



САМООРГАНИЗАЦИЯ И ОБРАЗОВАНИЕ СТРУКТУР

А.Е. Храмов

Статья представляет собой текст лекции, прочитанной для школьников старших классов на школе-конференции «Нелинейные дни в Саратове для молодых – 2011». В лекции дается краткое популярное введение для школьников в физику открытых систем, обсуждаются основные идеи и результаты теории самоорганизации открытых систем, а также приводятся примеры процессов самоорганизации в системах различной природы: физических, химических, биологических.

Ключевые слова: Самоорганизация, образование структур, физика открытых систем.

В данной лекции мы поговорим с вами о таком новом междисциплинарном направлении в современной нелинейной физике, как самоорганизация открытых систем [1–5]. В настоящее время усилия большого числа исследователей в самых различных областях естествознания направлены на изучение феноменов самоорганизации, которые позволяют объяснить самые различные явления, наблюдающиеся в окружающем нас мире. О чем же будет данная лекция? Если не останавливаться на частностях, то в нашей лекции мы обсудим три основных вопроса:

- самоорганизация (возникновение структур или паттернов, рост «упорядоченности», эволюция) в открытых неравновесных системах,
- физика нелинейных открытых систем,
- самоорганизация и образование структур, методы изучения этих явлений в биологических и социальных системах.

Однако прежде чем переходить непосредственно к анализу феноменов самоорганизации давайте остановимся на вопросе: а что же изучает физика открытых систем? Для теории самоорганизации и физики открытых систем наиболее интересны и важны сложные макроскопические системы, содержащие упорядоченные структуры, в которых порядок рождается из хаоса. Таких систем много, и они разнообразны. Среди наиболее активно исследуемых:

- конвективные и гидродинамические ячейки,
- вихри в атмосфере и океане,
- оптические квантовые генераторы (лазеры),
- химические реакции с временной и пространственной периодичностью,
- живые организмы и экосистемы,
- социальные системы.

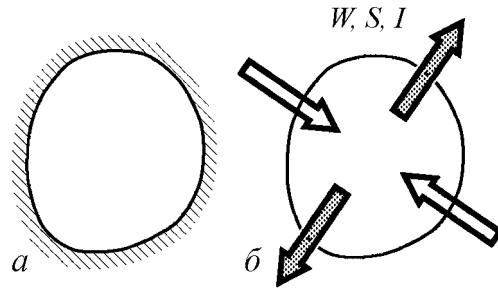


Рис. 1. Различия между «закрытыми» (а) и «открытыми» (б) системами: последние обмениваются с окружающей средой энергией W , энтропией S , переносимыми средой и/или излучением, и информацией I

Все имеющиеся экспериментальные данные и результаты наблюдений показывают, что для существования в системе упорядоченных структур (исключая равновесные структуры типа кристалла) система должна быть открытой, то есть должна обмениваться с окружающей средой энергией W и энтропией S , переносимыми средой и/или излучением, и, что не менее важно, информацией¹ I .

Классическими примерами самоорганизации, которые можно найти практически в любом учебнике по теории са-

моорганизации и физике открытых систем, являются так называемые «ячейки Бенара», «рябь Фарадея», реакция Белоусова–Жаботинского и возникновение генерации в оптическом квантовом генераторе. Рассмотрим некоторые из них более подробно.

Ячейки Бенара – это обычно шестигранные призматические ячейки, возникающие в подогреваемом снизу слое жидкости. Если слой некоторой достаточно вязкой жидкости снизу сильно нагреть, то между нижней и верхней границами жидкости возникает разность, или, как говорят физики, градиент температур (рис. 2, а). При малых градиентах температуры жидкость остается в покое, а тепло будет передаваться за счет теплопроводности. При превышении разности температур некоторого критического значения в жидкости начнется конвекция. Режим неподвижной теплопроводящей жидкости становится неустойчивым, и на смену ему приходит новый устойчивый режим, который теперь становится намного сложнее, с точки зрения динамики системы, – жидкость разбивается на множество конвективных ячеек, которые (если нет внешних возмущений) принимают форму правильных шестиугольников (рис. 2, б). В центре каждой ячейки жидкость движется вверх, а на краях – вниз (рис. 2, в). Важно то, что размер и форма ячеек не зависят от формы и размера сосудов, если он достаточно большой, ячейки искажаются только на границах кюветы.

Рябь Фарадея – характерные структуры, формируемые капиллярными волнами, возбуждаемыми на поверхности жидкости в кювете, совершающей вертикальные колебания с определенной частотой и амплитудой (что соответствует изменениям с определенной частотой параметра системы – ускорения свободного падения g). Схема установки для наблюдения ряби Фарадея показана на рис. 3, а. Впервые наблюдал данное явление гениальный экспериментатор Майкл Фарадей в середине XIX века, и его эксперименты являются одними из первых по наблюдению самоорганизации в динамических системах. Действительно, как писал Фарадей в 1831 году: «Если поместить ртуть на вибрирующую оловянную тарелку, то получается очень красивая картина в отраженных солнечных лучах» (цитируется по [7]). Фарадей проводил эти эксперименты с различными жидкостями (водой, чернилами, молоком, яичным

¹Понятия «энтропия» и «информация» в естественных науках тесно связаны между собой. Энтропия характеризует меру беспорядка системы, состоящей из многих элементов. В частности, применительно к статистической физике энтропия – мера вероятности осуществления какого-либо макроскопического состояния; в теории информации – мера неопределенности какого-либо опыта (испытания), который может иметь разные исходы. Последнее показывает, что энтропия, фактически, характеризует количество информации. В действительности, определение информации Шеннона в информатике совпадает со статистическим определением энтропии, данным Больцманом.

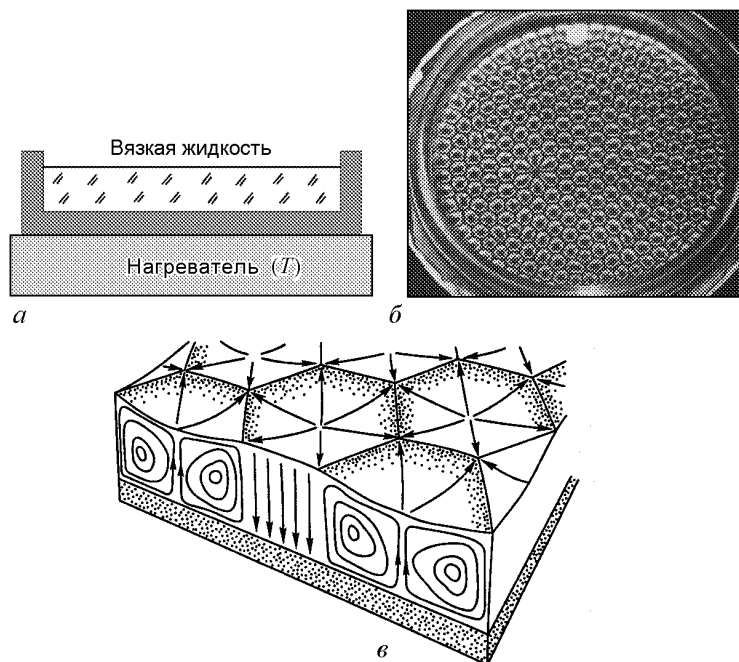


Рис. 2. Иллюстрация к описанию ячеек Бенара: *a* – схема, поясняющая экспериментальную установку, для наблюдения ячеек Бенара – температура нагревателя T является здесь основным управляющим параметром; *б* – фотография сформированных ячеек Бенара в силиконовом масле в кювете, подогреваемой снизу (фотография взята из альбома [6]); *в* – линии тока жидкости в режиме бенаровской конвекции

