

В. И. Коротков

РАЗВИТИЕ КОНЦЕПЦИИ НООСФЕРЫ НА ОСНОВЕ ПАРАДИГМЫ СИНЕРГЕТИКИ

В истории науки нередки случаи, когда наиболее ценным вкладом ученого оказывалось не открытие нового явления, а новый взгляд на уже существующие теории или известные факты. Выдающимся примером осознания взаимосвязанности всех процессов, происходящих на Земле и во Вселенной, явилось учение В.И.Вернадского о ноосфере, в котором анализируется эволюция нашей планеты как единый космический, биогенный и антропогенный процесс. Появление человека представляется закономерным этапом развития биосферы. Разум, проявляющийся в научной и технической мысли, рассматривается как важнейший фактор дальнейшей эволюции планеты.

Вернадский был не одинок в своих исканиях. В 20-е годы близкие взгляды высказывались различными учеными. Возникновение сходных идей почти одновременно в разных научных школах является, как будет показано дальше, событием не случайным. Термин «ноосфера» был введен в 1927 году французским математиком и философом Э.Леруа для обозначения будущего состояния биосферы [1]. П.Тейяр де Шарден с теософской точки зрения анализирует возникновение мысли и образование ноосферы в книге «Феномен человека» [2]. Эта блестящая работа представляет ноосферу и «сверхжизнь» в ней, как слияние народов, Природы и Бога в единое целое.

Значение работ В.И.Вернадского заключается в их энциклопедичности, обработке огромного фактического материала и строгой научной доказательности. Будучи по образованию представителем точных наук, он все свои выводы сопровождал расчетами¹. Им доказана основная роль живого вещества в геологическом изменении планеты. В ранних работах по геохимии (1912 г.) он отмечает роль живых организмов в изменении химического состава поверхности Земли. Процессы, протекающие в биосфере, впоследствии станут основным предметом его ис-

следований [3]. Для существования жизни выделяются три условия — наличие жидкой воды, солнечного излучения и границы раздела фаз. Вода является основным компонентом живых существ, Солнце — вселенским источником энергии, на границе фаз протекает большинство биохимических процессов. Главную роль в использовании солнечного излучения играют растения. В процессе фотосинтеза они аккумулируют солнечную энергию в виде энергии химических связей органического вещества, образуемого ими из углекислого газа и воды. Выделяющийся при этом молекулярный кислород поступает в атмосферу, формируя ее состав, которым дышит все живое. Вернадский пишет «...лучи Солнца обуславливают главные черты механизма биосферы. Изучения отражения на земных процессах солнечных излучений уже достаточно для получения первого, но точного и глубокого представления о биосфере как о земном и космическом механизме. Солнцем в корне переработан и изменен лик Земли, пронизана и охвачена биосфера».

Ежегодно на Земле аккумулируется растениями около 10^{19} ккал². Частично эта энергия используется в виде пищи и топлива, частично накапливается в отмирающем органическом веществе и переходит в ископаемое состояние. Так образовались залежи нефти, угля, природного газа. В результате жизнедеятельности живого вещества была преобразована первичная среда планеты. Атмосфера стала кислородной, изменился состав гидросферы, образовался покров осадочных пород, появился плодородный почвенный слой. Вернадский объясняет почему результаты жизнедеятельности организмов оказывают повсеместное воздействие на состав атмосферы, гидросферы и литосферы несмотря на ничтожно малое количество массы живого вещества по сравнению с массой Земли. Если живое вещество распределить по поверхности Земли, то толщина его слоя составит всего лишь 2 см. Причина глобальности воздействия заключается в непрерывности работы живых организмов. Они осуществляют свою планетоформирующую роль за счет быстрого по геологическим меркам воспроизводства, размножения и связанного с этим круговорота веществ, происходящего в течение сотен миллионов лет. Вся масса живого вещества, произведенного за это время биосферой, равна $2.4 \cdot 10^{20}$ т, что в 12 раз превышает массу земной коры. «На земной поверхности нет химической силы, более постоянно действующей, а потому и более могущественной по

своим конечным последствиям, чем живые организмы, взятые в целом» [3].

Живое вещество непрерывно эволюционирует. Появление Homo Sapiens принципиально нового фактора жизни биосферы, стало по Вернадскому не случайным, а закономерным результатом этой эволюции [5]. Благодаря своему разуму человек создал техносферу и, вследствие этого, стал самым могущественным существом на планете. Если действие живого вещества до возникновения разума уже имело планетарный характер, то все возрастающая мощь цивилизации ставит на повестку дня вопрос об ответственности человека за будущее развитие всей биосферы и общества как ее части. В своей последней работе «Несколько слов о ноосфере» Вернадский пишет: «Сейчас мы переживаем новое геологическое эволюционное изменение биосферы: мы входим в ноосферу». Ноосфера — сфера взаимодействия природы и общества, в рамках которой разумная человеческая деятельность становится главным определяющим фактором развития. В абстрактной форме неизбежность перехода к ноосфере предвидел и Тейяр де Шарден.

