

УДК: 004.94

Синтез структуры организованных систем как центральная проблема эволюционной кибернетики

И. В. Антонов^{1,a}, Ю. В. Бруттан^{1,2,b}

¹Псковский государственный университет,
Россия, 180000, Псков, пл. Ленина, д. 2

²Научно-образовательный математический центр «Северо-Западный центр математических исследований
имени Софьи Ковалевской» Псковского государственного университета,
Россия, 180000, Псков, пл. Ленина, д. 2

E-mail: ^a igorant63@yandex.ru, ^b bruttan@mail.ru

Получено 15.08.2023, после доработки — 14.09.2023.

Принято к публикации 28.09.2023.

В статье рассматриваются подходы к эволюционному моделированию синтеза организованных систем и анализируются методологические проблемы эволюционных вычислений этого направления. На основе анализа работ по эволюционной кибернетике, теории эволюции, теории систем и синергетике сделан вывод о наличии открытых проблем в задачах формализации синтеза организованных систем и моделирования их эволюции. Показано, что теоретической основой для практики эволюционного моделирования являются положения синтетической теории эволюции. Рассмотрено использование виртуальной вычислительной среды для машинного синтеза алгоритмов решения задач. На основе полученных в процессе моделирования результатов сделан вывод о наличии ряда условий, принципиально ограничивающих применимость методов генетического программирования в задачах синтеза функциональных структур. К основным ограничениям относятся необходимость для фитнес-функции отслеживать поэтапное приближение к решению задачи и неприменимость данного подхода к задачам синтеза иерархически организованных систем. Отмечено, что результаты, полученные в практике эволюционного моделирования в целом за все время его существования, подтверждают вывод о принципиальной ограниченности возможностей генетического программирования при решении задач синтеза структуры организованных систем. В качестве источников принципиальных трудностей для машинного синтеза системных структур указаны отсутствие направлений для градиентного спуска при структурном синтезе и отсутствие закономерности случайного появления новых организованных структур. Сделан вывод об актуальности рассматриваемых проблем для теории биологической эволюции. Обосновано положение о биологической специфике практически возможных путей синтеза структуры организованных систем. В качестве теоретической интерпретации обсуждаемой проблемы предложено рассматривать системно-эволюционную концепцию П. К. Анохина. Процесс синтеза функциональных структур рассматривается в этом контексте как адаптивная реакция организмов на внешние условия, основанная на их способности к интегративному синтезу памяти, потребностей и информации о текущих условиях. Приведены результаты актуальных исследований, свидетельствующие в пользу данной интерпретации. Отмечено, что физические основы биологической интегративности могут быть связаны с явлениями нелокальности и несепарабельности, характерными для квантовых систем. Отмечена связь рассматриваемой в данной работе проблематики с проблемой создания сильного искусственного интеллекта.

Ключевые слова: эволюционное моделирование, кибернетика, теория систем, теория эволюции, генетические алгоритмы, искусственный интеллект

Статья подготовлена в рамках реализации проекта «Научно-образовательный математический центр “Северо-Западный центр математических исследований имени Софьи Ковалевской”» (соглашение № 075-02-2023-937 от 16 февраля 2023 г.).

UDC: 004.94

Synthesis of the structure of organised systems as central problem of evolutionary cybernetics

I. V. Antonov^{1,a}, Iu. V. Bruttan^{1,2,b}

¹Pskov State University,

2 Lenin square, Pskov, 180000, Russia

²Scientific and Educational Mathematical Center “Sofia Kovalevskaya Northwestern Center for Mathematical Research” in Pskov State University,
2 Lenin square, Pskov, 180000, Russia

E-mail: ^a igorant63@yandex.ru, ^b bruttan@mail.ru

Received 15.08.2023, after completion – 14.09.2023.

Accepted for publication 28.09.2023.

The article provides approaches to evolutionary modelling of synthesis of organised systems and analyses methodological problems of evolutionary computations of this kind. Based on the analysis of works on evolutionary cybernetics, evolutionary theory, systems theory and synergetics, we conclude that there are open problems in formalising the synthesis of organised systems and modelling their evolution. The article emphasises that the theoretical basis for the practice of evolutionary modelling is the principles of the modern synthetic theory of evolution. Our software project uses a virtual computing environment for machine synthesis of problem solving algorithms. In the process of modelling, we obtained the results on the basis of which we conclude that there are a number of conditions that fundamentally limit the applicability of genetic programming methods in the tasks of synthesis of functional structures. The main limitations are the need for the fitness function to track the step-by-step approach to the solution of the problem and the inapplicability of this approach to the problems of synthesis of hierarchically organised systems. We note that the results obtained in the practice of evolutionary modelling in general for the whole time of its existence, confirm the conclusion the possibilities of genetic programming are fundamentally limited in solving problems of synthesizing the structure of organized systems.. As sources of fundamental difficulties for machine synthesis of system structures the article points out the absence of directions for gradient descent in structural synthesis and the absence of regularity of random appearance of new organised structures. The considered problems are relevant for the theory of biological evolution. The article substantiates the statement about the biological specificity of practically possible ways of synthesis of the structure of organised systems. As a theoretical interpretation of the discussed problem, we propose to consider the system-evolutionary concept of P.K. Anokhin. The process of synthesis of functional structures in this context is an adaptive response of organisms to external conditions based on their ability to integrative synthesis of memory, needs and information about current conditions. The results of actual studies are in favour of this interpretation. We note that the physical basis of biological integrativity may be related to the phenomena of non-locality and non-separability characteristic of quantum systems. The problems considered in this paper are closely related to the problem of creating strong artificial intelligence.

Keywords: evolutionary modelling, cybernetics, systems theory, evolutionary theory, genetic algorithms, artificial intelligence

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2023, vol. 15, no. 5, pp. 1103–1124 (Russian).

We acknowledge Scientific and Educational Mathematical Center “Sofia Kovalevskaya Northwestern Center for Mathematical Research” for financial support of the present study (agreement No. 075-02-2023-937, 16.02.2023).

1. Введение

К организованным системам относятся живые организмы, а также технические и вычислительные устройства различного уровня сложности. Предметом научного анализа системы такого рода стали в теории систем и в кибернетике, сформировавшихся к середине XX века. В число характерных атрибутов организованных систем входят иерархичность, функциональность, наличие информационных процессов.

Безусловный научный интерес представляет вопрос о генезисе организованных систем, об общих принципах их формирования и о моделях синтеза таких систем.

В человеческой практике создание систем такого рода является сферой профессиональной деятельности инженеров и программистов. В то же время сам человек является продуктом длительной эволюции живой природы, формы которой включают в себя большое число разнообразных высокоорганизованных систем, начиная с устройства и функционирования живой клетки, включая множество сложно организованных специализированных органов и систем, и завершая мыслящим мозгом, наделенным собственным созидательным потенциалом.

Техническая цивилизация заимствует некоторые решения у живой природы. Соответствующее направление исследований называется бионикой. Задаваясь вопросом о путях и способах возможной автоматизации синтеза организованных систем, инженерным наукам есть смысл обратиться к опыту природы. Научным направлением, фокусирующим свое внимание на задачах моделирования эволюционных процессов, является эволюционная кибернетика, задача которой формулировалась как «исследование возникновения и развития целенаправленных структур в Природе, Мышлении, Обществе и Технологиях» [Редько, 2003]. В данной работе анализируются полученные результаты и проблемы эволюционной кибернетики, приводятся результаты моделирования автоматизированного синтеза алгоритмов решения задач, рассматриваются выводы о причинах существующих проблем и обсуждаются возможные перспективы этого направления.

2. Организованные системы: понятие и критерии выделения

В общепринятой интерпретации под системой понимается объект, свойства которого не сводятся к сумме свойств составляющих его элементов, рассматриваемых независимо друг от друга. Способность системы проявлять особые свойства часто обозначают термином «эмерджентность». Структуры материального мира в целом обладают понимаемой таким образом системностью. То есть системность в широком смысле является универсальным атрибутом объектов материального мира. В то же время в числе объектов материального мира особое место занимают организованные системы. Впервые задачи теоретического анализа вопросов системной организации были поставлены в работах А. А. Богданова [Богданов, 2003], вышедших в начале XX века. Дальнейшее развитие теория систем получила в работах Л. Берталанфи [Берталанфи, 1969], вышедших в 30–50-е годы XX века. Важной вехой стал выход книги Н. Винера «Кибернетика, или управление и связь в животном и машине» [Wiener, 1948] в 1948 году. Название этой работы подчеркивает важный для теории систем принцип изоморфизма, заключающийся в том, что определенные организационные принципы и структуры единообразно проявляют себя в системах различной природы. В последующие годы круг авторов, занимающихся проблемами теории систем, существенно расширился, как и число работ, им посвященных. В СССР в течение двадцати лет издательством «Наука» издавался ежегодный сборник научных работ по теории систем «Системные исследования», в котором публиковались работы многих зарубежных и отечественных авторов.