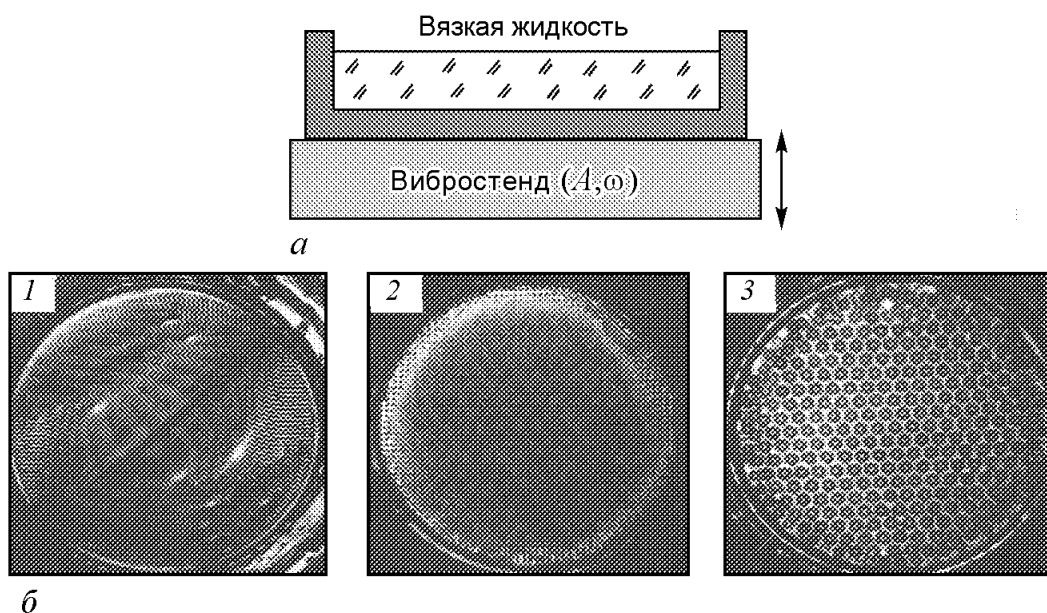


Рис. 3. Иллюстрация к описанию параметрически возбуждаемых капиллярных волн на поверхности жидкости – рябь Фарадея: *a* – схема, поясняющая экспериментальную установку, частота ω и амплитуда A вибрации являются основными управляющими параметрами, от которых зависит форма ячеек; *б* – примеры ячеек Фарадея, образующихся на поверхности жидкости при различных частотах и амплитудах внешнего воздействия: 1 – длинные валики, 2 – квадратная решетка, 3 – шестиугольные («сотовые») структуры (из работы [8])

белком). В своих экспериментах он использовал кюветы различной формы (круглой, квадратной, прямоугольной) и выяснил, что практически всегда рябь образует квадратную решетку, которая слегка деформируется у границы кюветы. Фарадей исследовал и процесс возникновения структуры. Он показал, что пространственная структура капиллярной ряби не зависит ни от граничных и начальных условий, ни от сорта жидкости. Как видно из рис. 3, б, в зависимости от управляющих параметров системы (амплитуды и частоты внешнего воздействия, свойств жидкости) на поверхности жидкости могут образовываться как регулярные структуры квадратной формы, так и беспорядочно меняющиеся во времени и пространстве волны

Реакция Белоусова–Жаботинского – колебательная химическая реакция в гомогенном растворе, открытая в 1950 году Б.П. Белоусовым и позднее подробно исследованная А.М. Жаботинским. При реакции Белоусова–Жаботинского раствор регулярно меняет свою окраску от бесцветной к желтой и далее снова к бесцветной и т.д. Период колебаний в зависимости от температуры и концентрации реагируемых веществ находится в пределах 10–100 с, что делает ее удобной для наблюдения. Следует отметить, что реакция Белоусова–Жаботинского, с точки зрения теории колебаний, в отличие от вышерассмотренных примеров, является автоколебательным

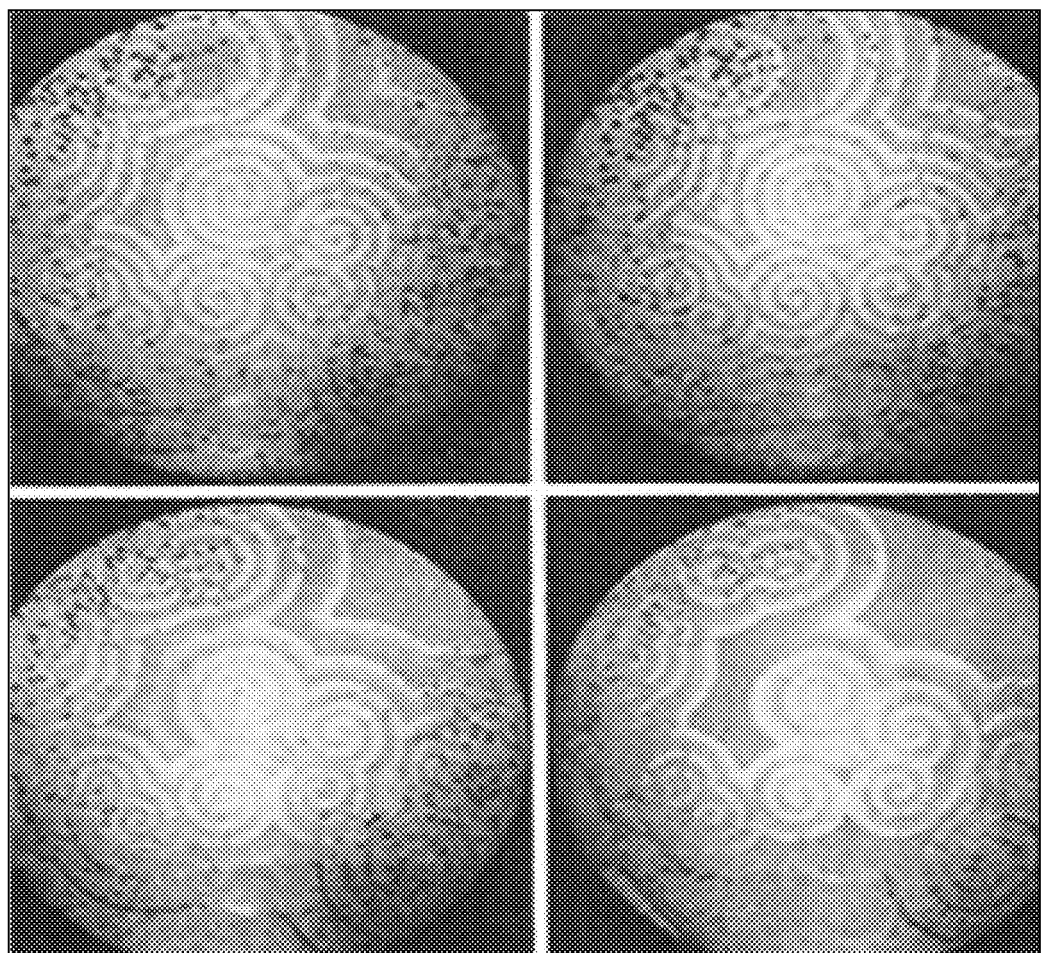


Рис. 4. Некоторые конфигурации, возникающие при реакции Белоусова–Жаботинского в тонком слое в чашке Петри

процессом. Открытие Белоусова ждала непростая судьба: химики и биохимики вначале дружно отвергли возможность такой реакции и только позже данное открытие было признано и стало активно исследоваться, а сама реакция стала одной из эталонных моделей временной диссипативной структуры в физике открытых систем и теории самоорганизации. Когда реакция протекает в тонком неперемешиваемом слое, например в чашке Петри, можно наблюдать различные типы волновой активности, в частности, спиральные волны (рис. 4), то есть в этом случае можно говорить о пространственно-временной диссипативной структуре.

