

PACS: 05.70.Ln, 05.70.Np, 47.53.+n, 81.05.Tr

С.В. Терехов

УНИВЕРСАЛЬНОСТЬ СИНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЗАКОНОВ. I. ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАСШТАБНЫХ УРОВНЕЙ

Донецкий национальный технический университет
ул. Артема, 58, г. Донецк, 83001, Украина
E-mail: svlter@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 29 августа 2011 года

Продемонстрирована универсальность синергетических закономерностей, проявляющаяся в подобии или аффинности физических явлений и процессов, использовании однородных функций при их описании, применении уравнения Лапласа для описания структур дендритного типа. Образование кластеров и их стремление принять форму правильных многогранников указывают на общность механизмов построения стабильных кластеров и гетерофазных систем. Стремление занять геометрически и энергетически выгодное состояние приводит систему к сферической форме. Реакция неравновесной системы на изменяющиеся внешние условия сводится при определенных условиях к преобразованиям структуры, т.е. к поиску оптимального строения. Достижение потоком физической величины критического уровня вызывает формирование диссипативных структур гексагонального, лабиринтного, спирального и других видов.

Ключевые слова: синергетика, фракталы, кластеры, солитоны, домены, глобулы, диссипативные структуры

1. Введение

Научное понимание функционирования масштабных уровней Природы опирается на знания, полученные специализированными науками и их перекрестным применением, когда одна наука предоставляет предмет, а другая – методы исследования. Иной подход необходим при выявлении предметов и методов исследования, которые являются общими для различных систем вне их природного уровня. Одной из наук, удовлетворяющих оговоренному критерию, является *синергетика* – наука об общих закономерностях возникновения, существования, устойчивости и эволюции *самоорганизующихся* диссипативных структур, возникающих в разных по природе открытых системах при протекании необратимых процессов [1–4]. Она базируется на: исследовании неравновесных, хаотических состояний с рассеиванием энергии, вещества и энтропии в открытых диссипативных систе-

мах; выяснении условий возникновения из хаоса самоорганизующихся структур; качественном и количественном анализе нелинейных динамических систем. Диссипативная система может быть многокомпонентной и многопараметрической. Под компонентами системы понимаются атомы (молекулы) того или иного вещества, субъекты рынка, члены коллектива и другие объекты. Параметры системы разделяют на внутренние, между которыми устанавливается детерминированная связь, и управляющие (или самоуправляющие), при определенных значениях приводящие систему к самоорганизации.

До появления синергетики классическая физика занималась изучением поведения изолированных, закрытых и открытых систем, состояние которых находилось в малой окрестности положения равновесия. В этой области законы физики описываются линейными зависимостями между внутренними параметрами системы (например, сила Ньютона пропорциональна ускорению; напряжение в законе Ома – силе тока; поток физической величины в модели Онзагера (для изотропной по Кюри системы) – приложенной термодинамической силе). При малом увеличении внешнего воздействия на линейную систему происходит только количественное изменение внутренних параметров без ее качественной перестройки. Однако в природных условиях зачастую возникают явления и процессы, связанные с возникновением качественно нового поведения диссипативной системы. Поэтому были разработаны нелинейные модели, позволившие установить наиболее общие закономерности хаотической самоорганизации. Они проявляются на различных уровнях организации материи, что ставит вопрос об их *универсальности*. Универсальность синергетических закономерностей сводится к подобию математических моделей, геометрического строения объектов, тождественности коллективного поведения частей системы вне зависимости от масштабного уровня. В этой связи рассмотрим некоторые выявленные закономерности на конкретных примерах.

2. Фрактальная природа материи

1. Самоподобие (самоаффинность). Одной из важных природных симметрий является инвариантность законов природы при изменении масштаба (*скейлинг*) [5–7]. Она приводит к существованию самоподобных (фракталы [8–12]: увеличение одного и того же затравочного объекта в определенное число раз) или самоаффинных (мультифракталы [13,14]: существует целый спектр масштабов – иерархичность структур и протекающих процессов) объектов. Нарушение *скейлинговой инвариантности* порождает несоизмеримость базовых компонентов самоподобных фигур и детерминированный хаос в динамических системах.

Измерение линий, которые описываются недифференцируемыми функциями Вейерштрасса (см., напр., [7, с. 13]) или подобными им отрезками прямой различной длины, привело к изменению понятия размерности, кото-

рая до Хаусдорфа и Безиковича [6,7,12] полагалась только целочисленной. Применение фрактальной размерности Хаусдорфа–Безиковича дало возможность Б. Мандельброту [5] выделить новый класс геометрических фигур (фракталы и мультифракталы), топологическая размерность которых строго меньше размерности Хаусдорфа–Безиковича. Работы Б. Мандельброта продемонстрировали возможность использования фрактальной геометрии для отображения структур природы: кристалликов льда, облаков и растений, вихря и водосбора ручья, флуктуаций высоты волн, биений человеческого сердца и др. [7].

2. Однородность. Подобие в динамических задачах сводится к использованию *однородных* функций, которые описывают поведение сложной системы. Если потенциальная энергия тела описывается однородной функцией пространственных координат порядка n , т.е. $U(\lambda r) = \lambda^n U(r)$, то при масштабировании времени в ω раз скорость движения изменяется в λ/ω раз, а кинетическая энергия – в $(\lambda/\omega)^2$ раз. Если коэффициенты подобия совпадают $(\lambda/\omega)^2 = \lambda^n$, то лагранжиан является однородной функцией порядка n , а уравнения движения остаются неизменными после преобразования сжатия–растяжения пространственно-временного континуума (*универсальность* поведения динамических систем вне зависимости от изменения масштабов).

Наиболее часто однородные функции используются в равновесной термодинамике, поэтому многие термодинамические системы демонстрируют универсальное поведение при использовании для их описания безразмерных величин. Нарушение скейлинга (в частности, из-за его ограниченности) приводит к изменению поведения динамических и термодинамических объектов. Оно указывает на пирамидальную организацию природы: на смену одной однородной функции состояния приходит другая зависимость между параметрами системы с новыми скейлинговыми свойствами.