Организованные системы в материальном мире представлены живыми организмами и продуктами конструктивной деятельности человека — машинами и механизмами, автоматами, электронными устройствами, средствами вычислительной техники. В работах по теории систем

отмечается общность принципов организации и атрибутов организованных систем различного рода. Их отличительными признаками являются функциональность, иерархичность связей и управления, использование информации и обратных связей в процессе функционирования систем, организационная сложность. **Функциональность** означает возможность определить для системы цель функционирования, обеспечиваемую ее структурой и реализуемую в процессе динамического взаимодействия со средой. **Иерархичность** подразумевает возможность выделить в системе подсистемы, решающие определенные подзадачи в процессе функционирования системы. Системная иерархия может быть многоуровневой. **Информационная природа** организованных систем обусловлена тем, что их функционирование координируется сигналами, поступающими из среды и от компонентов системы, и тем, что системы используют внутреннюю память для накопления оперативных данных и хранения управляющих кодов. Взаимодействие элементов структуры организованных систем изменяется с ходом времени в процессе функционирования систем. Поскольку структуры организованных систем являются динамическими, алгоритмы и программы функционирования таких систем относятся к их структурообразующим компонентам и включаются в информационную составляющую организованных систем. Сложность организации систем может ориентировочно оцениваться числом неоднородных структурных элементов и их связей, обеспечивающих функционирование системы. При оценке сложности организации систем не могут применяться чисто статистические критерии, поскольку произвольный нефункциональный набор элементов и связей, описание которого может быть достаточно объемным и формально сложным, может не иметь никакой функциональности и вообще не являться организованной системой. С точки зрения сложности компактного описания (сложности Колмогорова) наибольшую сложность имеет бессистемный шум. Соответственно, учитываемыми при оценке системной сложности элементами и связями должны быть только те, изъятие или произвольная замена которых могут в чем-то нарушать функциональность системы.

В живой природе высокоорганизованными иерархическими системами являются как сами организмы, так и отдельно взятые живые клетки.

Техническая цивилизация, являясь результатом деятельности живых систем, порождает собственную эволюцию искусственных организованных систем.

В неживой природе со многими материальными объектами происходят сложные процессы — физико-химические, геологические, атмосферные, астрономические, но в то же время там не наблюдается возникновение или присутствие систем, характеризующихся перечисленными выше атрибутами организованных систем. В числе природных объектов могут быть сложные динамические структуры, включая относительно устойчивые формы, но каких-либо неоднородных структур, решающих определенные задачи за счет определенной системы внутренних связей и реализующих информационные процессы, там не наблюдается. Следовательно, для возникновения организованных систем в материальном мире требуются определенные условия, которые могут быть предметом научного анализа.

3. Происхождение и эволюция организованных систем

В соответствии с научными представлениями организованные системы впервые появились на ранних этапах возникновения жизни.

Общепринятые представления о предбиологической эволюции связаны с появлением на Земле около 4 миллиардов лет тому назад комплексов самореплицирующихся органических молекул, после формирования у которых устойчивой оболочки (клеточной мембраны) появилась живая клетка, и эволюция жизни продолжилась в клеточной форме. Современные формы одноклеточных организмов имеют сложную структуру и организацию. Минимально возможная сложность генома, позволяющая успешно функционировать самым примитивным современным бактериям, составляет несколько сотен генов [Koonin, 2014]. Функционирование современных

клеток сопровождается значительным числом высокоупорядоченных согласованных процессов. Безусловный интерес представляет процесс перехода от первого авторепликатора к сложно организованной современной клетке. Гипотетическая модель первых этапов этого процесса была предложена Эйгеном [Eigen, Schuster, 1979] как модель эволюционирующих гиперциклов. Но если первичный гиперцикл представляет собой пассивный набор химических реакций, поддерживаемый поступлением из среды энергии и вещества, то живые организмы поддерживают свое существование за счет определенной внутренней координации своего функционирования и активного взаимодействия со средой. Момент перехода от пассивного комплекса химических реакций к организованному целому принципиально важен, поскольку с ним связаны сущность жизни и момент зарождения жизни. Механизм этого перехода, предлагаемый Эйгеном, подразумевает переход к внутренней организации и активности в результате спонтанного усложнения гиперциклов, направляемого отбором.

Дальнейшая эволюция форм жизни сопровождалась появлением многоклеточности, формированием большого числа сложных высокоорганизованных систем живых организмов и их сложного поведения. С развитием человеческой цивилизации свойства организованных систем приобрели создаваемые людьми устройства. Их развитие и усложнение в рамках технического прогресса обеспечиваются конструктивной целенаправленной деятельностью человека.

В рассматриваемой сфере существуют две основные научные проблемы: как организованные системы возникли и как они эволюционировали до появления человека. Первую проблему призвана решить теория абиогенеза, которая пока не преодолела стадию наличия ряда обсуждаемых гипотез о возникновении жизни. Вторая проблема находится на пересечении компетенций теории эволюции и теории систем.

4. Организованные системы в контексте эволюционной теории

В теории эволюции в настоящее время существуют различные направления, представления которых об эволюционном процессе различаются. Доминирующей теорией является синтетическая теория эволюции (СТЭ, неodarвинизм, modern synthesis) [Huxle, 1942], представляющая собой синтез теории естественного отбора Ч. Дарвина и современной генетики. Теория естественного отбора Ч. Дарвина сформировалась в XIX веке, когда специфика организованных систем и вопросы системной организации наукой предметно не рассматривались. Если применить общие принципы теории естественного отбора к проблеме эволюции системной организации, то с точки зрения этой теории случайные ненаправленные вариации организации, сопровождающие размножение организмов, в разной мере способствуют выживанию организмов в определенных условиях среды. Отбором закрепляются имеющие адаптивное значение изменения, что в длительной перспективе обеспечивает эволюционный прогресс и усложнение организации.

В XX веке, когда теория естественного отбора в СТЭ была дополнена популяционной генетикой, конкретизирующей механизмы эволюционной изменчивости, наследования и отбора, рассмотренная выше общая концепция эволюционного процесса в целом не претерпела изменений. Вопросы биологической организации и системная проблематика отдельно не рассматриваются в рамках СТЭ и не затрагиваются в основных постулатах теории [Воронцов, 1999]. В СТЭ констатируется, что материалом для эволюции служат мелкие дискретные изменения наследственности (мутации) и порождаемая ими изменчивость носит случайный ненаправленный характер. Единственным движущим фактором эволюции в СТЭ является естественный отбор, основанный на отборе случайных и мелких мутаций. Следует отметить, что в постулатах СТЭ никак не отражена не только системная специфика, но и биологическая специфика форм жизни. Соответственно, принципы этой теории могут рассматриваться как универсальная модель механизма эволюции систем различного рода.

Альтернативные СТЭ направления теории эволюции, в свою очередь, обычно обходятся без рассмотрения проблем системной организации форм жизни. Это характерно и для теории нейтральной эволюции Кимуры [Kimura, 1983], в центре внимания которой преимущественно нейтральный характер молекулярной эволюции, и для теории прерывистого равновесия Гулда [Gould, 1992], в которой обосновывается, что существенные эволюционные изменения происходят скачками, чередующимися с длительными периодами стабильности.

Отдельная ветвь эволюционной теории рассматривает эволюцию как процесс, преимущественно направляемый закономерностями, предопределяющими появление новых эволюционных форм. Это ортогенез [Попов, 2005], включающий в себя номогенез Л. С. Берга [Берг, 1977] и близкие к нему по направлению работы. В качестве главных свидетельств в пользу концепции направленной эволюции приводятся эволюционные явления преадаптаций, параллелизмов и конвергенций, появление неадаптивных признаков. Системная проблематика затрагивается в работах этого направления преимущественно в рамках критики положений неodarвинизма о случайном характере эволюционной изменчивости. В число сторонников ортогенеза входил известный советский биолог А. А. Любищев [Любищев, Гурвич, 1998], в память о котором и в развитие идей которого в течение ряда лет проводилась ежегодная Международная конференция «Современные проблемы эволюции и экологии» («Любищевские чтения»). Новые работы в русле ортогенеза продолжают выходить в настоящее время [Мелких, 2020].

Отдельное внимание к вопросу о системной организации форм жизни и ее значении в контексте эволюции уделяют лишь некоторые направления эволюционной теории. В настоящее время это прежде всего эволюционная биология развития (Evo-Devo) [Uller et al., 2020] и расширенный эволюционный синтез (EES) [Laland et al., 2015]. В работах авторов этих направлений отмечается важность учета целостных свойств живых организмов для объяснения эволюционного процесса. Развитие форм жизни в процессе эволюции рассматривается там как процесс, связанный с активностью организмов и их способностью адаптивно и скоординированно реагировать на вызовы среды.

Близкая к положениям Evo-Devo и EES концепция движущих сил эволюции была сформулирована еще в середине прошлого века в работах известного советского эволюциониста И. И. Шмальгаузена, формально причисляемого к авторам СТЭ, но фактически одним из первых сформулировавшего некоторые ключевые эволюционные принципы, рассматриваемые в работах направлений Evo-Devo и EES. И. И. Шмальгаузен [Шмальгаузен, 1982] отмечает, что при формировании важных организационных признаков большое значение имеет точная координация частей и в их отношении естественный отбор мутаций, затрагивающих отдельные признаки, вряд ли может привести к положительным результатам в измеримые сроки. Взаимное приспособление органов достигается не подбором независимых изменений отдельных органов, а путем непосредственного приспособления изменяемых органов в течение индивидуального развития организма. Изменения оказываются сразу же согласованными благодаря существованию коррелятивной зависимости между органами. Адаптивная пластичность организмов является, по Шмальгаузену, фактором прогрессивной эволюции.

