

Синергетика и процессы развития сложных систем

Аннотация

В рамках синергетических представлений обсуждаются процессы возникновения качественно новых состояний в случае исторически развивающихся открытых неравновесных систем. Подобные переходы происходят при достижении кризисного этапа развития, из которого система выходит либо деструктивным, либо конструктивным путем. Конструктивный переход протекает с участием феномена, получившего название самоорганизации материи. Определенные трудности возникают в связи с необходимостью объяснения наблюдаемого направленного характера исторического развития высокоорганизованных сложных систем.

Введение

В 1977 году вышло первое издание книги Г. Хакена «Синергетика» [1], а несколько раньше были опубликованы основы неравновесной термодинамики [2] брюссельской школы И. Пригожина. Оба труда стали провозвестниками нового научного направления. Через шесть лет, когда работы в новом направлении уже приняли широкий размах, появилась статья Данилова Ю.А. и Кадомцева Б.Б. под названием «Что такое синергетика» [3]. Авторы определили синергетику как одно из возможных обозначений некоей «X-науки», для которой пока еще нет установившегося названия. Эта наука занимается исследованием процессов самоорганизации, а также процессов образования, поддержания и распада структур в системах, природа которых изучается в различных научных дисциплинах. По словам авторов [3], необходимость такой науки давно назрела, но она пока делает первые шаги, в ней еще не выработана единая общепризнанная терминология, отсутствует единая теория, она «существует сразу в нескольких вариантах, отличающихся не только названиями, но и степенью общности и акцентами в интересах».

С тех пор прошло более 30 лет, но то основное, что сказано в [3] в отношении незавершенности и проблем синергетики, можно повторить и сегодня. Наряду с положительными результатами активно ведущихся исследований продолжают споры вокруг многочисленных проблем и трудностей нового научного направления. Диапазон споров широк, от отрицания синергетики как науки, от нежелания признавать универсальный характер ее подходов, ее

междисциплинарности, до утверждений о бесплодности попыток ее практических приложений. Последние утверждения, как правило, вызваны неправомерными попытками приложить далекую от завершения X-науку к задачам биологии и социологии. Вместе с тем наблюдается широкий интерес к синергетике не только со стороны представителей естественных наук, но также и со стороны гуманитариев. Интерес вызывается тем, что «X-наука» в перспективе обещает создание универсальной теории, описывающей переходы любых развивающихся систем в качественно новые состояния, переходы, определяющие возникновение нового в мире.

Прямое участие в рассмотрении проблем нового научного направления принимают представители философских наук. Как пишет В.И. Аршинов [4], ставится вопрос о философско-методологическом, мировоззренческом осмыслении синергетики, особенностей новейших тенденций постнеклассической науки. Для процесса философского самоопределения синергетики, по мнению В.И. Аршинова, не может быть ее изоляции от разработки общих вопросов философии науки и техники, а также от разработки теоретико-познавательных проблем.

Е.Н. Князева [5] решает задачу показа возможности нетрадиционного взгляда на историческое развитие научного знания с опорой на модели и методологические следствия синергетики, которая вводит принципиально новое видение мира и новое понимание процессов развития в нем.

Интерес философов к новому научному направлению понятен, синергетика – это прямой продукт нового знания и порожденного этим знанием нового научного мировоззрения. В данной статье не ставится задача обсуждать спорные проблемы синергетики. Предполагается рассмотреть особенности ее связи с процессами развития сложных систем, на что, в частности, было обращено внимание в работе [6], где рассматривались основные черты формирующейся современной естественно-научной концепции развития в природе.

Истоки нового научного направления

Становление нового междисциплинарного научного направления произошло не на пустом месте, оно стало естественным следствием новой ситуации, возникшей под влиянием крупнейших научных открытий XX века. Ко второй половине века эти открытия заставили пересмотреть ряд, казалось бы, основополагающих мировоззренческих представлений, унаследованных от XIX века и занимавших относительно стабильное положение в науке на протяжении значительной части первой половины следующего века. Представитель естественных наук М.В. Волькенштейн коротко

сформулировал: «Синергетика – это новое мировоззрение, отличное от ньютоновского мировоззрения». В чем состоит это отличие?

