

УДК 004.94 + 519.7 + 536.75 + 514

САМОВОЗНИКНОВЕНИЕ МОДЕЛЕЙ – ОТ ТЕОРИИ К РЕАЛЬНОСТИ**Ланкин Ю.П.***ФГБУН КИЦ СО РАН, Красноярск, e-mail: lan7@mail.ru*

В работе рассматриваются фундаментальные проблемы современной методологии, ограничивающие потенциал научного метода познания природы, основанного на построении прогностических моделей реальности. Выполняется краткий анализ ограничений классических и неоклассических методов, препятствующих повышению точности отображения свойств и динамики сложных природных систем. Как выход из текущих трудностей, предлагается возможность построения математики самовозникновения моделей, количественные представления которой опираются на глубокие качественные обобщения достижений современной науки. Успех исследований базируется на выявлении и отражении в математических методах фундаментальных свойств сложных природных систем в противовес попыткам «втиснуть» свойства таких систем в прокрустово ложе представлений, полученных на основании ретроспективных познавательных моделей. Эта молодая, быстро развивающаяся область знания получила название Концепции адаптивной самоорганизации сложных систем и в недалеком будущем обещает сменить статус концепции на звание теории.

Ключевые слова: математическое моделирование, адаптивная самоорганизация, познавательные модели, нейронные сети

MODEL SELF-INITIATION: FROM THEORY TO REALITY**Lankin Y.P.***Krasnoyarsk Scientific Center, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, e-mail: lan7@mail.ru*

Fundamental problems of the modern methodology are considered that restrict the potential of scientific methods for nature cognition based on the building of prediction models of reality. Limitations imposed on the classical and neoclassical methods and preventing the enhancement of the accuracy of representation of the properties and dynamics of complex natural systems are briefly analyzed. To eliminate the existing difficulties, it is proposed to build the mathematical tools for model self-initiation in which quantitative representations are supported by deep qualitative generalizations of current scientific advances. Successful researches are based upon revelation and reflection of the fundamental properties of complex natural systems in mathematical methods, in contrast to the attempts to squeeze the properties of these systems into the Procrustean bed of the concepts grounded on retrospective cognitive models. This young, rapidly developed field of knowledge named the Concept of adaptive self-organization of complex systems promises to change its concept status for the theory title in the nearest future.

Keywords: mathematical modeling, adaptive self-organization, cognitive models, neural networks

В предыдущих работах [4, 5, 2, 3, 6] мы рассмотрели некоторые теоретические и прикладные аспекты развиваемой автором Концепции адаптивной самоорганизации сложных систем в приложении к решению экологических задач. Однако концепция имеет универсальный характер, что все более отчетливо просматривается по мере оформления ее в теорию. В силу необходимости в работе выполнен краткий критический анализ классической методологии создания математических моделей. Важно отметить, что осознание ограничений классических и новейших методов ни в коей мере не снижает уважения и искреннего восхищения учеными, их создавшими. Эти выдающиеся творцы совершили подвиг, изменив мир, в котором жили их современники. И лишь благодаря великим мыслителям, имевшим мужество противопоставить открывшуюся им истину общепризнанным догматам их времени (рискуя авторитетом, здоровьем, а иногда и жизнью), мы имеем возможность двигаться к новым вершинам познания.

Система уравнений – еще не модель

Когда мы пишем систему уравнений, она еще не является моделью. Даже при правильно составленных уравнениях, если коэффициенты не подобраны, система уравнений может вести себя как угодно, но не повторит поведение объекта, ради которого она писалась.

Есть всего несколько вариантов поведения не настроенной модели в зависимости от того, положительная или отрицательная обратная связь преобладает при обмене величинами между уравнениями. Если есть хотя бы одна положительная обратная связь, нарушающая равновесие, система перейдет либо в фазу экспоненциального роста значений функции, либо, если присутствуют задержки в обмене значениями между уравнениями, система перейдет в колебательный режим с экспоненциально нарастающей амплитудой. При наличии ограничений система будет приближаться к ним и рост амплитуды будет останавливаться.

При наличии отрицательной обратной связи система будет асимптотически

сходиться к устойчивому состоянию либо в нуле, либо в точке заданного ограничения, останавливающего спад амплитуды.