Мыслители первой половины XX века провидчески установили взаимосвязь всех процессов на Земле. Как писал Вернадский: «Никогда в истории человеческой мысли идея и чувство единого целого, причинной связи всех научно наблюдаемых явлений, не имели той глубины, остроты и ясности, какой они достигли сейчас в XX столетии». И во второй половине нашего века появилась физическая теория, доказавшая это предсказание. Наиболее часто употребляемое название этой науки — синергетика. Ей удалось ответить на два кардинальных философских вопроса: как объяснить появление нового в мире, управляемом детерминистическими законами, и в чем причина необратимости всего происходящего?

Единство мира впервые проявилось в физике после создания специальной теории относительности. Человечество увидело связь таких фундаментальных понятий как пространство и время, ранее представлявшихся априорно разнородными. Эйнштейн показал, что нельзя рассматривать время в отрыве от пространства, что привело к объединению их в одно многообразие — четырехмерное пространство-время. Теория Большого Взрыва представила всю Вселенную, как *единую* систему, эволюционирующую во времени. Причем эта система является по определению замкнутой (изолированной), если не допускать

существования Бога. Неизбежным логическим следствием этой модели является взаимосвязанность всех процессов во Вселенной.

Однако среди выдающихся эволюционных теорий XIX века две удивляли своей противоположностью. Это теория эволюции видов Ч. Дарвина и классическая термодинамика. Первая обосновывает развитие живой материи от низших форм к высшим, т.е. усложнение организации в процессе эволюции. Вторая предсказывает дезорганизацию и разрушение изначально существующей структуры в замкнутой системе при переходе с течением времени к равновесию. Обе эти теории отражают единую физическую реальность, но соответствуют различным ее проявлениям. Совместимость второго начала термодинамики со способностью к самоорганизации — одно из крупнейших достижений современной термодинамики. Жизнь теперь не выглядит как гигантская флуктуация, развитие которой идет по пути разрушения изначально заданной структуры.

Из чего состоит синергетика.

За последние тридцать лет физика сумела понять, что упорядоченность образуется в *открытых* системах находящихся в *неравновесном состоянии*.

Открытая система — это система обменивающаяся веществом и энергией с окружающей средой.

Теория выявила свойства открытых систем, находящихся вдали от равновесного состояния:

Они оказываются *неустойчивыми* и возврат к начальному состоянию является *необязательным*. В некоторой точке, называемой *бифуркацией* (разветвлением), поведение системы становится неоднозначным.

При наличии неустойчивости изменяется роль внешних воздействий. В определенных условиях ничтожно *малое воздействие* на открытую систему может привести к значительным непредсказуемым последствиям (раскрытие неустойчивости).

В открытых системах, далеких от равновесия, возникают *эффекты согласования*, когда элементы системы коррелируют свое поведение на макроскопических расстояниях через макроскопические интервалы времени. Такое кооперативное, согласованное поведение характерно для систем различных типов: молекул, клеток, нейронов, отдельных особей и т.д.

В результате согласованного взаимодействия происходят *процессы упорядочения*, возникновения из хаоса определенных структур, их преобразования и усложнения. Чем больше отклонение от равновесия, тем больший охват корреляциями и взаимосвязями, тем выше согласованность процессов, даже протекающих в отдаленных областях и, казалось бы, не связанных друг с другом. Сами процессы характеризует *нелинейность*, наличие обратных связей и связанные с этим возможности управляющего воздействия на систему.

Теория состояний, далеких от равновесия, возникла в результате синтеза трех направлений исследований:

1. Разработка методов описания *существенно неравновесных* процессов на основе статистической физики. В рамках этого направления создаются кинетические модели, определяются параметры, необходимые для описания, выявляются корреляции, крупномасштабные флуктуации, устанавливаются закономерности перехода в состояние равновесия.

2. Разработка термодинамики открытых систем, изучение стационарных состояний, сохраняющих устойчивость в определенном диапазоне внешних условий, поиск условий самоорганизации, т. е. возникновения упорядоченных структур из неупорядоченных. Было показано, что процессы *диссипации* энергии являются необходимым условием самоорганизации, поэтому возникающие структуры получили название *диссипативных*. Г.Хакен предложил называть эту область исследований *синергетикой* (от греческого «синергетикос» — совместный, согласованно действующий).

3. Определение качественных изменений решений нелинейных дифференциальных уравнений, определяющих состояния далекие от равновесия, в зависимости от входящих параметров. Этот раздел математики получил название *теории катастроф*. С ее помощью описываются качественные перестройки общей структуры решений — катастрофы, определяются границы устойчивости и изменения структуры состояний.

Синтез этих трех направлений дал новую область знаний занимающуюся описанием состояний, далеких от равновесия. С ее помощью удалось сформулировать общий подход к целой совокупности явлений природы и общества. Ее называют по-разному: синергетика, теория открытых систем, теория диссипативных структур, термодинамика необратимых процессов. Есть названия, связанные со свойствами неустойчивости, нелинейности.

Рассмотрим кратко каждое из направлений.

