БИОФИЗИКА, 2004, том 49, вып.1, с.98–106

БИОФИЗИКА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ (ДИСКУССИИ)

УДК 577.3

ОТ НЕРАВНОВЕСНОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ К НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКЕ

А.А. Бутылин, Е.С. Лобанова, Ф.И. Атауллаханов

Физический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, 119992, Москва, Воробьевы горы;

Гематологический научный центр РАМН, 125167, Москва, Ново-Зыковский проезд, 4а;

Институт теоретической и экспериментальной биофизики РАН, 142290, Пущино Московской области

Поступила в редакцию 11.06.03 г.

На примере системы с двумя и более стационарными состояниями обсуждаются различия между термодинамическим и кинетическим подходами. Показано, что описание поведения систем, имеющих более одного стационарного состояния, может быть достигнуто только в рамках кинетического подхода.

Ключевые слова: нелинейная динамика, самоорганизация, термодинимика неравновесных процессов.

Для многих из нас книга Льва Александровича Блюменфельда «Проблемы биологической физики» [1] была этапной и определила направление и подходы к изучению живого на многие годы. Немногим авторам в жизни удалось такое. Поэтому все книги Льва Александровича вызывали мощнейший интерес и активную дискуссию. Не явилась исключением и его последняя книга, гранки которой он подписал в последний день своей жизни [2]. В этой книге Лев Александрович Блюменфельд писал: «Физик, начинающий изучать живые объекты, испытывает, как правило, ощущение чуда. Упорядоченные в пространстве и времени, например, процессы митоза и мейоза настолько отличаются от процессов, наблюдаемых в обычных физических экспериментах, что неизбежно возникает вопрос: не нуждаемся ли мы в особой физике живой материи, законы которой отличаются от законов, преподаваемых в школах и университетах». Эта цитата пропитана неким пессимизмом. Лев Александрович всегда твердо стоял на тех позициях, что биологические процессы, наблюдаемые в природе, конечно же, имеют естественное объяснение в рамках обычных законов физики и не требуют привлечения каких-то специальных представлений. Мы видим, последнее движение мысли Льва Александровича немного подвергли этот постулат сомнениям и колебаниям. Хочется сразу сказать, что мы не разделяем его пессимизм и полагаем, что возможности физики для объяснения биологических явлений далеко не исчерпаны. Наши частые споры на эту тему и наши аргументы в этом споре, в основном, и легли в основу этой статьи.

А что вызывало, собственно, пессимизм Льва Александровича? Откуда эти колебания и сомнения? В той же книжке, прямо в следующем абзаце, он пишет: «В одной из моих книг, посвященных биофизическим проблемам [1], я написал: «Для полного описания и понимания строения и функционирования всех существующих биологических систем в принципе вполне достаточно известных нам основных законов физики». Сегодня я не вполне в этом уверен».

Нам кажется, что сомнения и колебания Льва Александровича были во многом связаны с безуспешными попытками применения термодинамики к решению биологических задач. Динамические аспекты функционирования биологических систем, их удаленность от состояний равновесия настолько важны, что как только мы перестаем с ними считаться, мы перестаем понимать, что творится в биологической системе. А термодинамика – наука статичная. Вот что пишет Лев Александрович по этому поводу: «Обсуждение интервалов времени в контексте термодинамики выглядит несколько необычно. В самом деле, термодинамика, как и равновесная статистическая механика, формально вообще не используют понятия времени».

Но термодинамические представления, на самом деле, настолько мощны и всеобъемлющи, что они, вообще говоря, определили целую эпоху во всех естественных науках, не только в физике. Основы термодинамики уже в современном виде были сформулированы больше века тому назад в работах Гиббса. И Лев Александрович – а он был блестящим специалистом в этой области – всю свою жизнь использовал аппарат термодинамики для того, чтобы работать в биологии, понимать механизмы работы биологических молекул, биологических процессов. И он видел лучше других, что не очень это успешно получается. А термодинамика – наука очень мощная, настолько мощная, что она смогла создать целый ряд иллюзий.

Например, мы все считаем, что если вещество предоставить самому себе, оно равномерно, изотропно повсюду распространится и заполнит все доступное пространство; считаем вопреки тому, что видим своими глазами: нигде никогда не видим ничего изотропного, а, тем не менее, все мы глубоко внутренне убеждены, что это – правильное утверждение. Аналогичные заблуждения, очень долго существовавшие по отношению к химическим реакциям, были ниспровергнуты работами, начавшимися с открытия Б.П. Белоусова.