Различные направления теории эволюции в целом не уделяют существенного внимания проблемам системной организации, но наблюдается явная корреляция: чем более учитываются в теории системные аспекты, тем менее она склонна считать достаточной для объяснения эволюции интерпретацию эволюционного процесса как направляемой отбором последовательности случайных событий.

5. Общие принципы эволюционного моделирования

При решении задач эволюционного моделирования процесс биологической эволюции рассматривают как естественный прототип для построения искусственных систем, которые должны

обеспечить воспроизведение основных свойств эволюционного процесса и их использование для задач оптимизации систем, синтеза новых решений и для нахождения путей построения интеллектуальных искусственных систем [Емельянов, Курейчик, Курейчик, 2003]. Построение компьютерных моделей эволюционирующих систем должно базироваться на определенной теоретической модели эволюционного процесса. В практике эволюционного моделирования, как правило, за основу берется модель синтетической теории эволюции. Эволюция рассматривается как многоступенчатый итерационный процесс, состоящий из случайных изменений и последующей селекции [Емельянов, Курейчик, Курейчик, 2003]. Основы эволюционного моделирования этого направления были заложены работами Дж. Холланда [Holland, 1975] и Л. Фогеля [Fogel, Owens, Walsh, 1966].

Эквивалентом генов в этом случае являются двоичные операнды (цифровые гены), эквивалентом хромосом и геномов — наборы цифровых генов. Определенная интерпретация кодов генов модельным окружением создает фенотип искусственной особи. По фенотипу рассчитывается фитнес-функция, характеризующая его успешность. С использованием рандомизации генерируется популяция искусственных особей. Отбираются более успешные фенотипы. Они размножаются, при этом производится рекомбинация генов особей и в гены привносятся новые мутации. Процесс итерационно продолжается до тех пор, пока фитнес-функция лучших особей не перестанет возрастать или не будет достигнуто желаемое значение фитнес-функции.

Процесс стохастического поиска в этом случае подобен реализации алгоритма стохастического градиентного спуска, но, в отличие от последнего, обеспечивает распараллеливание поиска решений в отдельных ветвях популяции особей.

6. Компьютерное моделирование синтеза алгоритма решения задачи

Одним из авторов данной статьи была разработана программная среда для модельного исследования проблемы эволюционного формирования системных свойств программного кода — «Генератор алгоритмов», *alggen*. Исходный код проекта выложен на платформе github.com и доступен по ссылке <https://github.com/igorant63/alggen>. В проекте реализован виртуальный процессор со своим набором команд, обеспечивающим выполнение арифметических и логических операций с данными. Отдельные задачи подключаются через расширяемый набор файлов динамических библиотек DLL, реализующих общий интерфейс, предоставляющий характеристики задачи, исходные наборы данных и фитнес-функцию. В самой среде настраиваются параметры генерации кода и мутаций, генерируется исходная популяция и выполняется эволюционный процесс решения задачи. В процессе итераций среда исполнения отсеивает заикливившиеся программы, реализует генерацию новых поколений программ в соответствии с настройками, упорядочивает программы по значению фитнес-функции и отсеивает реализации с худшими показателями.

Одной из решавшихся с использованием этого инструментария задач была автоматическая генерация программного кода, реализующего алгоритм сортировки массива числовых данных.

В качестве фитнес-функции для i -го экземпляра программы была выбрана следующая функция:

$$F_i = \sum_{j=1}^n j \cdot P_{ij},$$

где n — размер сортируемого массива чисел, P_{ij} — порядковый номер j -го числа из сформированного i -й программой выходного массива в сортированном по возрастанию входном массиве либо 0, если j -е число выходного массива не содержится в исходном массиве.

То есть каждое из слагаемых является произведением позиции элемента в исходном массиве и его позиции в сортированном массиве.

Если $A = \{a\}$ — исходный массив, $(A', <) = \{a'\}$ — массив, полученный в результате сортировки по возрастанию исходного массива, $B = \{b\}$ — массив, сформированный программой, то

$$P_{ij} = \begin{cases} k, & \text{если } b_j \in (A', <) \text{ и } b_j = a'_k, \\ 0, & \text{если } b_j \notin (A', <). \end{cases}$$

Максимальное значение функции F_i зависит от числа элементов массива и является суммой ряда квадратов чисел от 1 до размера массива. Например, для 16 элементов это значение 1496. Значение фитнес-функции будет максимальным только для полностью упорядоченного ряда чисел. Любой обмен позициями двух чисел в произвольном неупорядоченном или частично упорядоченном массиве увеличивает значение функции F_i , если позиция большего числа увеличивается, а меньшего — уменьшается.

Пусть j, k — позиции двух чисел в исходном массиве, при этом $k = j + d_1$, а m, n — позиции этих же чисел в сортированном массиве, при этом $m = n + d_2$, где d_1, d_2 — положительные числа. В этом случае порядок следования чисел в исходном массиве неверный, а их вклад в фитнес-функцию имеет вид

$$F_1 = j \cdot m + k \cdot n = j \cdot (n + d_2) + (j + d_1) \cdot n = 2 \cdot j \cdot n + j \cdot d_2 + n \cdot d_1.$$

После обмена местами этих чисел проверяемой программой их вклад в фитнес-функцию будет иметь вид

$$F_2 = j \cdot n + k \cdot m = j \cdot n + (j + d_1) \cdot (n + d_2) = 2 \cdot j \cdot n + j \cdot d_2 + n \cdot d_1 + d_1 \cdot d_2.$$

Приращение фитнес-функции после успешной перестановки имеет вид

$$\Delta F = F_2 - F_1 = d_1 \cdot d_2.$$

Таким образом, отбор на основе рассматриваемой фитнес-функции будет закреплять любую удачную перестановку двух чисел, а приоритет будут иметь варианты программы, выполняющее большее число удачных перестановок, вплоть до решения, успешно сортирующего массив в целом.

В результате моделирования в приложении `alggen` был успешно синтезирован программный код, реализующий алгоритм сортировки массива. Файл с использованными при моделировании настройками среды `sort.set` доступен в папке `bin` проекта `alggen` на `github.com`. Там же находится файл `sorted.pop`, в котором сохранена синтезированная популяция программ сортировки. В повторных прогонах успешный синтез программы сортировки воспроизводится, но формируются отличающиеся тексты программ. В среднем успешное решение задачи формируется в пределах 200 поколений эволюции популяции из 10 000 программ.

На рис. 1 представлен интерфейс приложения `alggen`, отображающий текст синтезированной программы сортировки массива. В исходном состоянии в регистрах `A-D` — значение 0, в регистре `E` — число элементов массива. Команда `xchg` выполняет перестановку местами двух ячеек оперативной памяти (`agau`), используя косвенную регистровую адресацию. Сформированный программный код сначала помещает в первую ячейку памяти максимальное число, содержащееся в ячейках от первой до индексируемой значением в регистре `E` за вычетом 1. Затем значение регистра `E` уменьшается на 1 и меняются местами первая ячейка памяти с индексом 0 и ячейка, индексируемая регистром `E`. Процесс повторяется циклически с первого шага, пока в регистре `E` не окажется значение 0. Синтезированный код реализует алгоритм сортировки выбором. Он успешно решает поставленную задачу, хотя и не является оптимальным.

Успешное решение задачи машинного синтеза программы сортировки массива чисел в рассматриваемом примере обусловлено следующими причинами:

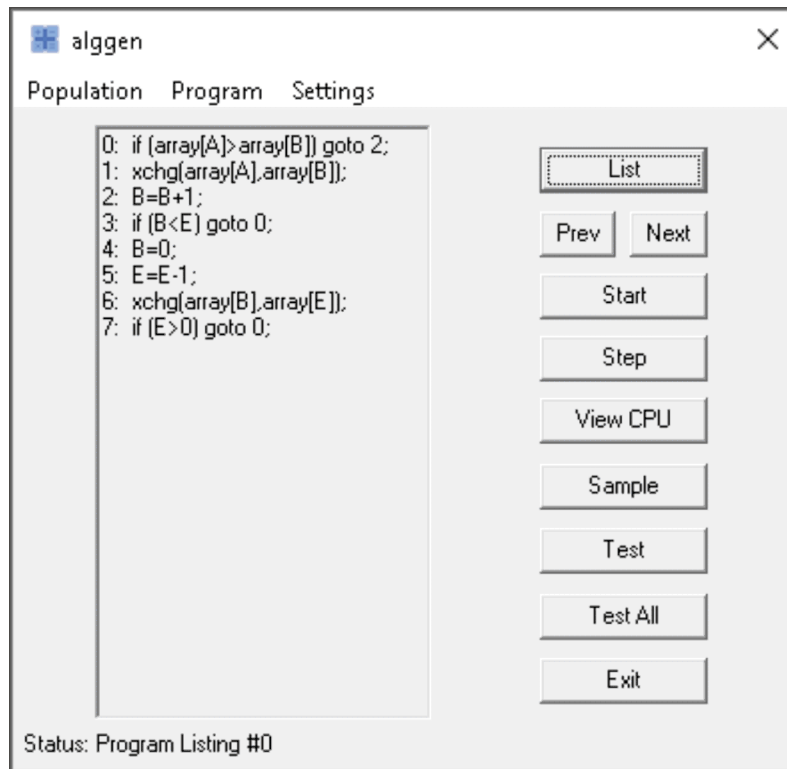


Рис. 1. Программа сортировки массива, синтезированная приложением algen

- наличие системы команд, соответствующих операциям, типичным для алгоритмов сортировки: обмен содержанием ячеек памяти, инкремент/декремент, сравнение, заикливание;
- подбор фитнес-функции, чувствительной к любому повышению уровня упорядоченности исходного массива чисел.