В качестве примера рассмотрим построение фрактального множества, которое называется «пыль» Кантора. Если отрезок прямой разделить на три равные части и удалить средний отрезок, то полученная фигура будет представлять первый шаг при построении канторовской «пыли». Аналогичные действия выполняются с каждым из полученных отрезков до бесконечности (рис. 1). При n -м построении коэффициент подобия $k = 3^{-n}$, а число возникающих отрезков $N = 2^n$, тогда размерность Хаусдорфа–Безиковича равна

$$D = -\ln N / \ln k = \ln 2 / \ln 3 \approx 0.631. \quad (1)$$

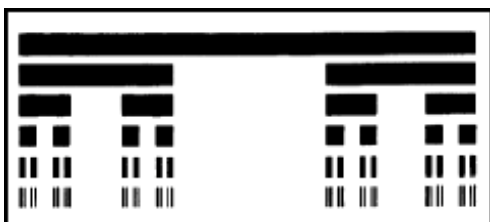


Рис. 1. «Пыль» Кантора

Канторовская «пыль» занимает промежуточное положение между прямой (топологическая размерность $d = 1$) и точкой ($d = 0$). На первом шаге из отрезка единичной длины изымается отрезок длиной $1/3$, на втором шаге – $2/9$, на третьем – $4/27$, на четвертом –

8/81, ... В результате бесконечной последовательности итераций будет изъята вся длина исходного отрезка. Таким образом, канторовская «пыль» представляет собой несчетное множество бесконечного числа точек, которое обладает мощностью континуума. Если построить зависимость вероятности найти у точек *множества Кантора* слева от значения аргумента x длины единичного отрезка на каждом итерационном шаге, то можно видеть, что при устремлении количества итераций к бесконечности функция $y(x)$ будет иметь горизонтальные плато («чертова лестница») почти всюду, но при этом будет возрастать от 0 до 1 (рис. 2,б).

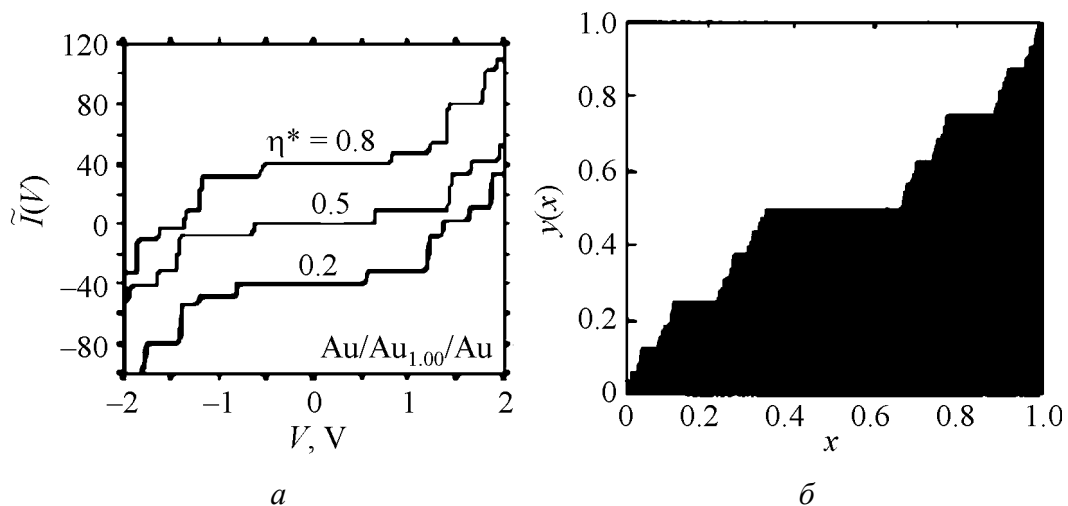


Рис. 2. ВАХ («кулоновская лестница») для структур на сферических металлических кластерах (а) [15] и «чертова лестница» для однородного множества Кантора при бесконечном числе итерационных шагов (б) [12]

Аналогичное строение имеет вольт-амперная характеристика (ВАХ) контакта нанокластеров со слабыми туннельными взаимодействиями в островковых пленках («кулоновская лестница», рис. 2,а). Поглощение электрона нанокластером сопровождается возникновением электрического поля, способного заблокировать туннельный переход для других электронов (*кулоновская блокада*). Кулоновская блокада управляет последующим моноэлектронным туннелированием: при низкой температуре и малом значении приложенного напряжения проводимость подавляется энергией зарядки. Блокирование тока одним электроном проявляется на ВАХ в виде «кулоновской лестницы». Указанное подобие подчеркивает не только дискретность заряда, но и возрастание вероятности туннелирования электрона через контакт при увеличении напряжения на затворе. Экспериментальное изучение одноэлектронных эффектов в полупроводниковых системах (например, в трехслойной структуре Si (10 nm)–Si_{0.05}Ge_{0.95} (8 nm)–Si (2 nm) [15]) привело к построению ВАХ с *кулоновскими осцилляциями* (рис. 3,а), подобной «чертовой лестнице» для *неоднородной «пыли»* Кантора (рис. 3,б).

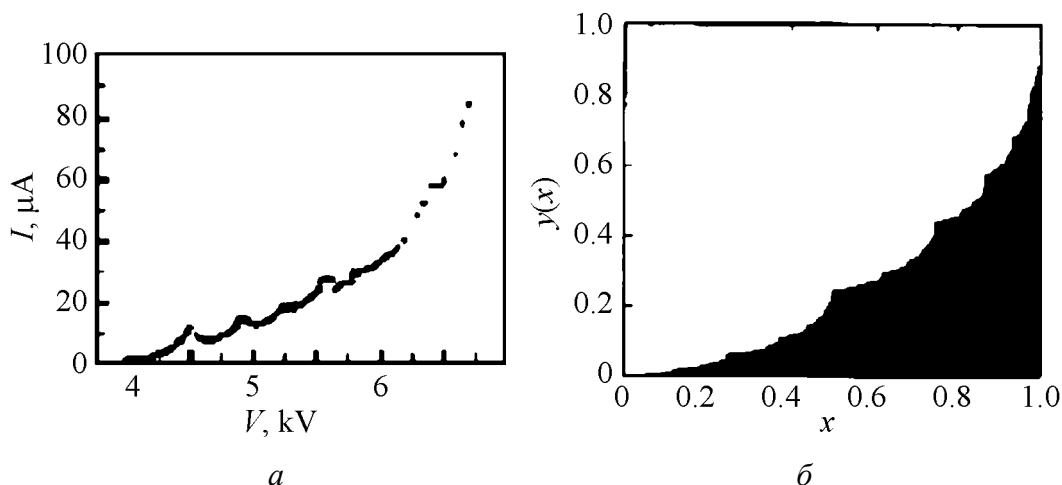


Рис. 3. ВАХ для структур на полупроводниковых квантовых точках (а) [15] и «чертова лестница» для неоднородного множества Кантора при бесконечном числе итерационных шагов (б) [12]

«Чертовы лестницы» играют важную роль при синхронизации двух осцилляторов. Значение непрерывно-дискретной функции $y(x)$ определяет переменное отношение частот на множестве вещественных чисел, а плато – фиксированное отношение на множестве рациональных чисел (асимптотическое самоподобие). Рациональное отношение частот соответствует появлению параметрических резонансов, приводящих к подстройке осцилляторов друг под друга. Именно поэтому данное явление получило название *синхронизация мод* (затягивание частоты, синхронизация фаз). Особенность синхронизации мод состоит в том, что она предпочитает скачкообразный переход к иному рациональному отношению частот при нарушении первоначального отношения. Интервалы синхронизации обладают высокой степенью *универсальности* и наблюдаются во многих колебательных системах. Поэтому они моделируются асимптотически самоподобными фрактальными структурами с размерностью $D \approx 0.868$.