В зависимости от числа степеней свободы и качества синхронизации системы колебательные режимы могут быть более регулярными или более хаотическими.

От набора формул и коэффициентов – к модели

Для превращения системы уравнений в модель необходима процедура идентификации или фиттинга, настраивающая параметры (коэффициенты) модели таким образом, чтобы генерируемые ею кривые проходили через точки экспериментальных данных.

После того, как модель создана, она функционирует как механизм (механическое устройство) по раз и навсегда заданным правилам. Однако это не согласуется с поведением живых систем, которые непрерывно адаптируются к новым условиям, изменяя свое поведение. Другой проблемой является малое число стационарных состояний, одно – три. В то время как известно, что живые системы имеют множество стационарных состояний, в которые могут переходить в зависимости от текущих условий для возврата к стационарному состоянию. Да и неживые системы часто обладают большим числом потенциальных ям, локальных минимумов, обеспечивающих сохранение равновесных состояний.

Серьезной трудностью классической методологии создания моделей является необходимость пошагового контроля их создания человеком. С ростом сложности модели, часто необходимой для приближения ее поведения к моделируемой системе, увеличивается трудоемкость и время ее разработки, растет потенциальная возможность появления ошибок в математическом описании и коде компьютерных программ.

С другой стороны, использование классических методов моделирования при создании сложных моделей приводит к известным проблемам «проклятья размерности (сложности)» и «проклятья неустойчивости» модели. Первое ведет к быстрой потере обзорности (понятности) модели, а также усреднению большого числа величин и, как следствие, потере точности, ради которой создавалась сложная модель. Второе связано с упомянутым очень небольшим числом стационарных состояний (точек динамического равновесия модели), при выходе за пределы которых модель теряет устойчивость. В результате роста сложности модели (числа уравнений и коэффициентов) нарастает число ее степеней свобо-

ды, и малейшее отклонение от положения стационара ведет к раскачке решений множества других уравнений. Этот процесс ведет к быстрой хаотизации системы уравнений (модели).

Другой особенностью сложных моделей с большим числом уравнений и параметров (коэффициентов) является их способность порождать кривые или гиперповерхности произвольного вида при соответствующем подборе коэффициентов в процессе идентификации. Возникает ситуация с множеством возможных решений, аналогичная наблюдаемой в реальном мире, очевидным следствием которой становится невозможность рассуждать об однозначно выделяемых «механизмах» функционирования сложных систем. Это позволяет говорить об окончательной гибели механистической модели мира, неявно сохраняющейся в науке еще со времен Ньютона.

Уход от детерминизма к усреднениям статистических методов приводит нас к другому аспекту проблем создания классических моделей, обладающему соответствующей спецификой. С одной стороны, усреднение «смазывает» реальную сложность природных систем, дающую им столь впечатляющие возможности. С другой стороны, гауссовское распределение независимой случайной величины слабо соотносится со структурами систем (сетей взаимосвязанных объектов) реального мира, которые по определению нельзя назвать изолированными. Изоляция, независимость элементов друг от друга делает невозможным само понятие системы, как комплекса элементов и связей между ними. И здесь мы вновь приходим к вопросу об адекватности математических методов. Использование распределений «с толстыми хвостами» Леви-Парето спасает ситуацию лишь для стационарных процессов, в то время как в наблюдаемой реальности приходится иметь дело, в лучшем случае, лишь с квазистационарностью. Перманентное изменение степени связанности между элементами системы в процессе ее эволюции ведет к неустойчивости статистических распределений, зачастую имеющих место уже в процессе экспериментов и измерений.

Этот небольшой экскурс в модели мира (берущие свое начало во времена познания законов идеального газа и Больцмановской статистики), усредняющие его разнообразие, приводит к печальному выводу, аналогичному тому, что сделан выше для механистических моделей детерминизма.

И коль скоро упомянутые методы эффективны лишь в узких пределах, то на каких ключевых идеях должна базироваться

математика отображения наблюдаемой реальности?

Спасут ли нас неоклассические методы?

Последние десятилетия обогатили науку рядом впечатляющих достижений, среди которых можно назвать синергетику, теории: катастроф, динамических систем, самоорганизованной критичности, фракталов, хаоса и др.