Кинетика существенно неравновесных состояний [6,7]. Исходным пунктом для данной области исследований явилась классическая кинетика процессов в газах, начатая работами Дж.Максвелла и Л.Больцмана. Затем произошло расширение области исследования на слабонеравновесные системы в различных средах и условиях. С 1950 года началось широкое изучение систем, находящихся далеко от состояния равновесия из-за действия сильных полей и жестких излучений различной природы. На сцену вышел качественно новый фактор — квантованность энергетических состояний молекул. Ранее, по существу, рассматривалось только поступательное движение бесструктурных частиц. При сильном отклонении от равновесного состояния возбуждение охватывает различные степени свободы молекул — вращательные, колебательные, электронные. Возникает необходимость детального учета квантовой структуры вещества. В этих условиях частицы уже нельзя считать бесструктурными, а нужно рассматривать их эволюцию в фазовом пространстве многих степеней свободы.

Свойства атомов и молекул в различных энергетических состояниях различны. За счет неравновесных процессов происходит быстрое перераспределение заселенностей по большому числу термов и неизвестно какой из них окажется в данной конкретной системе наиболее реакционноспособным. Поэтому реакция существенно неравновесной системы на внешнее воздействие может быть неожиданной. Примером может служить диссоциация многоатомных молекул (ангармонических осцилляторов) при охлаждении газа в условиях накачки энергии. Этот эффект использовался для получения свободных атомов при низких температурах, что сыграло существенную роль в разработке химических лазеров. Другим примером нетривиального поведения существенно неравновесной системы является кратковременное охлаждение углекислого газа при резонансном поглощении излучения молекулой CO_2 .

В данном случае принципиально то, что при рассмотрении открытых систем, внешние параметры играют роль регуляторов, с помощью которых можно управлять процессами. Очень существенным моментом является то, что энергетические затраты на управление с помощью этих регуляторов намного меньше, чем требуется для достижения того же эффекта в равновесных условиях. Причем эффектив-

ность воздействия зависит от степени неравновесности системы.

В ряде случаев элементы системы начинают действовать в неравновесных условиях согласованно, обнаруживая свойства, не присущие отдельной частице. Эти общие свойства получили название когерентных или кооперативных свойств. При приближении системы к состоянию равновесия сначала разрушаются когерентные связи, а затем уже связи, определяемые энергетическими заселенностями. Когерентность определяется возникновением корреляций (взаимосвязей и взаимозависимостей) между частицами. Математически это выражается необходимостью рассмотрения функции распределения не одной частицы, а нескольких взаимодействующих. Н.Н.Боголюбов разработал единый подход рассмотрения всей совокупности функций распределения — цепочек уравнений для последовательных функций увеличивающегося числа взаимодействующих частиц. Этот метод назван цепочками ББГКИ, по имени ученых, внесших основной вклад в их разработку: Н.Н.Боголюбов, М.Борн, Х.Грин, И.Кирквуд, И. Ивон. Так функция p переменных $f_n(x_1, x_2, \dots, x_n, t)$ учитывает корреляции p частиц. Если масштаб корреляции уменьшается и взаимодействуют только $n-1$ частиц, то переходят к $f_{n-1}(x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, t)$ функции. При сглаживании неравновесности (переходе к состоянию равновесия) корреляции разрушаются, сокращается набор функций, необходимых для описания поведения системы, а сами функции зависят от все меньшего числа частиц. В пределе остаются лишь одночастичные функции распределения, уравнения которых составляют основу обычной кинетики.

Метод цепочек ББГКИ имел исключительно большое значение в неравновесной статистической физике. Это был, по существу, новый подход к проблеме необратимости. В замкнутой системе уравнения динамики (классической или квантовой) обратимы, т. е. замена t на $-t$ их не меняет. При обрыве цепочки, когда нарушается корреляция высших порядков, возникает необратимость. В этом случае четко видна причина необратимости. Разрушение корреляции может быть вызвано внешним воздействием. Но чем больше и упорядоченней система, тем выше масштаб корреляций. Это означает, что они действуют между большим числом частиц, на больших расстояниях и в течение большого промежутка времени. Следовательно, нужно меньшее воздействие для нарушения такой сложной корреляции.

ляции. А так как абсолютно изолированных систем нет, то необратимость нашего мира заложена в природе вещей в силу всеобщей связи.

Неравновесная термодинамика открытых систем изучает существенно неравновесные процессы. В их описании ключевую роль играет понятие возрастания энтропии системы за счет процессов, происходящих внутри нее. Такой подход привел к новому взгляду на привычные понятия. Выдающаяся роль в развитии данного научного направления принадлежит И.Р.Пригожину, удостоенному за свои работы Нобелевской премии в 1977 году [8-10]. Большой вклад внесли также Л.Берталанфи, Л.Онзагер, Л.И.Мандельштам, М.А.Леонтович, М.Эйген, Г.Хакен [11-15].