Классическая физика постулировала обратимость основных физических законов. Обратимость предполагает равноправие путей развития как от прошлого в будущее, так и из будущего в прошлое. Крайним выражением этого понятия стал лапласовский детерминизм, утверждавший теснейшую взаимозависимость всего сущего в этом мире. Так, при известных параметрах, определяющих состояние динамической системы в какой-то определенный момент времени, предполагалось возможным описать все ее прошлые состояния и предсказать все будущие состояния. При такой точке зрения становилось непонятным, почему в Природе наблюдаются необратимые процессы, как объяснить существование «стрелы времени», то есть однонаправленного во времени развития событий, как в таких условиях может возникать новое в мире. Термодинамика, в противовес классической физики, признала необратимость существующей реальностью, а вторым началом закреплялось реальное существование стрелы времени. Противоречие двух мировоззренческих представлений удалось устранить ко второй половине XX века. В классической физике произошло освобождение от таких предпосылок, как понятие обратимости во времени фундаментальных законов, как детерминистический характер динамических процессов и линейный характер подавляющего большинства протекающих в природе процессов. На смену пришло понимание, что при определенных условиях в Мире господствуют нелинейные, необратимые процессы, обеспечивающие возможность спонтанного возникновения новых типов структур в сильно неравновесных условиях, в результате чего возникает возможность перехода от беспорядка к нарастающему порядку [7]. Здесь речь не идет об отмене законов классической физики, они остаются неприкосновенными в той области, которой ограничивается их применимость. Меняются мировоззренческие представления, касающиеся процессов развития открытых неравновесных систем.

Но и термодинамика к этому времени претерпела серьезные изменения. Эта наука изучает процессы преобразования одних видов энергии в другие, что сопровождается совершением работы. Раздел, получивший название равновесной или классической термодинамики, изучал подобные процессы, происходящие в изолированных системах, не обменивающихся с внешней средой энергией и/или веществом, и находящихся при этом в состояниях, близких к равновесным. Каждый акт совершения внутри системы работы сопровождался необратимыми потерями части энергии, превращавшейся в тепло, равномерно рассеивавшегося в системе. При отсутствии притока энергии извне система вынужденно деградировала, достигая, в

конечном счете, состояния полного термодинамического равновесия, самого простого состояния конкретной системы. На пути к термодинамическому равновесию в системе разрушалась всякая упорядоченность, всякая структурная организованность. Термодинамическое равновесие характеризуется полным отсутствием упорядоченности в нем.

Классическая термодинамика утвердила в науке представление о единственном пути развития подобных систем, деструктивном пути, завершающемся «тепловой смертью» системы. Но ко второй половине XX века выяснилось, что все разномасштабные развивающиеся системы, изучаемые в разных научных дисциплинах, являются открытыми неравновесными системами. Это означает, что все такие системы в той или иной степени взаимодействуют с внешней средой, обмениваясь с ней энергией и/или веществом. В нашем Мире не встречаются изолированные системы, такие представления есть идеализация, допустимая в случаях, когда взаимодействие реальной системы с окружающей средой настолько слабое, что в первом приближении им можно пренебречь. Но большинство сложных развивающихся систем далеки от таких допущений, к ним неприменимы представления классической термодинамики. И.Пригожиным и руководимой им брюссельской школой термодинамики были разработаны основы нового раздела этой дисциплины, получившего название неравновесной термодинамики.

В биологических науках в свете новых открытий модифицировалась исходная теория Дарвина, которую заменила так называемая синтетическая теория биологической эволюции. В ней учтены новые представления об изменчивости и наследственности, но сохранено представление о плавном характере развития, способном создавать качественно новые состояния биологических систем путем накопления последовательных мелких изменений. Сохранено также представление о естественном отборе, как главной движущей силы биологической эволюции. Вопреки таким утверждениям высказывается мнение, что современные научные открытия меняют подобные представления. Полагают, что естественный отбор обеспечивает популяции адаптацию к среде обитания, однако он не занимает ведущего положения в процессах, сопровождающихся качественными изменениями биологических объектов. Это разрушает установившиеся в биологии представления о принципиальных отличиях общих законов развития биологических систем от законов развития, наблюдаемых в неорганическом мире.