Что объединяет между собой все рассмотренные выше системы? Все они были макроскопическими открытыми системами, состоящими из большого числа элементарных объектов (атомов и молекул), которые можно принять за элементы структуры. Именно такие системы являются основными объектами, которые изучает теория самоорганизации. Элементы структур могут быть как микроскопическими (атомы и молекулы в физических и химических системах), так и малыми, оставаясь все же макроскопическими (макромолекулы в полимерах, клетки в биологических структурах, отдельные особи в биологических популяциях). Также они могут быть и не малыми телами, например, «элементарные» объекты в социологии – человек или даже отдельная группа людей («малая» группа). Благодаря сложности макроскопических открытых систем, в них возможно образование различного рода диссипативных структур (или «паттернов»²), и диссипация здесь играет конструктивную роль. Это кажется, на первый взгляд, удивительным, так как понятие диссипации ассоциируется с затуханием различного рода движений, с рассеянием энергии, с потерей информации. Тем не менее, диссипация необходима для формирования паттернов в открытых системах!

Чтобы подчеркнуть это обстоятельство, Илья Романович Пригожин ввел термин «диссипативные структуры», который объединяет все виды паттернов: временные (автоколебания в генераторе и реакции Белоусова–Жаботинского), пространственные (ячейки Бенара на поверхности жидкости), пространственно-временные структуры (автоволны на поверхности жидкости, паттерны в электронных потоках и т.д.).

Илья Романович Пригожин (1917–2003) – бельгийский физик и химик, лауреат Нобелевской премии по химии за работы по неравновесной термодинамике, диссипативным структурам и сложным системам. Основная масса его работ посвящена неравновесной термодинамике и статистической механике необратимых процессов.

Илья Пригожин родился 25 января 1917 года в Москве. В 1921 году семья эмигрировала из России в Западную Европу. В 1942 году Илья Пригожин окончил университет Брюсселя (Universite Libre de Bruxelles).



²Термин «паттерн» происходит от английского *pattern* – структура и является синонимом русского термина «структура».

С 1961 по 1966 год Пригожин сотрудничал с институтом Ферми в Чикаго. В 1967 году в городе Остин (штат Техас) Пригожин основал Центр по изучению сложных квантовых систем (Center for Complex Quantum Systems). Одновременно, в 1967 году Пригожин возвращается в Бельгию, где он становится директором Центра статистической механики и термодинамики (Center for Statistical Mechanics and Thermodynamics).

Сложность открытых систем предоставляет широкие возможности для существования в них коллективных явлений. Подчеркивая определяющую роль кооперации при образовании диссипативных структур, Герман Хакен ввел понятие «синергетика», который означает *коллективное действие* [9].

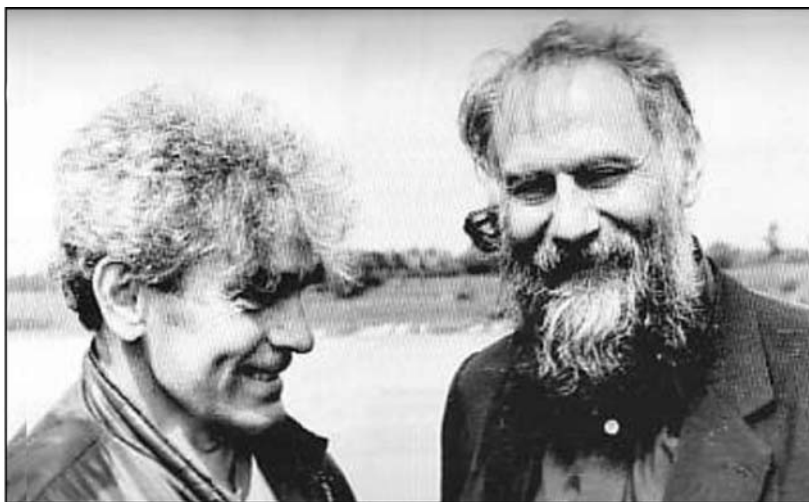
По Юрию Львовичу Климонтовичу: «Синергетика – не самостоятельная научная дисциплина, а *новое междисциплинарное научное направление*, цель синергетики – выявление общих идей, методов и общих закономерностей в самых различных областях естествознания, а также социологии и даже лингвистики; более того, в рамках синергетики происходит кооперирование различных специальных дисциплин» [10].

Хакен Герман (род. 12 июля 1927 г.) – немецкий физик-теоретик, основатель синергетики. Изучал физику и математику в университетах Галле (1946–1948) и Эрлангена (1948–1950), получив степени доктора философии и доктора естественных наук. С 1960 г. является профессором теоретической физики университета Штутгарта. До ноября 1997 г. был директором Института теоретической физики и синергетики университета Штутгарта. С декабря 1997 г. является почетным профессором и возглавляет Центр синергетики в этом институте, а также ведет исследования в Центре по изучению сложных систем в университете Флориды (Бока Рэтон, США).

Юрий Львович Климонтович (1924–2002) – крупнейший физик-теоретик в области статистической физики и кинетической теории плазмы. Родился 28 сентября 1924 г. в Москве, профессор Московского государственного университета.

Основные результаты исследований Ю.Л. Климонтовича в области физики открытых систем собраны в трехтомной монографии: Климонтович Ю.Л. Статистическая теория открытых систем. Т. 1. М.: Янус, 1995; Т. 2. М.: Янус, 1999; Т. 3. М.: Янус, 2001.

Итак, мы дали краткое введение в физику открытых систем. Очень важной сферой приложений усилий специалистов в физике открытых систем являются биология, экология, биофизика, где подходы и методы теории самоорганизации могут помочь в объяснении и понимании многих известных феноменов живой природы.



Ю.Л.Климонтович и Г.Хакен во время прогулки на пароходе. Конференция «Синергетика-83» в Пущино.

Давайте рассмотрим два примера образования структур в биологических популяциях, а именно:

- формирование плодового тела у миксамеб *Dictyostelium discoideum*,
- закладка основы термитника.

Пример 1. *Миксоформы* – это микроорганизмы, которые обнаруживают самую простую многоклеточность. Выделяют миксоформы как в царстве прокариот (миксобактерии), так и в царстве грибов (миксомицеты, слизевики, слизевые грибы и акразиевые). Принадлежа к разным царствам, миксоформы ведут себя очень сходно в том смысле, что индивиды часть жизни проводят как одноклеточные, а затем объединяются в колонию (образуют *паттерн*), на которой вырастают плодовые тела – яркие грибочки. Среди различных миксоформ наиболее изученными являются миксамебы *Dictyostelium discoideum*.

