложные системы.

ANALYSIS OF EXISTING METHODS FOR ARTIFICIAL LIFE MODELING

Dodonov N.A.

*Student, Department of Information Systems and Technologies,
Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics,
Samara, Russia.*

Limanova N.I.

*Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Information Systems and
Technologies,
Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics,
Samara, Russia.*

Abstract

The article is devoted to the analysis of the main conceptual and computational approaches to modeling artificial life. The aim of the work is to systematize the methods used to study the self-organization and evolution of artificial systems. Four main modeling approaches are analysed: cellular automata, digital organisms, agent-based models and artificial chemistry. Using the Lenia, Tierra, Avida, and Algorithmic Chemistry systems as examples, the features of representing the environment, organisms, genome, and evolution are discussed.

Дневник науки | www.dnevniknauki.ru | СМН ЭЛ № ФС 77-68405 ISSN 2541-8327

mutation mechanisms, selection, and interaction of model elements are demonstrated. Russian research in the field of artificial evolution and self

-organization

considered differ significantly in terms of the level of abstraction and the way the modeled system is represented, but they are based on the general principle of the emergence of complex global behavior as a result of local interactions between elements. Artificial life methods make it possible to conduct reproducible computational experiments and study the general patterns of evolution and self

-organization independently of

Keywords: Artificial life, computer modeling, self organization, automata, digital organisms, agent-based modeling, artificial evolution, evolutionary modeling, complex systems.

Введение

Искусственная жизнь представляет собой междисциплинарное направление исследований, объединяющее методы информатики, биологии, математики, робототехники, химии и теории сложных систем. В отличие от традиционной биологии, преимущественно изучающей существующие формы жизни и закономерности их развития, исследования в области искусственной жизни направлены также на рассмотрение возможных принципов организации живых систем. В рамках данного направления процессы самоорганизации, воспроизводства, наследственности, изменчивости, адаптации и эволюции исследуются с помощью компьютерных программ, математических моделей, робототехнических систем и искусственно созданных химических сред [9].

Актуальность изучения методов моделирования искусственной жизни связана с необходимостью выявления общих закономерностей возникновения и развития сложных организованных систем. Искусственные модели позволяют многократно воспроизводить эволюционные процессы, изменять

Дневник науки | www.dnevniknauki.ru | СМН ЭЛ № ФС 77-68405 ISSN 2541-8327

параметры среды, наблюдать формирование устойчивых структур и анализировать влияние отдельных правил на поведение системы в целом. Подобные исследования применяются при изучении эволюционной динамики, морфогенеза, взаимодействия организмов и популяций, возникновения кооперации, специализации, адаптации и других процессов, характерных для живых систем [3].

В настоящее время для моделирования искусственной жизни используется ряд подходов, различающихся способом представления пространства, структурой моделируемых объектов, механизмами их взаимодействия и возможностями реализации наследственной изменчивости и естественного отбора. К числу наиболее распространённых методов относятся клеточные автоматы, системы цифровых организмов, агентное моделирование и искусственные химии. Каждый из данных подходов позволяет исследовать отдельные свойства живых систем, однако обладает собственными методологическими и вычислительными ограничениями. В связи с этим возникает необходимость систематизации существующих методов и сравнительного анализа областей их применения.

Целью настоящей статьи является систематизация основных подходов к моделированию искусственной жизни и сопоставление их принципов, возможностей и областей применения. Такой обзор позволяет показать общие методологические принципы различных направлений искусственной жизни и различия подходов западной и российской практики.

Принципиальные подходы к искусственной жизни

Все модели, проекты и эксперименты, ставящиеся в рамках вышеописанной дисциплины, разделяют один из двух основных подходов: сильной или слабой искусственной жизни. Это разделение возникло по аналогии с дискуссией о сильном и слабом искусственном интеллекте [12,13].