Решающую роль в наступивших переменах играет открытие в 70-х годах явления, получившего название самоорганизации материи. Это понятие означает экспериментально открытую способность материи в

определенных условиях осуществлять созидательные процессы, повышающие упорядоченность развивающейся системы. Утверждение о существовании в природе созидательных процессов высказывалось задолго до указанного открытия, но теперь удалось понять механизм, действие которого реализует способность материи осуществлять созидательные процессы. Отсюда более узкое понимание термина самоорганизация, предполагающее описание самого процесса перехода системы из менее в более организованное состояние. Новые мировоззренческие представления в науке позволяют решить старый спор о становлении нового в Мире в пользу существования процессов, в которых возникают качественно новые объекты и состояния [8].

В своей совокупности перечисленные выше изменения в мировоззренческих представлениях создали новую ситуацию. Объектами активных исследований стали развивающиеся открытые системы, находящиеся в неравновесном состоянии относительно окружающей среды. В развитии таких систем особый интерес вызывают ситуации, в которых протекают их переходы в качественно новые состояния. Механизмы таких переходов носят универсальный характер, независимо от того, в какой научной дисциплине изучается система. Необратимость протекающих процессов развития и неравновесность сложных систем в определенных условиях порождают самоорганизацию материи, обеспечивающую созидательные переходы в качественно новые состояния, что приводит к рождению нового в Мире. Появилась настоятельная необходимость изучения процессов перехода в качественно новые состояния, именно это привело к возникновению нового научного направления, носящего междисциплинарный характер. Отцами-основателями такого направления стали И. Пригожин и Г. Хакен.

Остается добавить, что сложности исследования подобных состояний возрастают вместе со сложностью изучаемой системы и ростом количества параметров, характеризующих ее состояние. Отсюда особые проблемы, возникающие при распространении еще незавершенной «X-науки» на биологические и социологические объекты.

Связь «X-науки» с процессами развития

В изучаемых синергетикой проблемах нам предстоит обсудить определяющую роль процессов развития сложных систем. В их развитии различают два этапа. Первый этап характеризуется стационарностью, на всем его протяжении не происходят принципиальные качественные изменения в состоянии системы. Эволюционные процессы жестко детерминированы, будущие

состояния предсказуемы, если выявлена общая тенденция развития. Однако пребывание системы в стационарном состоянии требует протекания определенных внутренних и внешних взаимодействий, позволяющих системе устойчиво сохранять внутреннее равновесие при ее неравновесности с окружающей средой. Для биологических систем такие взаимодействия называют гомеостазом. В случае развивающихся неорганических систем внутреннее равновесие поддерживается либо постоянной выработкой энергии внутри системы, либо постоянным притоком необходимой энергии извне. Примером первого случая служит стационарная звезда, устойчиво сохраняющая внутреннее равновесие благодаря протеканию ядерных реакций, сопровождающихся выделением необходимого количества энергии. Благодаря такой внутренней деятельности устанавливается равновесие между стремлением массы звезды сжаться под действием сил гравитации, и противоположным стремлением расшириться под действием давления, создаваемого выделяющейся энергией. Один из многочисленных примеров второго случая – лазер, стационарно испускающий высокоорганизованное оптическое излучение при постоянной его накачке энергией от внешнего источника питания.

Но под влиянием внешних воздействий, или в результате развития внутренних противоречий стационарное состояние рано или поздно заканчивается, в развитии системы наступает новый этап, характеризуемый нарушением внутреннего равновесия и потерей устойчивости. Из такого кризисного состояния необходим выход в одно из возможных качественно новых устойчивых состояний. Параметры системы, при которых возникает кризис, называют критической точкой развития. Последующий кризисный этап развития завершается переходом системы в качественно новое состояние одним из двух способов: либо деструктивным путем, разрушающим упорядоченную систему, либо конструктивным путем перехода в устойчивое состояние с более высоким уровнем организации, чем в предшествующем стационарном состоянии.