3. Дендритное строение. Применение мультифрактальной геометрии позволяет смоделировать: сложное поведение нелинейных динамических систем; ограниченную диффузией сегрегацию; появление «пальцев» в вязких средах; перколяцию в кристаллических решетках и т.д. Поведение вещества в указанных процессах описывается древовидным мультифракталом и фракталом Уиттена–Сандера (рис. 4,а) (*дендритный класс универсальности*).

Причиной возникновения такой фигуры является более высокая вероятность того, что блуждающая частица осядет на «отростке», по сравнению с вероятностью прикрепления во внутренней области «дерева». В результате этого процесса внутренние области имеют достаточно низкую вероятность «заселенности», поэтому в них практически отсутствует рост новых «ветвей». Подобные мультифрактальные дендриты наблюдаются при агрегации

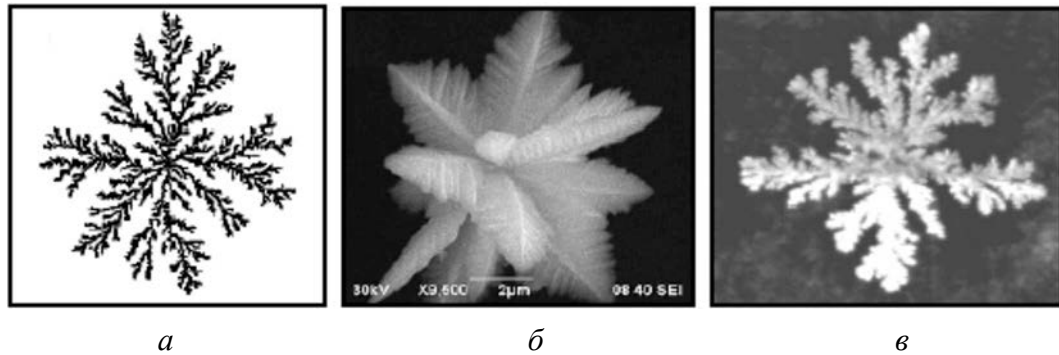


Рис. 4. Древоподобный мультифрактал Уитгена–Сандера (а), агрегат химически осажденного кобальта (б) и паттерн колонии бактерий (в)

частиц в результате химического (рис. 4,б) или электрического осаждения металлов, при осаждении из газовой фазы, росте вторичных фаз, возникновении линейных молний, образовании паттерна колонии бактерий (рис. 4,в) и тому подобных процессах.

Дендритное состояние материи возникает при электрическом пробое (пробой описывается уравнением Лапласа для потенциала электрического поля $\Delta\varphi = 0$, осаждении металла на подложку ($\Delta c = 0$, c – концентрация частиц), вытеснении жидкости из пористого объема на поверхность раздела ($\Delta p = 0$, p – давление) и других физических процессах [16] (например, в квантовой механике уравнение Лапласа описывает поведение угловой составляющей волновой функции атома в радиальном потенциальном поле). Из приведенных примеров видно, что дендритное состояние материи описывается уравнением Лапласа

$$\Delta f(x, y, z) = 0, \quad (2)$$

которое, в частности, является следствием дифференциальных законов сохранения физической величины $f(x, y, z)$ в случае ее стационарного распределения в пространстве ($\partial f/\partial t = 0$) при отсутствии в объеме стоков и источников ($\sigma_f = 0$) для однородной и гомогенной среды ($\mathbf{J}_F = -\gamma \nabla f$, $\gamma = \text{const}$):

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \text{div} \mathbf{J}_F = \sigma_F. \quad (3)$$

Например, локальный закон сохранения электрического заряда имеет вид

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div} \mathbf{j} = 0, \quad (4)$$

здесь ρ и \mathbf{j} – плотности соответственно заряда и тока. По дифференциальному закону Ома плотность тока \mathbf{j} связана с напряженностью постоянного электрического поля \mathbf{E} линейным соотношением

$$\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E}, \quad (5)$$

где $\sigma = \text{const}$ – электропроводность среды. Электростатическое поле связано со своим потенциалом равенством

$$E = \nabla\varphi. \quad (6)$$

Подстановка формул (5) и (6) в уравнение (4) для стационарного распределения зарядов приводит к уравнению вида (2), решение которого находят, например, методом Фурье (методом разделения переменных [17,18]). Таким образом, решения дендритного класса универсальности определяются случайными блужданиями компонентов и соответствуют максимальному значению градиента той или иной физической величины.

3. Кластеры, домены (солитоны, кинки) и глобулы

4. Кластеризация. Кластерами («cluster» – скопление, гроздь) называют объединения из небольшого числа частиц ($\sim 10-10^5$ атомов). Свойства кластеров существенно отличаются от характеристик макрообъектов, для которых физико-химические свойства либо не зависят от геометрических размеров (например, температуры плавления и замерзания), либо пропорциональны объему (например, теплоемкость). Экспериментально установлено, что кластер плавится при более низкой температуре, чем макрокристалл из тех же атомов, причем температура плавления не совпадает с температурой замерзания. Теплоемкость нанокластера при определенных условиях может принимать отрицательные значения, так как поглощение некоторого количества тепла приводит к снижению его температуры за счет изменения конфигурации расположения атомов. Нанокластеры металлов в зависимости от размера объединения атомов имеют разные виды зон проводимости: диэлектрическую, полупроводниковую или металлическую.

Особенности в поведении физико-химических характеристик кластера связаны с тем, что активную роль в их формировании принимают поверхностные частицы кластера. Самоорганизация частиц в кластере приводит к их плотной упаковке в малой пространственной области с образованием правильных многогранников и, как предельный случай, сферы. Для правильных многогранников, которые имеют V вершин, G граней и R ребер, выполняется соотношение связи Эйлера

$$V + G - R = 2. \quad (7)$$

Соотношение (7) полностью совпадает с правилом фаз Гиббса в термодинамике: если система состоит из l сосуществующих фаз, содержит k химически пассивных компонентов и ее состояние описывается p независимыми переменными (степенями свободы), то указанные величины связаны между собой равенством

$$p + l - k = 2. \quad (8)$$

Стабильный кластер и гетерофазная термодинамическая система демонстрируют существование *универсального геометрического фактора*, связанного с плотной упаковкой пространства частицами вещества.

Примером кластеров могут служить многоатомные молекулы углерода (фуллерены [19–21]) вида C_n (n – четное число атомов в кластере), которые имеют сферическую, сфероидальную, тороидальную и другие формы (рис. 5).