Это разделение нельзя приписать к какому-то конкретному учёному, так как такое деление возникло в ходе обсуждения работ таких учёных, как: К. Дневник науки | www.dnevniknauki.ru | СМН ЭЛ № ФС 77-68405 ISSN 2541-8327

Лэнгтона, Т. Рэя, М. Бедо, Э. Собера, Х. Патти, М. Боден, К. Эммече и других исследователей. Тем не менее, Кристофер Ленгтон сыграл важную роль в формировании философии сильной искусственной жизни, рассматривая в своих работах возможность моделирования жизни в нехимических средах [9]. Рассмотрим каждую философию по отдельности.

Философия, называемая сильной искусственной жизнью, утверждает, что при определённых условиях сложная система может быть не просто моделью жизни, но быть подлинной формой жизни. Из этого следует, что жизнь является не столько свойством конкретной углеродной биохимии, сколько совокупностью организации процессов самоорганизации, обмена, воспроизводства, адаптации и эволюционной изменчивости вне зависимости от носителя жизни. Если реализовать эти процессы с помощью любого другого носителя, компьютерной модели или роботехники, то структуры, возникающие в них, можно считать не просто моделью жизни, а жизнью как таковой. В общем смысле такую позицию можно выразить в тезисе “Жизнь какой она могла бы быть” [9, 12].

В противовес ей, слабая искусственная жизнь рассматривает вышеописанные модели и системы лишь как инструмент изучения процессов жизни. В данном подходе искусственная экосистема, модель организма или клеточные автоматы не признаются живыми, а считаются лишь полезными моделями для понимания процессов биологии. Эволюция цифровых организмов будет показывать, как накапливаются полезные мутации или как возникает специализация и само организуются организмы в виды, но сами организмы будут восприниматься только как модель. В общем смысле данная философия отвечает на вопрос “что модель может рассказать о жизни и её процессах” [3, 13].

Различия между этими двумя философиями в практической плоскости заключаются в методологическом значении. Исследователь, придерживающийся слабой позиции, стремится повысить точность модели в Дневник науки | www.dnevniknauki.ru | СМН ЭЛ № ФС 77-68405 ISSN 2541-8327

соответствии с биохимической действительностью. При сильной позиции акцентируется внимание и ресурсы на повторении каких-либо конкретных процессов жизни - стремление к само поддержанию, самоорганизация, эволюционная изменчивость и т. п. На практике исследователи искусственной жизни занимают промежуточную позицию для изучения конкретных принципов жизни независимо от биологического базиса [3, 13].

Технологии моделирования искусственной жизни

Клеточные автоматы

Одним из первых инструментов для симуляции искусственной жизни являлись клеточные автоматы. Представляли они двумерное поле, разбитое на клетки, которые в свою очередь могут находиться в конечном количестве состояний и переходить между состояниями с помощью локально заданных правил. Основная ценность клеточных автоматов - возможность исследовать как локальные правила формируют глобальный порядок в симуляции. Из-за этого данный инструмент используют для изучения морфогенеза, распространения инфекций, роста колоний микроорганизмов, образования структур минералов или организмов и принципов саморепликации.

При использовании данного инструмента исследователь должен определить ряд параметров для модели, а именно: геометрию поля (прямоугольные, гексагональные, треугольные клетки), тип окрестности поля (Неймана или Мура), режим обновления поля (синхронный или асинхронный), граничные условия и критерий оценки. Хорошо описанными являются самовоспроизводящиеся автоматы фон Неймана и “Игра жизнь” Конвея [8, 10].

Дальнейшим развитием клеточных автоматов стал отказ от дискретности. То есть создание таких автоматов, в которых пространство, время или состояние могут быть непрерывными. Примером таких автоматов является проект Берта Ван-Чака Чана - Lenia, непрерывное обобщение идей “Игры жизнь” Конвея. Вместо дискретных состояний, “живой” и “мёртвый”, Дневник науки | www.dnevniknauki.ru | СМИ ЭЛ № ФС 77-68405 ISSN 2541-8327

используется диапазон состояний между этими крайними значениями, а модель обновляется итерационно, а окрестность модели представляет окрестность (Рис 1) [6].

