

## АСПЕКТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОСОБЫЕ СВОЙСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

**С.Л. Артеменков**

Рассмотрены особые свойства строения сложных (сверхсложных) систем и некоторые аспекты возможности их моделирования в искусственных системах. Показаны такие важные характеристики сложности, как: сложный атомизм, нелокальные взаимодействия, наличие циклов действующей причины, семантика и контекстная чувствительность, поддерживаемые иерархией внутренних циклических процессов, обусловленность внутренними состояниями и отношениями, возможности самоизменения, самоподдержания и самовосстановления, связанные с трансцендентальными структурно-порождающими процессами. Сверхсложные системы являются невычислимыми (в машине Тьюринга) и принципиально соотносимы со множеством невыводимых друг из друга формальных моделей.

---

We consider the special properties of the structure of complex (highly complex) systems and some aspects of their simulation capabilities in artificial systems. Showing such important characteristics of complexity, how complicated atomism, non-local interactions, the presence of cycles of efficient cause, semantics and context sensitivity, supported by the hierarchy of internal cyclic processes, conditioning by internal states and relationships, the self-transformation, self-sustaining and self-healing capabilities, associated with the transcendental structure-generating processes. Highly complex systems are uncomputable (in Turing machine) and fundamentally correlated with a variety of non-printing from one another formal models.

---

### **КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА**

Сложность, сверхсложность, сложная система, открытая система, синтаксическая система, семантическая система, моделирование, структурно-порождающие процессы, формопорождение, постановление, энактивизм, иерархия, причинно-следственные отношения, M-R система, конструкция мозга.

### **1. ВВЕДЕНИЕ**

В современном информационно-технологическом мире на первый план часто выходят проблемы разработки и построения разнообразных адаптивных автоматизированных систем и механизмов, которые могут взять на себя часть свойственных человеку интеллектуальных функций и других способностей, которыми обладают живые организмы. Интеллектуализация технических систем требует исследования и внедрения качественно новых подходов, которые должны позволить создавать функционально гибкие системы с необходимыми интеллектуальными и полифункциональными возможностями.

Важную роль в этих исследованиях играют направления работ, связанные с воссозданием в искусственных системах тех механизмов, которыми обладают люди и животные, их телесные органы и системы их жизнедеятельности. Сделать это в действительности нелегко, поскольку относительно простым свойствам и конструктивному строению современных машин

и механизмов противостоит сложная системная организация живых систем, чье интегративное строение пока еще в недостаточной степени понято современной наукой.

Например, такие процессы, как процессы метаболизма клеток или психические процессы восприятия и мышления, остаются во многом слабо изученными и понятыми, а закономерности строения и функционирования этих систем во многом неясными. В частности, в психологических исследованиях мы имеем дело с действительно сложной реальностью психических явлений. С системной точки зрения исследуемая психологическая реальность сложна в своем устройстве онтологически, а в фило- и онтогенезе определяется не менее, если не более сложным образом. Характерным примером может служить описание механизмов и стадий развития ребенка [6; 13]. На практике эта сложность может приводить как к ситуациям практически полной неопределенности, так и наоборот непредсказуемой определенности.

Если эти процессы и связанные с ними системы являются по-настоящему сложными, то, по всей видимости, их также и сложно научно исследовать. Психологические исследования, направленные на понимание сущности психических процессов, определяющих основу возможности существования самого этого понимания и соответствующих научных концепций, оказываются в особом положении, поскольку «человеческое мышление способно осмысливать психику только опосредованно – опять же через продукты психического процесса, а сам психический процесс, порождающий эти продукты, остается за пределами логико-понятийной структуры человеческого мышления» [11].

Таким образом, можно утверждать, что сложность и неопределенность имманентны процессу психологического исследования, а изучаемые в психологии системы обладают действительно сложными свойствами и проявлениями. Характерным примером общего представления о такой сложности является положение о формопорождении, которое лежит в основе иерархической объяснительной модели строения восприятия в теории трансцендентальной психологии, предложенной проф. А.И. Миракяном [5; 9]. Данная теория представляет собой опыт построения новой аксиоматической методологии психологии восприятия на основе определения универсальных общеприродных принципов и условий возможности осуществления формопорождающих процессов психического отражения. В этих процессах выделяется структурно-процессуальная часть, обеспечивающая бессознательные процессы непосредственно-чувственного восприятия, которые основаны на иерархической системе образования анизотропных отношений [4]. Следует отметить, что идея формопорождения методологически является важной в плане ее более широкого обобщения и выделения в общей системологии отдельного класса структурно-порождающих процессов, механизмы которых не зависят от свойств их частей или продуктов и являются характерными для процессов перехода между системообразующими структурами, изучаемыми разными иерархически взаимосвязанными науками [2].

Естественно возникает вопрос в чем, по сути, состоит представленная выше сложность и как она может быть определена? Есть ли в этой «сложности» какие-либо общие свойства или характеристики, которые важны для ее моделирования в искусственных системах?