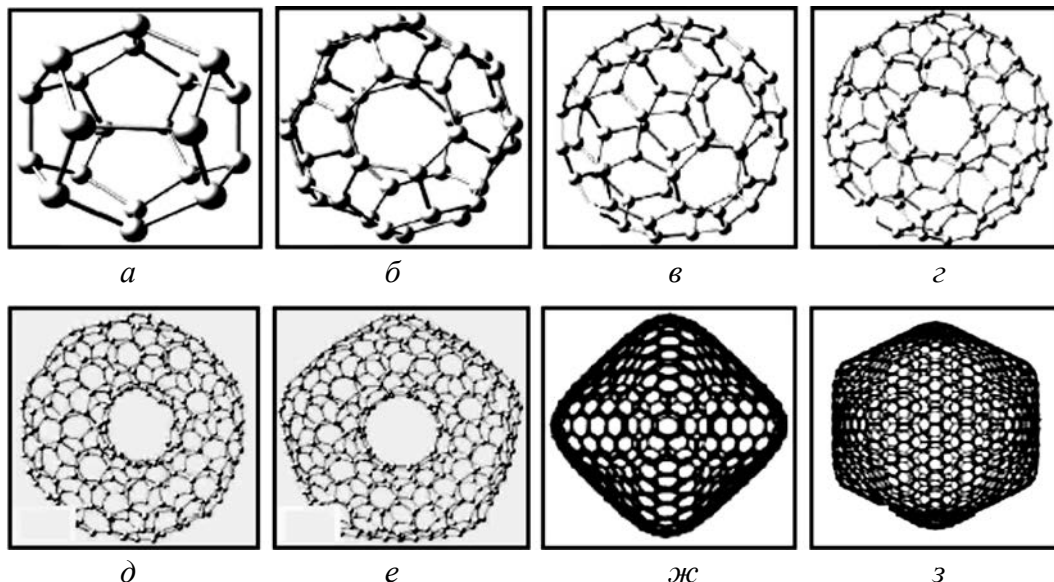


Рис. 5. Углеродные молекулы с разным числом атомов: a – 20, b – 40, c – 60, d – 120, e – 300, e – 400, $ж$ – 600, $з$ – 1500

Фуллерены представляют собой поверхностные структуры. Наиболее симметричным и стабильным кластером является углеродная молекула C_{60} , ее поверхность состоит из 20 правильных гексагонов (шестиугольников) и 12 правильных пентагонов (пятиугольников). Общие стороны шестиугольников образованы двойными связями $C = C$ и имеют длину 0.139 nm, а общие стороны гексагона и пентагона – одинарной связью $C - C$ с длиной стороны 0.144 nm. Фуллерен C_{60} представляет собой *сферу* с толщиной оболочки 0.1 nm и радиусом 0.357 nm. Более сложные молекулы углерода имеют изогнутые поверхности, образованные пяти-, шести-, семи- и восьмиугольниками. Форма фуллеренов изменяется от правильного додекаэдра (C_{20}) до правильного икосаэдра (C_{500} и выше), ее преобразование сопровождается возникновением пятигранников (например, C_{400} ; рис. 5). Дальнейшее увеличение числа атомов в углеродной молекуле приводит к многогранникам с различной симметрией и формой (квадратной C_{600} , треугольной C_{660} или гексагональной C_{1500}). Из рис. 5 видно, что при числе атомов $100 < n < 540$ углеродные молекулы имеют не сфероидальную, а тороидальную форму. Стабильными молекулами являются только фуллерены C_{60} и C_{70} , которые с помощью сил Ван-дер-Ваальса объединяются в кристаллы, называемые фуллеритами (рис. 6).

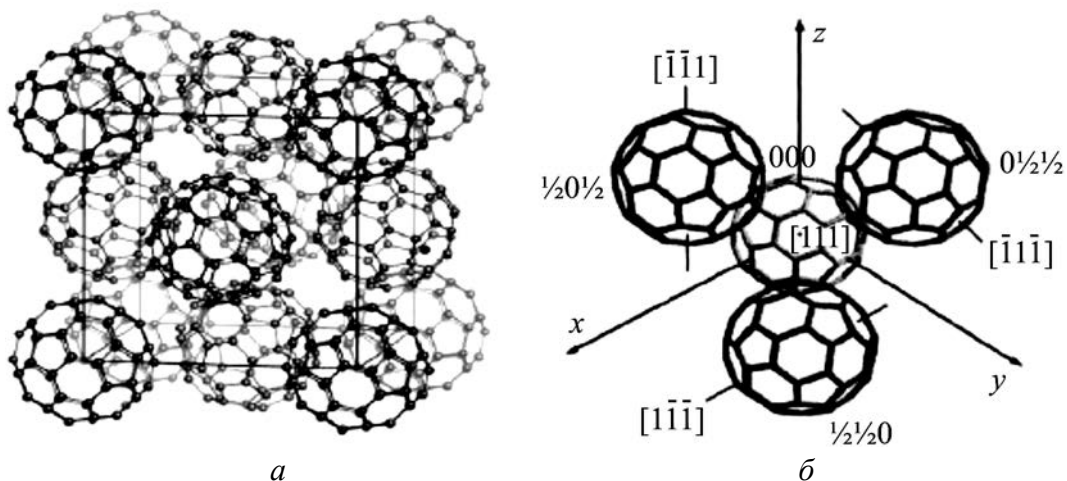


Рис. 6. Кристалл (а) [27] и ячейка (б) фуллерита C_{60}

В фуллеритах молекулы C_{60} и C_{70} сохраняют свою индивидуальность, предопределяя кристаллические свойства фуллеритов. При нормальном давлении фуллерит C_{60} имеет плотность примерно 1.69 kg/m^3 (плотности графита и алмаза равны 2.3 и 3.5 kg/m^3 соответственно), а объемный модуль сжатия $\sim 18 \text{ GPa}$ (довольно мягкий материал). Снижение температуры до $T_c \approx 260 \text{ K}$ приводит к фазовому переходу и смене решеточной структуры фуллерита C_{60} на простую кубическую (гексаэдр) с постоянной решетки 1.411 nm . При температуре около 165 K происходит полное замораживание хаотического вращения молекул C_{60} вокруг их положений равновесия (при комнатной температуре частота вращения достигает 10^{12} Hz). Фуллерены C_{60} при комнатной температуре укладываются в гранцентрированную кубическую структуру с постоянной решетки, равной 1.415 nm . Кристалл из фуллеренов C_{70} имеет объемно-центрированную кубическую решетку с незначительной долей гексагональной фазы.