В указанных условиях отбором последовательно могут закрепляться отдельные шаги, ведущие к решению задачи: упорядочивающая перестановка любой пары чисел, успешная перестановка группы чисел и, наконец, успешная сортировка всего массива. При этом успешная перестановка пары чисел реализуется комбинацией всего двух операторов используемого языка: «сравнение операндов с переходом на метку по условию» (if ... goto) и «перестановка операндов» (xchg).

Если использовать для синтеза решения фитнес-функцию, отмечающую только успешно сформировавшееся решение задачи и не различающую качество промежуточных шагов:

$$F'_i = \begin{cases} 100, & \text{если } B_i = A', \\ 0, & \text{если } B_i \neq A', \end{cases}$$

то успешное решение задачи не удастся синтезировать даже при длительном выполнении моделирования. Этот результат объясняется малой вероятностью случайного появления функционального решения, обеспечиваемого комплексной согласованной работой ряда элементов. При генерации кода программы существует 760 возможных разных вариантов операторов (с учетом вариаций их операндов). Пространство состояний для программы из 10 операторов будет составлять $760^{10} \approx 6,4 \cdot 10^{28}$. В случае генерации 1 000 000 таких программ в секунду среднее время ожидания случайного появления конкретной программы составит $3,2 \cdot 10^{22}$ секунд, то

есть $\sim 10^{15}$ лет. Даже с учетом множественности возможных решений одной задачи вероятность случайного получения успешного решения останется крайне малой даже для рассматриваемого выше несложного по уровню организации примера.

Таким образом, успешный синтез программного кода, решающего прикладную задачу, возможен, когда фитнес-функция распознает отдельные шаги решения задачи и позволяет оценить достигнутый прогресс. Из этого обстоятельства следует, что при формировании фитнес-функции должны быть известны составляющие предполагаемого решения, то есть в саму фитнес-функцию должно быть заложено априорное знание о том, каким путем может решаться задача. В тех же случаях, когда требуется получить определенный системный результат, не располагая данными о возможном пути к решению, фитнес-функция будет выявлять только готовые системные решения, что, как показано выше, не создает условий для успешной практической реализации синтеза организованно функционирующей системы при использовании рассматриваемого подхода к эволюционному моделированию.

Другой пример — задача нахождения максимального числа в массиве. Машинный синтез ее решения через отбор успешно решающих задачу в целом случайных программ проблематичен по рассмотренным выше причинам, а пошаговый отбор элементов решения возможен, но предполагает использование априорной информации о возможном пути к решению.

Следует отметить, что универсальным атрибутом сколько-нибудь сложных систем является их иерархическая организация. Но отбор на основе фитнес-функции систем, подвергаемых незначительным случайным вариациям, не может привести к их уровневой организации. Подсистема, формируемая поэлементно, не полностью функциональная и не связанная согласованно с системой верхнего уровня, не сможет поэтапно формироваться на основе отбора по фитнес-функции полной системы, поскольку частичная реализация подсистемы будет не функциональна и она не отразится положительно на фитнес-функции системы как целого.

Рассмотренный в этом разделе подход к автоматизации синтеза программного кода позволяет получить программное решение несложных задач, при условии, что фитнес-функция будет способна отслеживать поэтапное приближение к решению задачи. Ограничения данного подхода заключаются в том, что он не масштабируем, а именно, не применим в тех случаях, когда качество системы может быть повышено только новым, не известным априорно системно-связным взаимодействием ряда элементов и когда формируются системы с иерархической организацией. Эти ограничения не позволяют рассматривать данный подход как успешную иллюстрацию решения проблемы формализации синтеза структуры организованных систем.

7. Практика эволюционного моделирования и ее результаты

Представляет интерес, каким образом соотносится с проблематикой синтеза структуры организованных систем опыт эволюционного моделирования и программирования в целом.

В публикациях по генетическим алгоритмам рассматривается решение круга задач по оптимизации систем, но рассматриваемые решения, как правило, обеспечивают параметрическую оптимизацию систем или комбинирование ограниченного набора известных решений (эвристик).

Общим местом для практически используемых генетических алгоритмов является применение операции кроссовера (кроссинговера) при генерации новых поколений особей популяции. При этом происходит обмен генами между хромосомами различных особей, что увеличивает внутривидовое разнообразие. В тех случаях, когда гены, подверженные кроссоверу, системно связаны и в комплексе обеспечивают реализацию функций системы, произвольная их замена либо не будет затрагивать существующую организацию, либо будет закономерно ее нарушать, поскольку ген с другими свойствами, например другой оператор языка программирования, нарушит прежнюю системную связность элементов. Соответственно, использование кроссовера

заведомо неперспективно для решения задач по конструктивной трансформации организованных систем, уже имеющих какую-либо организацию.

В работах по генетическим алгоритмам и эволюционному программированию отмечается проблематичность практической реализации автоматизированного решения задач по структурной организации и реорганизации систем. В частности, в [Аверченков, Казаков, 2021] отмечается, что принципы генетического программирования оказываются эффективными лишь для относительно простых задач синтеза программ, что связано прежде всего с разрушающей способностью оператора кроссинговера. В [Норенков, 2002] указывается, что структурный синтез, как правило, выполняют в интерактивном режиме при решающей роли инженера-разработчика.

В работе [Половинкин, 1988] рассматривается задача формализации машинного синтеза технических решений. В качестве практически реализуемого варианта параметрически-структурной оптимизации систем рассматривается подход, комбинирующий параметрическую оптимизацию на основе поисковых методов с комбинированием заданных готовых работоспособных структурных решений или шаблонов их генерации. Для последних вводится специальное обозначение операции «Синтез допустимых структур» (СДС).

В работах [Карпов, 2012; Карпов, 2013] анализируются результаты эволюционного программирования в целом и констатируется, что эволюционным вычислениям не удается породить хоть сколько-нибудь сложные объекты.

В эволюционном программировании существует отдельное направление, которое ставит своей целью наглядную демонстрацию работоспособности дарвиновских механизмов развития систем. Это Artificial Life (искусственная жизнь). К характерным примерам этого направления можно отнести программы EV [Schneider, 2000] и Avida [Ofria, Bryson, Wilke, 2009]. В программе EV эволюция генома и появление там новой информации моделируются через эволюцию популяции цифровых организмов, фитнес-функция которых оценивает степень отличия текущей геномной последовательности от образцовой. Итогом эволюции является успешный синтез последовательности с нужными свойствами. В программе Avida эволюция популяции цифровых организмов обеспечивает синтез логической функции, реализуемой пятью логическими элементами NAND. При этом фитнес-функция поощряет отбор особей, частично реализующих целевую функцию.

Таким образом, в программах EV и Avida фитнес-функция обеспечивает ступенчатое приближение к заранее заданному решению с использованием знаний о возможном способе решения задачи. Это полностью соответствует ситуации, рассмотренной выше в § 6, где решалась задача по синтезу алгоритма сортировки массива. Как отмечалось там же, такие подходы не масштабируемы и не являются сколько-нибудь универсальным решением проблемы формализации синтеза структуры организованных систем.

8. Источники принципиальных трудностей при моделировании системной эволюции

Практика эволюционного моделирования основана на концепциях синтетической теории эволюции, в которой проблематика системной организации форм жизни предметно не рассматривается. С содержательной стороны СТЭ остается теорией микроэволюционной адаптации, дополненной допущением о том, что плавные микроэволюционные изменения постепенно переходят в макроэволюционные, сопровождаемые повышением сложности организации форм жизни. Техническим аналогом этого допущения была бы констатация, что параметрическая оптимизация систем постепенно переходит в структурную оптимизацию.

Общепринятая интерпретация логики эволюции заключается в том, что особи, свойства которых варьируются в процессе размножения, характеризуются некоторым разбросом приспособленности внутри популяции и отбор в поколениях может итерационно смещать популяцию

к большей приспособленности, что и приводит к постепенным прогрессивным изменениям в организации. Но данная схема не работоспособна в отношении системной организации, поскольку системная функциональность порождается комплексным специфическим взаимодействием ряда элементов. Она не является следствием свойств отдельных элементов, и к ней в общем случае не существует постепенного приближения через варьирование отдельных элементов и их параметров.

В отсутствие направлений плавного движения к новой системной организации она может быть сформирована либо случайно, либо путем последовательного перебора возможных комбинаций элементов систем. Последнее даже при относительно малом числе элементов систем и их связей приводит к «комбинаторному взрыву», что делает невозможным физическую реализацию подобного синтеза. Случайный способ формирования новых системных решений в многокомпонентных системах, в силу комбинаторных и статистических причин, не относится к событиям, возникновение которых закономерно даже в случае отсутствия ограничений на число попыток. Но существует обратная закономерность: произвольное варьирование структурообразующих элементов и связей закономерно нарушает функциональность существующих систем.