Потенциально возможное раздвоение выхода системы из кризисного состояния (деструктивного или конструктивного) привело к введению в оборот понятия «точки бифуркации». В синергетике смысл такого понятия несколько иной по сравнению с принятым в литературе его математизированным определением. В Нобелевской лекции И. Пригожин так определил синергетическое представление о бифуркации: «Обнаружение феномена бифуркации ввело в физику элемент исторического подхода. <...> Любое описание системы, претерпевшей бифуркацию, требует включения, как вероятностных представлений, так и детерминизма. Находясь между двумя точками бифуркации, система развивается закономерно, тогда как вблизи точек бифуркации существенную роль играют флуктуации, которые и

определяют какой из ветвей кривой будет далее определяться поведение системы» [11].

Речь идет о том, что на кризисном этапе развития системы заканчивается однозначный эволюционный путь, характерный для ее предыдущего стационарного этапа. Возникает несколько ветвей потенциально возможных продолжений развития после выхода из кризиса. Количество таких переходов определяется особенностями развивающейся системы и условиями ее взаимодействия с внешней средой. «Выбор» одной из таких ветвей определяется воздействием на систему одной из возникающих в этот период времени флуктуаций.

Что же происходит на этапе бифуркации, как протекают процессы перехода в качественно новые состояния исторически развивающейся системы?

В том, как протекают такие переходные процессы, не всё до конца ясно. В случае сложных систем решающее значение имеет их открытость, взаимодействие с внешней средой, откуда поступает энергия и/или вещество, обеспечивающие выход из состояния кризиса. Из классической термодинамики известно, что при отсутствии такого взаимодействия (изолированные системы) любые процессы преобразования одних видов энергии в другие, сопровождаемые совершением работы, завершаются необратимыми переходами части участвующей энергии в тепло, которое равномерно рассеивается внутри системы. Необратимые потери энергии создают увеличение неупорядоченности, численно характеризуемое увеличением энтропии. Так что в изолированных системах неизбежен исторический процесс производства энтропии вплоть до достижения ею максимального значения в состоянии термодинамического равновесия, которое является самым простым состоянием данной системы.

В открытой системе, попавшей в кризисную ситуацию, при наличии внешнего источника энергии в систему осуществляется приток свежей энергии. Если величина поступающей энергии не превысит потерь энергии внутри системы, то выход из кризиса произойдет деструктивным путем, путем частичного или полного разрушения упорядоченного состояния системы. Деструктивный путь выхода из кризиса реализуется механизмами достижения равновесных состояний. Переход неравновесной системы в некоторое промежуточное равновесное состояние сопровождается ростом энтропии, что означает снижение уровня организованности. При деструктивном выходе из кризиса нередко наблюдается однозначность перехода. Например, после выработки в недрах звезды ядерного горючего катастрофический ее переход в качественно новое

состояние однозначно определяется исходной массой. В новом облике белого карлика или нейтронной звезды достигается неустойчивое состояние внутреннего равновесия при более низком уровне организованности, чем в исходном стационарном состоянии. Другой пример: любой многоклеточный организм, исчерпавший свои жизненные возможности, завершает жизненный путь летальным выходом из кризиса, достижением полного равновесия с окружающей средой.

Неожиданностью для ученых стало открытие конструктивного пути выхода системы из кризиса. Существование такого пути означает, что материи изначально присуща не только разрушительная тенденция развития, но также созидательная тенденция, без которой невозможно объяснить возникновение нового в этом мире. И если механизм деструктивной тенденции развития заложен в стремлении систем к достижению равновесия, то самоорганизация предстает в качестве физической основы механизма созидания. Основное условие для проявления самоорганизации – поступающая извне энергия должна уверенно перекрывать протекающую в системе диссипацию энергии. Это необходимое, но недостаточное условие для конструктивного выхода из кризиса.

Выход из кризисного этапа считается конструктивным, если система приобретает качественно новое состояние с более высоким уровнем организации, чем до ее вступления в этап бифуркации. Такой переход может протекать в форме гигантской коллективной флуктуации, во время которой элементы системы, до того проявлявшие лишь способность к хаотическим близкодействиям, вдруг обретают способность к дальнодействиям, объединяющим элементы в единый когерентный коллектив. Ничего подобного прежняя наука не знала. Пригожин образно расценивает ситуацию так [10]: «Можно сказать, что в равновесии материя слепа, а вне равновесия прозревает». К смыслу слова «прозревает» мы еще вернемся.