5. Упорядочение. В открытых системах агрегатное состояние или структура существования (различаются степенями упорядоченности и разной симметрией) выбираются в соответствии с внешними условиями. Эти явления связаны с тем, что суммарная энтропия системы может быть уменьшена за счет отдачи ее части во внешнюю среду, при этом возрастает степень упорядоченности внутри объема и возникают новые образования – домены. Самоорганизация [22] возникает в «закритической» области, а самоорганизующиеся структуры являются результатом взаимосвязи между внутренним состоянием открытой диссипативной системы и внешними условиями. Значительное отклонение от равновесного состояния сопровождается разрушением старой и формированием новой структуры. Последняя структура возникает при когерентном (кооперативном, согласованном) поведении элементов вне зависимости от природы диссипативной системы. Среди возникающих структур выделяют временные, пространственно-временные и про-

пространственные образования, а по изменению их состояния с течением времени – стационарные, квазистационарные и нестационарные. Пространственными образованиями являются структуры Тьюринга [23], временными явлениями – автоколебания, пространственно-временными – волны. Структуры Тьюринга возникают в химически активных системах, которые характеризуются диффузионным подводом компонентов.

В качестве примера рассмотрим автокатализ одного из компонентов (активатора) системы с подавлением его производства другим (ингибитором). Активация производства одного из компонентов вызывает в химической системе распространение возмущений гауссового типа, которые гасятся производством ингибитора [1]. В свою очередь, рост концентрации ингибитора вызывает распространение обратной волны возмущений, подавляемой повышением концентрации активатора. Возникновение нелинейности в поведении химической системы проявляется в торможении химических реакций и в солитоноподобных всплесках концентраций компонентов (рис. 7).

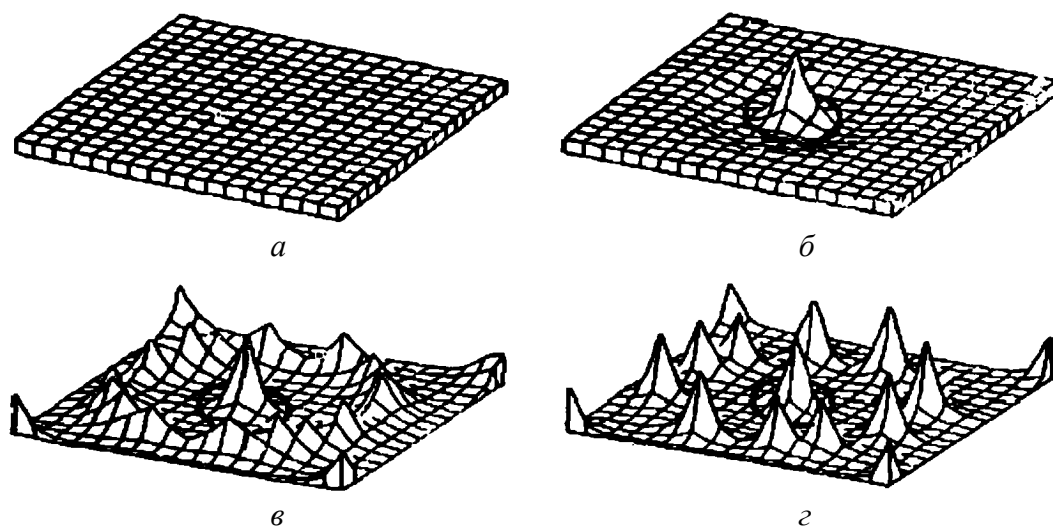


Рис. 7. Временная эволюция солитоноподобных решений в химически активной системе, ограниченной диффузией [32]: $a - t_0$, $б - t_1 > t_0$, $в - t_2 > t_1$, $г - t_3 > t_2$

Процесс торможения химической реакции сопровождается образованием новой диссипативной структуры, более приспособленной к новым условиям существования. Солитоноподобные волны активатора распространяются быстрее, чем происходит движение отдельных частиц в обычном диффузионном процессе. Следовательно, солитоны перемещаются в соответствии с механизмом бегущей волны и являются высокоэффективными переносчиками информации на малые расстояния в виде конечных изменений концентрации активатора (рис. 7,б–г). Такой «инфекционный» эффект указывает на то, что солитонный механизм передачи «химических текстов» преобладает над остальными способами, если сообщение надо доставить на расстояние в несколько сантиметров за время порядка нескольких минут [24]. Диф-

фузионный процесс значительно ускоряется при создании периодического потенциального профиля (рэтчет-эффект) и его индуцирования шумом [25], причем эффективный коэффициент диффузии определяется не высотой профиля, а крутизной ($U(x)/dx$) потенциальной кривой.

Другой системой, в которой наблюдаются солитоноподобные решения, являются ансамбли наночастиц из магнитных материалов. Однодоменность магнитных наночастиц связана с возрастанием удельного вклада поверхностной энергии границ между доменами, которая превышает объемную энергию собственного магнитного поля образца [26–28]. При определенном размере кластера весь его объем занимает один домен, т.е. он превращается в наноскопический постоянный магнит (впервые этот эффект был предсказан Френкелем и Дорфманом [29]). Ансамбли магнитных нанокластеров могут образовывать решетки с постоянными периодической структуры 100–200 нм [30,31] (рис. 8). При превышении размером магнитной наночастицы характерного размера доменной границы перемагничивание решетки происходит путем образования, движения и исчезновения доменных границ (топологических доменов или кинков) [27]. Если размер магнитной наночастицы превышает характерную длину обменного взаимодействия, то неоднородное перемагничивание осуществляется путем образования вихрей [27,32], параллельно силовым линиям которых ориентируются спины. При повышении температуры энергетический барьер для переориентации магнитных моментов наночастиц может преодолеваться за счет тепловых флуктуаций.

