

Лоскутов А.Ю.**Очарование хаоса**

Описана взаимосвязь между некоторыми проблемами, изучаемыми теорией хаоса, среди которых нетрадиционные виды обработки информации, анализ временных рядов, фрактальные множества, колебательные химические реакции, сердечные аритмии. В рамках теории динамических систем объясняется роль малых воздействий на сильно неравновесные системы, приводящих к таким явлениям, как самоорганизация, переход от хаоса к порядку, дефибрилляция, и другим.

Данная статья посвящена памяти выдающегося ученого современности, лауреата Нобелевской премии И.Р. Пригожина. Его работы последнего времени были направлены на целостное описание мира, взаимосвязь хаоса и порядка, случайности и необходимости, самоорганизации как спонтанного возникновения порядка из временного и пространственно-временного хаоса, обратимости и необратимости времени. Естественнаучное видение природы И. Пригожиным затрагивает проблемы, находящиеся в междисциплинарной плоскости современного естествознания. Эта концепция послужила толчком к радикальным изменениям в нашем понимании мира как множественного, неравновесного и необратимого.

1. Самоорганизация и хаотизация

Первоначально понимание сложных систем (например таких, как биологические) было связано с представлением о том, что их невозможно описать при помощи математических моделей. Более того, долгое время жизнь рассматривалась как антипод неорганической природы. Сегодня, однако, происходит все более активное проникновение физических методов и подходов в биологию. Оказывается также, что основные формы кооперативного поведения, свойственные живым организмам, имеют свои аналоги среди неорганических систем. Любой живой организм представляет собой иерархию достаточно автономных подсистем, в которой исходящие от верхнего уровня сигналы управления не имеют характера жестких команд, подчиняющих себе активность всех индивидуальных элементов более низких уровней. Вместо этого от высших уровней иерархии поступают сигналы, которые предопределяют переходы подсистем из одного режима функционирования к другому. Иерархическое устройство сложных живых систем, которые представляют собой ансамбль связанных подсистем более простого строения, позволяет избежать неустойчивостей и нежелательной динамики, которые неизбежно возникают в сложных системах с жестким централизованным управлением.

Наиболее очевидная особенность биологических систем заключается в том, что они способны к самоорганизации, т.е. спонтанному образованию и развитию сложных упорядоченных структур. Это не противоречит законам термодинамики, поскольку все живые биологические системы не являются замкнутыми и обмениваются энергией с окружающей средой. Энтропия, служащая мерой беспорядка, может уменьшаться в открытых системах с течением времени. Необходимая предпосылка эффектов самоорганизации заключается, кроме того, в наличии потока энергии, поступающего в систему от внешнего источника и дисси-

ЛОСКУТОВ А.Ю.

пируемого ею. Именно благодаря этому потоку система становится активной, т.е. приобретает способность к автономному образованию структур. Очевидно, что эффекты самоорганизации не могут быть исключительным свойством биологических объектов, и должны наблюдаться в той или иной форме также в системах неорганического происхождения.

Большой интерес представляют распределенные среды, которые построены из дискретных элементов, локально взаимодействующих друг с другом и, таким образом, являющихся приближением естественных пространственно протяженных систем. Хотя разнообразие таких сред чрезвычайно велико, число математических моделей, которые используются для описания процессов образования и развития структур в таких системах, не столь значительно. По-видимому, даже когда отдельные элементы системы (например, живые клетки) обладают сложной внутренней структурой, вся их сложность не проявляется во взаимодействиях между ними, и с точки зрения макросистемы они функционируют как достаточно простые объекты с малым числом эффективных степеней свободы. В противном случае никаких упорядоченных структур в системе обычно не возникает.

Самоорганизация тесно связана с зарождением турбулентности. При макроскопическом течении жидкости к каждому ее малому элементу поступает энергия от крупномасштабных мод, которая превращается затем в теплоту за счет действия вязких сил. Чем выше средняя скорость течения жидкости, тем интенсивнее поток энергии, проходящей через каждый ее элемент. Как известно, при больших средних скоростях течения оно, как правило, является турбулентным, т.е. характеризуется хаотическими пульсациями поля скоростей, давления, температуры, плотности и т.п. Переход к турбулентности от ламинарного течения может осуществляться постепенно, не скачком. В этом случае возникновению турбулентности предшествует особая стадия, характеризующаяся появлением все более сложного течения.