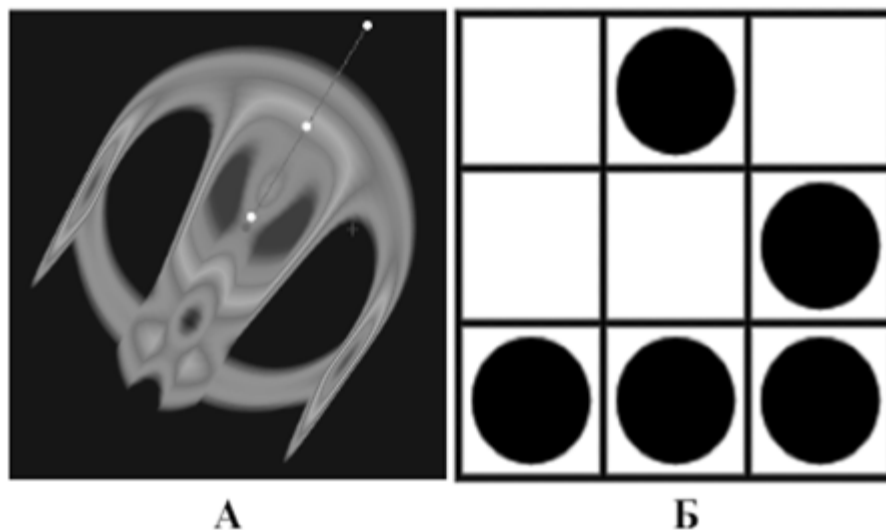


Рис. 1 - Пример планера из (А) Lenia и (Б) Game of Life

Цифровые организмы и самописный код

Цифровые организмы - это программы или фрагменты кода, способные к само воспроизводству, изменчивости и конкуренции за вычислительные ресурсы. Их также называют самописным кодом, так как в ходе работы таких моделей, программа сама ищет наиболее эффективный набор действий для заданной среды обитания. Важными компонентами этого подхода являются - язык генома, система интерпретации генома, механизмы копирования, параметры мутации, ограничения ресурсов и правила отбора.

Главное преимущество - понятность генома организмов создателю, доступ ко всей истории эволюции в модели, благодаря чему можно воссоздать все родословные линии, измерить частоту мутаций, сравнить успешные и неуспешные геномы и на основе всего вышесказанного проверить, какие мутации обеспечили конкурентное преимущество.

Существует два основных проекта, использующих концепции цифровых самописных организмов, это Tierra Томаса С. Рея и Avida Чарльза

Оффрия, К. Титуса Брауна и Кристофа Адами. Рассмотрим их по порядку появления. [11, 14]

Tierra - это абстрактная компьютерная симуляция, в которой компьютерные программы конкурируют за два основных ресурса: за время и пространство, они же время центрального процессора и доступ к оперативной памяти. Программы в модели могут мутировать в процессе само воспроизводства в памяти компьютера и рекомбинировать свой код с другими программами [14].

Базовая модель использовалась для экспериментального изучения процессов эволюционной и экологической динамики. В ходе таких экспериментов были обнаружены такие эффекты, как: прерывистое равновесие вида (отсутствие значимых генетических изменений после стабилизации вида), коэволюция пары хозяин-паразит (совместная эволюция адаптации хозяина и паразита друг к другу) и возникновения зависимость от плотности населения естественного отбора. Главным свойством такой модели является отсутствие фитнес-функции, которая бы внешне отсекала неприспособленные виды. В модели есть только выживание и смерть, как говорил автор. Интерфейс программы со списком программ и их количеством в памяти компьютера представлено на рис. 2 [14].



Рис 2 - Интерфейс программы Tierra для Windows XP

Avida - вдохновленный Tierra проект Чарльза Оффриа. Главными отличиями от Tierra были виртуальные процессоры для каждого из
Дневник науки | www.dnevniknauki.ru | СМН ЭЛ № ФС 77-68405 ISSN 2541-8327

организмов и защищенная область памяти. Скорость работы виртуальных процессоров зависела от числа логических задач, выполняемых организмом, что побуждала их оптимизировать процесс вычислений. Из-за этого за один промежуток времени, одни организмы успевали выполнить десяток операций, а другие в два и три раза больше. Интерфейс этой программы представлен на Рис. 3. В центре располагается основное поле, где цветом отмечается частота выполнений команд, по бокам дополнительная справочная информация [11].