Давно уже, наверное в 20-е годы минувшего века, стало ясно, что термодинамика в равновесном виде не очень справляется с описанием окружающего мира, и ее пытались улучшать. Онзагер сделал первый шаг – появилось понятие «неравновесная» термодинамика. Более 50 лет продолжалось развитие этого направления, в основе которого лежала попытка уточнить решение для нелинейной системы, используя разложение нелинейных функций в ряды. Но, тем не менее, все эти работы не позволили заменить аппарат классической термодинамики чем-то гораздо более эффективным. Все развитые подходы оказались слабыми и, по сути дела, сложилось впечатление, что от всех этих добавлений к классической термодинамике толку нет. Стало ясно, что нужно ограничить область применения термодинамики и за эти пределы не выходить. Но там, где она не работает, – а история с реакцией Белоусова, в этом смысле, оказалась наиболее показательной – мы вынуждены обратиться к таким теориям и описаниям, в которых время присутствует в явном виде, т.е. к истинной динамике.

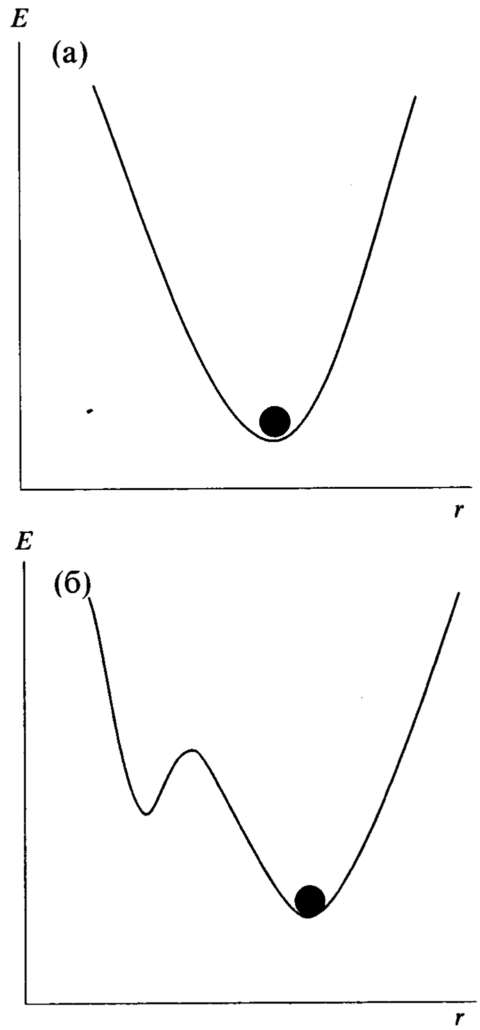

Рис. 1. Шарик в потенциальной яме.

Рассмотрим тривиальный пример: шарик в потенциальной яме (рис. 1а). Это может быть описание физического маятника, как пример того, что все очень хорошо понимают и представляют. Равновесная термодинамика говорит, где этот шарик будет лежать – на дне ямы. Равновесное поведение такого шарика или огромного количества таких шариков в соответствующих ямках прекрасно описывается термодинамикой.

Попробуем рассмотреть поведение этого шарика не в равновесии. При небольших отклонениях от равновесия нам в этом прекрасно помогут законы, описывающие динамическое поведение линейных систем. По сути, для разных разделов физики это разные законы, имеющие практически очень похожее математическое описание. Принято считать, что линейное приближение (и в том числе неравновесная тер-

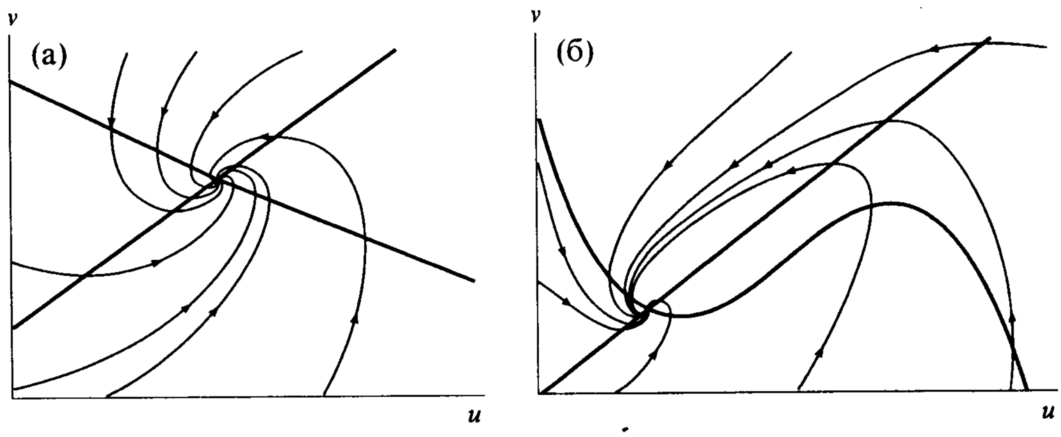

Рис. 2. Фазовый портрет с одним устойчивым состоянием системы: линейной (а) и нелинейной (б).