Здесь следует заметить, что как специальная дисциплина «сложные системы» являются относительно новой большой областью науки [16]. Задачей этой науки является изучение того, как части системы и их взаимосвязи обеспечивают особое функционирование и коллективное поведение систем и как эти системы взаимодействуют с их окружением. Поскольку эти вопросы относятся к очень многим системам самого разного рода, включая социальные, нейронные, молекулярные, мультиагентные и другие системы, то вопросы, относящиеся к этой дисциплине, пронизывают многие теоретические и практические сферы науки и имеют отношение к инженерному конструированию, системотехнике, робототехнике и другим направлениям научно-технического развития.

Обычное определение «сложности» связано с представлением о частях, которые взаимосвязаны и переплетены. Поскольку из частей состоят и «простые» системы, то взаимосвязи и «сплетения» частей в результате представляют собой важную характеристику сложности. При таком понимании сложности существует тенденция исследования свойств и качеств сложности систем, представляющих собой в первую очередь различные сетевые образования [22]. Вместе с тем анализ биологических, психофизиологических и психологических исследований показывают, что такое понимание сложности недостаточно [3].

В этой связи, одной из важнейших фундаментальных задач является задача исследования строения и развития по-настоящему сложных (сверхсложных) систем, структура и динамика процессов в которых существенным образом отличаются от процессов в широко известных механизмах и машинах. В данной работе представлен ряд направлений исследования сложных систем и показаны некоторые из важных особенностей их строения.

## 2. СЛОЖНОСТЬ СИСТЕМ И ЯВЛЕНИЙ ДЕЙСТВИТЕЛЬНОСТИ

Основные направления исследования сложных систем относятся к самым разным разделам науки: общая теория систем, кибернетика, искусственный интеллект, теория динамических систем и теория глобальных сетей, синергетика, мультиагентские системы и др. Понятно, что представления о структурной, динамической и иной «сложности» систем формировались в самых разных науках, включая физику, химию и биологию. В существенной мере они так или иначе связаны с процессами «живого мира» и системами, относящимися к миру живых существ.

Следует отметить, что «сложность» и «простота» на самом деле одновременно присущи системам и явлениям действительности, которые являются предметом научного исследования. В принципе «простота» является важным началом и результатом науки, что, в частности связано с широким применением методов аналитической редукции и поведенческой имитации, а также с требованием «не множить сущее без необходимости». В контексте стремления к такому упрощению сложность явлений мира оказывается менее заметной еще и потому, что она просто меньше встречалась и встречается в повседневной практике человека. При этом потенциальная сложность и неопределенность внутренне присущи (имманентны) процессу научного исследования и естественно зависят от объекта и предмета исследования. В этом научный подход в целом отличается от нашего повседневного опыта. Наука ставит и пытается просто решать проблемы, которые в повседневной жизни человек может не замечать.

Характерным примером является история развития теории чисел. В частности, обыденная практика создает представление о редкости иррациональных чисел по отношению к множеству рациональных чисел. Основными числами житейского опыта долгое время являлись рациональные числа, связанные с отношениями между целыми числами. Если в геометрической практике человека появляется число «пи», которое не является рациональным, то оно является действительно редким в контексте рациональных чисел. Однако, как нам известно, эта редкость обманчива и множество иррациональных чисел является более мощным, чем множество рациональных чисел. Иначе говоря, редкость иррациональных чисел есть результат ограниченной выборки.

В биологии таким же образом может быть поставлен вопрос: «является ли живой мир незначительными (специальным) по отношению к миру не живых систем и явлений? Должны ли мы согласиться со следующим положением [21]: биология является незначительной, поскольку – живой мир образует очень малую и очень специальную часть вселенной – не похоже, что изучение живых существ когда-либо откроет общие законы, которые будут действительны вне биосферы?

В физикальной классификации материальных систем класс организмов содержится в классе машин, класс машин содержится в классе материальных систем. В этой классификации систем фон Нейман и ряд других исследователей обратили внимание на понятие сложности систем. При этом в качестве основы сложности рассматривали размер (количество) и полагали, что критический размер системы приводит к возникновению сложности. Системные качества имеют порог в зависимости от количества элементов, которые содержит система и/или количества связей между ними. Определенное системное качество (свойство) будет отсутствовать при малом количестве элементов и связей и появится только при достаточно большом их количестве [8].

По фон Нейману биологические качества: самовоспроизведение, возможность роста, эволюционирования и развития, и психические качества: обучаемость, запоминание, мышление, познание и сознание, могут быть ассоциированы с такими порогами сложности. Все организмы находятся по другую сторону порога сложности. Но при этом онтология и эпистемология совпадают. Понимание того как работает система говорит также и о том, как ее можно построить и наоборот.

Следствием такого рассмотрения является то, что конструирование и вычисление, фактически, совпадают. Вне зависимости от уровня сложности система есть совокупность своих подсистем. Функция всегда локализована в структуре. Одна функциональная активность в машине может быть пространственно отделена от другой с использованием искусственных средств, без нарушения функции (каждой из таких частей).

Обычный подход к конструированию искусственных систем вполне естественно может ставить задачу воссоздания функциональных возможностей живых организмов. Например, если вы хотите построить самолет, то вы смотрите на птицу, которая может летать и обладает крыльями. Однако, общая идея выделения и воссоздания отдельных специальных свойств оказывается главенствующей. Поэтому функцию полета вполне естественно отделить от материальной структуры (птицы и самолета).