На рис. 5 показан жизненный цикл миксамеб, который состоит из следующих стадий: споры, автономные амёбы, колонии амёб, плодовое тело, цистофор. Питаются миксамебы только в амёбоидной стадии. В это время амёбы равномерно рассредоточены по субстрату. При истощении корма амёбы образуют колонию. Формирование плодового тела начинается следующим образом. Голодающие амёбы начинают продуцировать циклический аденозинмонофосфат (цАМФ).³ Другие

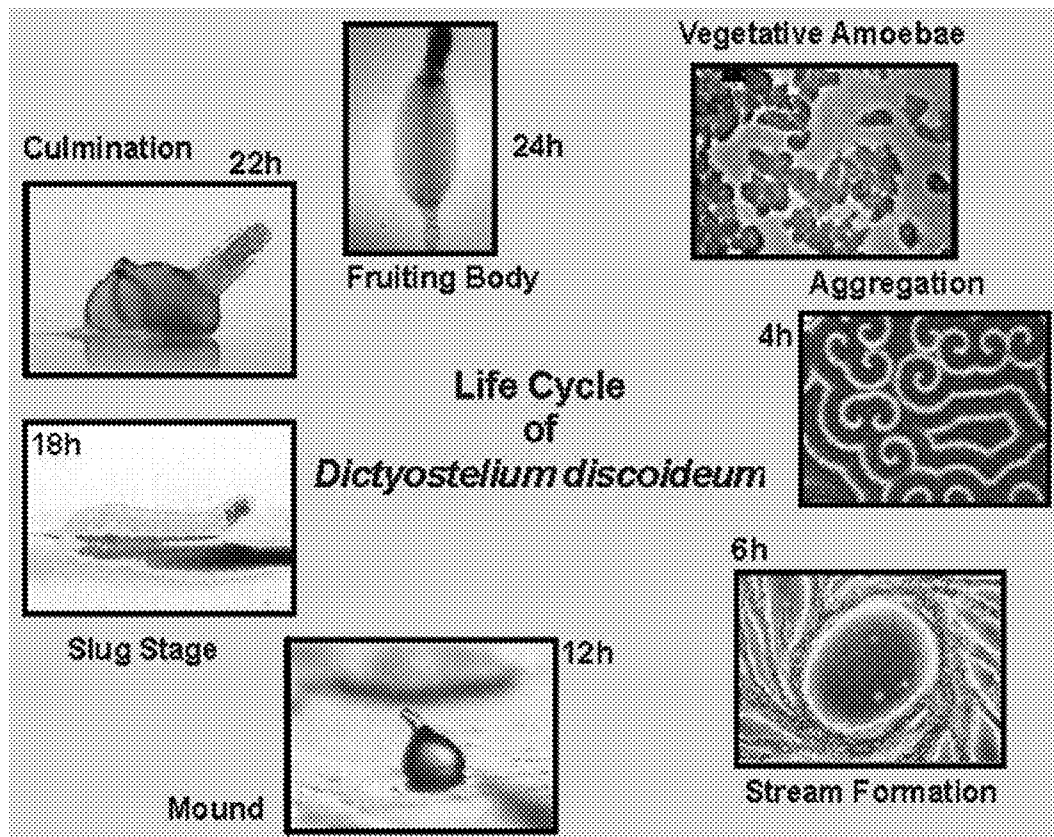


Рис. 5. Жизненный цикл и формирование плодового тела у миксамеб *Dictyostelium discoideum* (рисунок взят с [www-сайта: http://www.zi.biologie.unimuenchen.de/](http://www.zi.biologie.unimuenchen.de/))

³Циклический аденозинмонофосфат (циклический АМФ, цАМФ, сАМР) – производное нуклеотида аденозинтрифосфата, выполняющий в организме роль вторичного посредника, используемого для внутриклеточного распространения сигналов некоторых гормонов (например, адреналина), которые не могут проходить через клеточную мембрану

амебы, получившие сигнал в виде цАМФ, начинают: 1) перемещаться по градиенту ее концентрации, 2) продуцировать цАМФ, 3) продуцировать фосфодиэстеразу (разрушителя цАМФ). В результате случайных флуктуаций концентрации цАМФ возникают первичные сгущения амеб, одно из которых становится *центром* будущей колонии (центром формирующегося паттерна).

Каков механизм формирования паттерна – сгущения миксамеб? В его основе лежит механизм формирования *положительной обратной связи*⁴. Действительно, концентрация цАМФ пропорциональна размеру сгущения (колонии) амеб. Так как амебы движутся по градиенту концентрации цАМФ, одновременно продуцируя цАМФ, то перед нами система с положительной обратной связью: одно из сгущений, образовавшееся из первичной флуктуации концентрации цАМФ, разрастается и образует колония, на которой далее вырастает плодовое тело.

Результаты экспериментального исследования формирования плодового тела, проведенного в Мюнхенском зоологическом институте (Ludwig-Maximilians-Universität München), показывают, что на этапе формирования колонии из индивидуальных амеб в системе наблюдается возникновение спиральных волн (рис. 5). Это обусловлено взаимодействием цАМФ с фосфодиэстеразой, что приводит к незатухающим колебаниям концентраций реагентов вокруг точки неустойчивого равновесия. После того, как все амебы собираются в единую колонию волны движения амеб затухают, и сформировавшаяся колония перемещается как целое в поисках подходящего субстрата и, найдя его, формирует плодовое тело.

Пример 2. Второй пример образования структур из популяционной биологии, который мы рассмотрим здесь, – это основа закладки термитника. Напомним, что *термиты* (лат. *isoptera*) – отряд общественных новокрылых насекомых с неполным превращением. Как и все общественные насекомые, термиты живут в колониях, состоящих из каст. Число зрелых особей в колониях может достигать от нескольких сотен до нескольких миллионов. Типичная колония состоит из личинок (нимф), рабочих, солдат и репродуктивных особей. Термиты-рабочие занимаются нахождением, сбором и хранением пищи, заботой о потомстве, строительством и ремонтом колонии. Рабочие – единственная каста, способная переваривать целлюлозу, благодаря особым кишечным микроорганизмам – симбионтам. Именно рабочие занимаются кормлением всех остальных термитов. Своими впечатляющими размерами колонии также обязаны термитам-рабочим.

Колонии термитов живут в термитниках, стены которых строятся из комбинации экскрементов, измельченной древесины и слюны. Некоторые виды создают настолько прочные сооружения, что при попытке их разрушить ломаются даже автомашины. Размеры колоний некоторых африканских термитников таковы, что в их тени прячутся слоны. В гнезде предусмотрены места для разведения грибковых садов, содержания яиц и молодых личинок, репродуктивных особей, а также обширная сеть вентиляционных туннелей, которые позволяют поддерживать внутри термитника практически постоянный микроклимат. Кроме того, иногда имеются также помещения для термитофилов – животных, сосуществующих с термитами в симбиозе.

Как происходит закладка нового термитника? На начальной стадии закладки основания гнезда термиты на выбранное место приносят и беспорядочно разбрасывают комочки земли. Каждый комочек пропитан гормоном, привлекающим других

⁴Положительной обратной связью называют такую обратную связь, которая способствует росту возмущений в системе.

термитов. Случайное скопление комочков, возникающее в какой-либо точке, создает флуктуацию концентрации гормона. Возросшая плотность термитов в окрестности этой точки приводит к нарастанию флуктуации (рис. 6, *a*). Процесс движения и концентрации термитов продолжается, заканчиваясь возникновением «опоры» гнезда (термитника). Число таких опор может быть несколько, расстояние между ними определяется радиусом распространения гормона. Мы опять имеем дело с вышеописанным механизмом *положительной обратной связи*, который приводит к росту начального возмущения.