модинамика – это и есть линейное приближение к равновесию, линейные движения вокруг равновесия) прекрасно работает, пока отклонения невелики. На самом деле дело не в том, велики ли отклонения. И при больших отклонениях может оказаться, что это приближение прекрасно работает, а при малых – все может оказаться плохо. Все зависит от формы потенциальной ямы и от того, какую часть этой ямы система «использует» в процессе функционирования. Рассмотрим это подробнее на примере все того же шарика в потенциальной яме. Динамику такой системы описывают линейные уравнения примерно такого типа:

$$\begin{cases} \dfrac{du}{dt} = a_{11}(u-u^*) + a_{12}(v-v^*), \\ \dfrac{dv}{dt} = a_{21}(u-u^*) + a_{22}(v-v^*). \end{cases}$$

Динамическое поведение, описываемое системами обыкновенных дифференциальных уравнений, на качественном уровне удобно рассматривать в фазовом пространстве. Это другой математический язык – другой способ описания динамических систем. Очень интересно, что этот язык формировался в классической механике и статистической физике тоже в конце XIX – в начале XX вв., когда формировалась и складывалась классическая термодинамика, формировался как абсолютно независимый и мощный пласт науки, но, казалось бы, применимый совсем к другим вещам. В фазовом пространстве состояние системы представляется точкой, а реальное движение, изменение системы во времени, изображается движением точки вдоль линии, называемой фазовой траекторией.

Для примера рассмотрим фазовый портрет гармонического осциллятора (рис. 2а). Гармонический осциллятор, как известно, описывается двумя переменными: координатой и скоростью (импульсом). Будем считать, что изображенные на рисунке переменные – это и есть безразмерные координата и скорость гармонического осциллятора в некоторой системе координат. В этом случае фазовое пространство – это плоскость, которую часто называют фазовым портретом. Фазовый портрет этой системы выглядит так. У системы есть одна особая (неподвижная) точка, что соответствует шарику в наинизшем положении в потенциальной яме. Любые отклонения от этого нижнего положения описываются возникновением линейных сил, которые возвращают шарик назад в эту лунку. И в механике, и во многих других науках прекрасно показано, что если силы, возникающие в таком потенциальном поле, пропорциональны отклонениям, т.е. линейны, то энергия квадратична и будет иметь вид потенциальной функции, изображенной на рис. 1а.

Простая связь между видом потенциальной функции и реальной динамикой системы является огромным достоинством этого подхода, созданного в основном трудами Пуанкаре уже больше 100 лет тому назад. Главное достоинство состоит в том, что этот подход позволяет анализировать динамику любых систем: линейных, сколь угодно нелинейных – любых. Анализировать качественно, не заботясь о том, что подавляющее большинство уравнений, которые мы можем написать в любой науке, и в первую очередь в биологии, окажутся сильно нелинейными.

Таким образом, если посмотреть на поведение шарика в потенциальной яме качественно, можно подумать, что нет никакой особой разницы между линейными и нелинейными системами. Ведь если не нравится линейное приближение, любую функцию можно приблизить рядом Тейлора и взять следующее приближение, сделать следующий шажок и т. д.

Что это означает на языке Пуанкаре? Хорошо известно, если система линейная, то потенциальная яма описывается параболой – это квадратичная функция. Т.е. квадратичность потенциала означает строгую линейность. Если же система нелинейная, казалось бы, ее можно описать так: квадратичная функция плюс члены более высоких порядков. Добавление членов более высоких порядков на самом деле не затрудняет решения задачи, если они малы. Просто для каждого следующего приближения надо решать, по сути, тоже линейную задачу. И решение задачи, в которой есть потенциал типа того, что показан на рис. 1а, но сильно нелинейный, принципиально не меняется. С точки зрения качественной теории это все похожие решения. Теория говорит очевидную истину – чем ближе мы к этой точке, тем точнее все будет описываться линейными законами. Таким образом, нет оснований считать, что есть какие-то существенные отличия для нелинейных систем, описываемых потенциалами, типа показанных на рис. 1а.

Ситуация сильно меняется и становится по-настоящему нелинейной, когда потенциальная яма имеет не один минимум (рис. 1б). Тогда уже разлагать в ряд непонятно как, потому что мы разлагали в ряд в окрестности положения равновесия, т.е. в окрестности дна ямки, а теперь есть еще одно положение равновесия, и система может переходить из одного в другое. Термодинамика не может рассмотреть эти переходы. Она постулирует, что ямки будут заполняться в соответствии со своей глубиной: чем глубже ямка, тем больше объектов будет в ней находиться. Но это справедливо только в случае, если динамика процесса такова, что часть объектов непременно стремится к одному из положений равновесия. Это справедливо вблизи от положения термодинамического равновесия. Но там, как правило, есть только одна ямка. Однако большинство систем, с которыми реально приходится иметь дело, устроены иначе. Они много энергии тратят и много энергии откуда-то получают. И находятся вдали от термодинамического равновесия. Это не значит, что у них нет других потенциальных ям, т.е. других, локальных минимумов. И этих минимумов может быть несколько. Это абсолютно точно относится к биологическим системам. Они существуют на мощнейшем протоке энергии. В этом случае картина меняется значительным образом. Как показывает анализ динамики систем, имеющих два и более локальных минимума, т.е. стационарных состояния, система часто не хочет оставаться только в одном из них.