Действительно, что делает самолет и птицу столь разными? Крыло птицы есть неразделимая комбинация двигателя и аэродинамической поверхности. Мы не можем физически разделить их на две пространственно разнесенные структуры. В самолете двигатель и крыло отделимы одно от другого потому, что так он построен по самой сути своей неоднородной онтологии, которая определяется гетерогенной эпистемологией исследователей.

При более широком рассмотрении можно утверждать, что независимо от количественного порога система является простой или только усложненной, если все ее модели являются воспроизводимыми таким гетерогенным способом разделений и соединения частей и функций (в том числе с помощью синтаксического конструирования). Соответственно непростая система, которая должна иметь невозпроизводимую модель, является по настоящему сложной. Ее нельзя построить с использованием с помощью чисто синтаксических средств. Необходимо включать семантические элементы, трансцендентальные по отношению к синтаксису (как, например, взятие предела в математике) или использовать два или более несоизмеримых временных процесса.

Если эпистемология равна онтологии - формализация, вычисление и конструирование совпадают. Конструирование сводится к манипуляции символами и является приложением механических синтаксических операций (правил вывода) в заданной последовательности (в единственной фиксированной временной рамке). Это собственно и есть алгоритм. Все, что «производится» таким образом, называется еще предикативным.

Соответственно то, что нельзя сконструировать путем приложения правил из конечного набора синтаксических продуктов, прилагаемых в определенном порядке к символам, взятым из фиксированного набора, может быть названо импредикативным и определяется через общность, которой оно само должно принадлежать. Фактически не существует «обычного» алгоритма построения того, что является импредикативным (возможно, в этом случае можно говорить о «необычных» алгоритмах, но этот вопрос требует дополнительного исследова-

дования). Импредикативность и неразложимость на части тесно связаны друг с другом. Неразложимость является онтологической характеристикой импредикативности. Например, аэродинамическую поверхность нельзя отделить от крыла птицы – она определяется через крыло и наоборот.

В этом смысле изучение организации живых существ выводит нас из специального физикалистского мира (где вещи следуют закономерным принуждениям частных, которые в результате определяют все) в более сложный мир, где: частные особенности не обязательно определяют общности, а знание о том, как система работает, не определяет то, как она создана. Если нашей проблемой является воссоздание (т.е. онтология) мы просто не можем ее решить с использованием ограниченных эпистемологических средств в мире, в котором онтология и эпистемология существенно отличаются и существует реляционная иерархия (взаимное вложение) разных уровней существования и сущности (организм, личность, социум и др.).

### 3. САМООРГАНИЗАЦИЯ В НЕРАВНОВЕСНЫХ СИСТЕМАХ

На основании представленных выше аргументов можно утверждать, что наличие сложности в организации живых существ является общим случаем, а простые системы (механизмы и машины) - это вырожденный случай сложных систем. Известно, что поведению и состояниям живых существ свойственны особые качества и явления: порождение, реактивность, адаптивность, ситуативность, проявление новых системных свойств и состояний (например, эмергентность) и др. Идеи порождения в настоящее время достаточно основательно исследуются в науке. В частности, синергетика, как наука о развитии и самоорганизации сложных систем произвольной природы, занимается нахождением общих закономерностей эмерджентных процессов, каким-либо образом проявляющих новые качества целостности, которых нет в составляющих эти процессы частях. Эмерджентные явления включают с себя большие количества разных возможностей, включая: приспособительный успех, который выступает из сложных взаимодействий между организмом и миром; поведение, которое не централизованно контролируется (или создается) и является результатом взаимодействия множества простых компонентов или агентов; неожиданные, непредсказуемые, поразительные ситуации или действия; поведение, возникающее в результате взаимодействия агента с окружением, которое эксплицитно не запрограммировано; проявления интеллекта, который определяется динамикой взаимодействия с миром, и др.

В частности, эмергентность предполагает наличие порождаемых интегральных системных качеств и свойств, специфичных именно для системы в целом и не выводимых из известных свойств ее элементов и способов их соединения. К этому относится и представление о том, что психические свойства возникают (проявляются) из сложных материальных образований, но не сводятся к совокупности всех их физических характеристик.

Понятие эмергентности или «проявления» в первую очередь связано с возможностью самоорганизации и порождения нового качества организации целого. Однако, интегральные системные качества самоорганизации характерны не только для живых существ. Как показывает современная наука, появление новых системных качеств возможно, например, в результате кооперативных явлений в неравновесных диссипативных системах, где во многих случаях проявляется самоорганизация и имеет место спонтанное рождение динамических структур. Таким образом, синергетические эффекты согласованного взаимодействия частей системы имеют место, как в живых, так и в неживых системах. Например, это могут быть процессы самоорганизации фосфолипидных молекул при их смешивании с водой.