2. Динамический хаос

Где лежит граница между регулярной, но сложно организованной структурой и хаосом? Критерием может служить устойчивость возникающих в процессе течения образований по отношению к малым возмущениям. Если такая устойчивость отсутствует, детерминированное описание теряет смысл, и необходимо использовать статистические методы. Впервые на связь между статистическим подходом и неустойчивостью указал еще Анри Пуанкаре.

Как же возникает хаотическое движение? Казалось бы, путей его возникновения должно быть очень много. Однако выяснилось, что число сценариев процесса хаотизации совсем невелико. Более того, некоторые из них подчиняются универсальным закономерностям, и не зависят (!) от природы системы. Одни и те же пути развития хаоса присущи самым разнообразным физическим, химическим, биологическим и др. объектам. Универсальное поведение напоминает обычные фазовые переходы второго рода, а введение ренормгрупповых и скейлинговых методов, известных в статистической механике, открывает новые перспективы в изучении хаотической динамики.

Какие же законы управляют хаосом? Возможно ли создать математический аппарат, позволяющий непротиворечиво описывать хаотическую динамику и предсказывать появление хаоса в тех или иных системах? Наконец, можно ли найти методы предсказания поведения хаотических систем? Ответами на эти и ряд других вопросов занимается *теория динамического (или детерминированного) хаоса*, являющаяся одним из разделов нелинейной динамики. К настоящему времени разработаны методы классификации различных типов хаоса, найдены закономерности его развития, созданы методы, позволяющие отличить, например в эксперименте, хаос от белого шума, и т.п. Более того, было обнаружено и строго обосновано, что сложное пространственно-временное поведение распределенных сред с громадным числом степеней свободы может быть адекватно описано нелинейными системами небольшой размерности.



[1]. Г.Николис, И.Пригожин. *Познание сложного*. – М.: Мир, 1990.

[2]. И.Р.Пригожин, И. Стенгерс. *Время. Хаос. Квант. Крещению парадокса времени*. – Эдиториал УРСС 2000.

[3]. И.Пригожин, И.Стенгерс *Порядок из хаоса. Новый диалог человека с природой*. – УРСС, 2003.

[4]. И. Пригожин *От существующего к возникающему: Время и сложность в физических науках*. – РХД, Изд. 2, 2002.

[5]. А.Ю.Лоскутов, А.С.Михайлов. *Введение в синергетику*. – М., Наука, 1990.

[6]. A.Loskutov. *Chaotic dynamics of chemical systems*. — In: *Mathematical Methods in Contemporary Chemistry*. Ed. S.I.Kuchanov. — Gordon and Breach, USA, 1995, p.181-265.

Физически осмысленное понятие детерминированного описания заключается в том, что начальное состояние процесса задается в силу неизбежных флуктуаций некоторым вероятностным распределением. Задача состоит в том, чтобы на основании известного начального распределения предсказать его эволюцию. Если малые возмущения начального условия с течением времени не нарастают (т.е. имеет место устойчивость), то поведение такой системы является предсказуемым. В противном случае процесс может быть описан только вероятностным образом. По-существу именно эти соображения легли в основу современного представления о динамическом хаосе.

Как известно, математическим образом установившихся *периодических* колебаний является предельный цикл, а квазипериодических — инвариантный тор. И устойчивые циклы, и инвариантные торы являются *аттракторами* (буквально — “притягателями”), поскольку в прямом смысле они притягивают все близкие траектории. Физически это означает, что при отклонении от таких колебаний (вследствие каких-либо воздействий) система спустя некоторое время вновь возвращается к ним, т.е. такое движение как бы притягивает. Простым примером здесь может служить обычный часовой маятник.

