Методические заметки по фундаментальным проблемам естествознания

НЕКОТОРЫЕ ФИЛОСОФСКИЕ ВОПРОСЫ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ДЕТЕРМИНИРОВАННОГО ХАОСА*

В.А. Загоруйко

Явление детерминированного хаоса в динамических системах, описываемых системой нелинейных дифференциальных уравнений, было открыто сравнительно недавно, и это открытие повлекло за собой появление новой философско-методологической проблематики, значимой для целого ряда отраслей современной науки. Результаты работ А.Н.Колмогорова, Я.Г.Синая, В.И.Арнольда и др. позволили описать новые классы неустойчивых динамических систем, поведение которых можно охарактеризовать как хаотическое. Оказалось, что хаос присущ почти всем неустойчивым динамическим системам и тем самым – математическим моделям большинства реальных процессов. На этом основании И.Пригожин и многие другие современные исследователи выдвигают идеи о том, что фундаментальными характеристиками мироздания являются нестабильность, неравновесность, нелинейность, ни к чему простому не сводимая сложность. Природе свойственны разнообразие, множественность вариантов развития и их реализаций. Вся природа, по существу, есть постоянное порождение новых форм, состояний, она сама – открытая динамическая система, которая

* Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 00–06–80178.

постоянно “выбирает” в точках бифуркации свой дальнейший путь. Нельзя ни точно предсказать результат выбора, ни вполне надежно это контролировать. Природа-система регулирует себя сама. Появление в научной картине мира подобных новых элементов требует развития рациональных средств, адекватных пониманию мира в таком качестве.

Исследования в области детерминированного хаоса дали ряд принципиально новых результатов, не укладывающихся в рамки устоявшихся научных концепций. Например, выявилась ограниченность представлений о хаосе как о совершенно беспорядочном состоянии, лишенном всякой структуры. Хаос может быть различным, обладая определенной степенью упорядоченности. Для некоторых хаотических систем получены универсальные законы подобия, введены количественные меры хаотичности систем. Показано, что возникновение хаотической динамики происходит по определенным законам, в одной и той же системе может существовать целая иерархия хаотических движений, закономерно сменяющих друг друга и различающихся своими характеристиками. В динамических системах при определенных условиях хаотические движения возникают из регулярных и могут исчезать, вновь превращаясь в периодические.

Похоже, что открытие детерминированного хаоса создало предпосылки для формирования новой общенаучной парадигмы. Данное обстоятельство объясняет высокий интерес к изучению онтологических и гносеологических аспектов представлений, связанных с детерминированным хаосом. Возникает целый ряд вопросов, на которые хотелось бы найти ответы. Например, в чем могут заключаться отличия детерминированного хаоса от так называемого “истинного” хаоса, или “шума”? Являются ли эти отличия существенными? Правомерно ли использование единого понятия “хаос” для описания хаотического поведения обоих видов? Какие новые математические и физические понятия, появившиеся вместе с концепцией динамического хаоса, в настоящее время приобретают статус общенаучных категорий и нуждаются в философской интерпретации? Насколько универсальны критерии возникновения хаоса в системах разного типа, например в диссипативных и консервативных системах? Как трансформируется традиционное соотношение категорий “порядок” и “хаос”? Разрешим ли “логический парадокс упорядоченного хаоса”? Выступают ли “порядок” и “хаос” неотъемлемыми качествами всех природных явлений? Это лишь малый перечень вопросов, возникающих в связи с изучением этого феномена.

Что же в современной науке понимается под хаосом и как это понятие сформировалось? Обратимся к истории развития представлений о хаосе в человеческом познании. В древнегреческой мифологии хаос отождествлялся с космогоническим представлением о “зияющем” пространстве, существовавшем раньше мироздания. По учению орфиков, хаос возник из безначального времени. Хаос понимался как беспорядочное, но животворящее начало мироздания, исходное состояние мира, давшее начало основным сущностям. Долгое время это понятие, безусловно, было положительно окрашено. Впоследствии, как известно, хаос стал синонимом абсолютного беспорядка, даже разрушения. С ним связывали представление о совершенно непредсказуемом, неуправляемом состоянии или процессе, о преобладании случая над порядком и разумом. Однако представление о хаосе оставались двойственным. Всегда наряду с беспорядком под хаосом подразумевалось и начало всех начал, из которого впоследствии возникает упорядоченный мир [1]. В науке до недавнего времени под хаосом понимали состояние системы, характеризующееся полным отсутствием порядка, как пространственного, так и временного, причем понятие порядка было аксиоматическим.