Согласно диссипативной структурной модели самоорганизация происходит в условиях далеких от равновесных, когда в результате увеличения энергетических потоков, проходящих через систему, могут внезапно появиться пространственно-временные образования

глобального масштаба. Знаменитый австрийский физик Э. Шрёдингер в публичных лекциях, прочитанных в Дублине в 1943 году, рассмотрел конкретные вопросы применения физических идей в биологии (в том числе общие проблемы физического подхода к различным явлениям жизни, причины макроскопичности, многоатомности организма, механизма наследственности и мутаций) и пришел к заключению, что новая физика должна осуществить переход от «частного к общему». В минимальном случае это означает переход от закрытых систем к открытым системам [12]. Это, по сути, означает, что живые организмы являются более общим классом систем, чем неживые системы, рассматриваемые в традиционной физике.

Открытые системы в целом обладают большим многообразием возможных состояний и свойств. Примером достаточно сложной картины возможных процессов в открытой физической системе является спонтанное образование структур и возникновение упорядоченности в виде конвективных ячеек в форме цилиндрических валов или правильных шестигранных структур в слое вязкой жидкости с вертикальным градиентом температуры, то есть равномерно подогреваемой снизу (конвекция Бенара). В условиях без нагрева имеет место обычное случайное движение частиц жидкости. С модельной точки зрения единственными свойствами этих частиц (атомов Ньютона) являются масса и их координаты движения в конфигурационном и тангенциальном пространствах (положение и скорость). При нагревании в условиях, далеких от равновесных, в жидкостной системе возникает совокупное глобальное поведение, которое подчинено определенной кооперативности (за счет распределения градиентов и автоподстройки фаз): кооперативное состояние при этом включает только несколько макроуровневых степеней свободы.

Эти кооперативные синергетические явления связаны с глобальным поведением физических или иного типа систем, которые при всей усложненности имеющих явлений достаточно просты. Важно отметить, что указанные выше простые частицы Ньютона, которые образуют новые атрибуты структуры системного целого, сами не претерпевают изменений и не зависят от условий или контекста. Свойства (состояний) этих простых «атомов» являются основой для образования объединенного состояния. Кооперативные явления в этом случае это сложное агрегирование простых (контекстно-независимых) «атомов». Добавление неравновесных зависимостей (градиентов) не добавляет каких-либо новых свойств к вектору состояний этих «атомов».

#### 4. ВОЗРАСТАЮЩАЯ СЛОЖНОСТЬ КАК ОБЩЕЕ СВОЙСТВО

Математический анализ структурной стабильности системных свойств в целом тоже указывает на то, что возрастающая сложность является общим свойством их изменения. В частности, это имеет место для случая изменения свойств состояний динамических систем [24].

Общность (или качественное постоянство) свойства  $P$  может быть выражена в таком виде, что  $P(x)$  включает  $P(dx)$ , где  $d$  некоторое малое возмущение  $x$ , т.е.  $dx$  всегда или, по крайней мере, почти всегда является заменителем  $x$ . Применим такой же подход к системе дифференциальных уравнений:

$$dx/dt = f_i(x_1, \dots, x_n), \quad i = 1, \dots, n. \quad (1)$$

Для определения малого изменения  $df_i$  функций  $f_i$  уравнение (1) можно представить в виде:

$$df_i = \sum u_{ij} dx_j, \quad \text{где } u_{ij} = \partial f_i / \partial x_j. \quad (2)$$

Функция  $u_{ij}$  отражает возбуждение или торможение роста  $x_i$  под воздействием  $x_j$ . Для выявления структурной стабильности динамической системы можно ввести возмущение в произвольной форме в виде:

$$df_i = f_i + e_g, \quad \text{где } e \text{ малая величина, а } g \text{ произвольно.}$$

Это образует общее возмущение  $f_i$ . С другой стороны, каждое такое возмущение в точности сохраняет дифференциальную форму (системы). Но, точность является совершенно не общим свойством дифференциальных форм и, конечно, не сохраняемым при произвольном малом изменении таких форм.

Таким образом, то, что выглядит расширенным контекстом для понимания структурной стабильности  $f_i$ , не является таковым для  $df_i$ . Иными словами, для возмущения  $df_i$  существует больше способов, чем мы можем найти с помощью возмущения  $f_i$ . У  $df_i$  как формы существует намного больше «окрестностей», чем у  $f_i$  как функции [24].

Это образует общее возмущение  $\tilde{f}_i$ . С другой стороны, каждое такое возмущение в точности сохраняет дифференциальную форму (системы). Но, точность является совершенно не общим свойством дифференциальных форм и, конечно, не сохраняемым при произвольном малом изменении таких форм.

Таким образом, то, что выглядит расширенным контекстом для понимания структурной стабильности  $\tilde{f}_i$ , не является таковым для  $d\tilde{f}_i$ . Иными словами, для возмущения  $d\tilde{f}_i$  существует больше способов, чем мы можем найти с помощью возмущения  $\tilde{f}_i$ . У  $d\tilde{f}_i$  как формы существует намного больше «окрестностей», чем у  $\tilde{f}_i$  как функции [24].