Открытые системы, в которых наблюдается прирост энтропии, получили название диссипативных. В таких системах энергия упорядоченного движения переходит в энергию неупорядоченного хаотического движения, т.е. в тепло. Если *замкнуть* систему вывести из состояния равновесия, то в ней начнутся процессы, возвращающие ее к состоянию термодинамического равновесия, в котором ее энтропия достигает максимального значения. Со временем степень неравновесности будет уменьшаться, однако, в любой момент времени ситуация будет неравновесной. В случае *открытых* систем отток энтропии наружу может уравновесить ее рост в самой системе. В этих условиях может возникнуть и поддерживаться стационарное состояние. Такое состояние Берталанфи назвал *текущим равновесием*. По своим характеристикам текущее равновесие может быть близко к равновесным состояниям. В этом случае производство энтропии минимально (теорема Пригожина). Если же отток энтропии превышает ее внутреннее производство, то возникают и разрастаются до макроскопического уровня крупномасштабные флуктуации. При определенных условиях в системе начинает происходить самоорганизация — создание упорядоченных структур из хаоса. Эти структуры могут последовательно переходить во все более сложные состояния. Такие образования в диссипативных системах Пригожин назвал диссипативными структурами.

Диссипативные структуры являются результатом развития собственных внутренних неустойчивостей в системе. Процессы самоорганизации возможны при обмене энергией и массой с окружающей средой, т. е. при поддержании состояния текуще-

го равновесия, когда потери на диссипацию компенсируются извне. Эти процессы описываются нелинейными уравнениями для макроскопических функций.

Возникновение макроскопических структур обусловлено рождением, под действием крупномасштабных флуктуаций, коллективных типов движения (мод), их конкуренцией, подавлением одних и развитием тех, которые наиболее приспособляемы к данным условиям. Сходство процессов возникновения диссипативных структур с фазовыми переходами в равновесных системах дало основание называть их *неравновесными (кинетическими) фазовыми переходами*. Формальная общность кинетических и равновесных фазовых переходов заключается в кооперативном характере процесса, обусловленном тем, что в системе, обладающей бесконечным числом степеней свободы, находится одна или несколько таких, изменение которых подчиняет себе изменение остальных.

Таким образом, в отличие от неравновесной статистической физики замкнутых систем, где анализируются процессы релаксации, приближение к равновесному состоянию, синергетика (термодинамика открытых систем) рассматривает обратный процесс создания и эволюции все усложняющихся диссипативных структур, когда системы стремятся к менее вероятному состоянию, эволюционируют с уменьшением энтропии. Так как в процессе усложнения требуется все большее число параметров для их описания, то структуры приобретают индивидуальность, неповторимость. В обратном процессе возвращения к положению термодинамического равновесия поведение различных систем становится схожим и, в конце концов, единственным параметром, определяющим функции распределения, становится температура.

Диссипативные структуры можно разделить на временные, пространственные и пространственно-временные. Примерами временных структур являются периодические, колебательные и волновые процессы. Типичными примерами пространственных структур являются: переход ламинарного течения в турбулентное, переход диффузионного механизма передачи тепла в конвективный. Характерные примеры: турбулентность, ячейки Бенара и сверхрешетка пор.

Развитие турбулентности начинается при достижении числом Рейнольдса критического значения. Ламинарное течение становится неустойчивым, возникают стационарные колебания

скорости движения, затем более сложное движение со все увеличивающимся числом характерных частот. Это чрезвычайно сложное квазипериодическое движение иногда называют динамическим хаосом. Однако понятие хаоса в этом случае не имеет ничего общего с хаотическим тепловым движением молекул в равновесном состоянии³. Турбулентное движение является макроскопическим, обусловленным большим числом возникших корреляций. Число степеней свободы, необходимых для его описания, по некоторым оценкам достигает 10^9 . Возникшие макроскопические связи увеличивают внутреннюю упорядоченность системы, что проявляется в возникновении интерференционных пятен в световой волне, прошедшей через турбулентность. Важность анализа турбулентности следует из того, что большая часть Вселенной заполнена веществом, находящимся в турбулентном движении.

Ячейки Бенара представляют собой структуры, напоминающие пчелиные соты, которые возникают в вязкой жидкости, подогреваемой снизу, после того, как градиент температуры превышает некоторое критическое значение. Весь слой жидкости распадается на одинаковые вертикальные шестигранные призмы с определенным соотношением между высотой и стороной. В центральной области призмы жидкость поднимается, а вблизи вертикальных граней опускается. В приповерхностном слое жидкость растекается от центра к краям, а в придонном — от границ призм к центру. При таком типе согласованного движения поток энтропии из системы максимален. Грандиозная структура подобных ячеек имеется на Солнце. Она образует конвективную зону сферической формы толщиной 10^5 км. Именно эта зона обеспечивает перенос на поверхность Солнца энергии, высвобождающейся за счет термоядерных реакций в его недрах.

При непрерывном облучении металлов потоком частиц высокой энергии ионы выбиваются из узлов кристаллической решетки. Возникающие вакансии объединяются, образуя частички пустоты — поры. Обычно пространственное распределение вакансионных пор случайно и близко к равномерному. Однако при определенных условиях может образовываться решеточное распределение пор, симметрия и кристаллографические оси которого являются такими же как и у решетки основного кристалла. Впервые решетку вакансионных пор (ее также называют сверхрешеткой) наблюдал в 1971 году Д.Эванс в чистом

молибдене, облучаемом при 870°C ионами азота с энергией ~ 2 МэВ.