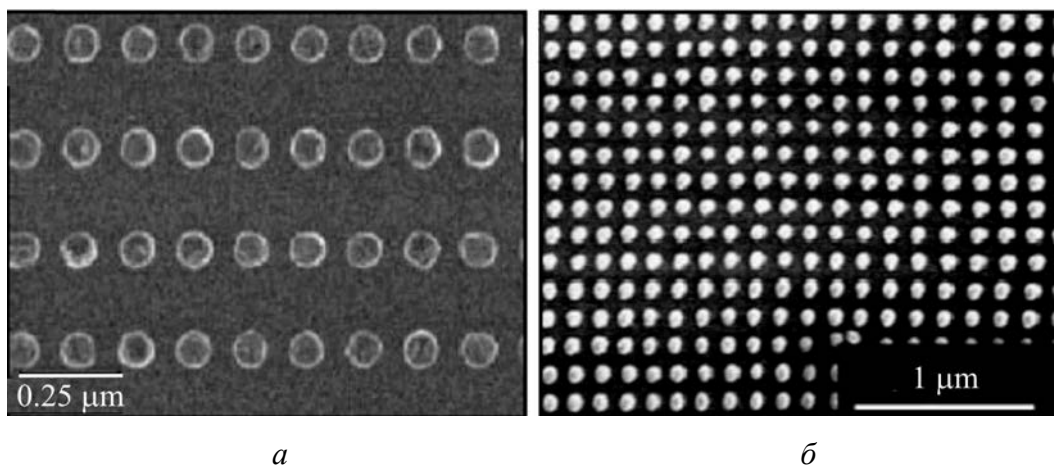
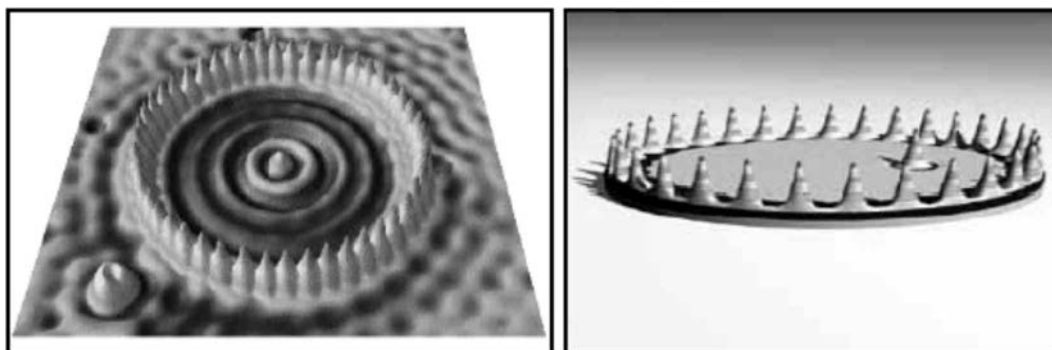


Рис. 8. Решетки ансамблей наночастиц в супермаллоэ $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{14}\text{Mo}_5$ [30] (а) и CoCrPt (б) [31]

Третьим примером образования солитоноподобных структур является нанотехнологическая сборка конструкций с применением зондов сканирующих туннельных микроскопов. Управление прилипанием адсорбированных атомов к игле зонда осуществляется путем изменения напряжения, подаваемого на зонд. Захваченный атом можно оставить в любой точке поверхности, увеличивая расстояние между зондом и поверхностью и группи-

руя адатомы в любые конструкции. Для предотвращения термодиффузии адатомов и сохранения чистоты поверхности манипуляции проводят при температуре жидкого гелия в условиях сверхвысокого вакуума. Технология позволяет собирать структуры типа «квантовый загон» (рис. 9,а), которые подобны организации солитонов на поверхности магнитной жидкости (рис. 9,б) или солитонам в химически активных системах (см. рис. 7).

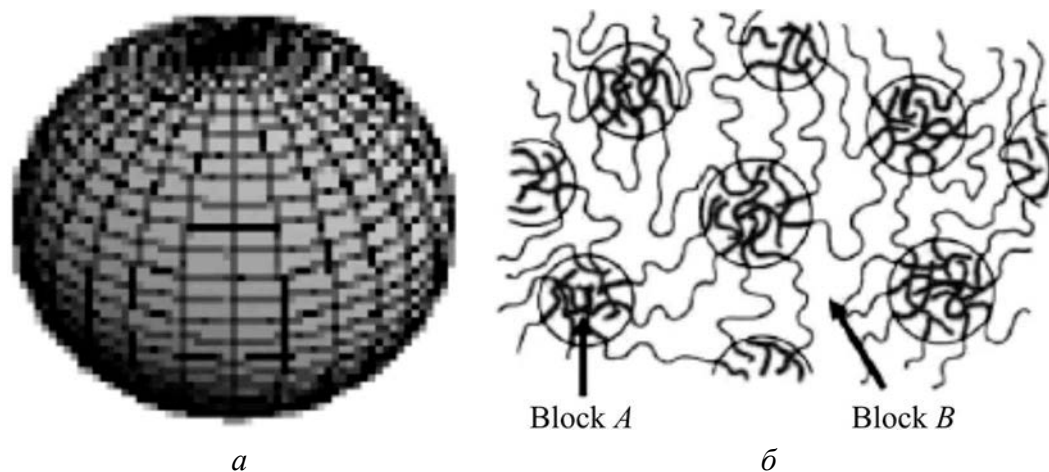


а

б

Рис. 9. «Квантовый загон» из 48 атомов железа на поверхности меди (а) [33] и солитоны на поверхности магнитной жидкости (б) [4]

6. Глобуляризация. Стремление вещества принять сферическую форму (глобуляризация) пронизывает все масштабные уровни организации материи: от сферической формы основного состояния электрона в атоме водорода (рис. 10,а) до образования стеклообразных фаз в растворах сополимеров (рис. 10,б). Этот эффект связан с тем, что сфера обладает наименьшим отношением площади к объему. Например, реальные полимеры всегда имеют



а

б

Рис. 10. Вид основного состояния электрона в атоме водорода при $B = 0$ (а) и модель микрофазного расслоения в системе полистирол–полибутадиен (согласно А.Р. Хохлову) (б): блок А – стеклообразные области (полистирол), блок В – высокоэластичная матрица (полибутадиен)

аморфно-кристаллическую структуру, обладают малой энтропией, поэтому даже слабые взаимодействия приводят к самоорганизации и упорядочению полимерных цепей. Полимерные макромолекулы редко смешиваются друг с другом, поэтому даже малое несоответствие в макромолекулах приводит к их микрофазному расслоению с образованием сфероидальных стеклообразных фаз (рис. 10,б). Возникающие структуры микрофазного расслоения в системах полистирол–полиизопрен–полистирол, полистирол–полиизопрен, полистирол–сополимер этилена и бутилена показаны на рис. 11. Образование доменной, лабиринтной и слоистой структур характерно для систем с самоорганизующимися процессами [4]. Склонность полимерных цепочек к самоорганизации, глобуляризации, выстраиванию в линии, заполнению доступного пространства и другие характеристики делают полимеры *макроаналогом* наночастиц.

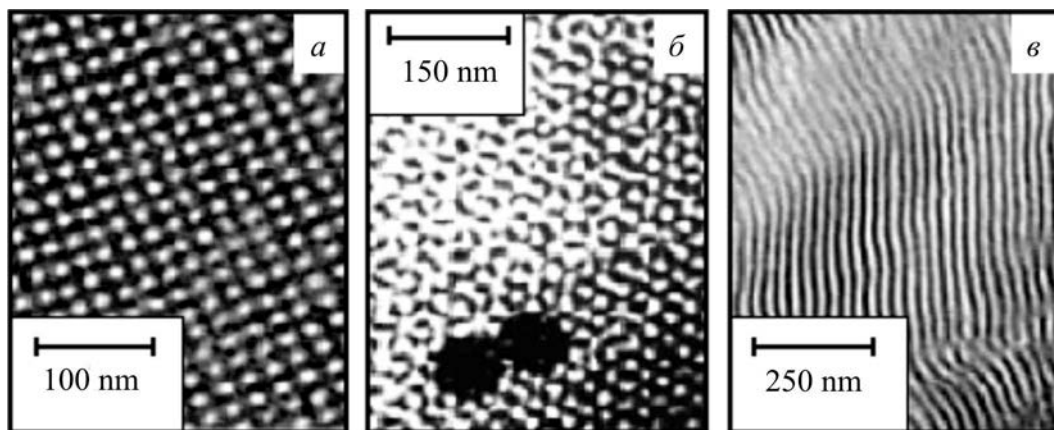


Рис. 11. Микрофазные расслоения в растворах сополимеров: полистирол–полиизопрен–полистирол (а); полистирол–полиизопрен (б); полистирол–сополимер этилена и бутилена (в)