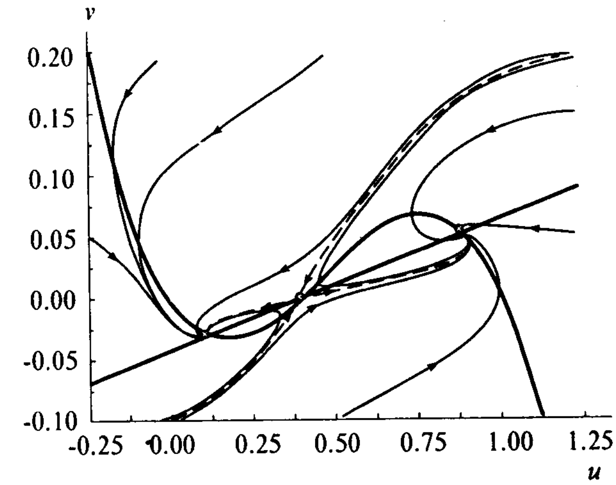

Рис. 3. Фазовый портрет системы (1) с двумя устойчивыми состояниями (ε = 0,02; a = 9,3995; b = –0,405; n = 0,4); здесь изображены изоклины первого и второго уравнений и фазовые траектории. Штриховыми линиями показаны сепаратриссы седла. Координаты особых точек: верхней точки (0,88; 0,051), нижней точки (0,12; –0,0299), промежуточной точки (0,395; –0,001).

Возьмем хорошо известную систему нелинейных уравнений, где появляется кубическая нелинейность:

$$\begin{cases} \dfrac{du}{dt} = -u(u-1)(u-n) - v, \\ \dfrac{dv}{dt} = \varepsilon[u - av + b]. \end{cases} \tag{1}$$

В этой системе может быть одно стационарное состояние (рис. 2б). Тогда фазовый портрет этой системы будет похож на фазовый портрет гармонического осциллятора. Особенно велико сходство вблизи стационарного состояния. Но если немного изменить параметры системы [3], то фазовый портрет вроде не сильно и изменится, но в нем появится еще одно стационарное состояние (рис. 3). Появление нового стационарного состояния, равноправного с первым, когда нельзя сказать, какому из этих состояний отдать предпочтение, – а так бывает, когда поток энергии велик, – приводит к качественно новым вещам, которые не описываются никакими приближениями. В этой системе появилась бистабильность. Все пространство начальных условий для переменных разделилось на две части пунктирной линией. Если

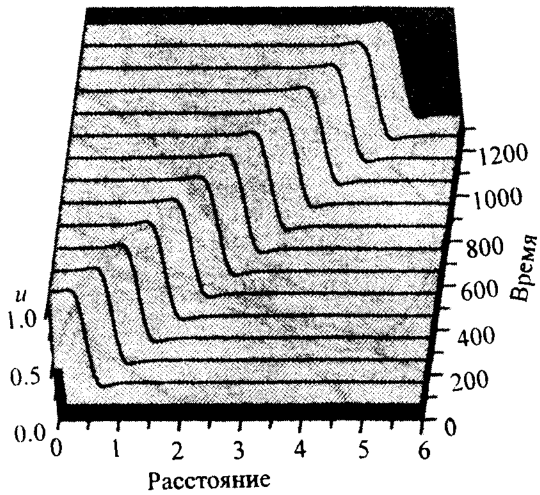

Рис. 4. Случай бистабильности: волна переключения. Показано, что при добавлении диффузии можно получить волну переключения нижнего устойчивого состояния в верхнее (D_u = 0,001; D_v = 0,005), остальные параметры, как на рис. 3.

мы стартуем с начальных условий, которые относятся к одной половинке плоскости, то мы окажемся в одной яме, а если к другой, то – вот в другой. Высота барьера между ямками в принципе определяет возможность перескока из одной ямки в другую и т.д. Эти перескоки не запрещены, но они становятся пороговыми. Система принципиально распалась на две области притяжения. Такую ситуацию методом последовательных приближений получить нельзя – там всегда будет только одно стационарное состояние. Существование множества областей притяжения – пусть даже таких простых, как эти два (рис. 3) – это уже нечто качественно новое. Такое фазовое пространство приводит к сложному поведению системы даже тогда, когда одно из этих состояний перестает существовать. В системе может возникнуть предельный цикл, т.е. незатухающие колебания, что никак не совмещается с термодинамическим подходом. Это было основной причиной того, что колебательные химические реакции, реакция Белоусова-Жаботинского например, имели такую драматическую историю и долго считались артефактами.

При исследовании систем, которые имеют сложное фазовое пространство, имеют множество стационарных состояний, или даже не истинных состояний и областей притяжения – аттракторов, оказывается, что наша физическая интуиция, воспитанная на классической термодинамике, нам изменяет. И мы не можем предугадать, как поведет себя система в том или ином случае.