Примерами пространственно-временных структур являются режим генерации лазера и колебательные химические реакции. Возникновение когерентного излучения в лазере происходит при достижении мощности накачки (подводимой энергии) порогового значения. Атомы или молекулы рабочего тела лазера, излучавшие до этого независимо друг от друга, начинают испускать свет согласованно, в одной фазе.

Фазовый переход в физике означает скачкообразное изменение физических свойств при непрерывном изменении внешних параметров. Неравновесный фазовый переход определяется флуктуациями. Они нарастают, увеличивают свой масштаб до макроскопических значений. Возникает неустойчивость и система переходит в упорядоченное состояние. Неравновесные фазовые переходы различной природы имеют общие характеристики. Прежде всего, упорядочение связано с понижением симметрии, что обусловлено появлением ограничений из-за дополнительных связей (корреляций) между элементами системы. Л.Д.Ландау в 1937 г. предложил общую трактовку фазовых переходов 2-го рода как изменение симметрии. В точке перехода симметрия меняется скачком. Также общим свойством кинетических фазовых переходов является наличие фундаментальной макроскопической переменной, позволяющей дать единое описание процесса упорядочения — параметра порядка. По своему физическому смыслу параметр порядка — это корреляционная функция, определяющая степень дальнего порядка в системе.

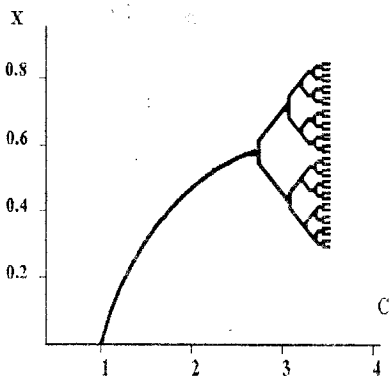
Теория катастроф. [16,17] Возникновение диссипативных структур носит пороговый характер. Неравновесная термодинамика связала пороговый характер с неустойчивостью, показав, что новая структура всегда является результатом раскрытия неустойчивости в результате флуктуаций. Можно сказать о «порядке через флуктуации». С математической точки зрения, неустойчивость и пороговый характер самоорганизации связаны с нелинейностью уравнений. Для линейных уравнений существует одно стационарное состояние, для нелинейных — несколько. Таким образом, пороговый характер самоорганизации связан с переходом из одного стационарного состояния в другое. Потеря системой устойчивости называется катастрофой. Точнее, катастрофа — это скачкообразное изменение, воз-

никающее при плавном изменении внешних условий. Математическая теория, анализирующая поведение нелинейных динамических систем при изменении их параметров, называется теорией катастроф. Ее основой является новая область математики — теория особенностей гладких отображений, являющаяся далеким обобщением задач на экстремум в математическом анализе. Начало было положено в 1955 г. американским математиком Г. Уитни. После работ Р. Тома (давшего теории название) началось интенсивное развитие как самой теории катастроф, так и ее многочисленных приложений. Значение элементарной теории катастроф состоит в том, что она сводит огромное многообразие ситуаций к небольшому числу стандартных схем, которые можно детально исследовать раз и навсегда. Различают 7 канонических катастроф для функций одной или двух переменных и числа управляющих параметров, не превышающих 5.

Траектория нелинейной динамической системы в многомерном фазовом пространстве ведет себя необычным образом. При определенных условиях существует область, которая притягивает к себе все траектории из окрестных областей. Она была названа «странным аттрактором» Лоренца. Попадая в нее сколь угодно близкие траектории расходятся и имеют очень сложную и запутанную структуру. В странном аттракторе Лоренца выбранное наугад решение будет блуждать и со временем пройдет достаточно близко к любой точке аттрактора. По топологии странный аттрактор представляет собой, так называемое, фрактальное множество, характеризующееся дробной размерностью. Быстрое расхождение двух близких в начальный момент времени траекторий означает очень большую чувствительность решений к малому изменению начальных условий. Этим обусловлена большая трудность или даже невозможность долгосрочного прогноза поведения нелинейных динамических систем.

Теория катастроф определяет область существования различных структур, границы их устойчивости. Для изучения же динамики систем необходимо знать каким именно образом новые решения уравнений «ответвляются» от известного решения. Ответ на такие вопросы дает теория бифуркаций (разветвлений), то есть возникновения нового решения при критическом значении параметра. Момент перехода (катастрофический скачок) зависит от свойств системы и уровня флуктуаций.

В реальных условиях при углублении неравновесности в открытой системе возникает определенная последовательность бифуркаций, сопровождающаяся сменой структур. Типичным примером такого сценария является развитие турбулентности с чередующимися типами все более усложняющихся движений. Состояние системы в момент бифуркации является неустойчивым и бесконечно малое воздействие может привести к выбору дальнейшего пути. Финальным состоянием эволюционирующих физических систем является состояние динамического хаоса.