К сожалению, эти удивительные открытия не дают окончательного решения, ведущего к точному описанию сложных систем природы, обеспечивающему высокое качество прогнозов. Базируясь на классических представлениях о конструировании моделей «вручную» и «жестких» закономерностях, они ограничивают возможности отображения вариативности свойств сложных систем в сочетании с сохранением их самоидентичности (инвариантности). Так, синергетика и теория катастроф позволяют сформировать очень небольшое число аттракторов (стационарных состояний). Связь микро- и макро-уровней рассматривается в виде параметров порядка (массовых тенденций в поведении микрообъектов), не затрагивая всей иерархии и самих элементов на микроуровне. А математика фракталов и теории хаоса задают «жесткие» итеративные формы, не позволяющие отразить вариативность свойств самоподобия множества реальных объектов.

Легко видеть, что как классическая, так и неоклассическая методологии моделирования не позволяют нам приблизиться к необходимой сложности и разнообразию поведения природных систем, особенно когда дело касается отображения живого.

В свете сказанного возникает сакральный вопрос: «Что делать?». Каковы наши шансы на разрешение проблем планетарных кризисов (экологического и экономического) и выживание на планете, если мы неспособны достаточно точно прогнозировать поведение сложных систем из-за отсутствия эффективных методов их моделирования и прогнозирования их поведения? И есть ли выход из третьего глобального кризиса – методологического?

Математика самовозникновения моделей

Оказывается, что выход все-таки есть, и лежит он в создании математики самовозникновения моделей, которая может перевести в модель систему с любым числом уравнений. Идея такой математики базируется на выявлении фундаментальных свойств сложных природных систем и построения на их основе теории самооргани-

зации, самосборки систем неограниченного уровня сложности. Необходимо отметить, что ряд таких свойств уже открыт современной наукой и их интеграция в единое и непротиворечивое целое – лишь вопрос сублимации знания до соответствующего уровня теоретических обобщений.

Одной из фундаментальных мировоззренческих концепций, расширяющих существующие представления и образующих основания математики самопорождения моделей, является представление о том, что устойчивость наблюдаемых объектов окружающего мира на всех уровнях его организации (от микромира до космоса) базируется на наличии механизмов обратной связи, эффективно компенсирующих лавинообразное нарастание хаоса в системах огромной сложности при отклонении их от текущих состояний динамического равновесия. Отсутствие высокого уровня организации согласования процессов взаимодействия приводит к тому, что система просто не возникает из множества разрозненных элементов или рассыпается, едва успев возникнуть, либо разрушается из предшествующего стабильного состояния. Таким образом, мы наблюдаем лишь те системы, механизмы обратной связи (адаптивные механизмы) которых позволили им не разрушиться под натиском деструктивных воздействий внешнего мира и флуктуаций их внутренней среды. При недостаточной эффективности этих механизмов возникают лишь переходные формы с ограниченным временем жизни.

Другим фундаментальным открытием теории адаптивной самоорганизации является установление того факта, что, в отличие от классических статистических представлений о ведущей роли случайности в многомерном поиске (беспорядочного изменения величин, не скоррелированного со свойствами системы), детерминированный хаос дает эффективное средство выявления направления самоорганизации для сложных систем любой размерности.

Ключевым аспектом сохранения устойчивости сложных природных систем, нашедшим отражение в рассматриваемой математике, является наличие множества стационарных состояний (аттракторов, инвариантных многообразий). Восстановление динамического равновесия системы обеспечивается быстрыми стереотипными реакциями на дестабилизирующие воздействия путем перехода системы в соответствующий аттрактор, компенсирующий возникшую нестабильность. Однако такие переходы возможны лишь при наличии соответствующих стационарных состояний.

В случае их отсутствия происходит хаотизация системы, активирующая подсистему обратных связей на процесс сохранения системной функции путем модификации структуры системы. Другими словами, наблюдается процесс модификации аттрактивного ландшафта, направленный на возникновение соответствующих инвариантных многообразий, компенсирующих возникающую нестабильность, угрожающую существованию системы. Множество инвариантных многообразий, отражающих историю адаптации к изменениям окружения, образуют характерный инвариантный портрет системы. Описанные процессы протекают в пределах ограничений («коридоров» допустимых траекторий), в границах которых сохраняется жизнеспособность системы и ее целостность.