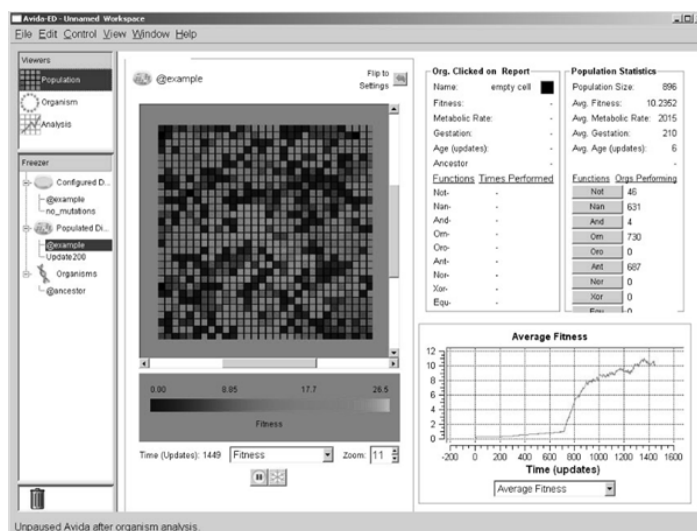


Рис 3. Интерфейс программы Avida ED

Avida использовалась во многих исследованиях, как например статья “Эволюционное происхождение сложных признаков”, где описывалось, как из простых побитовых операций возникла операция равенства, не описанная создателем с самого начала [15].

Агентное моделирование

Агентное моделирование - это подход при котором модель состоит из множества автономных объектов, обладающих состоянием, правилами поведения и механизмами взаимодействия как друг с другом, так и со средой модели - агентами. В моделях искусственной жизни агентами могут быть клетки, животные, роботы, цифровые существа или абстрактные особи. Среда может содержать различные ресурсы, отражающие аналогичные из реального

мира, такие как пища, опасности, конкурентов или изменчивые условия среды [4].

В отличие от клеточных автоматов, агентам можно задать свои уникальные свойства, память, геном и числовые параметры, такие как возраст, калории, приверженность группе и т.п. Исследователь при создании модели искусственной экосистемы задаёт агентам такие параметры как: энергию, возраст, координаты, скорость, сенсоры, правила питания, размножения и смерти. Как пример, хищник может питаться только травоядным, оно же ищет растение, а растение питается солнечным светом и минералами в почве. У каждого из них будут свои правила размножения и если исследователь захочет добавить изменчивость правил, то система станет эволюционной. Такой подход позволяет изучать устойчивость экосистем, возникновение биосферных ниш, пищевые цепочки и их кризисы, миграцию, кооперацию и конкуренцию видов [4].

Искусственная химия.

Отдельно от вышеописанных методов стоит искусственная химия. Данная группа методов опирается на принципы слабой искусственной жизни. Исследователь в таких моделях задаёт множество реальных или абстрактных молекул со своими правилами взаимодействия друг с другом. Она может быть строкой символов, графом или программой. Взаимодействия - это реакции молекул друг с другом [7].

Эта группа методов особенно важна для изучения возникновения живой материи из неживой, так как здесь не задаётся сразу уже живой организм, а лишь материя и предпосылки к организации её структур. Главная проблема таких моделей в том, что количество возможных реакций растёт быстро, а критерий жизнеспособности часто трудно определить [7].

Примером проекта искусственной химии является Algorithmic Chemistry Вальтера Фонтаны, опубликованная в 1991 году. В ней молекулы записаны как лямбда-функции, одновременно структура и правило преобразования. При Дневник науки | www.dnevniknauki.ru | СМН ЭЛ № ФС 77-68405 ISSN 2541-8327

реакции двух молекул происходит применение их правил преобразований на структуры друг друга (Рис. 4) [7].