Иллюстрацией перехода к нему является логистическое уравнение:

$$X_{n+1} = CX_n(1 - X_n)$$

Для наглядности рассмотрим биологическую трактовку этого уравнения: изолированно живет популяция особей нормированной численностью X_n . Через год появляется потомство численностью X_{n+1} . Рост популяции описывается первым членом правой части уравнения — CX_n , где коэффициент C определяет скорость роста и является определяющим параметром. Убыль (за счет перенаселенности, недостатка пищи и т.п.) определяется вторым, нелинейным членом — $-CX_n^2$. Зависимость численности популяции от параметра C приведена на рисунке. Линии показывают значения X_n при больших n ($n \rightarrow \infty$). При $C < 1$ популяция с ростом n вымирает. В области $1 < C < 3$ численность популяции приближается к постоянному значению $X_0 = 1 - 1/C$. Это область стационарных решений. Затем в диапазоне $3 < C < 3.57$ появляются бифуркации, разветвление кривых на две. Численность популяции колеблется между двумя значениями, лежащими на этих ветвях. Сначала популяция резко возрастает, на следующий год возникает перенаселенность и через год численность снова становится малой. Далее происходит перекрывание областей различных решений и поведение системы становится хаотическим. Динамические переменные X_n принимают значения сильно зависящие от начальных. При расчетах на ЭВМ для близких начальных значений C

ения могут резко отличаться. Более того, расчеты становятся корректными, так как начинают зависеть от случайных процессов в самой ЭВМ. М. Фейгенбаум установил универсальные закономерности перехода к динамическому хаосу при удвоении периода, которые были экспериментально подтверждены для широкого класса механических, гидродинамических, химических и т.д. систем. Наряду с последовательностями удвоения периода (каскадами Фейгенбаума) имеются другие пути перехода к хаосу, когда, например, длительные периоды упорядоченного движения чередуются со вспышками беспорядка.

Применение синергетики в других науках

Синергетика выявила общность закономерностей развития объектов разного уровня организации. Разительное сходство уравнений, описывающих процессы в самых различных областях знаний позволяет говорить о структурном изоморфизме процессов самоорганизации любых систем. Для конкретных случаев меняются лишь параметры и значение входящих переменных. В химии, например, переменными являются концентрации реагирующих веществ. В биологии — численность организмов или биомасса, мембранный потенциал и т.д. Примером временной структуры в биологии является процесс «хищник-жертва». Периодические колебания численности популяции зайцев и питающихся ими рысей, прослеженные компанией по заготовке пушнины «Хадсон-Бей» в течение 90 лет описываются уравнением Лотки-Вольтерра. Это же уравнение описывает незатухающие концентрационные колебания в химических системах. С точки зрения неравновесной термодинамики, процесс Лотки — Вольтерра интересен тем, что описывает систему как бы бесконечно удаленную от состояния равновесия, но еще не перешедшую в неустойчивое состояние.

Деятельность организмов немыслима без автоволновых процессов, являющихся пространственно-временными структурами [18]. Хорошо известно «чувство времени» у многих биологических объектов, начиная от простейших и кончая высокоорганизованными. Разгадка «биологических часов» лежит в периодических автоволновых процессах. Говорят, что природа не терпит пустоты, но любит ритм и цикличность.

Ярким примером последовательности бифуркаций и кинетики переходов является морфогенез [19]. Причем

здесь наглядно проявляется самое интересное свойство этих переходов — скачкообразное изменение симметрии системы. Морфогенез — это возникновение тканей, органов и всей структуры организма в процессе его эмбрионального развития. Исходная яйцеклетка в первом приближении имеет форму шара. Эта симметрия сохраняется на стадии бластулы, когда клетки, возникающие в результате деления еще не дифференцированы. Далее сферическая симметрия нарушается и сохраняется лишь аксиальная симметрия. На стадии гаструлы нарушается и эта симметрия — образуется сагитальная плоскость, отделяющая брюшную полость от спинной. Усложнение системы сопровождается понижением ее симметрии. Справедливо выражение «порядок есть нарушение симметрии». Хаос в высшей степени симметричен: любая его точка подобна любой другой и все направления равноправны. Появление структуры сразу снижает симметрию.

Нарушения симметрии в ходе развития зародыша возникают спонтанно в результате неустойчивости симметричного состояния. Именно в это время малые изменения управляющих параметров (в данном случае химического состава окружающей среды) очень эффективно действуют на систему (зародыш). Появление в организме матери биологически активного вещества может привести к аномалии в развитии плода. Известным примером является запрещение талидомида, применявшегося как снотворное. У некоторой части принимавших его женщин рождались дети с многочисленными уродствами. Прием лекарства у них совпадал с моментом раскрытия неустойчивости в развитии плода.

При дальнейшем развитии организма происходит формирование структуры личности. Внешними факторами, приводящими к раскрытию неустойчивости в данном случае являются межличностные взаимодействия. В психологии известны многочисленные примеры неадекватной реакции подростков на незначительные события. Насмешка, просто неосторожное слово взрослых или сверстников иногда приводит к катастрофическим последствиям — уходу из дома, суициду. Каждый из читателей может вспомнить в своем прошлом моменты, когда какой-либо пустяк выводил его из равновесия (пользуясь терминологией синергетики — из состояния текущего равновесия).