Если диссипативная система проявляет *хаотические* свойства, то математически это соответствует наличию в ее фазовом пространстве *странного аттрактора*. Данное понятие впервые было введено в известной работе Д.Рюэля и Ф.Такенса “О природе турбулентности” в 1971 г. и означало притягивающее множество, отличное от конечного объединения *гладких* подмногообразий. Появление такого подмножества в системах дифференциальных уравнений тогда казалось экзотикой, отсюда и название — странные аттракторы.

3. Бильярды

Впервые концепция динамического (детерминированного) хаоса получила строгое обоснование на простейшей модели статистической механики — бильярде. Понятие бильярда в теоретической и математической физике возникло после того, как Д.Биркгоф рассмотрел задачу о движении по инерции материальной точки в некоторой ограниченной области. Позже глубокие работы Н.С.Крылова, посвященные проблеме перемешивания в системе из упругих шаров, привели исследователей к необходимости рассмотрения задач бильярдного типа.

Бильярд на плоскости — это система, отвечающая движению по инерции материальных тел (шаров) внутри ограниченной области по закону “угол падения равен углу отражения”. По-существу, математический плоский бильярд представляет собой обычный бильярд, только с произвольной конфигурацией стола и без луз. Было показано, что си-

стема уже из двух (!) шаров, в зависимости от формы границы, может обладать свойством хаотичности. Тем самым была решена задача об экспоненциальной неустойчивости (и как следствие — непредсказуемости) траекторий системы упругих шариков. В дальнейшем были изучены различные модификации бильярдных систем и исследованы их статистические свойства. Более того, на основе анализа бильярдных систем был получен результат о сходимости к броуновскому движению поведения чисто детерминированной системы, что явилось первым строгим подтверждением рождения хаоса в динамических системах.

Естественным обобщением бильярдных систем являются бильярды, границы которых не являются неподвижными, а изменяются по какому-либо закону. Это совершенно новая область математической физики, открывающая новые перспективы в исследовании многих давно известных, но малоизученных проблем. В частности, появляется возможность принципиально нового подхода к управлению скоростью (температурой) заряженных частиц в разряженном газе посредством периодического внешнего воздействия. Это позволяет создать устройства охлаждения принципиально нового типа.

4. Управление динамическими системами и подавление хаоса

Развитие теории динамических систем внесло много нового в понимание происхождения хаотичности и привело к ряду важнейших открытий. Обоснование эргодической гипотезы Больцмана для определенного класса систем, доказательство сохранения квазипериодического движения при возмущении интегрируемых систем (теория Колмогорова-Арнольда-Мозера), введение энтропии Колмогорова, подковы Смейла и У-систем Аносова стимулировало развитие новых направлений современной математики и математической физики, отражающих всю глубину проблем, рассматриваемых в нелинейной динамике. В результате было показано, насколько типичным и всеобщим явлением оказывается хаотическое поведение

в системах с небольшим числом степеней свободы. Таким образом, проблема предсказуемости, первоначально появившись в достаточно сложных системах (таких как гидродинамические или системы статистической механики), стала общей для многих направлений современной науки.

В связи с этим в последнее время стало интенсивно развиваться новое направление в нелинейной динамике и синергетике, посвященное проблемам предсказуемости поведения хаотических систем, управления их динамикой и возможности подавления хаоса. Исследования показали, что оно имеет непосредственное отношение ко многим областям естественных наук, поскольку на этом пути удастся найти подходы к таким важным и насущным приложениям как обработка (запись, кодирование и расшифровка) информации, скрытая связь (т.е. пересылка зашифрованных сообщений), проблема самоорганизации, стабилизация неупорядоченных сокращений сердечной мышцы и дефибрилляция, искусственное создание когерентных структур в распределенных системах, обладающих пространственно-временным хаосом, инженерия динамических систем, и других. Интенсивные теоретические и экспериментальные исследования хаотических динамических систем выявили их неожиданное и вместе с тем замечательное свойство: они являются весьма податливыми и чрезвычайно чувствительными к внешним воздействиям. Повидимому, именно это обстоятельство лежит в основе процессов структурообразования в живых тканях. Развитие любого живого организма есть последовательность автономных актов самоорганизации. Благодаря этому развивающаяся структура характеризуется возможностью перейти в одно из очень большого числа допустимых равноправных состояний. Тем не менее, эволюционирующая система всегда проявляет только определенную (заданную) динамику. Управление этим процессом может осуществляться с помощью слабых воздействий, которые и влияют на выбор того или иного конкретного состояния.