Следующим важным основанием математики самовозникновения моделей, отразившим фундаментальные аспекты организации природных систем, является сложность. В первом приближении, системная сложность подразумевает достаточно мощное множество элементов и межэлементных связей. Достаточность означает возможность построения гиперповерхности аттрактивного ландшафта системы, обеспечивающего ее переход в одно из квазистационарных состояний в ответ на любое (или почти любое) из конечного множества дестабилизирующих воздействий в системном окружении. Множество элементов и их взаимосвязей можно представить, как сеть. А в рассматриваемом контексте, самоорганизующуюся адаптивную сеть (или сеть с отрицательными, стабилизирующими обратными связями), которая представлена в природе сетями взаимосвязанных атомов в молекулах, клеток в организмах, организмов в экосистемах, заезд в галактиках, галактик во вселенной и т.д. Иерархия сетей элементов позволяет по-новому взглянуть на картину мироздания и увидеть целостность системной организации всех уровней суперсистемы вселенной. И в этом смысле объяснить ее устойчивость, как в целом, так и на всех нижестоящих уровнях системной организации. С феноменологической точки зрения сетевые структуры можно соотнести с конечным (или бесконечным для вселенной) математическим рядом нелинейных базисных функций (по аналогии с широко известным рядом Фурье и др.), позволяющим синтезировать гиперповерхности заданного уровня сложности. В такой постановке сложность превращается из «проклятья» в союзника и предоставляет исследователю почти неограниченные воз-

можности, соотносимые с доступной мощностью вычислительных систем.

Важнейшей особенностью рассматриваемой методологии является акцент на информационной стороне отражения реальности. Как указывается в [9], на сегодня глубоко разработаны концепции на основе вещества и энергии. Однако информационная концепция, в силу сложности ее развития, до сих пор оставалась практически неразвитой. В контексте предлагаемых системных представлений, информация представляется не набором битов, а сочетанием взаимосвязей между элементами сети (системы), обеспечивающим наблюдаемые системные свойства.

Следует подчеркнуть, что рассмотренная трансформация познавательной модели, ставшая возможной благодаря обобщению новейших достижений научного знания, вновь возвращает нас к осознанию удивительной простоты, ясности и гармонии основ картины мироздания, открывшейся в прошлом основателям науки, но утерянной позднее в нарастающем хаосе бесконечных деталей и конкурирующих теорий.

От концепции к теории

Работа над концепцией адаптивной самоорганизации сложных систем [4] началась в конце прошлого века. На начальных этапах она носила название концепции адаптивных систем, и среди первых публикаций, ознаменовавших ее появление, можно отметить работу [8]. При разработке концепции упор был сделан на методы нейроинформатики, ряд алгоритмов которой обеспечивал адаптацию моделей теоретически неограниченной размерности. Возможности нейронных сетей обоснованы рядом теорем, доказанных различными исследователями. В частности, в работе [1] показано, что комбинация сложения, умножения и нелинейного преобразования, характерная для нейросетевых алгоритмов, позволяет получить любую непрерывную функцию. А в переносе на многомерные отображения, формируемые нейронными сетями, можно говорить о любых непрерывных гиперповерхностях. Ранее для дискретных сетей была доказана теорема об их эквивалентности машине Тьюринга [11], что означает сопоставимость их возможностей с возможностями компьютеров.

В процессе исследований выяснились определенные трудности использования классических алгоритмов нейроинформатики, связанные с их специализированностью и ограничивающие их применение при моделировании сложных природных систем задачами обработки информации. Для снятия этих ограничений были изначально

предложены модификации классических алгоритмов [7], затем алгоритмы, основанные на идеях биологической эволюции [10], а в дальнейшем и детерминированные алгоритмы адаптивной самоорганизации [2]. Использование этих алгоритмов позволило решать классические задачи нейроинформатики, комбинировать их с классическими моделями для отражения описанных свойств сложных природных систем [3] и осуществить перенос их на другие типы моделей адаптивной самоорганизации [5].

Концепция адаптивной самоорганизации предоставляет уникальную возможность построения моделей сверху вниз естественным для человека образом [4]. В отличие от классических методов, уже на первых этапах моделирования выполняется воспроизведение интересующих исследователя сложных системных свойств. А уже затем происходит пошаговая детализация структуры до требуемой глубины с повторяющейся адаптацией для каждого нового уровня уточнения с контролем сохранения системных свойств модели.