Вернадский рассматривал жизнь на Земле как процесс имеющий космический источник энергии — Солнце. Причем основ-

ную роль в использовании солнечной энергии играют фотосинтезирующие организмы. Теория диссипативных структур выявляет более глубокую роль растительного покрова — обеспечение термодинамических условий существования жизни на планете [20]. Земной шар вместе с живой и неживой природой является открытой, неравновесной системой. От Солнца поступает поток энергии в виде излучения. Существование на Земле упорядоченной структуры в виде биосферы возможно лишь при отводе в космическое пространство большего количества энтропии, чем приходит с солнечным излучением и вырабатывается в биосфере в результате диссипативных процессов. Можно сказать, что самоорганизация поддерживается за счет поглощения отрицательной энтропии. По предложению Бриллюэна отрицательную энтропию стали называть негэнтропией. Негэнтропийный рацион Земли составляет, по оценке Ребана, 10^{22} кал · град⁻¹ в год [20]. Поглощая солнечное излучение растительный покров понижает эффективную температуру уходящего излучения, увеличивая поток отводимой энтропии. Это увеличивает энтропию Вселенной, но обеспечивает поддержание стационарного состояния на Земле. В этом проявляется общее свойство жизни как упорядоченной подсистемы — она ускоряет рост энтропии системы в целом, но создает упорядоченность локально. Постоянство негэнтропийного рациона Земли лежит, по-видимому, в основе закона Вернадского о сохранении биомассы на Земле.

Современный взгляд на динамическую систему Земля — Солнце выявил значение солнечной активности. Возникающие флуктуации электромагнитного и корпускулярного излучений Солнца не превышают 10^{-3} от его общего потока, поэтому влияние солнечной активности на процессы, происходящие на Земле, раньше полностью отрицалось из-за энергетической малости. Однако сейчас установлено это влияние на самые разнообразные процессы в магнитосфере, верхнем и нижнем слоях атмосферы, гидро- и литосфере Земли. Воздействие происходит из-за сильной неравновесности ряда процессов в космическом пространстве, земной атмосфере и на самой Земле. Неравновесность же характеризуется наличием неустойчивостей. Солнечная активность выступает как спусковой крючок, приводящий к раскрытию этих неустойчивостей.

В настоящее время синергетические методы начинают находить применение в гуманитарных науках — экономике, социо-

логии, психологии, лингвистике и т.д. В качестве конкретного социологического примера можно привести разработку Хакеном стохастической модели формирования общественного мнения, в которой содержится резкий переход между различными состояниями. Появляются попытки синергетического осмысления искусства [21].

Наука как открытая система

Синергетика применима и к анализу процесса самого научного познания. Наука представляет собой совокупность знаний, приведенных в систему, в которой факты и законы связаны между собой определенными соотношениями и взаимно обуславливают друг друга. Она является открытой информационной системой, связанной с внешним миром потоками информации. В физических системах самоорганизация начинается если энтропия системы убывает. Энтропия же и информация с точностью до знака совпадают [22]. Применение синергетики в информационной формулировке в данном случае наиболее удобно.

Система научных структур и понятий в своем единстве является парадигмой. С точки зрения синергетики, парадигма — это своего рода устойчивое состояние текущего равновесия. В условиях нормального экстенсивного развития парадигма разрешает возникающие рассогласования. По мере накопления информации, то есть ухода системы в сторону от равновесия, структура научных знаний должна пройти кинетический фазовый переход. Этот переход — переосмысление основ теории, изменение методологических предпосылок и стиля мышления — называется научной революцией. Коренная трансформация и смена ведущих представлений дают новую картину мира. В результате научной революции старая парадигма целиком или частично замещается новой. Атрибутами фазового перехода являются: отклонения и флуктуации в установившихся понятиях, учащающееся появление «еретических» гипотез, крупномасштабные флуктуации в теоретических интерпретациях, появление согласований и корреляций типа одновременности и независимости одних и тех же открытий в разных местах. Примером последнего может являться появление концепции ноосферы в трудах Леруа, Тейяра де Шардена и Вернадского, а также понятия «пневматосферы» (сферы духа) в работе

П. А. Флоренского [23]. Развитие науки представляется процессом самоорганизации, проходящим через бифуркации, последовательность устойчивых, все более усложняющихся состояний — парадигм.

Нарушение открытости системы, прекращение притока новой информации приводит к диссипации знаний, схоластике. Замкнутость всего общества приводит к застою и деградации. Примером могут служить Спарта, средневековая Япония, изолированные племена.

В настоящее время синергетика показала свою общенаучную значимость. Происходят качественные изменения основы наших знаний, вызванные использованием идейного и понятийного багажа синергетики различными науками. Синергетика вводит новое видение мира и процессов эволюции. Ситуацию можно рассматривать как преддверие перехода на новую парадигму вслед за теорией относительности и квантовой механикой. Вместе с тем, следует помнить Сократа: «Основная ошибка, которой следует остерегаться, — полагать, что мы знаем больше, чем на самом деле». Л. де Бройль предупреждал о несостоятельности эйфории по поводу окончательности наших знаний: «...каждый успех нашего познания ставит больше проблем, чем решает...».