Развитие этих методов, а также знание закономерностей самоорганизации дает



[7]. A.S.Mikhailov, A.Loskutov. *Chaos and Noise*. — Springer, Berlin, 1996.

[8]. Ф.Мун. *Хаотические колебания*. — М., Мир, 1990.

[9]. Г.Шустер. *Детерминированный хаос. Введение*. — М., Мир, 1988.

[10]. Дж. Гукенхеймер, П.Холмс. *Нелинейные колебания, динамические системы и бифуркации векторных полей*. — РХД, 2002 г.

[11]. А.Лихтенберг, М.Либерман. *Регулярная и стохастическая динамика*. — М., Мир, 1984.

[12]. Г.Г.Малинецкий, А.Б.Потапов. *Современные проблемы нелинейной динамики*. М.: УРСС, 2002.

[13]. А.Ю.Лоскутов. *Проблемы нелинейной динамики*. I. II. III. — Вестн. Моск. ун-та, сер. Физ.-астр., 2001, №2, №3, 2002, №6.

[14]. Н.С.Крылов. *Работы по обоснованию статистической физики*. — М.-Л., Изд-во АН СССР, 1950.

возможность в самом прямом смысле вмешиваться в деятельность существующих биосистем и управлять их динамикой. В этом направлении наиболее примечательным является разработка принципиально новых методов стабилизации некоторых сильно нерегулярных сокращений сердечной мышцы (т.е. различного рода аритмий) и иногда возникающих в сердечной ткани смертельно опасных нарушений — фибрилляций.

5. Подавление хаоса и сердечная аритмия

Сердечная мышца (как и любая другая мышечная ткань) относится к так называемым возбудимым системам. При описании таких сред часто прибегают к аппроксимации исходной системы совокупностью отдельных возбудимых элементов, локально взаимодействующих друг с другом. Каждый такой элемент способен находиться в одном из трех состояний — покоя, возбуждения и рефрактерности. Из состояния покоя элемент может перейти в возбужденное состояние, в котором будет находиться определенное время. Затем он переходит в состояние рефрактерности и только потом вновь в состояние покоя. Таким образом, переход в возбужденное состояние оказывается возможным лишь из состояния покоя. Хотя такая модель является определенным приближением, она очень хорошо воспроизводит основные явления в возбудимых средах, в том числе и в тканях сердца.

Предположим, что имеется однородная возбудимая среда, в которой все элементы обладают идентичными свойствами. Тогда частота возбуждения всех таких элементов будет одинаковой. Если некоторую область такой среды начать периодически возмущать, то в этой области возникнет источник концентрически расходящихся волн возбуждения. Такой источник называют *ведущим центром* или *пейсмейкером*. Если в возбудимой среде есть два или несколько пейсмейкеров, то пейсмейкер меньшей частоты генерации с течением времени подавляется пейсмейкером большей частоты. Иными словами, имеет место *конкуренция* между пейсмейкерами. В идеальном случае через определенное время во всей среде останется только один пейсмейкер.

Кроме пейсмейкеров, в возбудимых средах возможно появление иных аномальных источников возбуждения — спиральных волн, которые представляют собой “вращающиеся” спирали. Все спиральные волны имеют одинаковую частоту. Поэтому они всегда сосуществуют между собой, но гасят ведущий центр, являющийся более медленным автоволновым источником. Кроме того, спиральные волны представляют собой главный тип элементарных самоподдерживающихся структур в однородных возбудимых средах. Подобно вихрям в сверхпроводнике или в сверхтекучем гелии, они чрезвычайно устойчивы.

Появление нескольких источников возбуждения в сердечной мышце в настоящее время связывается с опасными на-

рушениями нормальной работы сердца – аритмией. При большом числе аномальных источников появляется фибрилляция после чего, как правило, наступает смерть организма. Современные методы выведения сердца из состояния фибрилляции являются очень жесткими (подача короткого электрического импульса громадного напряжения и большого тока).