В науке проблема исследования и описания хаотических движений, по существу, возникла в середине XIX в., когда между теоретической гидродинамикой с ее уравнениями Навье – Стокса и прикладными задачами о течениях жидкостей и газов образовался ряд противоречий. Первую попытку включить в классическую физику описание хаотических движений сделал Рейнольдс, введя безразмерный комплекс (число Рейнольдса), большие значения которого связаны с турбулентными, хаотическими течениями жидкостей, а малые – с ламинарными, упорядоченными. Впоследствии для описания хаотических, случайных движений большого ансамбля частиц, например частиц газа, была создана такая специальная дисциплина, как статистическая физика. С тех пор в научном понимании истинно хаотическими процессами являются броуновское движение молекул и турбулентное течение жидкостей. В современной физике такие случайные движения большого числа частиц принято называть стохастическими, или шумами, и описывать с помощью статистических методов. В последние десятилетия внимание исследователей сосредоточилось на изучении детерминированного хаоса, резко отличающегося от охарактеризованного выше тем, что он может иметь место в простых системах, описываемых динамическими законами.

В чем состоит основная специфика детерминированного хаоса? Детерминизм предполагает однозначную взаимосвязь между причиной и следствием, т.е. подразумевает, что начальное состояние системы однозначно определяет ее последующие состояния. Таким образом, очевидно, что детерминированный хаос объединяет в себе два противоположных по смыслу понятия: детерминированность и хаос. Детерминизм ассоциируется с полной предсказуемостью системы, хаос – с полной непредсказуемостью и невоспроизводимостью. Г.Шустер дает следующее определение: "…Под детерминированным хаосом подразумевается нерегулярное, или хаотическое, движение, порождаемое нелинейными системами, для которых динамические законы однозначно определяют эволюцию во времени состояния системы при известной предыстории" [2]. Этот вид хаоса порождается не случайным поведением большого количества элементов системы, а внутренней сущностью нелинейных процессов, при этом нелинейность является необходимым, но не достаточным условием для возникновения хаотического движения.

В чем же кроется причина возникновения хаотического движения? Традиционно к причинам хаотического поведения относились внешние шумы, бесконечное число степеней свободы, принципиальная неопределенность траектории квантовых объектов и т.п. Для детерминированного хаоса настоящая первопричина нерегулярности заключается в способности неустойчивых нелинейных систем экспоненциально разводить первоначально близкие траектории в ограниченной области фазового пространства. Эта чувствительность к начальным условиям была образно названа "эффектом бабочки", поскольку взмах ее крыла в принципе способен повлиять на траектории воздушных масс в глобальном масштабе. В фазовом пространстве детерминированный хаос отображается непрерывной траекторией, продолжающейся без самопересечений (иначе процесс замкнулся бы в цикл) и постепенно заполняющей некоторую ограниченную область фазового пространства. Таким образом, любую сколь угодно малую зону фазового пространства пересекает бесконечно большое количество отрезков траектории. Это и создает в каждой зоне "запутанную" ситуацию – хаос. Здесь следует различать детерминированный хаос в диссипативных системах (для которых объем элемента в фазовом пространстве сокращается с течением времени) и консервативных (для которых элемент в фазовом пространстве только меняет форму, но сохраняет объем).

Возникает вопрос, почему хаотическая динамика нелинейных систем стала предметом тщательного изучения сравнительно поздно, ведь идеи возможности появления детерминированного хаоса высказывались и раньше [3]. По-видимому, это можно объяснить отсутствием методов решения нелинейных уравнений в общем виде. Сложность хаотических явлений стала причиной того, что наука долгое время вообще не пыталась описать нерегулярные, неупорядоченные движения, даже в рамках математики и физики. Нелинейные физические системы в рамках аналитических методов изучались только при малых значениях параметров, когда линеаризация правомерна. Лишь успехи компьютерной технологии позволили численно решать системы нелинейных уравнений в широкой области параметров и сразу выявили хаотические режимы, которые, как выяснилось, во многих системах встречаются чаще, чем периодические.