В итоге к основным источникам принципиальных трудностей при машинном моделировании системной эволюции следует отнести отсутствие направлений для градиентного спуска при структурном синтезе и отсутствие закономерности случайного появления новых организованных структур.

9. Проблема природы системообразующего фактора

Поскольку структура организованных систем не выводится математически и не синтезируется путем рандомизации и отбора, модель их синтеза должна включать в себя дополнительный системообразующий фактор. В человеческой практике такие системы создаются на основе интеллектуального анализа задачи и целенаправленного синтеза решения с использованием накопленного ранее опыта и знаний о предметной области. Иерархическая организация систем в рамках технического творчества обеспечивается декомпозицией процесса синтеза решения на ряд операций синтеза компонентов разного уровня, реализация каждого из которых решает одну из подзадач. Свою задачу система решает после объединения всех компонентов в связное целое. Например, в программировании создается код решения задачи, учитывающий возможности используемых библиотек функций, даже если внутренняя реализация этих функций остается неизвестной. Функции библиотеки никакой завершенной полезной работы не выполняют, но могут реализовываться в соответствии с их спецификацией как функциональный элемент будущих систем. Человеческое мышление способно учитывать будущие системные эффекты нового соединения элементов с известными свойствами за счет знаний о предметной области и о свойствах среды. Представление о том, что определенное новое соединение элементов будет обладать неким системным эффектом, способствующим решению текущей задачи, является конструктивной идеей. Конструктивное мышление является единственным достоверно известным инструментом, создающим иерархические организованные системы.

Возможность машинной формализации процесса мышления остается дискуссионным вопросом. В последние десятилетия эта проблематика часто ассоциируется с работами Р. Пенроуза [Penrose, 1989; Penrose, 1994], в которых подробно рассматривается ряд аргументов в пользу принципиальной неформализуемости мышления на основе классических вычислений и использования конечных автоматов. В качестве оснований для этой точки зрения, в частности, рассматриваются способность мышления совершать неалгоритмические операции и невозможность алгоритмического представления интегративных атрибутов мышления — понимания и осознания.

Иллюстрацией к проблеме вычислимости процесса мышления может служить рассмотренные характеры мышления программиста. Программист делает умозаключения о свойствах новых

конструкций программного кода, в частности об условиях завершимости циклов, **не вычисляя** все возможные прохождения кода с различными исходными данными. Любые вычисляемые прохождения цикла с определенными исходными данными будут частным случаем, исход которого не даст однозначного ответа на вопрос о том, будет ли конкретный цикл всегда завершаться или он будет бесконечно закичиваться. В то же время программист в общем случае адекватно осознает интегративные свойства кода, содержащего циклы, поскольку в отсутствие этой способности он не смог бы создавать работоспособный код. В таких ситуациях мышление выходит за рамки выполнения отдельных вычислительных операций с данными, представляя характерное поведение всей совокупности возможных исходов операций кода с данными с учетом свойств той вычислительной среды, в которой работает этот код. Соответственно, мышление имеет дело с интегративными образами рассматриваемых составных объектов, а не с отдельными операциями, выполняемыми с их элементами, и оно способно формировать адекватные умозаключения о новых системных свойствах, проявляемых сложными объектами в среде.

Таким образом, в явно наблюдаемых ситуациях синтеза организованных систем их ключевым системообразующим фактором является конструктивное мышление, направленное на решение определенных проблем и задач. Предположительно существуют принципиальные ограничения в отношении возможности машинной формализации подобного процесса, связанные с его невычислимыми аспектами.

10. Квантовая лазерка

В качестве возможной физической основы интегративности мышления Р. Пенроуз предложил рассматривать явления нелокальных квантовых корреляций и квантовой суперпозиции, которые могут играть особую роль в функционировании живой материи в целом. Составные квантовые системы в волновом состоянии обладают свойством несепарабельности, их невозможно рассматривать как совокупность отдельных элементов с определенными свойствами. Несепарабельность квантовых систем не ограничена какими-либо расстояниями. Можно провести параллель между свойствами квантовой несепарабельности и целостностью мысленных представлений, идей и других ментальных феноменов, для которых есть основания считать, что они не могут быть представлены конструкцией из дискретных элементов с независимыми свойствами. Поэтому некоторые исследователи возлагают надежды на квантовые свойства как на возможный ключ к механизмам мышления, сознания и биологического уровня организации. В рамках этих представлений живыми системами управляют природные квантовые компьютеры. Данным допущением преодолевается проблематичность вывода свойств биологического уровня организации из известных физических и химических свойств материальных объектов. Структуры живых организмов выполняют в этом случае роль адаптеров, позволяющих квантовым системам управлять макроскопическими объектами материального мира.

Некоторые алгоритмы технических квантовых компьютеров, например алгоритм Гровера [Grover, 1997], обладают свойствами, внешне подобными процессу интуитивного мышления. В алгоритме Гровера с помощью квантовых вентилях задается определенное уравнение, и в процессе итераций увеличивается вероятность считывания правильного ответа (корня этого уравнения) из квантового регистра. Поиск решения не является в этом случае классическим вычислением, а является итерационным воздействием на квантовую суперпозицию всех возможных решений. В итоге, когда уравнение имеет несколько возможных решений, из квантового регистра случайно считывается одно из них. То есть здесь есть и аналогия интуиции, поскольку успешное решение формируется при редукции квантового состояния сразу готовым, и аналогия индетерминизму мышления: когда возможных решений несколько, то случайно выбирается одно из них.

В роли ключевого для функционирования мышления компонента живых систем, циклически переходящего в состояние квантовой суперпозиции, в работах Р. Пенроуза рассматриваются микротрубочки цитоскелета клеток, выполняющего в клетке роль управляющего центра. Р. Пенроуз считает [Penrose, 1994], что уровень нейронов, на котором в настоящее время описывается функционирование мозга и сознания, — это просто тень более глубокой активности клеточных цитоскелетов, и именно на этом более глубоком уровне мы и должны искать физическую основу сознания. Концепция Р. Пенроуза пока имеет статус обсуждаемой гипотезы. Приводятся косвенные свидетельства в ее пользу. К ним, в частности, относят важную роль некоторых квантовомеханических эффектов в биологических процессах: использование квантового туннелирования электронов обонятельными рецепторами, обеспечение эффективности фотосинтеза за счет квантовой когерентности, использование влияния магнитного поля на квантовую спиновую корреляцию электронов в биохимическом компасе птиц [Сюракшин, Салеев, Юшанхай, 2022]. В работе [Kerskens, Pérez, 2022] обнаружены признаки квантовой корреляции в процессе работы мозга.

Если квантовые эффекты окажутся принципиально важны для обеспечения биологического уровня организации, то объективным препятствием для вычислимости некоторых биологических свойств может оказаться известная из квантовой физики нелокальность квантовых корреляций не только в пространстве, но и во времени [Leifer, Pusey, 2017], поскольку информация о будущих условиях, которые потенциально влияют на события редукции волновой функции, принципиально недоступна для использования в текущих классических вычислениях.

11. Системно-эволюционная концепция П. К. Анохина

Известный советский нейрофизиолог П. К. Анохин, автор теории функциональных систем (ТФС), уделял большое внимание проблемам биологии, теории систем и кибернетики. В своих многочисленных работах он неоднократно излагал принципы сформировавшейся у него системно-эволюционной концепции, которая имеет прямое отношение к проблематике, рассматриваемой в данной статье.

Основная теоретическая работа Анохина по системной проблематике — «Принципиальные вопросы общей теории функциональных систем» [Анохин, 1971]. В этой статье Анохин обобщил результаты, полученные им в нейрофизиологических исследованиях и приведшие к созданию теории функциональных систем, и сформулировал системную аксиоматику, которая, на его взгляд, должна быть включена в общую теорию систем.

Важный принцип системной аксиоматики Анохина заключается в том, что системы, обладающие функциональностью, всегда имеют определенную причину своего возникновения и для них должен быть выявлен системообразующий фактор. Системы не могут возникать случайно прежде всего из-за огромного пространства потенциально возможных произвольных, бессистемных комбинаций элементов систем. Основным системообразующим фактором, по Анохину, является будущий полезный результат работы системы, а причина появления новых систем — потребность живых организмов в определенных новых результатах.

Анохин приводит схему функциональной системы [Анохин, 1971], включающую в себя компоненты, обеспечивающие формирование новых системных решений. Эта схема отражает процессы, происходящие как при сознательной координации действий, так и при протекании нейрофизиологических процессов, не контролируемых сознанием.

По модели Анохина, в процессе формирования нового решения нервная система осуществляет синтез различных внешних и внутренних факторов — внешней обстановки, актуальных потребностей, памяти о прошлом опыте. Этот синтез завершается принятием решения — выбором такого варианта управления, который обеспечит решение текущей задачи. Анохин отмечает, что этап принятия решения наименее ясен по своему механизму и часто имеет характер внезапной

интуиции. Отдельный компонент модели Анохина обеспечивает оценку соответствия полученной модели решения ожидаемому результату, санкционируя выполнение действий, а затем за счет обратной связи сопоставляет полученный практически результат с желаемым, инициируя либо корректировку действий, либо переход к следующим задачам.