Развитие нелинейной динамики и синергетики позволило понять, что такое силовое воздействие вовсе необязательно. Именно, если рассматривать фибрилляцию сердечной ткани как развитый пространственно-временной хаос, то, по-видимому, вполне достаточно слабых электрических воздействий непосредственно на сердечную мышцу с тем, чтобы погасить хаотические процессы. Кроме того, если в среде имеются спиральные волны с противоположными направлениями вращения, то, подбирая фазу и частоту внешнего воздействия, можно добиться движения центров двух волн навстречу друг другу и их *аннигиляции*.

6. Динамические системы и проблема обработки информации

Знание основных закономерностей поведения хаотических сред позволяют перейти к целенаправленному конструированию искусственных систем, процессы самоорганизации в которых приводили бы к образованию нужных структур. Наиболее развитым приложением здесь является создание устройств *обработки информации* на основе применения хаотических систем. Действие таких устройств базируется на использовании естественной “внутренней” структуры системы и управлении притоком энергии, т.е. фактически на том же принципе, который положен в основу контроля хаотических систем. Это дает возможность при относительно малых энергетических затратах создать устройства принципиально нового типа, способные запоминать, шифровать и обрабатывать заданную информацию.

В приложениях важно не только уметь записывать и считывать информацию, но и передавать ее, причем часто в зашифрован-

ном виде. Применение динамических систем позволяет решить эту проблему несколькими способами. Часть из них базируется на использовании неустойчивых циклов хаотических систем. Другие основаны на приложении методов символической динамики и стабилизации таких циклов посредством внешних возмущений.

Конкретный оригинальный способ скрытой передачи полезной информации и кодирования символов алфавита стабилизированными циклами хаотических систем может быть реализован следующим образом. Поставим в соответствие каждому стабилизированному (с помощью выбранного возмущения) циклу определенный символ алфавита. Передавая тем или иным способом такое возмущение на приемник, можно осуществить трансляцию закодированного символа. Расшифровка состоит в том, что полученное периодическое возмущение, использованное при кодировании, применяется к динамической системе, которое зашито в приемнике, т.е. ключом к обработке информации является сам вид системы. При этом необходимо, чтобы возмущения, приводящие к стабилизации цикла определенного периода, составляли в пространстве параметров множество положительной меры или лучше целую область. Тогда каждый символ алфавита может кодироваться не одним конкретным возмущением, а подмножеством ненулевой меры. Это свойство обеспечивает в том числе и устойчивость данного метода к внешним шумам, всегда имеющимся в линии передачи.

Таким образом, развитие теории динамических систем дает возможность по-новому и с достаточно общей точки зрения подойти к созданию систем обработки и передачи информации. Углубление и дальнейшее обобщение полученных в этой области результатов позволит вплотную приблизиться к решению проблемы искусственного интеллекта.

7. Временные ряды

Наиболее интригующим и заманчивым приложением теории нелинейных систем является прогнозирование динамики порождаемых ими временных рядов. Как известно,



[15]. *Динамические системы. Тома 1–9. Серия “Современные проблемы математики. Фундаментальные направления.”* — ВИНТИ, 1985–1996.

[16]. A.Loskutov. *Non-feedback Controlling Complex Behaviour of Dynamical Systems: An Analytic Approach.* — In: *Nonlinear Dynamics: New Theoretical and Applied Results*, ed. J.Awrejcewicz. *Academie Verlag*, 1995, p.126-150.

[17]. T.Shinbrot, C.Grebogi, E.Ott, J.A.Jorke. *Using small perturbations to control chaos.* — *Nature*, 1993, v.363, p.411-417.

[18]. Л.Гласс, М.Мэки. *От хаосов к хаосу. Ритмы жизни.* — М., Мир, 1991.

[19]. L.Schamorth. *The Disorders of the Cardiac Rhythm.* — *Blackwell, Oxford*, 1980.

[20]. Е.Федер. *Фракталы.* — М., Мир, 1991.

[21]. *Emergent Nature. Proc. of the Int. Conf. “Fractal’2002”, Granada, Spain, March 2002.* Ed. M.M.Novak. — *World Scientific*, 2002.