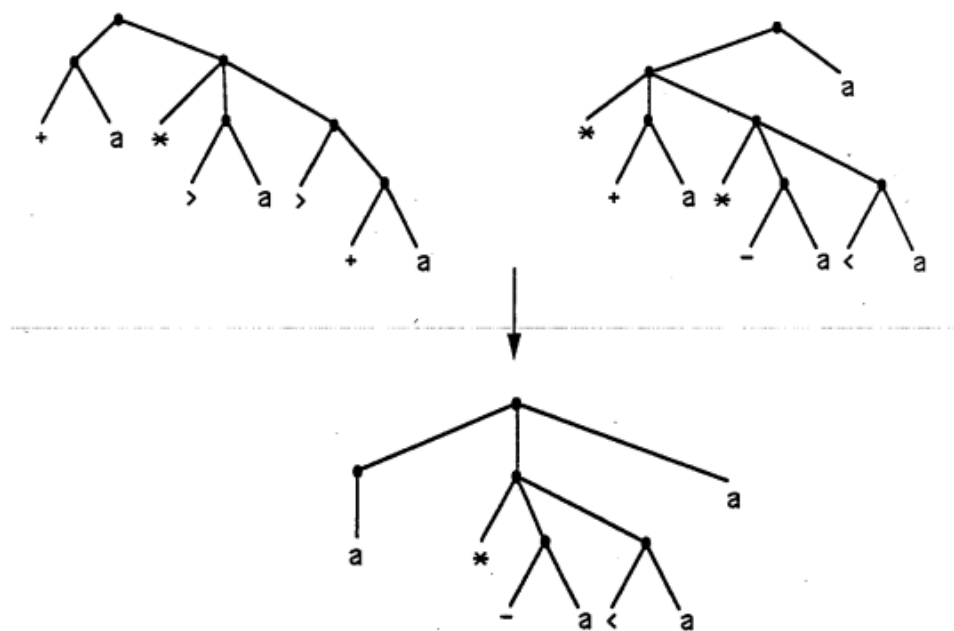


Рис. 4 - Пример реакции двух молекул в Algorithmic Chemistry

Примеры проектов России

В российской науке исследования в области искусственной жизни развивались менее активно, чем на западе, но имеется ряд работ, которые в ходе данной статьи стоит рассмотреть.

М. С. Бурцев, кандидат физико-математических наук, в своих работах активно развивал идеи анализа динамики искусственной эволюции и искусственной жизни. В его диссертации “Исследование новых типов самоорганизации и возникновения поведенческих стратегий” от 2005 года, он предложил модель, в которой кооперация возникала в ходе эволюционного отбора [1, 5]. В других своих работах он рассматривал возможность измерения эволюционной активности, визуализации траекторий эволюционного древа и анализа популяций как сложных систем [1].

Другой интересный пример, это разработка и статья двух российских ученых А.В. Марков и М.А. Марков, компьютерная программа EvoDevo для статьи “Самоорганизация в онтогенезе многоклеточных: опыт имитационного

моделирования”. В своей модели, они установили основной принцип - любой сложный организм возникает в результате согласованного развития клеток, которые имеют одинаковый геном (рис. 5). Геном описывает только локальные поведения клетки и её возможность реагировать на химические сигналы и контакт с другими клетками. Любой организм в EvoDevo формируется из клетки зиготы, после чего та начинает создавать свои копии, у которых подавлены одни участки генома, но активны иные. Тем самым у организмов в этой модели возникают ткани, кости и органы [2].



Рис 5. Примеры онтогенеза организмов, созданных из одной клетки

В своей статье они приводят ряд свойств, характерных для реального онтогенеза: стохастичность (неустойчивость фенотипа существ, появление отличных признаков, мутаций) и как следствие необходимость обратной отрицательной связи для подавления критических для жизнеспособности искажений, эквифинальность (помехоустойчивость развитого онтогенеза), канальность онтогенеза (множество мутаций могут привести к появлению одно и того же признака независимо друг от друга). В итоге они приходят к выводу, что без принципа самоорганизации множества клеток невозможен жизнеспособный онтогенез многоклеточных [2].