Рассмотренная ситуация в свою очередь является общей. В целом существует гораздо больше возможностей возмущения чего-либо, чем количество этих вещей как таковых. И затем мы можем помыслить о возмущении возмущений и так далее. Таким образом, можно заключить, что возрастающая сложность является общим свойством. То, что понимается под произвольным возмущением, зависит от более широкого контекста и является очень непростой сущностью, что невольно приводит к идее сложных систем, более «общих», чем простые.

В связи с этим для динамических систем актуальной является математическая теория катастроф [1]. Эта теория изучает и классифицирует явления, характеризующиеся внезапными изменениями поведения, связанными с малыми изменениями обстоятельств. Катастрофы здесь связаны с бифуркациями различных устойчивых (и неустойчивых) траекторий (предельных циклов и предельных точек). Тип катастрофы зависит от количества одновременно изменяющихся параметров.

## 5. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И БИОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Рассматривая принципы конструирования современных технологических систем легко понять, что биологические и искусственные «роботические» системы являются очень разными по своим свойствам. Последние являются преимущественно синтаксическими, имеют простой атомизм и контекстно-независимые части. Целое при этом так или иначе является суммой его частей, анализ равен синтезу, в системе имеются выделенные причинные связи. Система, естественно не является родовой, имеет наибольшую формальную модель и, как правило, основана на вычислениях или является вычислимой.

В отличие от этого в биологии или психологии мы в принципе имеем дело с родовыми системами, разложение которых на части невозможно без разрушения системной целостности. Целое здесь оказывается больше суммы его частей, анализ не равен синтезу, у рассматриваемой естественной системы может не быть наибольшей модели, и она в результате может быть невычислимой (в машине Тьюринга).

Сложность в данном случае является следствием собственно системных качеств (включая богатые и переплетенные причинные отношения), а не увеличения размера системы. «Настоящая сложность» появляется не в результате бифуркации динамики системы, а за счет бифуркации описания. Для более полного их понимания сложные системы требуют создания более чем одной формальной системы.

В этом отношении, сложность можно определить, как качество систем реального мира, заключающееся в невозможности отображения всех их свойств в рамках любой формальной системы. Это качество предполагает наличие принципиально разных путей взаимодействия с этими системами. Принципиально разных в том смысле, что формальные системы, как модели, необходимые для описания каждого отдельного аспекта явлений в естественных системах, оказываются невыводимыми одна из другой.

Свойство невычислимости сложной системы связано с ее эндогенностью и импредикативностью: богатыми и переплетенными циклическими причинными отношениями с наличием обратной связи и иерархической спецификации механизмов. Вполне понятно, что не все формы циклической причинности являются по своему существу невычислимыми. Например, линейные сервомеханизмы являются вполне вычислимыми и при этом имеют циклическую круговую причинность, которая ограничена кругом Аристотелевской материальной причины.

Более сложная форма цикличности возникает, когда два отдельных процесса одновременно «модулируют» один другой. Эти процессы можно представить, как процессы, взаимно обновляющие свои операционные характеристики. При этой цикличности частями петли являются как Аристотелевская материальная причина, так формальная причина. Эта та цикличность, которая возникает при традиционном кибернетическом подходе [14] и она также вполне вычислима.

Интересная радикальная идея автономной цикличности представлена в теории Автопоззиса [7]. Автопоззийная система определена в терминах своей организации. В простейшем виде суть автопоззиса состоит в самовоспроизведении организмом своей границы, что необходимо для существования в качестве единой системы в разнообразной окружающей среде. В этом смысле, «живая система», такая как живая клетка организма, есть автопоззийная машина, чья основная функция состоит в создании и поддержании ее целостности - мембраны, отделяющей ее от среды, в которой она существует как когнитивная единица. Автопоззийная машина является специальным типом машины с особым гомеостазисом. Фундаментальной переменной, которую надо поддерживать, в ней является своя собственная структурно-процессуальная организация.

При перенесении этого кибернетического подхода на анализ психологических и социальных систем обычно подчеркивается идея всецелотелесности и вводится понятие «постановления» или «энактивизма», как порождения когнитивных возможностей в циклическом действии. При этом исследователи выделяют свой подход в отдельное научное направление, дифференцируя его как, от традиционного когнитивизма, так и от коннекционизма [10; 26]. Согласно этому подходу процесс взаимодействия автономного организма со средой поддерживается внутренними циклическими процессами, которые образуют иерархию ее порождающих возможностей, обеспечивающих, в частности, создание и перемещение соответствующих перцептивных «интерфейсов».

Например, в процессе научения при сенсорном замещении или при использовании новых орудий функциональный «интерфейс» восприятия перемещается далее во вне организма в то время, как психический «интерфейс» наоборот движется вовнутрь. При этом «психическое расстояние» до предмета становится короче, а «физиологическое расстояние» становится процессуально более сложным и обособленным. То, что функционально означает освоение действительности в виде движения «вовне», трансцендентально означает движение «вовнутрь» и наоборот. В этом смысле можно утверждать, что перцептивный процесс имеет особую порождающую (моделирующую) природу [5; 17].