Заключение

Предыдущие пятьдесят лет показали необходимость форсированного перехода к ноосфере. Взрывообразно выросшее в результате научно-технической революции антропогенное давление на природу привело биосферу на грань необратимых изменений. Овладение ядерной энергией поставило вопрос о возможном одномоментном уничтожении жизни на Земле и даже самой планеты. С другой стороны, ускорение эволюции общества обеспечило условия для коллективной работы в планетном масштабе в целях устойчивого развития. Появление компьютеров позволило создать сети для быстрого информационного обмена. Появилась синергетика — мощный инструмент для дальнейшего познания мира в его взаимосвязанности и взаимообусловленности, позволяющий выявить механизмы этой взаимообусловленности. По словам Н. Н. Моисеева: «Установленные Вернадским факты дают отправную позицию для превращения его учения о ноосфере в теорию, пригодную в практических

исследованиях, необходимых для реализации ноосферогенеза» [24]. Применение синергетического подхода к изучению процессов в природе, обществе и их взаимодействия позволит дополнить конкретным содержанием провидческие слова Вернадского о причинной связи всех наблюдаемых явлений. Изучение этой причинной связи и выявление роли и места человека в процессах природной самоорганизации является центральной проблемой современной науки. Развитие связано с углублением неравновесности, что приводит к увеличению числа и глубины неустойчивостей, количества бифуркаций. В общем плане именно это и может представлять опасность дальнейшему развитию человечества. Чтобы избежать глобальных угроз необходимо новое, согласованное мышление, скоординированность совместных усилий всего человечества.

© Коротков В.И., 1996

Коротков Валентин Иванович — доцент физического факультета СПбГУ. Область научных интересов: фотопроцессы протекающие в сложных молекулах на границе раздела фаз.

Литература

- 1 *Le Roy Edouard. L'exigence idealiste et le fait d'evolution.* Paris; Alcan, 1927.
- 2 *Тейяр де Шарден П.* Феномен человека. М., 1987.
- 3 *Вернадский В.И.* Биосфера. Избр. соч. т. 5, М., 1960.
- 4 *Мировая энергетика.* Прогноз развития до 2000года. Под ред. Ю.Н.Старшинова. М., 1980.
- 5 *Вернадский В.И.* Научная мысль как планетное явление. М., 1991.
- 6 *Зоммерфельд А.* Термодинамика и статистическая физика. М., 1955.
- 7 *Климантович Ю.Л.* Статистическая физика. М., 1982.
- 8 *Пригожин И.Р.* От существующего к возникающему. М., 1985.
- 9 *Пригожин И.Р., Стенгерс И.* Порядок из хаоса. М., 1986.
- 10 *Пригожин И.Р., Стенгерс И.* Время, хаос, квант. М., 1994
- 11 *Хакен Г.* Синергетика. М., 1994.
- 12 *Хакен Г.* Синергетика. Иерархия неустойчивости в самоорганизующихся системах и устройствах. М., 1985.
- 13 *Эбелинг В.* Образование структур при необратимых процессах. М., 1979.
- 14 *Карери Дж.* Порядок и беспорядок в структуре материи. М., 1980.
- 15 *Эйген М.* Самоорганизация материи и эволюция биологических макромолекул. М., 1973.
- 16 *Томпсон Дж. М.Т.* Неустойчивость и катастрофы в науке и технике. М., 1985.
- 17 *Арнольд В.И.* Теория катастроф. М., 1990.

- 18 Блюменфельд Л.А. Проблемы биологической физики. М., 1977.
- 19 Романовский Ю.М., Степанова Н.В., Чернавский Д.С. Математическая биофизика. М., 1984.
- 20 Ребане К.К. Энергия, энтропия, среда обитания. Таллин, 1984.
- 21 Евин И.А. Синергетика искусства. М., 1993.
- 22 Волькенштейн М.В. Энтропия и информация. М., 1986.
- 23 Флоренский П.А. Философия, наука, техника. Л., 1989.
- 24 Моисеев Н.Н. Вернадский и современность. В кн. В.И.Вернадский. Живое вещество и биосфера. М., 1994.

Примечания

- 1 В.И.Вернадский в 1885 году окончил физико-математический факультет Санкт-Петербургского университета.
- 2 Данные, приводимые Вернадским, незначительно расходятся с современными: в год на планету падает $1.34 \cdot 10^{21}$ ккал солнечной энергии, атмосферой поглощается $2 \cdot 10^{20}$ ккал, океанами и морями — $4.2 \cdot 10^{20}$ ккал, преобразуется путем фотосинтеза — $(3.6) \cdot 10^{17}$ ккал. Однако лишь небольшая часть этой энергии используется сегодня человечеством — $8 \cdot 10^{15}$ ккал в виде топлива, древесных и других материалов растительного происхождения и $4 \cdot 10^{15}$ ккал в виде пищевых продуктов, обеспечивающих энергетические потребности человеческого организма [4].
- 3 Понятие динамического хаоса было введено в 1975 г. американскими учеными Т.Ли и Дж.Йорком.