Важным результатом в изучении феномена детерминированного хаоса стало выявление универсальных механизмов перехода к хаотическому движению. Г.Шустер [4] выделяет три сценария перехода к хаосу в диссипативных системах:

1) удвоение периода, т.е. удвоение числа неподвижных точек в фазовом пространстве при определенных значениях внешнего управляющего параметра;

2) перемежаемость, т.е. прерывание регулярного во времени сигнала статистически распределенными промежутками нерегулярного движения (перемежающимися всплесками). При изменении внешнего управляющего параметра среднее число всплесков нарастает до тех пор, пока движение не становится полностью хаотическим;

3) наличие в фазовом пространстве странных аттракторов – областей, в которых по некоторым направлениям первоначально близкие траектории экспоненциально расходятся в силу присущей системе неустойчивости. Неустойчивость означает, что любое, даже самое малое изменение состояния системы может привести к сколь угодно большому фактическому изменению движения. В этом случае по виду исходного движения нельзя прогнозировать движение этой же системы при других, даже очень мало отличающихся начальных условиях. Учитывая, что при описании любых реальных систем состояния определяются с конечной, а не с бесконечной точностью, можно сделать вывод о том, что динамика системы становится непредсказуемой, несмотря на детерминистический характер закона движения [5].

Более поздние результаты исследования нелинейной динамики самых разных систем показали, что помимо неустойчивости хаотизация движения зависит и от ряда других причин. Их можно выявить при анализе сильно нелинейных систем. Известно, что большинство рассматриваемых с точки зрения хаотической динамики систем являются сильно нелинейными и характеризуются тем, что в них при одних и тех же параметрах могут сосуществовать разные движения, которые могут быть как устойчивыми, так и неустойчивыми, т.е. являются мультистабильными. Благодаря существованию в нелинейных системах множества движений неустойчивость не только вызывает отклонение движения от невозмущенного при малом изменении начальных условий, но и обеспечивает переходы от одного аттрактора к другому. "Блуждание" между аттракторами может представлять собой неупорядоченное движение. Хаотические режимы подобного типа, непредсказуемость которых определяется не только неустойчивостью, но и мультистабильностью, являются весьма распространенными в нелинейных системах.

С точки зрения предсказуемости динамики нелинейных систем отдельно следует упомянуть ситуацию, когда границы бассейнов притяжения различных аттракторов, сосуществующих в фазовом пространстве, являются фрактальными ("размыты"). Это приводит к еще более сильному влиянию точности определения начальных условий. Если границы гладкие, то, задавая начальные условия, мы попадаем в зону притяжения конкретного аттрактора и малое изменение начальных условий не приведет к выходу фазовой траектории на другой аттрактор. Если же границы фрактальные, то они так изрезаны, имеют такую сложную структуру, что, выбирая начальные условия, мы заранее не можем с уверенностью сказать, в зону притяжения какого из аттракторов попадет фазовая траектория. Даже в случае, когда в системе существует только пара периодических режимов, разделенных фрактальными границами, уже возникает непредсказуемость, так как неизвестно, к какому аттрактору будет стремиться фазовая траектория. В случае, когда один из аттракторов хаотический, мы имеем дело с двумя уровнями непредсказуемости: сначала из-за фрактальности границ, а затем из-за неустойчивости индивидуальных траекторий внутри странного аттрактора.

Заметим, что четкого математического определения фрактала не существует, а сам термин принадлежит Б.Мандельброту. Первоначально им было предложено следующее определение: "Фракталом называется множество, размерность Хаусдорфа – Безинковича [6] которого строго больше его топологической размерности" [7]. Но такое определение исключало многие фракталы, встречающиеся в физике, поэтому от него пришлось отказаться. Более позднее определение, данное Мандельбротом, звучит слишком абстрактно: “Фракталом называется структура, состоящая из частей, которые в каком-то смысле подобны целому”. Тем не менее оно дает некоторое интуитивное представление о структуре фрактала. Исследования фрактальных структур, начавшиеся с попытки определить длину береговой линии, привели к открытию аналитических непрерывных функций, которые не являются дифференцируемыми в любой точке (так называемых фрактальных функций), и к созданию новой фрактальной геометрии, описывающей весьма широкий класс природных процессов и явлений. Здесь важно отметить, что при введении нового понятия Мандельброт не изобретал каких-то абсолютно новых формализмов или теорий, поскольку некоторые фрактальные объекты уже были известны (к примеру, Канторово множество). Но не было общей методологии, связывающей в целостное представление такие, казалось бы, совершенно не связанные между собой вещи, как, например, множество Кантора и чертеж побережья Британии. Работа Мандельброта заключалась в перестройке схем восприятия и создании нового языка для изучения фрактальных объектов. Поэтому фрактальная геометрия, по-видимому, не является новой геометрической теорией. Это скорее новая концепция, новый взгляд на известные вещи, перестройка восприятия, заставляющая по-новому видеть мир. Распознавание, интерпретация, исследование фрактальных структур вынуждают нас по-новому оценивать давно известные вещи, например, различные типы размерностей [8].