Специальные эксперименты показали, что нарушение гормонального механизма положительной обратной связи приводит к тому, что процесс возведения термитника становится «хаотичным» (рис. 6, *б*). Действительно, распыливание вещества, подавляющего восприятие гормона у термитов, приводит к тому, что термиты начинают разбрасывать комочки случайным образом по территории будущего гнезда, так что в итоге все пространство оказывается однородным образом заполнено гормоном и опоры для будущего термитника не возникает.

Таким образом, возникновение термитников снова определяется самоорганизацией в биологической популяции, заключающейся в формировании и «усилении» (за счет положительной обратной связи) пространственной неоднородности популяции на небольшом ареале.

Перейдем теперь к еще очень важному направлению исследований на стыке физики открытых систем и биологии – науке, изучающей мозг. Следует отметить, что изначально термин *паттерн* пришел в нелинейную динамику и физику открытых нелинейных систем от исследователей, работающих в этой научной области. С. Спрингер и Г. Дейч в книге «Левый мозг, правый мозг» (М.: Мир, 1983) пишут: «Саган характеризует правое полушарие как опознающее устройство, предназначен-

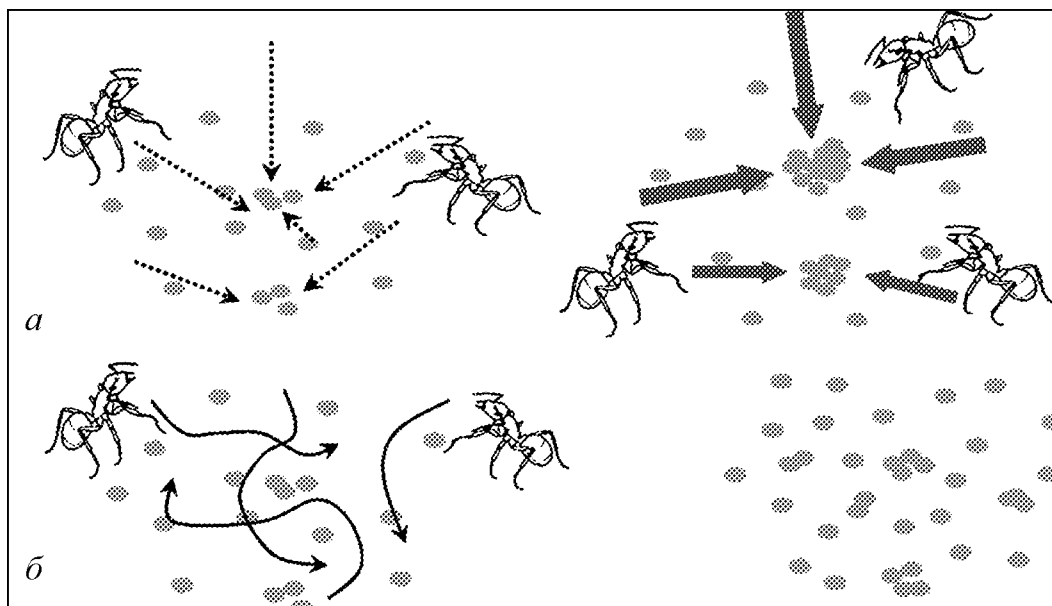


Рис. 6. *a* – механизм закладки нового термитника, основанный на механизме положительной обратной связи. Стрелками показаны направления движения термитов по градиенту концентрации гормона. *б* – результаты разрушения «гормонального» механизма, реализующего положительную обратную связь: движения термитов беспорядочны, областей повышенной концентрации гормона не возникает

ное для поиска паттернов (иногда реальных, иногда воображаемых) в поведении людей, а также в природных событиях. Эмоциональный тонус правого полушария таков, что он подозревает существование тайны не только там, где она есть, но и там, где ее нет. Для критического анализа создаваемых им паттернов и для проверки соответствия их реальности ему необходимо левое полушарие... Поиск паттернов без критического анализа и жесткий скептицизм без поиска паттернов – это антиподы совершенной науки. Эффективный поиск знания нуждается в обеих функциях». С их мнением перекликается более ранняя работа Грея Уолтера. В своей книге «Живой мозг» (М.: Мир, 1966) он отмечает: «Понятие паттерн подразумевает любую последовательность явлений во времени или любое расположение предметов в пространстве, которое можно отличить от другой последовательности или другого расположения или сравнить с ними... Вообще говоря, можно считать, что науки возникают в результате поиска паттернов, а искусства – в результате создания паттерна, хотя между поисками и созданием паттерна существует более тесная связь, чем обычно полагают».

С точки зрения нейробиологии, человеческий мозг – сложнейший из известных материальных объектов. Он состоит из приблизительно $2 \cdot 10^{10}$ нейронов, каждый из которых образует в среднем 10^5 связей с другими нервными клетками, большинство из которых также расположено в коре головного мозга. Одновременно в головном мозге работает порядка 10^7 – 10^8 нейронов, которые динамически образуют распределенные нейронно-клеточные популяции. Очень точно написал о возможностях моделирования и анализа поведения головного мозга Юлий Александрович Данилов [11]:

«Головной мозг человека по праву можно считать сложной системой, какого бы определения сложности мы ни придерживались. Ясно, что детальное описание активности каждого из нейронов – занятие бесперспективное и довольно бессмысленное. Даже если бы такое описание удалось реализовать, то обилие информации препятствовало бы сколько-нибудь рациональной ее обработке и использованию...»

Не менее сложными объектами для исследования служат электрические и магнитные сигналы, свидетельствующие об активности головного мозга.

И в случае анализа структуры головного мозга, и в случае анализа электро- и магнито-энцефалограмм необходимо прибегнуть к так называемому «сжатию информации»...»

Ситуация оказывается очень схожей с описанием процессов в газах. Серьезный прогресс в построении молекулярно-кинетической теории произошел тогда, когда Людвиг Больцман отказался от попытки точного описания (с точки зрения механики) движения частиц в газе. Понятно, что это невозможно: ведь не существует даже точного решения для задачи трех тел. Больцман пошел по пути радикального изменения модели рассматриваемой системы, представив газ как некоторую сплошную среду в 6-мерном фазовом пространстве координат и скоростей. Тем самым он отказался от задания координат и скоростей каждой частицы газа, а задал состояние системы интегральным образом – функцией распределения частиц в 6-мерном фазовом пространстве. Можно сказать, что при таком описании информации произошла операция «сжатия информации»: специалисты в области статистической физики отказались от описания динамики индивидуальных элементов, образующих большой «ансамбль», а описывают усредненные характеристики этого ансамбля.

Юлий Александрович Данилов (1936–2003) – Юлий Александрович Данилов родился в Москве в 1936 году. Окончил механико-математический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова в 1963 году. После окончания университета был принят на работу в Институт атомной энергии им. И.В. Курчатова (в настоящее время Российский научный центр «Курчатовский институт»), где проработал до последнего дня. Ю. А. Данилов создал и прочитал ряд оригинальных курсов по современным методам математической физики, статистической обработке экспериментальных данных и истории естествознания. Сфера его научных интересов простиралась от симметрии в физике и нелинейной динамики



до философии и истории науки. Для Ю. А. Данилова практически не существовало лингвистических барьеров – он владел почти всеми европейскими языками, а также латинским и древнегреческим. Им опубликовано и переведено более 200 научных и научно-популярных статей, в его переводе вышло более 100 книг. Много лет участвовал в переводе и издании трудов А. Эйнштейна, Г. Кирхгофа, А. Пуанкаре, В. Паули, В. Гейзенберга, У. Р. Гамильтона, Д. Гильберта, вышедших в свет в серии «Классики науки». Он был постоянным автором журналов «Знание–сила», «Природа», «Химия и жизнь», «Квант», «Семья и школа», членом редколлегии журнала «Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика», неизменным лектором на ежегодных школах «Нелинейные дни в Саратове для молодых» и нижегородских школах «Нелинейные волны», создал серию научно-популярной литературы в издательстве «Мир».