[22]. P.Gray and S.K.Scott. *Chemical Oscillations and Instabilities.* — *Oxford University Press*, 1990.

большинство систем (природных, таких, например, как атмосфера, или искусственных, таких, например, как биржа), в силу их сложности, не могут быть смоделированы с достаточной точностью. Однако их описание может быть выполнено посредством иного подхода, основанного на наблюдении за их поведением. Наблюдаемая (сигнал, реализация) — это функция от времени, по которой судят о процессе в исследуемой системе. Иными словами, наблюдаемая — это временной ряд.

Например, для атмосферы в качестве наблюдаемой может выступать, скажем, изменение температуры, для биржи — ежедневный курс ценных бумаг и т.п. Если такую наблюдаемую определенным образом обработать, то при некоторых условиях возможно с большой точностью произвести оценку будущего значения временного ряда, причем эта оценка представляет собой функцию только (!) от предыдущих значений ряда.

При каких условиях может быть динамически смоделированы некоторые временные ряды и успешно осуществлено их прогнозирование? Для ответа на этот вопрос проследим за изменением наблюдаемой со временем. Тогда получим некоторую функцию. Если измерения производились в фиксированные моменты времени, то эта функция примет дискретный ряд значений. Когда исследуемая система — детерминированная (или динамическая, т.е. описывается конечным набором обыкновенных дифференциальных уравнений), — то наблюдаемая всегда будет функцией от ее фазовой точки. Однако, как правило, заранее неизвестно, возможно ли описать данный процесс динамически. Тем не менее, в рамках современной теории размерности и теории динамических систем можно, в принципе, отличить шум (случайный процесс) от детерминированного поведения и тем самым установить конечномерность рассматриваемого явления.

8. Фрактальные множества

К синергетике и теории неравновесных систем относится и другая область нелинейной физики — *фракталы*. Фракталами обычно называют множества, которые обладают масштабной инвариантностью, т.е. в любом масштабе они выглядят практически одинаково.

Термин “фрактал” был введен известным математиком Бенуа Мандельбротом и означал множество, размерность которого не совпадала с обычной. Теория фракталов долгое время не находила широкого применения, пока не было обнаружено большое число задач, где фрактальная структура и размерность служат основными характеристиками системы. Например, в турбулентности теория фракталов теснейшим образом связана с теорией масштабной инвариантности Колмогорова. В теории динамических систем фрактальные множества занимают особое место, поскольку решения большинства нелинейных задач представляют собой фрак-

тал. Дело в том, что математическим образом хаотических колебаний в диссипативных системах является аттрактор, который уже не обладает такой гладкой структурой, как, например, тор. Геометрическое строение таких аттракторов более сложное. В частности, они могут обладать геометрической (масштабной) инвариантностью, т.е. представлять собой фракталы.

У фрактальной теории много точек соприкосновения с методом ренормгруппы и теорией фазовых переходов. В финансовой математике многое можно описать, используя фрактальный подход. Неожиданно важные приложения теории фрактальных множеств были выявлены в достаточно новых областях современной науки — теоретической биологии и математической медицине. Здесь многое удалось понять, опираясь на масштабную инвариантность. Наконец, фрактальные множества интересны с точки зрения создания моста между математикой и искусством.

9. Динамика колебательных химических реакций

К теории неравновесных сред тесно прилежит не менее интересная область исследований нелинейной динамики, изучающая колебательные химические реакции. В настоящее время ряд результатов теории динамических систем достаточно эффективно используются в химической кинетике. В частности, многие из колебательных химических реакций впервые нашли объяснение в рамках качественной теории дифференциальных уравнений.

Любая химическая реакция достаточно сложна. Ее стехиометрическое уравнение, как правило, не учитывает всю сложность элементарных процессов. Это уравнение выявляет природу реагирующих веществ и определяет общее число реагирующих молекул, но не учитывает промежуточных компонент, появляющихся в ходе реакции (ионов, свободных радикалов и т.д.) на каждой ее элементарной стадии. Совокупность элементарных стадий, вовлеченных в суммарную реакцию, называется механизмом реакции. Используя закон действия масс и зная константы скоростей, можно описать

реакцию динамически, т.е. составить соответствующую систему дифференциальных уравнений.