Изучение фракталов показало, что их структура настолько сложна, что оставляет заметный отпечаток на физических процессах, протекающих на фракталах как на носителях. Фракталы иначе рассеивают электромагнитное излучение, по-другому колеблются и звучат, иначе проводят электричество, по фракталам иначе происходит диффузия вещества. Возникает новая область естествознания – физика фракталов. Параллельное развитие компьютерной графики позволило рассмотреть фракталы невооруженным глазом, и нашему взору предстали объекты, наделенные определенной структурой, симметрией и самоорганизацией. Их красота завораживает. Они являются наглядной иллюстрацией возможного сочетания двух противоположных категорий – порядка и хаоса. Достаточно рассмотреть множество Мандельброта M, задаваемое на комплексной плоскости простым способом: $M=\{$множество комплексных констант c, таких что отображение $z_{n+1}=z_n^2+c$ сходится$\}$. Это множество обладает очень сложной и причудливой структурой.

Итак, можно выделить три возможные причины, лежащие в основе непредсказуемости поведения нелинейных систем: 1) неустойчивость движения и неоднозначность задания начальных условий; 2) мультистабильность; 3) фрактальность границ бассейнов притяжения. Причем непредсказуемость поведения системы понимается не в смысле принципиальной невозможности определения характера движения, а в смысле неспособности определения траектории системы. В среднем установившееся движение такой системы вполне предсказуемо, мы можем вычислить его статистические характеристики, предсказать координаты и скорость внутри некоторого вероятностного распределения. То есть если нам известны уравнения динамики некоторой нелинейной диссипативной системы, заданы ее параметры и начальные условия, мы можем узнать характер ее движения. Но траектории возмущенного и невозмущенного движений могут существенно различаться по виду. Более того, если мы собираемся следить за одной-единственной траекторией в течение долгого времени, то, зная, как она выглядит в настоящий момент, мы не можем точно сказать, как она будет выглядеть некоторое время спустя. Единственное, о чем мы с уверенностью можем говорить, так это о том, что данный процесс будет сложным образом зависеть от параметров системы: при некоторых их значениях он может быть периодическим, при других – хаотическим.

Как известно, даже регулярные (периодические) движения могут иметь очень сложный и запутанный характер, поэтому отдельно следует рассмотреть вопрос о том, как, по каким критериям можно отличить регулярное движение от хаотического. Исследования в этой области позволили создать специальный математический аппарат, включающий в себя новые понятия, такие как показатель Ляпунова, инвариантная мера, корреляционная функция, энтропия Колмогорова, которые являются важными количественными характеристиками хаотического движения. Например, показатель Ляпунова определяет скорость расхождения траекторий в фазовом пространстве. Энтропию Колмогорова K можно трактовать как скорость потери информации о состоянии системы с течением времени или меру средней деформации выделенного объема в фазовом пространстве, а характерный промежуток времени, на котором мы можем предсказать поведение системы, равен $1/K$ [9]. Следует отметить, что до сих пор не существует бесспорного универсального количественного критерия возникновения детерминированного хаоса в системе. Тем не менее для отдельных классов диссипативных систем (правда, достаточно простых) удалось получить количественные критерии хаотизации движения. Показано, что для возникновения в системе детерминированного хаоса необходимо, чтобы размерность фазового пространства была не меньше трех. Установлено, что если для системы показатель Ляпунова принимает положительное значение, то следствием будут непериодичность в зависимости от времени любой пространственной координаты, сплошной спектр мощности (в спектре присутствуют все частоты из некоторого интервала) и спадающая во времени автокорреляционная функция, что приводит к "забыванию" системой своего начального состояния. Доказано, что при переходе системы от режима периодических колебаний к хаотическому режиму скачкообразно возрастает энтропия Колмогорова [10]. Однако измерение или вычисление величин, являющихся количественными характеристиками хаотического движения, на практике удается осуществить только для некоторых классов простых систем, для так называемого "маломерного хаоса".