Другим примером глобуляризации может служить поведение в жидкостях липидных молекул, входящих в состав биомембран. Липиды состоят из электрически заряженной полярной головки и нейтрального хвоста, образованного жирными кислотами (рис. 12,а). Полярная головка может нести отрицательный заряд или быть нейтральной, если несет сразу оба электрических заряда. Неполярные хвосты липидов обуславливают их хорошую растворимость в жирных средах и органических растворителях. В водной среде липиды образуют мицеллы (рис. 12,б), при этом гидрофобные хвосты липидов располагаются в центре мицеллы, а полярные головки – снаружи, для соприкосновения с водой. В масле липиды образуют зеркальную структуру: их гидрофильные головки располагаются во внутренней части обращенной мицеллы, а *липофильные* (притягивающиеся к жиру) хвосты торчат наружу. Липиды относятся к *поверхностно-активным веществам* (ПАВ).

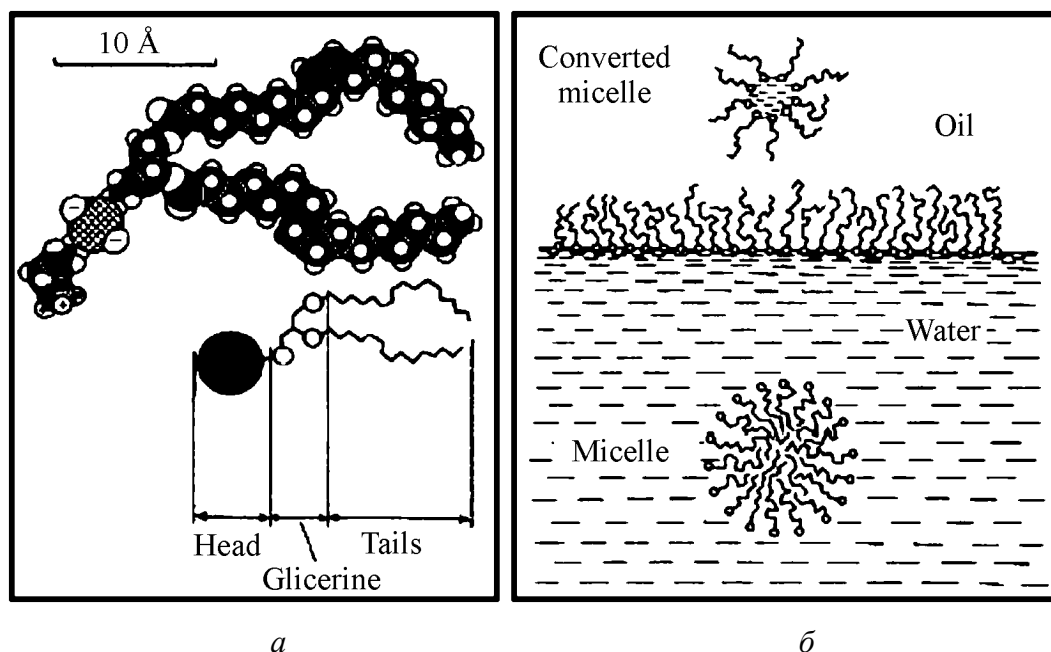


Рис. 12. Строение молекул фосфолипида (а) и их реакция на воду и масло (б) [42]

Молекулы ПАВ адсорбируются на границе раздела двух несмешиваемых сред, уменьшают поверхностное натяжение и способствуют повышению растворимости одних компонентов в других. Молекулы ПАВ характеризуются безразмерным параметром упаковки [35,36]:

$$\rho = \frac{V_T}{L_T A_H}, \quad (19)$$

где V_T и L_T – объем и длина углеводородного хвоста, A_H – площадь полярной головки. При значении параметра $\rho < 1/3$ мицелла принимает сферическую форму, при $1/3 < \rho < 1/2$ – цилиндрическую, а при $1/2 < \rho < 1$ – преобразуется в везикулу, в структуре которой присутствует бислои, формирующийся на границе раздела несмешиваемых сред при $\rho = 1$. Липидный бислои состоит из доменов в том случае, когда он образован несмешиваемыми фазами, например гелевой и жидкокристаллической. Если параметр ρ превышает единицу, то формируется *обращенная мицелла* (рис. 12,б). Повышение концентрации мицелл до определенной пороговой величины вызывает преобразование истинного раствора в *коллоидный (мицеллярный)*. Мицеллярные растворы используют в качестве эффективных моющих средств.

4. Диссипативные структуры

7. Структурирование. Изменение внешних условий существования приводит к ответной реакции открытой системы в виде течений, перемещений, электро- и теплопроводности, а также других движений. При достижении критических значений градиентов той или иной термодинамической силы существенное отклонение от равновесия сопровождается возникновением

новых структур (лабиринтная магнитная структура преобразуется в цилиндрические магнитные домены, конвективные потоки в жидкости порождают ячейки Рэля–Бенара, в ламинарном течении возникают турбулентные вихри и т.п.). Кинетические переходы происходят за счет изменения как микроскопических состояний системы, так и градиентов коллективных характеристик исследуемой системы.

Достижение *управляющими параметрами* (кинетическими коэффициентами) критических значений приводит к бистабильности и бифуркациям (возникают достаточно сложные автоколебания между двумя стационарными состояниями, например периодические реакции Жаботинского–Белусова (рис. 13,*а*) [36,37]) с образованием спиральных структур. Лабиринтные