## **6. МЕТАБОЛИЗМ И СИСТЕМНАЯ КОНСТРУКЦИЯ МОЗГА**

Отмеченные выше порождающие возможности психики могут быть связаны с работой третьего вида циклической причинности, относящейся к образованию циклов Аристотелевской



действующей причины. Эти причины также могут взаимодействовать друг с другом и образовывать иерархически замкнутые системы с обратной связью. В таком процессе одинаково необходимы, как цикличность, так и иерархия. Результирующие процессы по самому своему существу являются неоднозначными. Поскольку как таковая неоднозначность запрещена в вычислениях, то такой вид циклических причинных процессов является, по сути, невычислимым (в машине Тьюринга).

В эндогенной биологической системе иерархии причинных связей составляют кольцевые структуры. Эта «петлевая иерархия» имеет одновременно как нисходящую, так и восходящую связи, основанные на действующей причине. В такой системе организация неотделима от субстрата и физический субстрат имеет критическое значение. Будучи импредикативной, такая система обеспечивает определение по отношению к самой себе [25].

Представление о сложном строении биологических процессов в принципе, так или иначе, может и должно быть подтверждено на практике при рассмотрении соответствующих процессов в живых организмах и их моделях. В действительности такие модели относительно слабо разработаны.

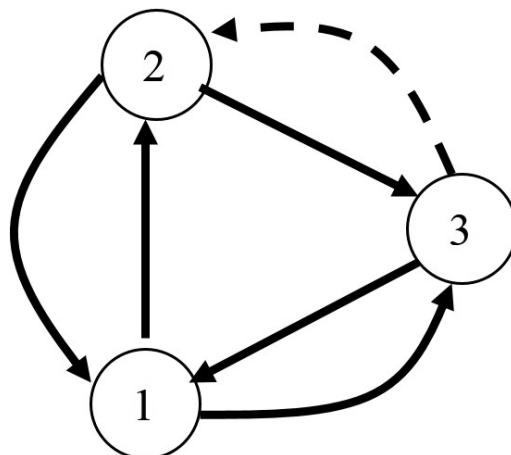
В частности, в реляционной биологии Николая Рашевского изучалась причинная организация всего спектра биологических функций. Он показал, что критические функции живой системы: метаболизм, восстановление и размножение, все внутренне причинно определены, т.е. причины берут начало в отношениях внутри системы [23]. Минимальная реляционная модель для «жизни как таковой» была представлена в виде M-R системы, которая в сжатом виде показывает организацию процессов метаболизма и восстановления в живой клетке. Эта модель является невычислимой сложной системой с внутренними петлями действующей причинной обусловленности [25]. Предложенное Р. Розеном математическое представление такой системы весьма абстрактно и представляет собой когерентное существование и трехчастное преобразование гипермножества  $\Phi = \{\{\{\Phi\}\}\}$  ( $\Phi \rightarrow \{\Phi\} \rightarrow \{\{\Phi\}\} \rightarrow \{\{\{\Phi\}\}\}$ ), где  $\Phi$  есть множество функциональных преобразований допустимых внутри данной системы.

В настоящее время есть исследования, в которых утверждается, что подобную сложную организацию можно проследить в морфологии (причинных) отношений внутри эндогенной системы мозга [18; 19]. В принципе известно, что физиологические процессы мозга не заключаются только в активности нейронов и их сетей. На практике это обычно не учитывается и многочисленные современные теории оперируют в основном представлениями о различных нейросетевых процессах. Вместе с тем эти процессы в существенной мере основаны на синаптических взаимодействиях между нейронами мозга и опосредуются другими системами [18].

Кроме нейронной системы, основанной на сером веществе, в мозге активно функционирует также нейроглии (которая, по-видимому, также имеет сетевую организацию). Кроме того, в отдельную систему можно выделить систему, обеспечивающую процессы Несинаптического Диффузного Нейропереноса (НДН). Вполне вероятно, что, как показано на рисунке ниже, все эти три системы находятся между собой в двухсторонних причинных отношениях, поскольку в настоящее время все действующие причинные связи между ними (за исключением влияния НДН на нейроглию) можно выявить экспериментально [19]. Это создает круговую структуру действующих причинных связей между тремя специфическими системами мозговых процессов (см. рисунок ниже). Она обеспечивает также самоизменение действующей причины, что предполагает возможности качественной смены механизмов и закономерностей процессов в зависимости от рабочих параметров и состояния системы, а также возможности управления качественным и количественным изменением субстрата материальных носителей. Это управление представляет сложность по многим причинам, две из которых достаточно очевидны.

Во-первых, известно, что замена материала процесс много более консервативный, чем изменение отдельных свойств, формальных параметров или условий. В качестве примера

можно привести гипотетически сложную задачу замены химического состава и структуры



полупроводников в микросхемах компьютера в зависимости от результатов производимых вычислений.

**Рис. 1. Морфологические (причинные) отношения между системами мозга  
(1 – синаптическая активность нейронов, 2 – нейроглия,  
3 – несинаптический диффузный нейротранспорт)**

Во-вторых, замена материала требует управления скоростью его переноса. В механической системе для того, чтобы управлять скоростями нужно уметь развивать большие ускорения. Для этого нужно иметь большие мощности и соответствующие системы управления ими. Биологические процессы здесь также являются весьма энергозатратными, поскольку они имеют дело с управлением скоростями и качеством соответствующих химических реакций.