В консервативных системах хаотические режимы тоже существуют и наблюдаются достаточно часто. Из сохранения фазового объема следует, что в таких системах нет ни притягивающих областей, ни неподвижных точек, ни предельных циклов, ни странных аттракторов, но тем не менее в таких системах детерминированный хаос возможен. Это означает, что в фазовом пространстве "хаотические" области тесно переплетаются с областями регулярного поведения системы и не являются притягивающими. В книге Г.Шустера [11] приведены примеры таких систем и дана классификация нескольких классов этих систем в соответствии с иерархией свойств возникающего хаотического движения. Для некоторых классов диссипативных систем получены качественные критерии хаотичности динамики, например, свойство гиперболичности, означающее наличие странного аттрактора в фазовом пространстве. Это означает, что возникающий в системе детерминированный хаос является новым качеством системы: все возможные движения объединяются в единое, чрезвычайно сложное. Хаотические движения, таким образом, можно трактовать как реализацию большого числа возможных движений.

Резко отличаясь от регулярной динамики, детерминированный хаос обладает спецификой по сравнению также и с "истинным" хаосом ("белым шумом"). Последний будем называть индетерминированным хаосом. К этому типу относится, например, хаотическое движение большого ансамбля частиц, в котором моменты столкновения отдельной частицы с другими частицами являются стохастическими, т.е. не детерминированными ее состоянием: здесь на отдельную частицу действует случайная внешняя сила и ее траектория является хаотической. Существенно ли различие между детерминированным хаосом и индетерминированным? Можно ли использовать единую категорию “хаос” для описания хаотических движений обоих видов? Различия можно выявить по некоторым количественным характеристикам. Так, например, спектр шумов гораздо более равномерный, однородный, а реализация совершенно беспорядочная, в то время как спектр детерминированных хаотических движений может содержать пики на некоторых частотах, а реализация – участки, напоминающие о периодичности. Показано, что для некоторых классов систем (рассматривались одномерные движения) энтропия Колмогорова конечна для систем с детерминированным хаосом и бесконечна для систем, в которых реализуется случайное движение [12]. Эти отличительные признаки вряд ли можно считать несущественными. Их происхождение может быть связано с глубоким внутренним различием между детерминированным и индетерминированным хаосом, которое имеет основания в природе этих явлений. Это означает, что детерминированное хаотическое движение нельзя отождествлять с собственно случайным процессом, хотя зачастую различить их по внешним проявлениям не представляется возможным. Их различия заложены во внутреннем механизме, который определяет смену состояний системы, ее поведение. Для детерминированного хаоса этот механизм однозначно определен и задается детерминистическими законами, выраженными посредством математических уравнений. Для индетерминированного хаоса данный механизм носит случайный характер, т.е. поведение системы определяют причинно не связанные между собой воздействия, как внешние по отношению к системе, так и внутренние. Поэтому классифицировать хаос возможно и необходимо не только по внешнему поведению системы, но и учитывая характер механизмов, определяющих ее поведение.

Для иллюстрации можно провести следующее. Рассмотрим бесконечную последовательность цифр $\{a_1, a_2, a_3, \ldots\}$, стоящих после запятой в десятичной записи иррационального числа (например, числа π^2), и бесконечную последовательность цифр $\{b_1, b_2, b_3, \ldots\}$, в которой каждая цифра сгенерирована независимо случайным образом [13]. Внешне они ничем не будут различаться. Как известно, вероятность того, что на k-м месте в обеих последовательностях будет стоять конкретная цифра, равна 0,1. Различие состоит в том, что в первом случае мы теоретически можем точно определить a_k для сколь угодно большого конечного k, – для этого нужно просуммировать конечное число членов ряда (например, из соотношения $\sum_{k=1}^{\infty} 6k^{-2} = \pi^2$ можно вычислить число π^2 с любой наперед заданной точностью), но на практике наши возможности всегда ограниченны, и с какого-то момента мы будем не в состоянии точно продолжить эту последовательность. Во втором случае мы можем говорить о любом b_k только с вероятностью 0,1. Первая последовательность, внешне проявляющая случайный характер, детерминированная, вторая – индетерминированная, т.е. собственно случайная.