То, что говорилось выше, касалось рассмотрения динамики систем только с одной независимой переменной – временем. На самом деле очень часто – и для нелинейной динамики это оказалось исключительно важным – присутствуют еще и другие переменные. Это – пространственные переменные. Принципиально новое поведение системы, сильно расходящееся с традиционными термодинамическими представлениями, особенно ярко проявляется в ситуациях, когда мы имеем дело с пространственными явлениями. Приведем несколько примеров. Первые теоретические представления, восходящие к той же реакции Белоусова и нескольким примерам, близким к ней, начинались с очень простых моделей, в которых было открыто несколько принципиально новых явлений.

Одно из этих явлений, обнаруженное в первых простых моделях, это волна переключения, когда система, будучи возмущенной в какой-то одной точке, переходит из одного состояния в другое. Рассмотрим однородную среду, в которой могут протекать некие реакции, допустим химические, а отдельные точки этой среды могут обмениваться веществом друг с другом. Возьмем систему уравнений (1), которые допускают два устойчивых состояния для системы. Если эти уравнения дополнить диффузией, то в среде, описываемой такими диффузионными уравнениями, можно наблюдать волны:

$$\begin{cases} \dfrac{du}{dt} = -u(u-1)(u-n) - v + D_u\Delta u, \\ \dfrac{dv}{dt} = \varepsilon[u - av + b] + D_v\Delta v. \end{cases} \tag{2}$$

На рис. 4 показана такая волна переключения. Это простейшая из волн, когда вся среда, находясь в одном изотропном состоянии, в результате такого волнового процесса перебрасывается в другое состояние: была в нижнем состоянии – становится средой в верхнем состоянии.

Кроме волн переключения, в таких системах были обнаружены «автоволны» (рис. 5). В этом случае, в ответ на возмущение формируется волна, которая бежит по пространству до бесконечности, не затухая, не останавливаясь, с постоянной амплитудой и скоростью. Важная особенность таких волн: эти волны при столкновении не интерферируют, а аннигилируют, т.е. эти волны просто гибнут (рис. 6).

Еще один довольно простой пример, давно известный – диссипативные структуры или структуры Тьюринга. В этом случае изотропное

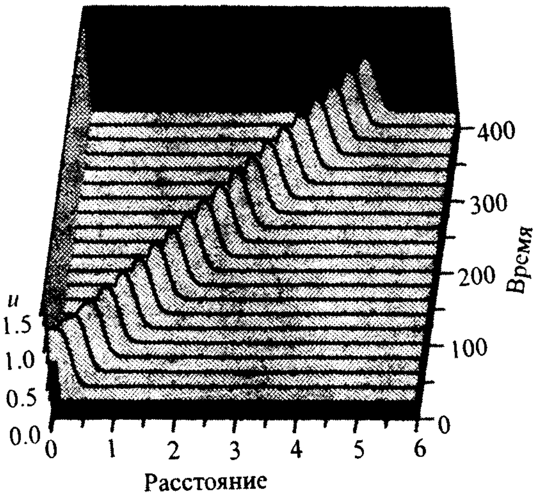

Рис. 5. Автоволна (ε = 0,008; a = 5,18; b = –0,275; n = 0,4; D_u = 0,001; D_v = 0).

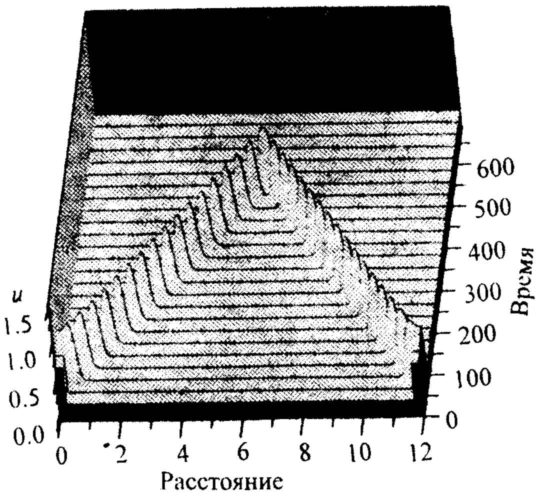

Рис. 6. Взаимодействие двух автоволн. Значения параметров, как на рис. 5.

распределение вещества в пространстве оказывается неустойчивым. И в результате переходного процесса все пространство оказывается заполненным чередующимися областями с высокими и низкими концентрациями веществ (рис. 7).

Все эти необычные волны и структуры плохо согласуются с традиционным поведением диффузионных сред, подчиняющемся традиционной термодинамике. В диффузионной среде волны должны были бы затухать, а конечное состояние среды должно было бы быть изотропным. С начала 60-х годов и до середины 90-х XX века казалось, что только вот эти несколько необычных примеров и встречаются в сильно неравновесных системах. Казалось, что все подчиняется термодинамике, и есть маленькая область, в которой существуют эти отклонения: диссипативные структуры, автоволны. Но в последнее десятилетие незаметно, исподволь, происходит настоящая революция в этой области. Помимо описанных явлений в разных задачах стали обнаруживаться все новые и новые типы поведения.