Главная особенность выполняемого синтеза заключается в его интегративности, одновременном и комплексном учете возбуждений различной природы в процессе формирования нового решения. Нейроны мозга при этом играют роль интеграторов, совместно обрабатывая возбуждения разного рода.

Модель Анохина обеспечивает создание новой организующей информации, и, по сути, это модель рождения идеального, поскольку в ее рамках создается еще не материализованный план, выполнение которого решит определенную задачу.

В работе «Философский смысл проблемы естественного и искусственного интеллекта» [Анохин, 1973] Анохин предлагает рассматривать свою модель функциональной системы как универсальную модель интеллекта, актуальную не только в качестве модели высшей нервной деятельности, но и для жизни на Земле в целом. Он приходит к выводу, что характерные черты интеллекта возникли на заре зарождения жизни, уже тогда они относились к физиологическим свойствам живых организмов, и они явились необходимым условием развития живых существ.

Характерную для интеллекта прогнозирующую способность Анохин считает свойством, приобретенным уже протоплазмой первых клеток за счет повторяемости событий, происходящих во внешней среде и влияющих на структуры протоплазмы. Структуры протоплазмы, сохраняя память о взаимодействиях со средой, получили возможность, ускоряя протекание некоторых реакций, получать следы повторяющихся событий ранее их наступления и смогли реагировать на них упреждающе. Это явление стало предтечей и предпосылкой будущей координирующей работы мозга. На отмеченных свойствах живых систем основана их общая способность к самоорганизации и эволюции.

Системно-эволюционная концепция П. К. Анохина сводится к следующим констатациям:

- формирование организованных систем причинно обусловлено потребностями живых организмов в получении определенных результатов;
- способность с опережением и адаптивно реагировать на воздействия среды возникла уже у первичных форм жизни и явилась необходимым условием дальнейшей эволюции;
- способность живых систем к синтезу новой организации основана на памяти и прогнозировании будущих событий;
- синтез новых системных решений выполняется на основе модели функциональной системы, обеспечивающей на этапе синтеза особого рода интеграцию нескольких информационных источников — памяти о прошлом опыте, сигналов из внешней среды и актуальных потребностей;
- новая организация реализуется через комплексное ограничение степеней свободы элементов системы именно тем образом, который потенциально соответствует решению актуальной задачи.

Основная проблема модели Анохина связана с тем, что источник органической целостности, интегративности, способности синтезировать новые адаптивные решения и в этой модели остается не раскрытым в деталях его реализации. Особые свойства живой материи констатируются, но как именно они обеспечиваются, остается открытым вопросом.

Концепция П. К. Анохина позволяет единообразно интерпретировать всю эволюцию организованных систем как последовательность адаптивных, приспособительных реакций живой материи на изменяющиеся условия и обстоятельства ее существования. Данная модель лишена противоречий, существующих между неodarвинистской моделью эволюции и известными системными свойствами. В то же время вряд ли объяснительная сила этой модели охватывает все содержание эволюционного процесса в целом. Есть труднообъяснимые в рамках этой концепции обстоятельства, на которые указывают сторонники ортогенетических концепций эволюции, — явления параллелизмов и конвергенций в эволюционной изменчивости, формирование неадаптивных признаков. С учетом этих обстоятельств можно предположить существование неких дополнительных механизмов координации эволюционной изменчивости на уровнях биоценозов и биосферы.

В последние годы появились публикации, подтверждающие и конкретизирующие положения системно-эволюционной концепции П. К. Анохина.

В [Brau, 1995] отмечается, что в одноклеточных организмах вместо нервной системы для управления поведением используются белковые цепи. Отпечаток окружающей среды на состоянии белков в клетке является следом памяти, содержащей постоянно меняющуюся информацию об окружении клетки. Благодаря высокой степени взаимосвязи системы взаимодействующих белков действуют как нейронные сети, адекватно реагирующие на внеклеточные стимулы.

В работе [Brau, 2014] отмечается, что подвижные клетки, такие как бактерии, амёбы и фибробласты, демонстрируют постоянный уровень энергозатратных реакций, связанных с цитоскелетом и сигнальными путями, независимо от того, мигрируют они или нет. Проводится параллель между этой сигнальной активностью и внутренней активностью человеческого мозга. Отмечается, что в обоих случаях можно утверждать, что организм постоянно репетирует возможные будущие действия, чтобы действовать быстро и точно при поступлении соответствующих сигналов из окружающей среды.

В обзоре современных исследований [Timsit, Gregoire, 2021] проводят аналогии между функционированием мозга и клетки и формулируют выводы, близкие к положениям системно-эволюционной концепции П. К. Анохина. Там отмечается, что помимо свойств самоорганизации и самовоспроизведения, которые считаются ее сущностью, жизнь с самого начала должна была выработать сложные формы поведения, а реализация ее первичных потребностей уже нуждалась в «молекулярном мозге». Авторы приходят к выводу, что восприятие и интеграция различных сигналов и реагирование на них путем принятия соответствующих решений являются неотъемлемой способностью всех форм жизни, независимо от степени их организации.

Результаты ряда экспериментальных исследований подтверждают основные положения концепции П. К. Анохина. В нескольких экспериментах [David et al., 2010] с колониями генетически идентичных клонов клеток дрожжей в клетки искусственно вносились генетические поломки, лишаящие их возможности питаться и делиться. Клеткам приходилось комплексно перестраивать внутреннюю регуляцию, чтобы приспособиться к новой ситуации. Часть клеток в колониях погибала, но другая часть некоторое время реорганизовывалась и затем успешно продолжала жизнедеятельность, используя новые пути метаболизма. В том числе наблюдались повторяющиеся однотипные мутации, а в других случаях комплексная перестройка регуляции в клетках происходила вообще без мутаций.

Поскольку адаптация клеток в экспериментах такого рода сопровождается согласованным изменением режимов работы ряда генов и сопутствующих процессов в клетке и она связана с реакцией клеток на проблему, ранее им не встречавшуюся, это наглядная иллюстрация синтеза нового решения по модели П. К. Анохина. Е. Браун отмечает [Brau, 2015], что особое значение

имеет сделанный на основе данных исследований вывод о том, что адаптация клеточной организации является эффективным исследовательским динамическим процессом, а не процессом, основанным на случайных мутациях.

Системно-эволюционная концепция П. К. Анохина находит подтверждение в результатах современных исследований и предлагает общую для всех организованных систем модель их синтеза, основанную на специфичной для живой материи способности к информационной интеграции памяти, потребностей и внешних сигналов, обеспечивающей направленный синтез новой организации.

12. Синергетика и системная сложность

Синергетика часто рассматривается как современное решение проблем самоорганизации и возникновения сложных систем. Литература по синергетике дает для этого определенные основания, поскольку сложность там часто упоминается, в том числе в названиях трудов этого направления: «Законы эволюции и самоорганизации сложных систем» [Князева, Курдюмов, 1994], «Познание сложного» [Nicolis, Prigogine, 1989], «Сложность и самоорганизация» [Майнцер, 1997].

Сложность в синергетике рассматривается как результат самоорганизации неравновесных диссипативных систем, снижающих собственную энтропию за счет притока внешней энергии. Неравновесные системы обмениваются энергией и веществом с окружающей средой, поддерживая себя в течение некоторого времени в состоянии, далеком от теплового равновесия и с локально уменьшившейся энтропией. Малые неустойчивости и флуктуации приводят к необратимым бифуркациям и, таким образом, к возрастающей сложности возможного поведения [Майнцер, 1997].

В тех ситуациях, где самоорганизация рассматривается синергетикой предметно, она обусловлена вполне определенными причинами — характером решений систем нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих динамику систем. Каноническими примерами таких процессов, постоянно приводимыми в качестве иллюстрации самоорганизации, являются ячейки Бенара [Гершуни, Жуховицкий, 1972] и реакция Белоусова – Жаботинского [Корзухин, Жаботинский, 1965]. Для этих примеров самоорганизации существуют их математические описания. В целом вся рассматриваемая синергетикой на формализуемом уровне самоорганизация именно такова: это закономерное, внутренне пассивное, объяснимое действием известных законов, допускающее математическое описание структурирование материи. Возникающая в рамках этих процессов динамическая сложность структур не является организованной сложностью и не содержит информационных составляющих. В работах по синергетике не рассматривается специфика организованных систем и информационных процессов, не анализируется проблема их возникновения. Если результат некоего спонтанного физико-химического структурирования материи начинает согласованно работать как организованная система, выполняя решение определенной задачи, и аналогичные явления многократно повторяются, то должны быть выявлены причины и закономерности явлений именно этого ряда. Но организованная система, решающая определенную задачу, как правило, не является математическим следствием самой постановки задачи, условий внешней среды и известных физических законов. Соответственно, отсутствует прямая аналогия между синергетическим структурированием материи и возникновением организованных систем, и синергетика содержательно не рассматривает механизмы синтеза организованных систем.