“Индетерминированный” хаос [14] соответствует абсолютизированному понятию случайного, так же как и регулярная динамика абсолютизирует необходимое. Возможно ли непротиворечиво помыслить и допустить существование чего-либо “промежуточного” между ними? Нет ли логического противоречия в наших представлениях о возможности возникновения хаотического поведения системы, описываемой детерминистическими законами? Казалось бы, последние достаточны для однозначного определения поведения системы, причем отнюдь не хаотического. Однако в случае детерминированного хаоса предсказать поведение системы в принципе можно лишь на ограниченном отрезке времени и на больших временах поведение системы приходится описывать уже статистическими методами. Вопрос о соотношении категорий необходимого и случайного в системах, описываемых детерминистическими законами, но проявляющих хаотическое поведение, рассматривался в работах О.В.Шарыпова, А.И.Гулидова и Ю.И.Наберухина [15]. Следуя им, отметим, что аспекты (или элементы) детерминированного хаоса, к которым применима категория необходимого, и аспекты этого феномена, к которым применима категория случайного, не совпадают. Категория необходимого, очевидно, относится к детерминистическому закону, управляющему движением, т.е. к внутреннему механизму, тогда как случайным является характер (или результат) движения, т.е. внешнее поведение системы. Тем самым формальных оснований для логического противоречия здесь не существует. Тем не менее приходится констатировать, что целостное научное представление о таком явлении, как детерминированный хаос, должно быть достаточно тонким, допускающим совместное использование указанных противоположных категорий.

Аналогичное соотношение возникает и между понятиями “порядок” и “хаос”, которые мы вправе рассматривать как традиционно противопоставляемые общенаучные понятия (или даже философские категории). Исследования динамического хаоса показали, что хаотическим движениям присуща значительная степень упорядоченности. Этот факт связан со следующими особенностями детерминированных хаотических движений [16]. Во-первых, они возникают в системах, описываемых динамическими уравнениями, которые представляют собой законы движения таких систем. Возникшие хаотические движения, несмотря на свой сложный вид и статистические характеристики, тоже подчиняются этим законам движения. Тем самым имеются основания для предположения о том, что могут существовать некие динамические, т.е. детерминистические, законы, которым подчиняются детерминированные хаотические движения. Во-вторых, само появление хаотических режимов подчиняется определенным закономерностям, полученным на основе теории бифуркаций и качественной теории динамических систем и носящим универсальный характер. Это означает, что при хаотизации поведения систем определенных классов наблюдаются общие количественные и качественные закономерности, которые проявляются в существовании определенной последовательности бифуркаций, происходящих при строгом соотношении некоторых параметров систем. Скажем, в зависимости от вида нелинейностей, содержащихся в уравнении движения, в рассматриваемых системах ожидается тот или иной переход к хаосу, то или иное хаотическое движение. В-третьих, в системах с динамическим хаосом может существовать определенная иерархия хаотических режимов. Это означает, что в режиме динамического хаоса возникает некоторая последовательность хаотических движений, сменяющих друг друга в определенном порядке, так называемая цепочка бифуркаций. В результате таких бифуркаций аттрактор небольшой размерности может смениться аттрактором большей размерности, аттрактор может слиться с другими странными и регулярными аттракторами, сменить симметрию или исчезнуть. В-четвертых, сами странные аттракторы, математические образы хаотических движений, имеют вполне определенную внутреннюю структуру, они устроены определенным образом. Известно, что их структура фрактальна и подчиняется своим собственным законам подобия, а следовательно, подразумевает существование некоторого порядка.

Таким образом, возникающие хаотические движения подчиняются вполне определенным динамическим законам, поэтому хаотическим движениям следует приписать некоторую степень упорядоченности. Следовательно, определять детерминированный хаос как полное отсутствие порядка, как полностью (или "истинно") случайное движение, по-видимому, было бы некорректным. В то же время нельзя понимать хаотические состояния и движения как упорядоченные, они гораздо сложнее, подразумевают качественно другое описание. Представление о детерминированном хаосе как о чем-то совершенно беспорядочном, бесструктурном, оказывается чрезмерно упрощенным. Регулярные движения при изменении параметров могут превратиться в хаотические, и наоборот. Многие системы постоянно балансируют на грани хаоса и порядка. В представлении о явлении детерминированного хаоса мы сталкиваемся со специфическим соотношением категорий "порядок" и "хаос". Здесь они выступают не в качестве взаимоисключающих противоположностей, но как аспекты единого целого, здесь они неразрывно связаны между собой, и именно эта связь определяет сущность данного явления.