Обнаружились совсем странные вещи. Когда в модели Тьюринга мы видим все пространство, заполненное как бы стоячими волнами, еще как-то можно себе представить, каким образом диффузия сочетается с активным производством вещества и возникает неравномерное распределение вещества по пространству. Но вот другой пример неравномерного распределения вещества по пространству. Представьте себе банку, в которую налиты какие-то реактивы, все тщательно перемешано, вся среда изотропна, и в этой банке в каком-то месте сделали небольшое возмущение. Через какое-то время, в ответ на это возмущение сформируется пик (рис. 8). Концентрация вещества в этом месте будет очень высокой, в других же местах она будет практически нулевой. Это неоднородное распределение вещества по пространству будет таким оставаться в течение сколь угодно длительного времени. Это уж совсем прямо приходит в противоречие с тем, что мы интуитивно привыкли думать про растворы. Когда в сосуде находятся какие-то вещества, даже если эти вещества реагируют друг с другом, мы привыкли думать, что все-таки там все будет более или менее равномерно распределено. А, оказывается, вовсе даже и нет – все выглядит так, как будто все вещество собралось в одном месте. Это все равно, что стул подпрыгнет сам по себе. Такого сорта одиночные образования могут находиться на одном месте, а могут и путешествовать по всему пространству. Один из первых таких путешествующих пиков был обнаружен А.Н. Заикиным. Он был в числе этих тихих людей, которые, не шумя, не устраивая сенсаций, изучали эту область и обнаружили в ней множество совершенно необычных объектов.

В последние годы появился ряд новых, более сложных моделей, которые привели к появлению ряда новых динамических объектов. В нашей работе [4] была описана модель свертывания крови:

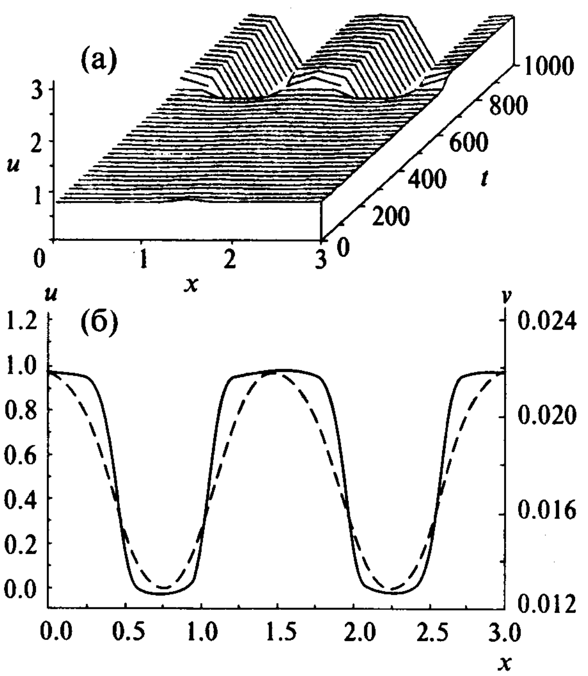

Рис. 7. Диссипативные структуры (система (2)); (а) – процесс образования тьюринговской структуры по первой переменной системы; (б) – установившиеся к $t = 1000$ пространственно-неоднородные распределения концентраций обеих переменных для системы (2) (сплошная линия – активатор u; пунктир – ингибитор v). Используемые значения параметров для системы (2): $\varepsilon = 0{,}01$; $a = 4$; $b = -0{,}48$; $n = 0{,}4$; $D_u = 0{,}001$; $D_v = 0{,}07$. Задача рассматривалась на отрезке $L = 3$. Начальные условия были заданы небольшим локальным возмущением в центре отрезка по первой переменной. Все остальные точки пространства находились в стационарном состоянии, соответствующем особой точке системы: $u = 0{,}742$; $v = 0{,}065$.

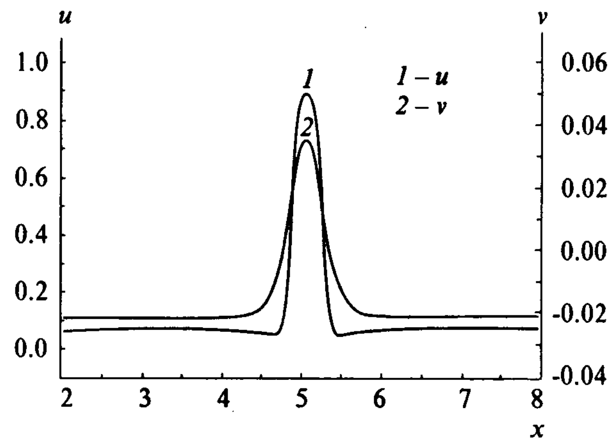

Рис. 8. Профиль установившегося стационарного пика. Параметры: $\varepsilon = 0{,}02$; $a = 9{,}3995$; $b = -0{,}2637$; $n = 0{,}4$; $D_u = 0{,}001$; $D_v = 0{,}005$. От длины отрезка не зависит.