Использование неоднозначности терминов «сложность» и «самоорганизация» в синергетике создает иллюзию решения эволюционных проблем. «Самоорганизация» там лишь дополняет известную из законов физики и химии склонность материи к структурированию склонностью

ее в определенных ситуациях порождать динамически устойчивые процессы, зависящие от начальных условий (аттракторы). Ближайший вычислительный аналог этого явления — компьютерная реализация математической игры Life Дж. Конвея [Gardner, 1970], где первоначальный случайный посев клеточных автоматов эволюционирует по жестким законам и порождает галерею устойчивых статических и динамических структур, включая составные объекты, перемещающиеся в пространстве. В этой модели нет ничего от информационных процессов и от функциональных систем, то есть нет главных, сущностных аспектов биологической организации. Но данное обстоятельство характеризует не только модель игры Life, но и в целом рассматриваемые в синергетике предметно модели.

Если принять во внимание организационную проблематику, то синергетический подход, когда он используется для объяснения появления новых организованных форм, оказывается вариантом преформизма, поскольку новые работающие структуры там predetermined некими физическими законами и активизируются они простыми переключателями («параметрами порядка» в синергетической терминологии). Информационная связь вновь возникающих структур с их будущей функциональностью не находит в синергетике какого-либо обоснования или объяснения.

В ряде работ обосновывается физикалистское объяснение эволюционного процесса, включая биологическую эволюцию, как самодвижения материи, направляемого определенными физическими законами. В качестве таковых предлагается рассматривать «принцип максимума производства энтропии» [Khazen, 1993], «принцип наименьшей диссипации энергии» [Зотин, Зотин, 1999], «диспропорционирование энтропии в сопряженных процессах» [Галимов, 2006]. В работах этого направления не рассматривается информационная специфика организованных систем и не конкретизируется, как именно физически иницируются затраты энергии на создание тех систем, которые дадут энергетический выигрыш и решение каких-либо проблем лишь в дальнейшем, что характерно для ситуаций синтеза организованных систем.

13. Дальнейшие перспективы

Успешное решение задачи моделирования и формализации синтеза структур организованных систем должно быть сопряжено с успешным теоретическим осмыслением закономерностей генезиса систем такого рода в материальном мире. Как было показано выше, вычислительные модели, основанные на положениях синтетической теории эволюции, по объяснимым причинам не обеспечивают решение задач системной эволюции.

Эволюционный синтез структур организованных систем требует неких иных подходов.

В альтернативных теоретических представлениях об эволюционном процессе появление новых организованных форм связывают с такими системными свойствами живых организмов, как их активность, интегративность, целостность, то есть с их биологической спецификой.

Выводы, которые следуют из этих обстоятельств в отношении компьютерного моделирования, заключаются в том, что для успешного машинного моделирования эволюции организованных систем потребуется техническая реализация тех свойств живой материи, которые обеспечивают динамическую координацию функционирования живых систем в изменяющихся условиях, включая системообразующие реакции на возникающие проблемы. Обычно такие свойства относят к атрибутам сильного искусственного интеллекта. Соответственно, потенциальный успех в этом направлении должен быть связан с успешной технической реализацией сильного искусственного интеллекта [Butz, 2021]. В силу глубокой связи проблемы возникновения и эволюции организованных систем с атрибутами реального интеллекта, тестирование интеллектуального агента на способность синтезировать новую организованную системность может рассматриваться как более точный критерий объективного наличия реального интеллекта, чем тест Тьюринга [Turing, 1950].

Современные системы ИИ (Copilot, ChatGPT) иногда используются разработчиками программного обеспечения как средства автоматической генерации программного кода. Эти системы обучаются на больших репозиториях кода, созданного ранее программистами, и генерируют предлагаемые решения на основе этого кода. Полученный таким образом программный код бывает неработоспособным, часто содержит уязвимости и ошибки (40 % для Copilot по [Pearce et al., 2022]). Используемый в данных системах принцип кодогенерации не является решением проблемы автоматизации синтеза новых системных решений, рассматриваемой в данной работе.

14. Заключение

Многолетний опыт эволюционной кибернетики и эволюционного программирования выявил принципиальные проблемы в модельном воспроизведении важнейшего аспекта эволюционного процесса — синтеза структуры организованных систем и эволюции системной организации.

Вычислительные эксперименты, представленные в данной работе, демонстрируют условия и ограничения, характерные для эволюционного формирования системных свойств программного кода. Результаты этих экспериментов подтверждают существование объективных ограничений на системную сложность кода, синтезируемого по методологии эволюционного программирования.

Поиск источника проблем эволюционного моделирования приводит к выводу о том, что ключевой фактор, обеспечивающий системный синтез, имеет биологическую специфику, для которой не удастся реализовать ее машинную формализацию и компьютерное моделирование.

В работах П. К. Анохина предложена универсальная модель синтеза организованных систем. В основе этой модели лежат способность биологических систем к прогнозированию и единовременная комплексная интеграция ими информации из памяти, актуальных потребностей и сигналов о текущей обстановке в процессе синтеза нового системного решения.

Способность биологических систем сопоставлять свои потребности как целого с совокупностью наличествующих обстоятельств содержит признаки особого рода интегративности, не имеющей алгоритмического вычислительного аналога.

Особые свойства живой материи могут быть связаны с нелокальностью и несепарабельностью квантовых систем.

Техническое решение задачи синтеза структуры организованных систем будет обусловлено созданием сильного искусственного интеллекта, реализация которого может потребовать выхода за рамки использования классических вычислений и типовых средств цифровой вычислительной техники.

Список литературы (References)

Аверченков В. И., Казаков П. В. Эволюционное моделирование и его применение: монография. — М.: ФЛИНТА, 2021.

Averchenkov V. I., Kazakov P. V. Evoliutsionnoe modelirovanie i ego primeneniye: monografiya [Evolutionary modeling and its application: monograph]. — Moscow: FLINTA, 2021 (in Russian).

Анохин П. К. Принципиальные вопросы общей теории функциональных систем. — М.: Наука, 1971.

Anokhin P. K. Printsipial'nye voprosy obshchei teorii funktsional'nykh system [Principal issues of the general theory of functional systems]. — Moscow: Nauka, 1971 (in Russian).

Анохин П. К. Философский смысл проблемы естественного и искусственного интеллекта // Вопросы философии. — 1973. — № 6. — С. 83–97.

Anokhin P. K. Filosofskii smysl problemy estestvennogo i iskusstvennogo intellekta [Philosophical meaning of the problem of natural and artificial intelligence] // Voprosy filosofii. — 1973. — No. 6. — P. 83–97 (in Russian).

- Берг Л. С.* Номогенез, или эволюция на основе закономерностей // Труды по теории эволюции. 1922–1930. — Л.: Наука, 1977.
Berg L. S. Nomogenez, ili evoliutsiia na osnove zakonomernostei [Nomogenesis, or evolution based on regularities] // Trudy po teorii evoliutsii. 1922–1930. — Leningrad: Nauka, 1977 (in Russian).
- фон Берталанфи Л.* Общая теория систем — критический обзор // Исследования по общей теории систем: сб. пер. / общ. ред. и вст. ст. В. Н. Садовского и Э. Г. Юдина. — М.: Прогресс, 1969. — С. 23–82.
fon Bertalanfi L. Obshchaya teoriya sistem — kriticheskii obzor [General systems theory — a critical review] // Issledovaniya po obshchei teorii sistem: sb. per. / obshch. red. i vst. st. V. N. Sadovskogo i E. G. Yudina. — Moscow: Progress, 1969. — P. 23–82 (in Russian).
- Богданов А. А.* Тектология: Всеобщая организационная наука. — М.: Финансы, 2003.
Bogdanov A. A. Tektologiya: Vseobshchaya organizatsionnaya nauka [Tectology: General organizational science]. — Moscow: Finansy, 2003 (in Russian).
- Воронцов Н. Н.* Развитие эволюционных идей в биологии. — М.: Прогресс-традиция: АБФ, 1999.
Vorontsov N. N. Razvitie evoliutsionnykh idei v biologii [Development of evolutionary ideas in biology]. — Moscow: Progress-traditsiya: ABF, 1999 (in Russian).
- Галимов Э. М.* Феномен жизни: между равновесием и нелинейностью. Происхождение и принципы эволюции. — М.: Едиториал УРСС, 2006.
Galimov E. M. Fenomen zhizni: mezhdru ravnovesiem i nelineinost'iu. Proiskhozhdenie i printsipy evoliutsii [Phenomenon of life: between balance and non-linearity. Origin and principles of evolution]. — Moscow: Editorial URSS, 2006 (in Russian).
- Гершуни Г. З., Жуховицкий Е. М.* Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. — М.: Наука, 1972.
Gershuni G. Z., Zhukhovitskii E. M. Konvektivnaya ustoichivost' neszhimaemoi zhidkosti [Convective stability of incompressible fluid]. — Moscow: Nauka, 1972 (in Russian).
- Емельянов В. В., Курейчик В. В., Курейчик В. М.* Теория и практика эволюционного моделирования. — М.: Физматлит, 2003.
Emel'ianov V. V., Kureichik V. V., Kureichik V. M. Teoriya i praktika evoliutsionnogo modelirovaniya [Theory and practice of evolutionary modelling]. — Moscow: Fizmatlit, 2003 (in Russian).
- Зотин А. И., Зотин А. А.* Направление, скорость и механизмы прогрессивной эволюции. — М.: Наука, 1999.
Zotin A. I., Zotin A. A. Napravlenie, skorost' i mekhanizmy progressivnoi evoliutsii [Direction, rate and mechanisms of progressive evolution]. — Moscow: Nauka, 1999 (in Russian).
- Карпов В. Э.* Методологические проблемы эволюционных вычислений // Искусственный интеллект и принятие решений. — 2012. — № 4. — С. 95–102.
Karpov V. E. Metodologicheskie problemy evoliutsionnykh vychislenii [Methodological problems in evolutionary computation] // Iskusstvennyi intellekt i priniatie reshenii. — 2012. — No. 4. — P. 95–102 (in Russian).
- Корзухин М. Д., Жаботинский А. М.* Математическое моделирование химических и экологических автоколебательных систем. — М.: Наука, 1965.
Korzukhin M. D., Zhabotinskii A. M. Matematicheskoe modelirovanie khimicheskikh i ekologicheskikh avtokolebatel'nykh system [Mathematical modeling of chemical and environmental auto-oscillatory systems]. — Moscow: Nauka, 1965 (in Russian).
- Князева Е. Н., Курдюмов С. П.* Законы эволюции и самоорганизации сложных систем. — М.: Наука, 1994.
Kniazeva E. N., Kurdiymov S. P. Zakony evoliutsii i samoorganizatsii slozhnykh system [Laws of evolution and self-organisation of complex systems]. — Moscow: Nauka, 1994 (in Russian).
- Любимцев А. А., Гурвич А. Г.* Диалог о биополе / сост.: В. А. Гуркин, А. Н. Марасов, Р. В. Наумов. — Ульяновск: Ульяновский государственный педагогический университет, 1998.
Liubishchev A. A., Gurvich A. G. Dialog o biopole [Dialogue about the biofield] / sost.: V. A. Gurkin, A. N. Marasov, R. V. Naumov. — Ul'ianovsk: Ul'ianovskii gosudarstvennyi pedagogicheskii universitet, 1998 (in Russian).
- Майнцер К.* Сложность и самоорганизация // Вопросы философии. — 1997. — № 3. — С. 48–61.
Maintser K. Slozhnost' i samoorganizatsiya [Complexity and self-organization] // Voprosy filosofii. — 1997. — No. 3. — P. 48–61 (in Russian).
- Мелких А. В.* Теория направленной эволюции. — Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2020.
Melkikh A. V. Teoriya napravlennoi evoliutsii [Theory of directed evolution]. — Dolgoprudnyi: Izdatel'skii dom «Intellect», 2020 (in Russian).