Это замечательное свойство детерминированного хаоса позволяет управлять им, что открывает огромные перспективы в плане его использования в практических целях. Хаотические динамические системы весьма податливы и чрезвычайно чувствительны к внешним воздействиям. Более того, динамикой хаотических систем можно управлять, т.е. посредством слабых воздействий переводить такие системы из режима хаотических колебаний в требуемый динамический режим, тем самым стабилизируя их поведение. Существует два основных способа стабилизации: без обратной связи и с обратной связью. Первый способ называется подавлением хаоса, второй – контролированием хаоса. Методы хаотической динамики дают возможность при относительно малых энергетических затратах создать устройства принципиально нового типа, которые могут запоминать, шифровать и обрабатывать заданную информацию. Один из подходов к этому основан на том, что хаотические аттракторы содержат, как правило, бесконечное множество неустойчивых циклов. Для ряда систем разработаны методы, позволяющие либо стабилизировать эти циклы, либо создавать новые. Это является ключом к решению проблемы обработки информации и организации динамической памяти на основе использования систем с подавленным хаосом. Для примера можно рассмотреть динамическую систему со странным аттрактором. В такой системе предельные циклы будут неустойчивыми. Каждому элементу алфавита поставим в соответствие один из циклов. В типичном странном аттракторе имеется неограниченное число неустойчивых циклов. Значит, таким способом может быть закодировано неограниченное число слов, причем записанная информация будет скрыта, ибо неустойчивые циклы практически ненаблюдаемы. Однако систему можно возмутить так, что нужный нам цикл станет устойчивым. Это позволит извлечь закодированную информацию.

Другая идея, связанная с использованием детерминированного хаоса для записи, хранения и поиска информации, состоит в следующем. Поведение хаотических траекторий не может быть предсказано на большие интервалы времени. Прогноз движения вдоль траекторий становится все более и более неопределенным по мере удаления от начальных условий. С точки зрения теории информации это означает, что система сама порождает информацию и скорость создания информации тем выше, чем больше хаотичность системы. Поскольку система создает информацию, постольку ее содержат и траектории системы. Если сопоставить траектории системы информацию в виде интересующей нас последовательности символов, то часть траекторий соответствовала бы информационным последовательностям и их можно было бы получать, решая уравнения, определяющие динамику системы. Если же взять любой (не слишком малый) фрагмент информационной последовательности, то с его помощью можно восстановить всю информационную последовательность, соответствующую данной траектории. Разным траекториям соответствуют разные информационные последовательности, и возникает возможность восстановить любую из них по любому ее небольшому фрагменту. Тем самым реализуется ассоциативный доступ (доступ по содержанию) ко всей информации, записанной в системе.

Итак, информация запоминается и хранится в виде траекторий динамической системы. Были построены математические модели, которые демонстрировали принципиальную возможность записи, хранения и извлечения информации с помощью траекторий динамических систем с хаосом. Разработанная технология позволяет записывать, хранить и извлекать любые типы данных: изображения, тексты, цифровую музыку и речь, сигналы и т.д. Примером использования технологии является персональная система управления факсимильными документами с ассоциативным доступом FacsData Wizard, которая обеспечивает возможность создания архивов неструктурированной информации с полным автоматическим индексированием всей хранимой информации [17].

Приведенные примеры показывают возможность управления детерминированным хаосом в динамических системах и указывают на тенденции проникновения идей нелинейной динамики в различные области человеческой деятельности.

* * *

Автор признателен докторам философских наук А.Л.Симанову и О.В.Шарыпову за полезное обсуждение рукописи настоящей статьи.

Примечания

1. Интересно, что такое представление о хаосе сохранилось до сих пор. Современные энциклопедические словари приводят два значения этого слова: "1) абсолютный беспорядок; 2) первоначальное неразвитое состояние Вселенной".

2. *Шустер Г.* Детерминированный хаос. – М.: Мир, 1988.