## 7. СТРОЕНИЕ И РАЗВИТИЕ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

На основе представленного выше обзора можно заключить, что системные качества сложности не всегда сразу ясны и понятны, являются весьма многообразными и при этом сложны также в их исследовании и изучении. В системном отношении можно говорить о достаточно большом количестве разных признаков сложности: открытость и нелокальность (причинные связи не сосредоточены локально) вместе с автономностью и самосоотнесенностью, характеризующейся переплетенностью причинных связей и соотношением многих со многими более, чем каждого с каждым; непредсказуемость и зависимость от контекста вместе с финальностью, выражающейся во внутренне определенном поиске целей; наличие сложных причинных зависимостей не только в связях и иерархии отношений, но и в системных частях, которые изменяются и проявляют разные свойства в разных отношениях. В результате «целое» в таких системах оказывает влияние на структуру, функции и поведение частей (если таковые можно выделить), а система является контекстно-чувствительной, т.е. в принципе может ме-

нять свои системные качества и функциональные возможности в зависимости от контекста, в котором она находится.

Свойства системной контекстной чувствительности при этом являются, по сути, весьма чудесными и радикально отличаются от качеств искусственных машин и механизмов, которые может производить современная техника. Принцип дизайна современных технических устройств как правило заключается в том, чтобы сделать отдельное устройство, которое функционирует одинаково в различном окружении, т.е. обладает функциональной автономностью и функционирует как контекстно-независимое устройство. Если производится, например, электрочайник, то он остается таковым и на заводе, и в магазине, и на кухне у потребителя. В этой связи трудно представить себе электрочайник, который, попав на конкретную кухню и «поняв», что там уже есть один такой чайник, самостоятельно превращается в тостер, которого на этой кухне нет. Однако, по существу превращение такого рода как раз и является основой той контекстной чувствительности, которой в той или иной мере обладают сверхсложные системы, и которую во многом демонстрируют различные живые существа, меняя свои свойства и функции в зависимости от окружающих условий и в той или иной мере приспособляя свое поведение и материальные структуры к изменяющемуся взаимодействию с окружающей средой.

Кроме того, одно из важных отличий многих живых систем от искусственных систем заключается в том, что искусственные системы работают с синтаксической информацией. В то же время биологические системы так или иначе «знают» о том, с чем они имеют дело, и являются интенциональными и семантическими, т.е. могут выделять значения, которые включаются в систему их отдельного внутреннего мира и имеют направленности, обусловленные как родовыми, так и средовыми зависимостями. При этом одно из важных свойств семантической системы, которое принципиально отличает ее от синтаксической системы, связано с ее «внешней соотнесенностью» - предметностью значений. Семантика - это нечто, что говорит о чем-то ином вне той системы, к которой оно само относится.

Строить или моделировать семантические системы мы можем пока путем имитации их частичных возможностей с помощью синтаксических систем. Вместе с тем можно также ориентироваться на физическое конструирование. Например, для имитации предметности можно использовать такие сложные части системы, состояния которых, определяются по отношению к не локальным воздействиям, в поле которых «существует» данная система [20]. Наряду с наличием локальных чувствительных элементов, в этом случае система в целом может также сохранять и использовать информацию о внешней среде и соответственно меняться и изменять свои функциональные возможности, учитывая не только конкретное воздействие, но и общий контекст взаимодействия с внешней средой.

## 8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Можно заключить, что сложные (сверхсложные) системы в целом характеризуются рядом положений, которые могут быть полезны как для понимания происходящих в них процессов, так и для попыток их моделирования и искусственного воссоздания.

1. Эти системы в той или иной мере обладают сложным атомизмом. Элементы или части, из которых система построена, сами в своей основе являются сложными в том смысле, что они способны изменяться (развиваться) в процессе функционирования (эволюционирования) системы.

2. Структура связей сложной системы предполагает наличие нелокальных взаимодействий, которые обеспечивают в том числе открытый внутренней и внешней среде характер отношений системы, что создает условия для ее развития.

3. Причинно-следственные отношения между элементами или подсистемами имеют характер действующей причины и предполагают управление скоростью изменения материального субстрата, из которого эти части состоят.

4. Причинно-следственные отношения выстраиваются в замкнутые кольца, что обеспечивает автономность системы и обязательную многозначность ее состояний и соответствующих неоднозначных возможностей реагирования на изменение окружающей среды.

5. Семантические отношения со средой в автономной живой системе предполагают, как минимум, два взаимосвязанных уровня циклических процессов, когда внешнее циклическое взаимодействие поддерживается иерархией внутренних циклических процессов.

6. Иерархия процессов в сложной системе имеет такое строение, в которой обратные связи могут присутствовать внутри одного уровня и между уровнями системной иерархии, а также между системами разных иерархий. Это предполагает также вложенность процессов, имеющих разные временные характеристики.

7. Существо (динамика и сложность) строения процессов в системе обусловлено возможностями образования взаимодействий и отношений между процессами в не меньшей мере, чем между структурами (частями или фиксированными связями между ними).