Следует признать, что подобный подход может быть весьма эффективным и при анализе и понимании функционирования головного мозга.

В настоящее время выделилось новое междисциплинарное научное направление, получившее название *нейронаука* (*neuroscience*), которое направлено на изучение фундаментальных принципов работы мозга в целом, ансамблей нейронов и т.д. для объяснения феноменов мышления, памяти, интеллекта и сознания. Ключевая проблема нейронауки тесно связана с проблемами физики открытых систем и заключается в выявлении принципов самоорганизации и образования паттернов в больших функциональных системах, состоящих из колоссального числа элементов (нейронов) и упорядочивание их астрономических степеней свободы. Успешные исследования в области нейронауки возможны только на стыке наук о мозге с математикой, физикой, химией, компьютерными науками, а также лингвистикой, философией и т.д.

Одним из интересных пионерских проектов в нейронауке стал проект «Blue Brain» – первая попытка прямого моделирования активности головного мозга из «первых принципов», то есть создания модели некоторой части головного мозга, содержащей число модельных нейронов соизмеримое с реальным числом нейро-

нов (сайт проекта: <http://bluebrain.epfl.ch/>). Реализация этого проекта происходит на базе Швейцарского политехнического университета (в Лозанне), в рамках которого используется суперкомпьютер Blue Gene, разработанный фирмой IBM для моделирования ансамбля нейронов колонки неокортекса.

Неокортекс – это новая область коры головного мозга, которая у низших млекопитающих только намечена, а у человека составляет основную часть коры. Новая кора располагается в верхнем слое полушарий мозга и отвечает за высшие нервные функции (сенсорное восприятие, выполнение моторных команд, пространственную ориентацию, осознанное мышление и у людей речь). Неокортекс у человека содержит порядка 18–25 миллионов нейронов (у мужчин – 20–25 миллионов, у женщин – 18–20 миллионов). Структура неокортекса относительно однородна и насчитывает шесть горизонтальных слоев нейронов, отличающихся по типу и характеру связей. Вертикально нейроны объединены в так называемые нейронные колонки, которые являются структурными единицами неокортекса. Одна колонка неокортекса содержит порядка 60–100 тыс. нейронов, дендриты которых проходят через всю высоту колонки. Для моделирования процессов в головном мозге в рамках проекта Blue Brain в качестве базовой системы была выбрана колонка неокортекса крысы, которая содержит намного меньшее количество нейронов – порядка 10 тысяч.

В конце 2006 года впервые удалось смоделировать одну колонку неокортекса молодой крысы. При этом использовался один компьютер Blue Gene и было задействовано 8192 процессоров для моделирования 10000 нейронов. То есть практически один процессор моделировал один нейрон. Для соединения нейронов было смоделировано порядка $3 \cdot 10^7$ синапсов. Залогом успеха данного проекта стал суперкомпьютер Blue Gene, который разрабатывается фирмой IBM с 1999 года, с целью создания суперкомпьютера с производительностью в несколько пфлопс/с для решения задач биомолекулярного и нейро-моделирования⁵. В начале 2008 году запущена в эксплуатацию система Blue Gene с пиковой производительностью 3 пфлопс/с.

Реализация данного проекта привела к разработке новых интересных решений для компьютерного моделирования нейросетевых моделей. В частности, были разработаны: *новая модель сеточной структуры*, которая автоматически, по запросу, генерирует нейронную сеть по предоставленным биологическим данным; *новый процесс моделирования и саморегуляции*, который перед каждым расчетом автоматически проводит систематическую проверку и калибровку модели для более точного соответствия биологической природе.

Все это позволило создать первую модель колонки неокортекса клеточного уровня, построенную исключительно по биологическим данным. Возникли и определенные проблемы, связанные с тем, о чем писал Ю.А. Данилов: с невозможностью корректно проанализировать и представить огромный объем информации, содержащий сведения о динамике каждого нейрона. Так, «компьютерный визуальный образ»

⁵FLOPS (акроним от англ. Floating point Operations Per Second, флопс) – величина, используемая для измерения производительности компьютеров, показывающая, сколько операций с плавающей запятой в секунду выполняет данная вычислительная система. Для сравнения вычислительной мощности суперкомпьютера Blue Gene с более привычными вычислительными системами можно привести следующие данные: персональный компьютер Intel Core 2 Duo E8400 600 МГц – 18.6 Гфлопс/с; игровая приставка Sony PlayStation 2 – 6.2 Гфлопс/с; калькулятор примерно 0.1 флопс/с; человек примерно 0.001–0.01 флопс/с.

колонки неокортекса (10000 нейронов) имеет объем порядка 100 Гб. Модель колонки с отображением электрической активности имеет объем порядка 150 Гб. Был разработан специальный интерфейс 3D визуализации, который позволял представить информацию электрической активности нейронов и выявлять наиболее интересные зоны. На рис. 7 показана характерная картина, получающаяся в результате расчета динамики колонки неокортекса, где интенсивностью серого цвета показана степень возбуждения того или иного нейрона. Важно, что в исследованиях существует возможность сравнивать результаты, полученные в результате компьютерного моделирования, с опытными нейрофизиологическими данными, которые получают путем измерения микроэлектродной активности колонки у лабораторного животного.

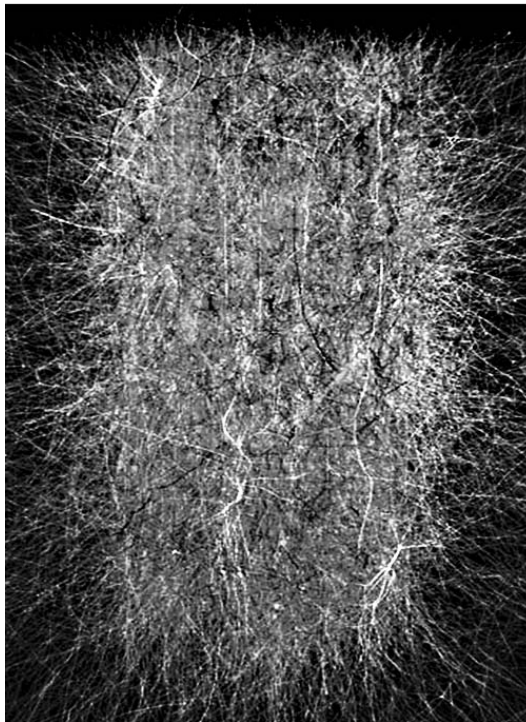


Рис. 7. Результаты 3D визуализации электрической активности колонки неокортекса. Интенсивностью серого цвета показана степень возбуждения того или иного нейрона (рисунок взят с сайта <http://bluebrain.epfl.ch/>)
©BBP/EPFL

Как отмечает в своем пресс-релизе руководитель проекта профессор Генри Макрам (Henry Markram), методы моделирования и анализа нейронных систем, разработанные и апробированные в ходе выполнения проекта, найдут широкое применение в дальнейших фундаментальных исследованиях в нейронауке и прикладных исследованиях в медицине. Фактически, этот проект – первая успешная попытка полномасштабного моделирования нейрофизиологической системы на базе модели клеточного уровня, построенная исключительно по биологическим данным. Эти исследования помогут разобраться с многими аспектами динамики нейронной сети головного мозга, а также с лечением тех или иных нервных заболеваний. Но наряду с таким полномасштабным моделированием функций и поведения каких-то элементов нейронных ансамблей головного мозга, необходимо и построение более простых моделей тех или иных аспектов функционирования центральной нервной системы с привлечением методов и подходов физики открытых систем и теории самоорганизации. Здесь стоит согласиться с Ю.А. Даниловым, который полагал, что без операции «сжатия информации», без построения простых математических моделей, описывающих динамику и функционирование головного мозга, без синергетического подхода, под которым он понимал теорию явлений самоорганизации, невозможно понять, как же функционирует головной мозг высших млекопитающих и человека. В настоящее время все больше исследователи переключают свое внимание на подобные задачи и все шире привлекают методы и подходы физики открытых систем к изучению функционирования нейронных ансамблей (см., например, замечательные обзоры и книги [12–16]).