Химические системы диссипативны, и поэтому они не могут пребывать в каком-либо динамическом режиме: спустя некоторое время большинство химических реакций приходит в равновесие. Однако имеются исключения из этого правила (реакции Белоусова-Жаботинского, Бриггса-Раушера, Брея-Либавски, и некоторые другие), когда до образования конечных продуктов концентрации промежуточных соединений периодически изменяются с течением времени. В зависимости от концентраций реагентов (т.е., в сущности, параметров соответствующей системы дифференциальных уравнений), реакционная смесь может проявлять самые разнообразные режимы поведения: периодические, сложнопериодические, квазипериодические и хаотические.

Хотя в настоящее время многое в таких реакциях уже понято, причины, вызывающие колебательные химические процессы, остаются до конца не выясненными. Динамическое описание колебательных химических реакций может оказать в этом существенную помощь, в частности, косвенным путем установить недостающие константы скоростей реакций. Кроме того, возможность стабилизации хаотических химических процессов в распределенных средах позволит подойти к исследованию явления резонансов спиральных волн с точки зрения теории динамических систем.

10. Динамические системы и новые нейропарадигмы

Одной из задач теории самоорганизации является объяснение механизма образования сложных пространственных структур. Особенностью синтеза таких структур, состоящих из заданных типов достаточно простых элементов (например, нейроноподобных объектов), является тот факт, что лишь малая доля возможных комбинаций составляющих образует устойчивые и (с той или иной точки зрения) приемлемые формы. Для объяснения этого явления пространственной сложной структуре поставим в соответствие динамическую систему, сформи-



рованную из “элементарных” подсистем. В качестве множества составляющих элементов можно выбрать одномерные отображения — динамические системы с дискретным временем на вещественной прямой. Подход заключается в том, чтобы объединять отображения одного и того же семейства в некоторые каскады и исследовать зависимость динамики полученной сложно организованной системы от состава и порядка ее комплектующих. Естественно, при этом может быть сформировано очень большое число каскадов, отличающихся последовательностью составляющих.

Эффект подавления хаоса и контролирования режима движения представляет здесь первостепенный интерес, так как является одним из главных механизмов, лежащих в основе образования каскадов отображений с регулярной динамикой. В данном контексте под категорию подавления хаоса попадают только те случаи возникновения устойчивых каскадов, когда все составляющие их подсистемы (отображения) являются хаотическими.

Основной смысл состоит в том, чтобы рассмотреть системы с контролируемым (посредством некоторого воздействия) поведением как композицию отображений. Эта композиция (каскад) может быть однородной, т.е. состоять из идентичных компонентов, или иметь определенные неоднородности. В последнем случае (который является наиболее интересным) в каскаде некоторые из отображений замещаются отображениями с другими свойствами. Тогда, в зависимости от вида неоднородностей, каскад будет проявлять тот или иной тип динамики.

При таком подходе нетрудно понять аналогию между каскадами отображений и первичной структурой биомолекул. Однако, строя эту аналогию, можно говорить лишь о попытке воспроизвести построение самой стабильной структуры, которая как раз и может быть описана в терминах последовательности элементов. В результате исследований подтверждаются соображения о том, что случайное выстраивание стабильной цепочки элементов есть крайне маловероятное событие. Лишь небольшая часть комбинаций базовых элементарных динамических систем обладает заданным типом поведения. Однако, если принять во внимание, что причиной формирования сложной системы является особенность проявлять предписанную (в данном случае регулярную) динамику, то число возможных комбинаций сокращается на порядки.

Справка об авторе:

Лоскутов Александр Юрьевич, д.ф.-м.н.(1997), профессор физического факультета Московского государственного университета им.М.В.Ломоносова,

Область научных интересов — хаотическая динамика, фрактальная геометрия, теория динамических систем. Опубликовал несколько монографий, учебник по синергетике и свыше 100 работ в научных журналах. Лауреат 1-й премии им. И.И. Шувалова по математической физике за 1998 год.

<http://chaos.phys.msu.ru/>