8. Сложные системы предполагают постоянное самоизменение, связанные с самоподдержанием активности, самовосстановлением, самовоспроизведением, развитием, эволюцией, ростом и др.

9. В отличие от процессов информационного преобразования сложные системы могут включать структурно-порождающие (формопорождающие) процессы, которые по своей природе отличаются трансцендентальным характером. Эти процессы можно назвать структурно-порождающими «адиафорами», поскольку они порождают новые структуры и формы особым образом, безразличным к этим своим продуктам.

10. Формализация сверхсложных систем предусматривает множественность принципиально разных формальных моделей, которые не являются выводимыми одна из другой. Эта множественность связана с представленными выше свойствами и предполагает такую неоднозначность процессов, которая, по сути, делает процессы в этих системах невычислимыми в машине Тьюринга.

## ЛИТЕРАТУРА

4. Арнольд В.И. Теория катастроф. М.: Едиториал УРСС, 2004. 128 с.
5. Артеменков С.Л. Реализация методологического принципа научного обобщения Выготского в современной трансцендентальной психологии // Научная школа Л.С. Выготского: традиции и инновации / Материалы международного симпозиума. М.: ФГБОУ ВО МГППУ, 2016. С. 154-157.
6. Артеменков С.Л. Реляционное моделирование психических функций (тезисы) // XIV Всероссийская научная конференция «Нейрокомпьютеры и их применение». М.: МГППУ, 2016. С. 128-129.
7. Артеменков С.Л. Трансцендентальная психология как изменение образа мышления // А.И.Миракян и современная психология восприятия: сборник материалов научной конференции. М.: ПИРАО, 2010. С. 324–358.
8. Артеменков С.Л. Методология трансцендентальной психологии и проблемы моделирования и экспериментального исследования порождающих процессов // Моделирование и анализ данных. Труды фак-та ИТ (выпуск 2). М.: РУСАВИА, 2005. С. 37-57.
9. Выготский Л.С. Лекции по педологии. Ижевск: Удмуртский университет, 2001. 304 с.
10. Матурана У.Р., Варела Ф.Х. Дерево познания. М.: Прогресс-Традиция, 2001, 224 с.
11. Медников Б.М. Аксиомы биологии. М.: Знание, 1982. 136 с.
12. Миракян А.И. Контуры трансцендентальной психологии. Книга 2. М.: ИП РАН, 2004. 384 с.

13. Ноэ А. Является ли видимый мир великой иллюзией? // Логос. №1 (97). 2014. С. 61-78.
14. Панов В.И. Парадоксы изучения психики и возможность их преодоления // Национальный психологический журнал. 2011. №1 (5). С. 50-54.
15. Шредингер Э. Что такое жизнь с точки зрения физики. М.: Римис, 2009. 176 с.
16. Эльконин Д.Б. К проблеме периодизации психического развития в детском возрасте // Избранные психологические труды. М.: Педагогика, 1989. 560 с.
17. Эшби Р. Конструкция мозга. М.: Иностранная литература, 1962. 399 с.
18. Artemenkov S.L. Embodied Cognition & Transcendental Psychology: Understanding the underlying processes of embodied cognition plasticity requires a new methodological paradigm // 2005 International Symposium on Body and Cognition: A Multidisciplinary Perspective. Taipei, Taiwan: NTU, 2005. P. 9-1 – 9-22.
19. Bar-Yam Y. General Features of Complex Systems // Encyclopedia of Life Support Systems. Oxford, UK: EOLSS UNESCO Publishers, 2002.
20. Brown-VanHoozer S.A., Kercel S.W., VanHoozer W.R. The Model-Based Mind // In Proceedings of SMC 2000: IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. 2000.
21. Kercel S.W. The Endogenous Brain // Journal of Integrative Neuroscience. 2004. Vol. 3 (1). P. 61–84.
22. Kercel S.W. The Role of Volume Transmission in an Endogenous Brain // Journal of Integrative Neuroscience. 2004. Vol. 3 (1). P. 7–18.
23. Kugler P. Emergence in 'Complex Parts': A Semantic approach to Modeling Complex Systems // Abstracts of the “7th Understanding Complex Systems” Symposium. University of Illinois at Urbana-Champaign. 2007.
24. Monod J. Chance and Necessity: An Essay on the Natural Philosophy of Modern Biology. NY.: Vintage Books, 1971. 199 p.
25. Newman M.E.J. The Structure and Function of Complex Networks // Society for industrial and applied mathematics Review. 2003. Vol. 45 (2). P. 167–256.
26. Rashevsky N. Mathematical principles in biology and their applications. Springfield, Illinois: Charles Thomas, publisher, 1961. 128 p.
27. Rosen R. Essays on the life itself. NY.: Columbia University Press, 1999. 361 p.
28. Rosen R. Life Itself: A Comprehensive Inquiry into the Nature, Origin, and Fabrication of Life. NY.: Columbia University Press, 1991. 285 p.
29. Varela F., Thompson E., Rosch E. The Embodied Mind. Cambridge MA: MIT Press, 1991. 308 p.

*Работа поступила 02.10.2016г.*