Следует отметить, что подходы, развитые в современной нелинейной физике, давно используют специалисты, занимающиеся изучением электрической и магнитной активности головного мозга. Наиболее простой, наглядный, широко используемый и исторически возникший первым способ наблюдения активности головного мозга является регистрация электроэнцефалограмм (ЭЭГ) – электрического потенциала, зарегистрированного непосредственно на поверхности головного мозга или сквозь покрывающие его ткани. При проведении экспериментов на черепе испытуемого крепятся электроды, регистрирующие колебания напряжения. Показания каждого электрода представляются в виде некоторой функции, выражающей зависимость изменения напряжения от времени (то есть упомянутые выше ЭЭГ). В экспериментах на животных существует возможность имплантировать электроды непосредственно в мозг, регистрируя сигналы из глубинных областей мозга, скрытых корой головного мозга, что невозможно в опытах на человеке, исходя из этических норм. Особую роль электроэнцефалография играет при диагностике и лечении различных нервных заболеваний, когда на ЭЭГ появляются характерные паттерны, позволяющие идентифицировать тот или иной тип патологии мозга [17]. Данные типичные паттерны являются отражениями той или иной степени синхронизации больших ансамблей нейронов коры головного мозга. Далее в рамках исследований подобных типов патологического поведения специалисты-нейрофизиологи изучают только зафиксированные на ЭЭГ паттерны. Это означает, что из рассмотрения исключается поведение всего нейронного ансамбля коры головного мозга, а анализируется только динамика кластера, образованного нейронами, демонстрирующими синхронное поведение. Следует отметить, что подобные нейроны не обязательно располагаются локально в одном месте коры мозга, а могут находиться в самых различных частях мозга, учитывая разнообразие связей (в том числе дальних) между нейронами. Интересно, что подобные синхронные паттерны могут быть связаны не только с заболеваниями головного мозга, но и отражать различные когнитивные процессы [18]. Рассмотрение подобных синхронных паттернов значительно упрощает описание поведения нейронной системы [19–21], выступая в качестве некоторого метода «сжатия информации», который обсуждался выше.

Типичным примером паттернов на ЭЭГ, отражающих синхронную динамику нейронного ансамбля головного мозга, являются эпизоды параксизмальной активности у больных эпилепсией. На рис. 8 показаны фрагменты ЭЭГ с различными типами эпилепсии. Осцилляторные паттерны, соответствующие эпилептическим событиям, на ЭЭГ характеризуются большей амплитудой и регулярностью колебаний по сравнению с фоновой десинхронизированной ЭЭГ. В настоящее время клинические исследования осцилляторных паттернов на ЭЭГ применяют для прямой диагностики всех без исключения эпилептических расстройств, а также для дифференциальной диагностики, например, в случае психогенных судорог неэпилептической природы, обморочных состояний, расстройств движений, мигрени. Изменение картины появления тех или иных ритмов на ЭЭГ служит одним из критериев для оценки эффективности медикаментозного лечения. В некоторых случаях данные о регистрируемых на ЭЭГ паттернах несут прогностическую информацию, и с их помощью можно предсказать ход развития болезни в кратко- и долгосрочной перспективе.

В заключение лекции скажем несколько слов о возникновении паттернов в социальных системах. Это отдельная огромная тема, требующая специального рассмотрения. Поэтому здесь ограничимся единственным примером, который относится к изучению динамики формирования мнений в малых группах и хорошо известен в психологии. Речь идет о знаменитых опытах С. Эша [22]. Суть опыта заключается в том, что участники эксперимента, составляющие малую группу, должны были выбирать на карточке Б линию, которая совпадает по длине с линией-образцом на карточке А (рис. 9, а). Во время исследований испытуемый сталкивался с тем, что все остальные участники единодушно оценивали линию 1 на карточке Б как равную линии-образцу. В результате большинство (порядка 90% испытуемых) демонстрировали конформизм и соглашались с заведомо неправильным мнением: в социальной группе формировался паттерн поведения. На рис. 9, б показаны сцены, снятые во время испытаний С. Эша. Участник под номером 6 – единственный подлинный испытуемый. На его лице мы видим запоздалое изумление, вызванное тем, что все остальные участники эксперимента дали очевидно неверные ответы относительно длины линии.

Количество примеров формирования паттернов в поведенческих реакциях можно продолжать. В частности, этологи, исследователи, которые изучают поведение животных в естественном окружении, обратили внимание на то, что в поведении представителей многих видов животных часто имеют место жесткие автоматические модели [23]. Называемые жестко фиксированными моделями (паттернами) поведения, эти автоматические последовательности действий заслуживают особого внимания, поскольку они имеют сходство с определенным автоматическим реагированием людей. Как у людей, так и у животных данные модели, как правило, приводятся в действие каким-то одним элементом информации. Это единственная специфическая черта (паттерн поведения) играет роль «спускового крючка». Она часто оказывается очень ценной, поскольку позволяет индивиду принимать правильное решение без тщательного и полного анализа всех остальных элементов информации в конкретной ситуации. Преимущество такого стереотипного реагирования (наличия паттер-

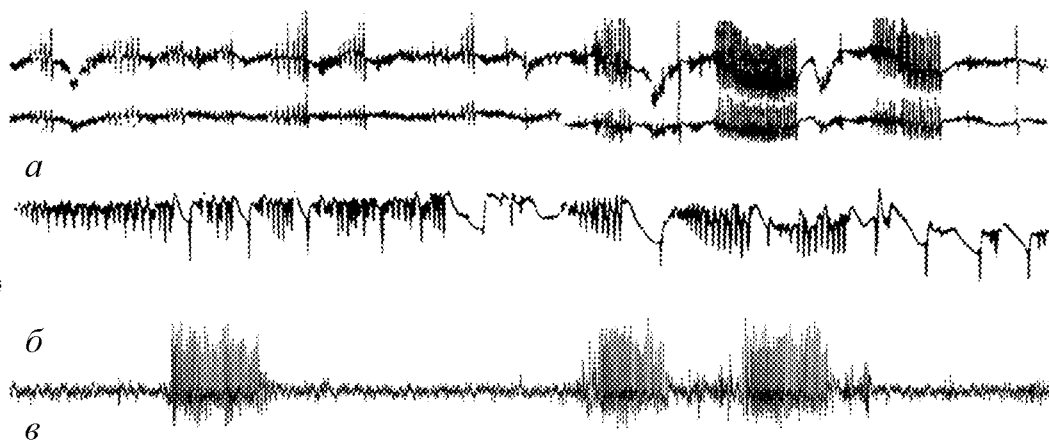


Рис. 8. Эпилептическая активность – образование пространственно-временных паттернов синхронного поведения в нейронном ансамбле в записях ЭЭГ: а – пациента с посттравматической генерализованной эпилепсией, б – пациента, больного редкой в медицинской практике эпилепсией Кожевникова; в – крыса с врожденной абсанс-эпилепсией