На текущем этапе развития теории основное внимание акцентируется на поиске методов уточнения моделей планетарных процессов, биосферы и составляющих ее экосистем [5, 2, 3, 6] с целью поиска путей разрешения проблемы глобального экологического кризиса.

За пределами привычного

Смеем предположить, что внимательный читатель давно уже заметил за строками этого текста новый мир бесконечных возможностей, открывающийся за пределами привычных представлений, навевянных господствующей парадигмой. Переход от известного и привычного к новому и неизвестному всегда сопровождается трудностями. Однако идеи, изложенные выше, наводят на параллели с промышленной революцией, приведшей к замене ручного, кустарного изготовления эксклюзивных изделий технологией массового промышленного производства качественных и дешевых товаров. Физический труд обрел новые, непривычные формы и экспоненциально трансформировал социум и природу планеты, оставившихся почти неизменными в течение тысячелетий. Концепция самовозникновения моделей переводит нас на новый рубеж эволюции разума, получающего в подспорье уникальный инструмент самопорождения новых представлений и прогнозов с минимальным участием их создателей. Переход от промышленной революции силы к промышленной революции разума ставит нас перед новыми вопросами,

переводящими рассмотренные идеи из интеллектуальной плоскости в нравственную. И от избранного способа перехода от биосферы к ноосфере зависит наличие или отсутствие будущего для тех, кто его созидает.

Автор признателен профессору Р.Г. Хлебопросу за оригинальный взгляд на теорию адаптивной самоорганизации сложных систем, нашедший отражение в данной работе в виде представления о самовозникновении моделей, а также профессорам Ю.Л. Гуревичу, В.Г. Суховольскому и Н.С. Печуркину за полезные и содержательные обсуждения.

Список литературы

1. Горбань А.Н. Обобщенная аппроксимационная теорема и вычислительные возможности нейронных сетей // Сибирский журнал вычислительной математики. – Новосибирск: РАН. Сиб. отделение, 1998. – 1, № 1. – С. 11–24.
2. Ланкин Ю.П., Басканова Т.Ф., Лобова Т.И. Нейросетевой анализ сложноорганизованных экологических данных // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 4. – URL: www.science-education.ru/104-6754.
3. Ланкин Ю.П., Басканова Т.Ф., Печуркин Н.С. Моделирование адаптивной самоорганизации экосистем // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 5. – URL: www.science-education.ru/105-6735.
4. Ланкин Ю.П., Иванова Н.С. Общий подход к моделированию разнообразия экосистем биосферы на основе фундаментальных свойств живых систем // Современные проблемы науки и образования. – 2011. – № 6. – URL: <http://www.science-education.ru/100-4883>.
5. Ланкин Ю.П., Иванова Н.С., Басканова Т.Ф. Основы теории моделирования разнообразия экосистем биосферы на основе фундаментальных свойств живых систем // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 1. – URL: <http://www.science-education.ru/101-5144>.
6. Ланкин Ю.П., Мокогон Д.А., Терешин С.В. Адаптивное моделирование планетарных процессов на основе спутниковых данных // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 6. – URL: <http://www.science-education.ru/106-7136>.
7. Ланкин Ю.П., Хлебопрос Р.Г. Самоадаптирующиеся нейронные сети при решении экологических задач (возможности реализации поискового поведения) // Инженерная экология. – 1998. – № 4. – С. 2–11.
8. Ланкин Ю.П., Хлебопрос Р.Г. Экологические основания концепции самоадаптирующихся сетей и систем с поисковым поведением // Инженерная экология. – 2001. – № 2. – С. 2–26.
9. Экологическая биофизика. Т. 3. Экология и биофизика: время интеграции / Ответственные редакторы: академик И.И. Гительзон, профессор Н.С. Печуркин. – М.: Логос, 2002. – 304 с.
10. Lankin J.P., Baskanova T.F. Algorithms of self-adaptation for atmospheric model designing // SPIE. – 2004. – Vol. 5397. – P. 260–270.
11. McCulloch W., Pitts W. A logical calculus of the ideas imminent in nervous activity // Bull. Math. Biophys. – 1943. – № 5. – P. 115–137.