Вывод

Искусственная жизнь является самостоятельным способом изучения фундаментальных свойств живого мира. Благодаря моделям возможно многократно запускать эволюционный процесс и исследовать, как искусственная биосфера реагирует на изменения. С помощью методов данной отрасли научного знания возможно изучить различные аспекты жизни, такие как переход локальных правил к глобальной структуре у клеточных

автоматов, соперничество за ресурсы у цифровых организмов, самоорганизация в агентном моделировании и сам процесс зарождения жизни в искусственной химии.

Всё это можно использовать для симуляции и уточнения данных о биосфере нашей планеты или изучить, как будет развиваться жизнь на других планетах со своими планетарными особенностями.

Были рассмотрены зарубежные проекты, которые создают платформы для научных исследований и примеры российских учёных, разрабатывающих модели, объединяющие различные подходы в сложные гибридные модели.

Библиографический список

1. Бурцев М. С. Исследование новых типов самоорганизации и возникновения поведенческих стратегий: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 05.13.18 / Бурцев Михаил Сергеевич. — Москва, 2005. — 120 с.
2. Марков М. А. Самоорганизация в онтогенезе многоклеточных: опыт имитационного моделирования / М. А. Марков, А. В. Марков // Журнал общей биологии. — 2011. — Т. 72, № 5. — С. 323–338.
3. Bedau M. A. Artificial life: organization, adaptation and complexity from the bottom up // Trends in Cognitive Sciences. — 2003. — Vol. 7, no. 11. — P. 505–512. — DOI 10.1016/j.tics.2003.09.012.
4. Bonabeau E. Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. — 2002. — Vol. 99, suppl. 3. — P. 7280–7287. — DOI 10.1073/pnas.082080899.
5. Burtsev M. Evolution of cooperative strategies from first principles / M. Burtsev, P. Turchin // Nature. — 2006. — Vol. 440, no. 7087. — P. 1041–1044. — DOI 10.1038/nature04470.
6. Chan B. W.-C. Lenia: Biology of Artificial Life // Complex Systems. — 2019. — Vol. 28, no. 3. — P. 251–286. — DOI 10.25088/ComplexSystems.28.3.251.

7. Fontana W. Algorithmic Chemistry // Artificial Life II / eds. C. G. Langton, C. Taylor, J. D. Farmer, S. Rasmussen. — Redwood City, CA : Addison-Wesley, 1991. — P. 159–209.
8. Gardner M. Mathematical Games: The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game “Life” // Scientific American. — 1970. — Vol. 223, no. 4. — P. 120–123. — DOI 10.1038/scientificamerican1070-120.
9. Langton C. G. Artificial Life // Artificial Life : Proceedings of an Interdisciplinary Workshop on the Synthesis and Simulation of Living Systems / ed. C. G. Langton. — Redwood City, CA : Addison-Wesley, 1989. — P. 1–47.
10. Neumann J. von. Theory of Self-Reproducing Automata / J. von Neumann ; ed. and completed by A. W. Burks. — Urbana ; London : University of Illinois Press, 1966. — XIX, 388 p.
11. Ofria C. Avida: A Software Platform for Research in Computational Evolutionary Biology / C. Ofria, C. O. Wilke // Artificial Life. — 2004. — Vol. 10, no. 2. — P. 191–229. — DOI 10.1162/106454604773563612.
12. Olson E. T. The ontological basis of strong artificial life // Artificial Life. — 1997. — Vol. 3, no. 1. — P. 29–39. — DOI 10.1162/artl.1997.3.1.29.
13. Pattee H. H. Simulations, realizations, and theories of life // Artificial Life : Proceedings of an Interdisciplinary Workshop on the Synthesis and Simulation of Living Systems / ed. C. G. Langton. — Redwood City, CA : Addison-Wesley, 1989. — P. 63–78.
14. Ray T. S. An approach to the synthesis of life // Artificial Life II / eds. C. G. Langton, C. Taylor, J. D. Farmer, S. Rasmussen. — Redwood City, CA : Addison-Wesley, 1991. — P. 371–408.
15. The evolutionary origin of complex features / R. E. Lenski, C. Ofria, R. T. Pennock, C. Adami // Nature. — 2003. — Vol. 423, no. 6936. — P. 139–144. — DOI 10.1038/nature01568.