Гигантская коллективная флуктуация, входящая в понятие самоорганизации, не является единственной флуктуацией, возникающей на кризисном этапе развития системы. Естественный вопрос – откуда берутся и что собой представляют иные флуктуации?

Значительная часть спонтанно возникающих флуктуаций вносится в систему извне. Многие такие флуктуации статистически обосновываются и носят вероятностный характер. Их выявление требует конкретного рассмотрения в каждом отдельном случае. Например, закономерный процесс биологического развития сложного организма может прерываться болезнью или несчастным случаем. Возможность заболевания, а также возможность того или иного исхода

конкретного заболевания, как и возможность несчастного случая и его последствий, поддаются статистической обработке и определяются вероятностно. Такие флуктуации создают кризисный этап исторического развития организма, выход из которого рассматривается как проявление случайности. Наряду с этим кризисные этапы развития могут возникнуть из-за неизвестных науке одноразовых флуктуаций, вызывающих особые формы выхода из кризиса. Такие флуктуации не носят вероятностного характера, и их появление создает состояние неопределенности выхода, который невозможно оценить вероятностными понятиями. Соответственно и выход системы из кризиса носит неопределенный, непредсказуемый характер.

Разветвление эволюционных путей в кризисных точках развития, случайный или неопределенный характер «выбора» послекризисного эволюционного пути дальнейшего развития, исключают возможность точного предсказания будущего системы на основании тенденций, наблюдаемых на предшествовавшем стационарном этапе [12,13].

Проблема направленного характера развития сложных систем

Давно было замечено, что в Природе наблюдаются процессы нарастания со временем сложности и упорядоченности развивающихся открытых неравновесных систем. Один из подобных примеров – возникновение на определенном этапе развития биосферы многоклеточных организмов, а в дальнейшем к постоянно протекающему среди таких организмов процессу цефализации, приведшему к появлению на Земле разумного начала [14,15]. Такие наблюдения рождают представление о направленном развитии высокоорганизованных открытых систем. Процесс развития у таких систем – историческая эволюция, время от времени прерываемая кризисными этапами с выходом в качественно новые состояния с более высоким уровнем сложности и организованности, чем на предшествовавшем стационарном этапе.

Относительно хорошо понятым современной наукой примером исторически направленного развития служит процесс биологического развития каждого земного организма. Любой земной организм является высокоорганизованной открытой неравновесной системой. В предлагаемом примере ограничимся сложными многоклеточными организмами, в частности человеком. От зарождения до финала такой организм проходит определенный путь исторического биологического развития, потенциально определяемый содержащейся в геноме программой, изначально заложенной в него родителями. Однако организм возникает и развивается в определенной внешней среде, которая активно взаимодействует с ним. На этом пути биологическое

развитие дополняется обучением, воспитанием, многочисленными внешними, очень часто отрицательными, воздействиями, что формирует реальный путь развития. Под действием программы биологического развития и под влиянием внешних факторов система на определенных этапах реального развития попадает в кризисные состояния, из которых выходит в полном соответствии с описанными выше скачкообразными переходами в качественно новые состояния. Но здесь обнаруживается новый фактор, играющий ведущую роль в части биологической направленности развития. Таким фактором является заложенная в геноме программа, иначе говоря, присутствие в самом организме информации о его будущих состояниях. Программный выход биологической системы из кризиса – это одно из возможных проявлений самоорганизации. Кризис, возникающий под влиянием внешних факторов, способен создать неопределенность будущего пути, поскольку возникает ограниченное число возможных путей выхода из него. Подобные кризисные состояния «выбивают» систему с предусмотренного программой направленного биологического пути развития.

Признаки направленного исторического развития отмечаются у многих высокоорганизованных систем, составляющих разномасштабную иерархию структур Мегамира. Достаточно уверенно в этом смысле можно говорить о развитии биосферы, Земли, Солнечной системы. Подробно такие признаки рассматриваются, например, в [6]. Сегодня космологи не подвергают сомнению утверждение, что вещественная Вселенная также является высокоорганизованной развивающейся системой. Необходимо только уточнить, что понимается под термином «вещественная Вселенная».