$$
\begin{cases}
\dfrac{\partial u_1}{\partial t} = D\dfrac{\partial^2 u_1}{\partial x^2} + K_1 u_1 u_2 (1 - u_1)\dfrac{(1 + K_2 u_1)}{(1 + K_3 u_3)} - u_1, \\
\dfrac{\partial u_2}{\partial t} = D\dfrac{\partial^2 u_2}{\partial x^2} + u_1 - K_4 u_2, \\
\dfrac{\partial u_3}{\partial t} = D\dfrac{\partial^2 u_3}{\partial x^2} + K_5 u_1^2 - K_6 u_3.
\end{cases}
\tag{3}
$$

В этой модели наблюдается большое разнообразие, целый «зоопарк» новых объектов. Вот некоторые из них. Пик, возникший из исходно изотропной среды (рис. 9). Но при этом пик не только нарушает изотропность пространства, он еще и нестационарен: амплитуда пика все время меняется. Следующий пример – нечто похожее на автоволну (рис. 10). Этот объект движется в пространстве с постоянной скоростью и амплитудой в среднем. Но при этом амплитуда этого движущегося возмущения все время колеблется. Строго говоря, это уже не автоволна.

Рассмотрим более сложные объекты в этой модели. Такие волны могут не только двигаться, не только колебаться, не только жить уединенно, находясь в неподвижном состоянии или колеблясь, но они еще могут делиться, образуя множество себе подобных, заполняя иногда все пространство какой-то активностью (рис. 11). Они могут распространяться таким образом: совсем ничего нет, потом идет одна вспышка, куда-то движется, делится и генерирует новые вспышки. Но даже там, где она

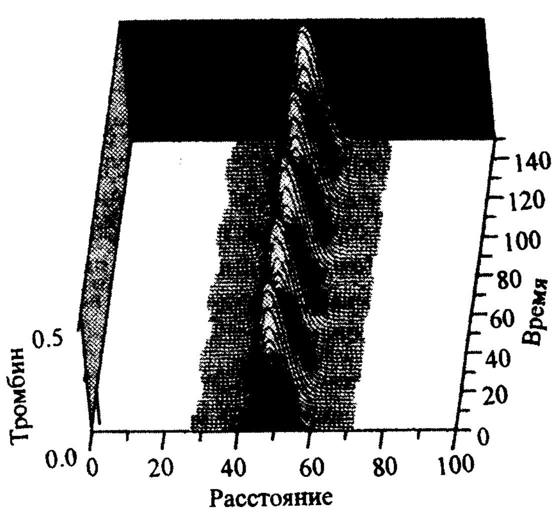

Рис. 9. Пространственно локализованная осциллирующая структура (пик) в модели (3). $D = 1$; $K_1 = 6{,}85$; $K_2 = 6{,}2$; $K_3 = 2{,}36$; $K_4 = 0{,}1$; $K_5 = 14{,}0$; $K_6 = 0{,}0725$.

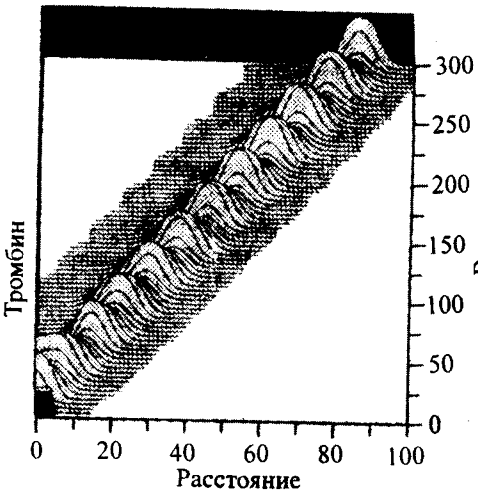

Рис. 10. Распространение волны тромбина с переменной амплитудой. K_2 = 4; K_6=0,0715. Другие константы, как на рис. 9.

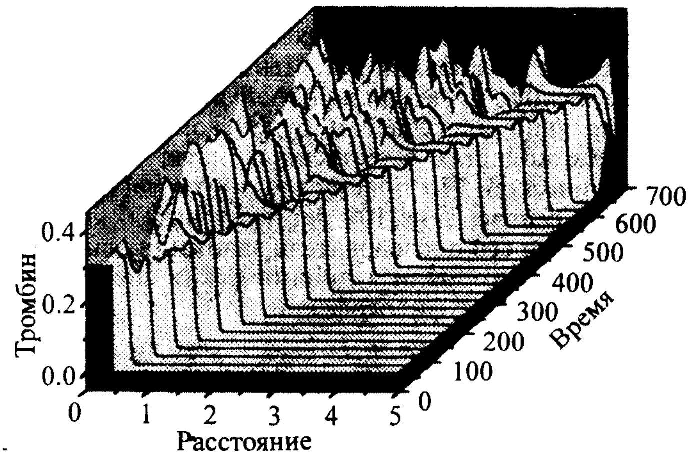

Рис. 11. Хаотическая активность среды после прохождения волны тромбина. $D = 2{,}6\cdot10^{-4}$; K_1 = 6,85; K_2 = 4,0; K_3 = 2,36; K_4 = 0,087; K_5 = 17,0; K_6 = 0,09.