Рис. 9. Опыты С. Эша (иллюстрации взяты из книги [22])

на) заключается в его эффективности и «экономичности»; автоматически реагируя на несущую основную информацию черту – «спусковой крючок», индивид сохраняет свое время, энергию и умственный потенциал. Однако такие поведенческие паттерны несут в себе и опасность, связанную с тем, что их можно использовать как «лазейки» для навязывания человеку «чужого» мнения (как в опытах Эша), являясь, с точки зрения прикладной психологии, механизмами уступчивости или влияния. Таких механизмов, побуждающих одного человека подчиниться требованиям другого, психологам известно достаточно много. Главное то, что все они основаны на определенных паттернах (или, как часто говорят психологи, стереотипах, или казуальных схемах) поведения, «защитных» в психологию человека, который склонен в большинстве случаев автоматически, не раздумывая, реагировать на внешнюю информацию в соответствии с заранее усвоенными причинно-следственными связями.

Подводя некоторые итоги сказанного в данной лекции, отметим, что существует огромное число примеров самоорганизации и образования структур в системах самой различной природы. Применительно к живым системам можно сказать, что исследование процессов самоорганизации в них позволяет понять механизмы эволюции, распространения популяций, особенности строения различных живых организмов, а также порой законы функционирования человеческого общества.

Подобные исследования помогут в разрешении самой удивительной загадки, стоящей перед человечеством, – загадки сознания, а также дать возможность выработать новые подходы к лечению и диагностике многих заболеваний (эпилепсия, болезни Альцгеймера, Паркинсона и т. д.).

Автор выражает благодарность Д.И. Трубецкову и А.А. Короновскому за плодотворные обсуждения и ценных замечаний, А.Е. Филатовой за обращение внимания на интересные примеры самоорганизации в биологических системах.

Работа поддержана Президентской программой поддержки научных школ РФ (проект НШ–3407.2010.2).

Библиографический список

1. *Трубецков Д.И.* Введение в синергетику. Хаос и структуры. М.: Эдиториал УРСС, 2004.
2. *Климонтович Ю.Л.* Введение в физику открытых систем. М.: Янус-К, 2002.
3. *Трубецков Д.И., Мчедлова Е.С., Красичков Л.В.* Введение в теорию самоорганизации открытых систем. М.: Физматлит, 2002.
4. *Эбелинг В., Энгель А., Файстель Р.* Физика процессов эволюции. М.: УРСС, 2001.
5. *Безручко Б.П., Короновский А.А., Трубецков Д.И., Храмов А.Е.* Путь в синергетику. Экскурс в десяти лекциях. 1-е изд. М.: Комкнига, 2005; 2-е изд. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2010.
6. *Ван-Дейк М.* Альбом течений жидкости и газа. М.: Мир, 1986.
7. *Faraday M.* On the forms and states assumed by fluids in contact with vibrating elastic surfaces // *Philos. Trans. R. Soc., London.* 1831. Vol. 121. P. 319. (подробнее на русском языке о ряби Фарадея можно прочитать в книге [5])
8. *Езерский А.Б., Рабинович М.И., Реутов В.П., Старобинец И.М.* // *ЖЭТФ.* 1986. № 1. С. 2070.
9. *Хакен Г.* Синергетика. М.: Мир, 1980.
10. *Климонтович Ю.Л.* Введение в физику открытых систем // *СОЖ.* 1996. № 8. С. 109.
11. *Данилов Ю.А.* Синергетика – внутри и вокруг человека // *Философия науки.* 1982. Вып. 8.
12. *Иваницкий Г.Р., Медвинский А.Б., Цыганов М.А.* // *УФН.* 1994. Т. 164. С. 1041.
13. *Абарбанель Г.Д.И., Рабинович М.И., Селверстон А., Баженов М.В., Хуэрта Р., Суццик М.М., Рубчинский Л.Л.* // *УФН.* 1996. Т. 166. С. 363.
14. *Некоркин В.И.* // *УФН.* 2008. Т. 178. С. 313.
15. *Рабинович М.И., Мюезинолу М.К.* // *УФН.* 2010. Т. 180. С. 371.
16. *Хакен Г.* Принципы работы головного мозга. Синергетический подход к активности мозга, поведению и когнитивной деятельности. М.: Per Se, 2001.
17. *Encyclopedia of the human brain / Ed. by Ramachandran V.S.* Elsevier Science, 2002.
18. *Свидерская Н.Е.* Синхронная электрическая активность мозга и психические процессы. М.: Наука, 1987.
19. *Иваницкий А.М., Лебедев А.И.* Разгадывая тайны ритмов мозга // *Журн. высш. нервн. деят.* 2007. Т. 57. С. 636.
20. *Короновский А.А., ван Луйтелеар Ж., Овчинников А.А., Ситникова Е.Ю., Храмов А.Е.* Диагностика и анализ осцилляторной нейросетевой активности головного мозга с использованием непрерывного вейвлетного преобразования // *Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика.* 2011. Т. 19, № 1. С. 86.
21. *Ситникова Е.Ю., Короновский А.А., Храмов А.Е.* Анализ электрической актив-

- ности головного мозга при абсанс-эпилепсии: Прикладные аспекты нелинейной динамики // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2011. Т. 19, № 6.
22. Зимбардо Ф., Ляйпте М. Социальное влияние. СПб: Питер, 2001.
23. Чалдини Р. Психология влияния. СПб: Питер, 1999.

Саратовский государственный
университет им. Н.Г. Чернышевского

Поступила в редакцию 29.01.2012

SELFORGANIZATION, PATTERN FORMATION, OPEN SYSTEM PHYSICS

A.E. Hramov

Paper presents the lecture which was conducted for pupils on workshop «Nonlinear Days in Saratov for Youth – 2011». In the lecture brief introduction in physics of open systems is presented and several examples of process of selforganization and pattern formation in the systems of different nature are discussed.

Keyword: Selforganization, pattern formation, open system physics.



Храмов Александр Евгеньевич – окончил физический факультет Саратовского госуниверситета (1996). Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата (1999) и доктора (2006) физ.-мат. наук. Профессор, заместитель заведующего кафедрой электроники, колебаний и волн факультета нелинейных процессов СГУ. Область научных интересов – радиофизика в той ее части, которая связана с взаимодействием свободных электронов с электромагнитными полями; нелинейная динамика распределенных активных сред; методы анализа и моделирования динамических систем. Опубликовал (в соавторстве) книгу «Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков» (Т. 1, М.: Физматлит, 2003; Т. 2, М.: Физматлит, 2004), монографию «Непрерывный вейвлетный анализ и его приложения» (Москва: Наука, Физматлит, 2003), двухтомную коллективную монографию «Методы нелинейной динамики и теории хаоса в задачах электроники сверхвысоких частот» (М.: Физматлит, 2009), коллективную монографию «Моделирование нелинейной динамики глобальных процессов» (М.: Изд-во МГУ, 2010) и др.

410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: aeh@nonlin.sgu.ru