Важнейшим событием конца прошлого века стало открытие господствующей в нашем мире темной энергии. Эта пока непонятная науке субстанция предположительно представляет собой невещественную форму материи, входящую составной частью в физический вакуум [9]. Пока темная энергия проявляет себя через гравитацию, составляя не менее 75% всей тяготеющей массы Вселенной. Теперь о Вселенной можно говорить в общем смысле, как о системе, включающей в свой состав все известные (а возможно и неизвестные) формы материи. Господствующая темная энергия предстает в качестве базовой формы материи в ней. Термин «вещественная Вселенная» предполагает ту часть общей Вселенной, которая состоит из вещества, это, скорее всего, производная от базовой формы. В таком представлении вещественная Вселенная рассматривается как высокоорганизованная открытая система, внешней средой для которой выступает физический вакуум, включающий в себя господствующую темную энергию. По оценкам атомарное вещество и излучения, образующие невещественную

Вселенную, составляют в Мегамире только 5% от общей тяготеющей массы. Как открытая высокоорганизованная система вещественная Вселенная обнаруживает признаки направленного развития [6].

Необходимость объяснить существование направленного развития сложных систем создает определенные трудности. Сама по себе самоорганизация при подходящих условиях случайным образом осуществляет единичный акт перехода системы в состояние с более высоким уровнем организованности, чем в исходном положении. Но направленный процесс развития состоит из последовательности взаимосвязанных одиночных актов усложнения. Сомнительна возможность объяснить согласованное существование таких одиночных актов случайностью. На приведенном выше примере программного развития земных организмов возникает понимание того, что необходимое согласование последовательных актов самоорганизации возможно при условии существования информации о будущих состояниях развивающейся системы. И такая информация должна содержаться в самой системе. Здесь можно вспомнить слова Пригожина о том, что вне равновесия материя прозревает, придав прозрению смысл наличия необходимой информации в сочетании с самоорганизацией.

ЛИТЕРАТУРА

1. *H.Haken, Synergetics, an introduction. Nonequilibrium phas-transitions and self-organization in physics, chemistry and biology. Springer, 1977*
Хакен Г., Синергетика, М.: «Мир», 1985
2. *Glansdorff P., Prigogine I., Thermodynamic theory of structure, stability and fluctuation, N.Y., Wiley-Interscience, 1971*
3. *Данилов Ю.А., Кадомцев Б.Б., Что такое синергетика? М.: 1983*
4. *Аршинов В.И., Синергетика как феномен постнеклассической науки, М.: 1999*
5. *Князева Е.Н., Одиссея научного разума. Синергетическое видение научного прогресса, М.: 1995*
6. *Ровинский Р.Е. Развивающаяся Вселенная, М.: 1995; второе издание Иерусалим 2001,*
7. *Пригожин И., Стенгерс И., Порядок из хаоса, Эдиториал УРСС, М.: 2001*

8. Пригожин И., Стенгерс И, *Время, хаос, квант. Эдиториал УРСС*, М.: 2001
9. Ровинский Р.Е. *Загадка темной энергии, Вопросы философии*, №12, с.103, 2004
10. Пригожин И., *Философия неустойчивости, Вопросы философии*, №6, с.46, 1991
11. Пригожин И. *Время, структура и флуктуации, (Нобелевская лекция), Успехи физических наук*, т. 131, с. 185, 1980
12. Капица С.П., Курдюмов С.П., Малинецкий Г.Г., *Синергетика и прогнозы будущего*, М.: «Наука», 1997
13. Князева Е.Н., Курдюмов С.П., *Будущее и его горизонты: синергетическая методология в прогнозировании. Труды семинара*, т.4, М.: Изд. МГУ, с.5, 2001
14. Вернадский В.И. *Научная мысль как планетарное явление*, М.: Наука, 1991
15. Тейяр де Шарден П. *Феномен человека*, М.: Наука, 1987
16. Ровинский Р.Е. *Синергетика и процессы развития сложных систем, "Вопросы философии"*, 2006, 2, с.162-169