- Норенков И. П.* Основы автоматизированного проектирования: учеб. для вузов. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002.
Norenkov I. P. Osnovy avtomatizirovannogo proektirovaniya [Basics of computer-aided design]: ucheb. dlia vuzov. — 2-e izd., pererab. i dop. — Moscow: Izd-vo MG TU im. N. E. Bauman a, 2002 (in Russian).
- Половинкин А. И.* Основы инженерного творчества. — М.: Машиностроение, 1988.
Polovinkin A. I. Osnovy inzhenernogo tvorchestva [Fundamentals of engineering creativity]. — Moscow: Mashinostroyeniye, 1988 (in Russian).
- Попов И. Ю.* Ортогенез против дарвинизма. Историко-научный анализ концепций направленной эволюции. — СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2005.
Popov I. Yu. Ortogenez protiv darvinizma. Istoriko-nauchnyi analiz kontseptsii napravlennoi evoliutsii [Orthogenesis versus Darwinism. Historical and scientific analysis of the concepts of directed evolution]. — St. Petersburg: Izd-vo S.-Peterb. un-ta, 2005 (in Russian).
- Редько В. Г.* Эволюционная кибернетика. — М.: Наука, 2003.
Red'ko V. G. Evoliutsionnaya kibernetika [Evolutionary cybernetics]. — Moscow: Nauka, 2003 (in Russian).
- Сюракшин А. В., Салеев В. А., Юшанхай В. Ю.* Квантовые модели в биологии // Вестник Самарского университета. Естественно-научная серия. — 2022. — Т. 28, № 1–2. — С. 74–94.
Siurakshin A. V., Saleev V. A., Yushankhai V. Yu. Kvantovye modeli v biologii [Quantum models in biology] // Vestnik Samarskogo universiteta. Estestvenno-nauchnaya seriya. — 2022. — Vol. 28, No. 1–2. — P. 74–94 (in Russian).
- Шмальгаузен И. И.* Организм как целое в индивидуальном и историческом развитии. Избранные труды. — М.: Наука, 1982.
Shmal'gauzen I. I. Organizm kak tseloe v individual'nom i istoricheskom razvitii. Izbrannye trudy [The organism as a whole in individual and historical development. Selected works]. — Moscow: Nauka, 1982 (in Russian).
- Braun E.* The unforeseen challenge: from genotype-to-phenotype in cell populations // Rep. Prog. Phys. — 2015. — Vol. 78, No. 3. — 036602.
- Bray D.* Intrinsic activity in cells and the brain // Mol. Biol. Cell. — 2014. — Vol. 25. — P. 737–738.
- Bray D.* Protein molecules as computational elements in living cells // Nature. — 1995. — Vol. 376. — P. 307–312.
- Butz M. V.* Towards Strong AI // Künstl. Intell. — 2021. — Vol. 35. — P. 91–101.
- David L., Stolovicki E., Haziz E., Braun E.* Inherited adaptation of genome-rewired cells in response to a challenging environment // HFSP J. — 2010. — Vol. 4, No. 3–4. — P. 131–141.
- Eigen M., Schuster P.* The hypercycle. A principle of natural self-organization. — Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1979.
- Fogel L. J., Owens A. J., Walsh M. J.* Artificial intelligence through simulated evolution. — New York: John Wiley, 1966.
- 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.
- Gould S. J.* Punctuated equilibrium in fact and theory // Somit A., Peterson S. The Dynamics of Evolution. — New York: Cornell University Press, 1992. — P. 54–84.
- Grover L. K.* Quantum mechanics helps in searching a needle in a haystack // Physical Review Letters. — 1997. — Vol. 79, No. 2. — P. 325–328.
- Holland J. H.* Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with application to biology, control, and artificial intelligence. — USA: University of Michigan, 1975.
- Huxle J., S.* Evolution: the modern synthesis. — London: Allen and Unwin, 1942.
- Karpov V. E.* Methodological problems in evolutionary computation // Sci. Tech. Inf. Proc. — 2013. — Vol. 40. — P. 286–291.
- Kerskens C. M., Pérez D. L.* Experimental indications of non-classical brain functions // J. Phys. Commun. — 2022. — Vol. 6. — 105001.
- Khazen A.* Maximum entropy production as a motive force of progressive biological evolution // Biophysics. — 1993. — Vol. 38, No. 3. — P. 537–565.
- Kimura M.* The neutral theory of molecular evolution. — Cambridge: Cambridge University Press, 1983.

- Koonin E. V.* The origins of cellular life // *Antonie van Leeuwenhoek*. — 2014. — Vol. 106. — P. 27–41.
- Laland K. N., Uller T., Feldman M. W., Sterelny K., Müller G. B., Moczek A., Jablonka E., Odling-Smee J.* The extended evolutionary synthesis: its structure, assumptions and predictions // *Proceedings. Biological sciences*. — L., 2015. — No. 282 (1813).
- Leifer M. S., Pusey M. F.* Is a time symmetric interpretation of quantum theory possible without retrocausality? // *Proc. Math. Phys. Eng. Sci.* — 2017. — Vol. 473 (2202).
- Nicolis G., Prigogine I.* *Exploring Complexity*. — New York: Freeman, 1989.
- Ofria C., Bryson D. M., Wilke C. O.* Avida: A software platform for research in computational evolutionary biology // *Komosiński M. & Adamatzky A. (eds.) Artificial life models in software*. — London: Springer, 2009. — P. 3–35.
- Pearce H., Ahmad B., Tan B., Dolan-Gavitt B., Karri R.* Asleep at the keyboard? Assessing the security of GitHub Copilot’s code contributions // *Proceedings — 43rd IEEE Symposium on Security and Privacy, SP 2022*. — P. 754–768.
- Penrose R.* *Shadows of the mind: a search for the missing science of consciousness*. — New York: Oxford Univ. Press, 1994.
- Penrose R.* *The emperor’s new mind: concerning computers, minds, and the laws of physics*. — New York: Oxford Univ. Press, 1989.
- Schneider T. D.* Evolution of biological information // *Nucleic Acids Research*. — 2000. — Vol. 28, Issue 14. — P. 2794–2799.
- Timsit Y., Gregoire S. P.* Towards the idea of molecular brains // *Int. J. Mol. Sci.* — 2021. — Vol. 22.
- Turing A.* Computing machinery and intelligence // *Mind*. — 1950. — Vol. LIX, No. 236. — P. 433–460.
- Uller T., Feiner N., Radersma R., Jackson I. S. C., Rago A.* Developmental plasticity and evolutionary explanations // *Evolution & Development*. — 2020. — Vol. 22, No. 1–2. — P. 47–55.
- Wiener N.* *Cybernetics or control and communication in the animal and the machine*. — New York: The Technology Press and John Wiley & Sons, Inc.; Paris: Hermann et Cie, 1948.