давно прошла, продолжает оставаться какая-то активность: вся среда превратилась, на первый взгляд, в совершенно хаотически флуктуирующее пространство.

В этих моделях обнаружились гибриды неподвижных структур и автоволн. Например, неподвижный пик образуется не в том месте, где было возмущение, а на каком-то расстоянии (рис. 12). Сначала возникает нечто, очень похожее на автоволну. Эта волна некоторое время движется, отходит на какое-то заданное параметрами системы расстояние и там останавливается, превращаясь в неподвижный пик. Таким способом можно генерировать барьеры и границы дистанционно, в отдаленных от источника сигнала местах.

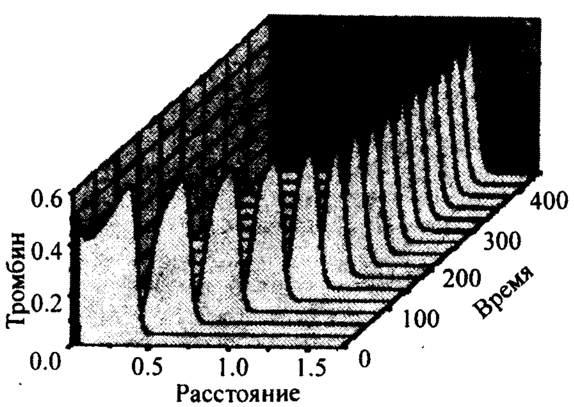

Рис. 12. Остановка распространяющейся волны тромбина на некотором расстоянии от места стимуляции и образование неподвижной неоднородной структуры. K_2 = 11; K_6 = 0,066. Другие константы, как на рис. 11.

Приведенные примеры сложных динамических объектов не исчерпывают всего разнообразия. Длительное время мы знали только автоволны и структуры Тьюринга, в последнее время число этих разнообразных объектов начинает быстро нарастать. Видимо, был преодолен некоторый психологический барьер. Оказалось, что даже в тех моделях, в которых раньше находили только автоволны, теперь обнаруживаются и более сложные режимы. Кроме того, исследования и моделирование конкретных систем, большей частью биологических, приводят к все новым уравнениям, иногда тоже довольно простым, которые приводят к новым явлениям, к новым режимам. По мере увеличения разнообразия динамических режимов возникает новый мир – мир нелинейных динамических объектов. Эти нелинейные динамические объекты оказываются настолько разнообразными, настолько непредсказуемыми, что наша классическая термодинамическая интуиция полностью пасует. Если при классическом подходе было легко предсказать, что нас ждет в данном эксперименте, исходя из здравого физического смысла, то оказалось, что классический физический смысл может нас очень сильно подвести, когда мы имеем дело с новыми динамическими системами. Приходится вырабатывать новый здравый смысл и тоже физический, но только для систем, далеких от термодинамического равновесия и принципиально нелинейных.

Нам кажется, что пессимизм Льва Александровича определялся переходным характером последних нескольких лет. Лев Александрович, к сожалению, не дожил до новой эпохи, которая сейчас явно наступает и будет доминировать во всех областях естественных наук, – эпохи динамической. Но почему эта эпоха наступает именно сейчас, а не 100 лет тому назад, когда Пуанкаре и его последователи заложили основы качественного анализа динамических систем, – это уже вопрос философский.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Блюменфельд Л.А.* Решаемые и нерешаемые проблемы биологической физики. М., 2002.
2. *Блюменфельд Л.А.* // Проблемы биологической физики. М.: Наука, 1974. С. 9.
3. *Атауллаханов Ф.И., Зарницина В.И., Кондратович А.Ю., Лобанова Е.С., Сарбаш В.И.* // Успехи физ. наук. 2002. Т. 172(6). С. 671–690.
4. *Zarnitsina V.I., Ataullakhanov F.I., Lobanov A.I., Morozova O.L.* // Chaos. 2001. V. 11(1). P. 57–70.

From Nonequilibrium Thermodynamics to Nonlinear Dynamics

A.A. Butylin, E.S. Lobanova, and F.I. Ataullakhanov

Physical Department, Lomonosov Moscow State University, Vorob'evy Gory, Moscow, 119992 Russia

Hematological Research Center, Russian Academy of Medical Sciences, Novo-Zykovskii proezd 4a, Moscow, 125167 Russia

Institute of Theoretical and Experimental Biophysics, Russian Academy of Sciences, Pushchino, Moscow Region, 142290 Russia

Differences between the thermodynamic and kinetic approaches were discussed by using a system with two or more different steady states as an example. It was shown that the behavior of such systems can be described adequately by the kinetic approach only.

Key words: nonlinear dynamics, self-organization, far-from-equilibrium thermodynamics