3. А.Пуанкаре в 1903 г. в своей работе "Наука и метод" писал, что "совсем незначительная причина, ускользнувшая от нашего внимания, вызывает значительный эффект, который мы не можем не заметить, и тогда мы говорим, что этот эффект вызван случаем. Если бы мы точно знали законы природы и положение Вселенной в начальный момент, мы могли бы точно предсказать положение той же Вселенной в последующий момент. Но даже если бы законы природы открыли нам все свои тайны, мы и тогда могли бы знать начальное положение только приближенно. Если бы это позволило нам предсказать последующее положение с тем же приближением, это было бы все, что нам требуется, и мы могли бы сказать, что явление было предсказано, что оно управляется законами. Но это не всегда так; может случиться, что малые различия в начальных условиях вызовут очень большие различия в конечном явлении. Малая ошибка в первых породит огромную ошибку в последнем. Предсказание становится невозможным, и мы имеем дело с явлением, которое развивается по воле случая" (*Пуанкаре А.* О науке. – М.: Наука, 1983. – С. 128).

4. См.: *Шустер Г.* Детерминированный хаос.

5. Наряду с неустойчивостью важная роль принадлежит нелинейности. Например, для того, чтобы динамика диссипативной системы стала хаотической и в ее фазовом пространстве возник странный аттрактор, необходимо, чтобы фазовые траектории не только были неустойчивыми, но и оставались в ограниченной области фазового пространства. Это обеспечивается именно нелинейностью, выполняющей функцию "ограничителя", который не дает фазовым траекториям "убегать" на бесконечность.

6. Размерность Хаусдорфа – Безинковича является обобщением топологической размерности и может принимать не только целые значения. Подробнее см., например: *Федер Е.* Фракталы. – М.: Мир, 1991.

7. *Mandelbrot B.B.* The fractal geometry in nature. – N.Y.: W.H.Freeman, 1983. – P. 51.

8. Помимо размерности Хаусдорфа – Безинковича фракталы характеризуются и другими размерностями как эмпирического (например, массовая размерность), так и теоретического характера (например, размерности Б.Реньи, образующие континуально бесконечное семейство и включающие в себя все известные размерности, в том числе размерность Хаусдорфа – Безинковича, информационную и корреляционную размерности). Для описания некоторых фракталов одной размерности оказывается недостаточно, – такие объекты, называемые мультифракталами, характеризуются целым спектром значений размерности Хаусдорфа – Безинковича.

9. Подробнее об этом см.: *Шустер Г.* Детерминированный хаос; *Гапонов-Грехов А.В., Рабинович М.И.* Хаотическая динамика простых систем // Природа. – 1981. – № 2; *Синай Я.Г.* Случайность неслучайного // Природа. – 1981. – № 3.

10. См.: *Гапонов-Грехов А.В., Рабинович М.И.* Хаотическая динамика простых систем // Природа. – 1981. – № 2; *Синай Я.Г.* Случайность неслучайного // Природа. – 1981. – № 3.

11. См.: *Шустер Г.* Детерминированный хаос.

12. См.: Там же.

13. Правда, на сегодняшний день любой реализованный генератор случайных чисел так или иначе детерминирован, но здесь мы рассматриваем абстрактный генератор случайных чисел.

14. См.: *Шарыпов О.В.* Детерминированный хаос и случайность // Философия науки. – 2001. – № 2.

15. См.: *Шарыпов О.В.* Детерминированный хаос и случайность; *Гулидов А.И., Наберухин Ю.И.* Диалектика необходимого-случайного в свете концепции динамического хаоса // Философия науки. – 2001. – № 1; *Они же*. Проблема причинности в свете концепции динамического хаоса // Философия науки. – 2001. – № 3.

16. См.: *Афанасьева В.В.* К философскому обоснованию феномена детерминированного хаоса // http://ivanem.chat.ru/afanasieva.htm 14.05.2002.

17. См.: *Дмитриев А.* Детерминированный хаос и информационные технологии // Компьютерра. – 1998. – № 47; *Лоскутов А.* Нелинейная динамика, теория динамического хаоса и синергетика (перспективы и приложения) // Там же.

Институт теплофизики СО РАН,
г.Новосибирск

Zagoruiko V.A. **Some philosophical problems arising when studying determined chaos**

The paper considers philosophical and methodological problems concerned with the phenomenon of the determined chaos in dynamic systems and shows the importance of these problems for a series of branches of the modern science. Possible causes of unpredictability of behavior of the dynamic systems are pointed out. The concept of «undetermined» chaos is discussed.