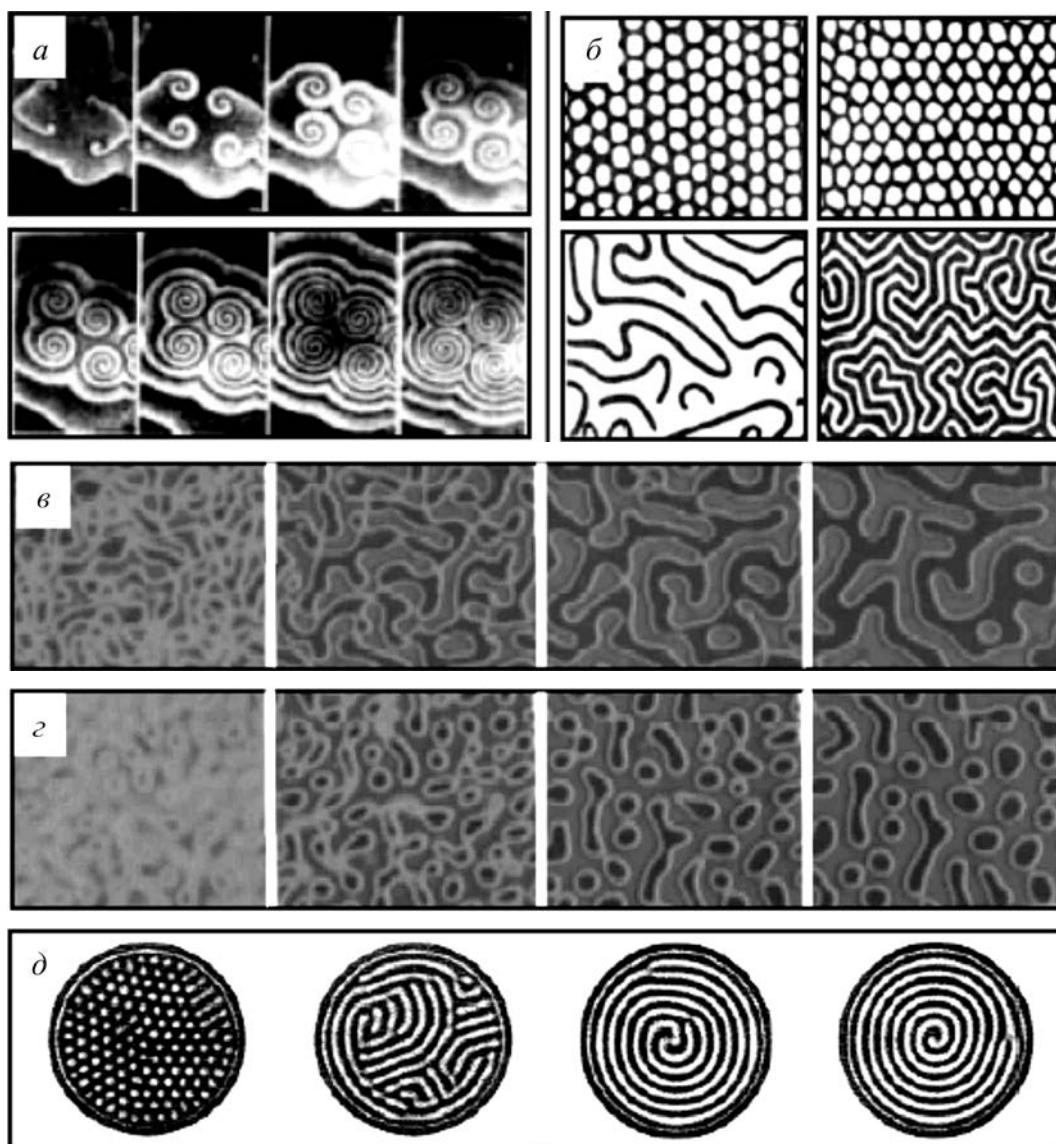


Рис. 13. Образование структур при необратимых процессах: *а* – реакция Белоусова–Жаботинского; *б* – намагничивание ЦМД-пленок; *в* – спиnodальный распад фазы; *г* – нуклеация; *д* – ячейки Рэля–Бенара

построения возникают в магнитных ЦМД-пленках (ЦМД – цилиндрические магнитные домены (рис. 13,б)), при спиновом распаде фазы (рис. 13,в, [38]), нуклеации частиц (рис. 13,з, [38]), при латеральном (боковом) нагреве ячеек Бенара (рис. 13,д, [4]). Если внешние воздействия носят периодический характер, то в химически активной системе формируются гексагональные пространственно-периодические структуры Тьюринга для концентрации активатора (рис. 14). Подобные формирования возникают и в других системах, например вида «брюсселятора» Пригожина–Лефевра [22,39,40] (рис. 15).

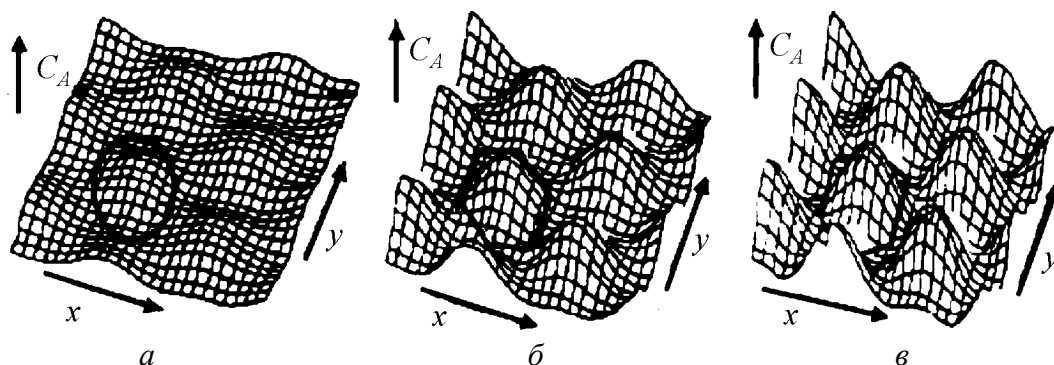


Рис. 14. Эволюционное видоизменение пространственно-периодической гексагональной структуры в реакционно-диффузионной системе при гармонических вариациях внешних условий [1]: $a - t_1 > t_0$, $б - t_2 > t_1$, $в - t_3 > t_2$

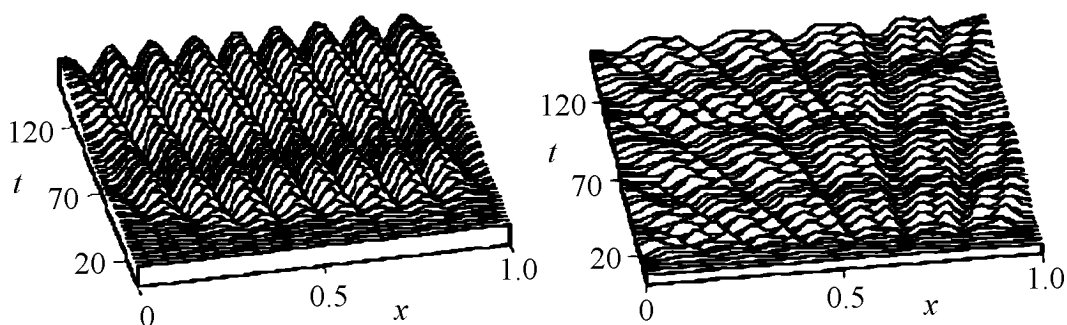


Рис. 15. Структуры Тьюринга в модели «брюсселятора»

Универсальность синергетических закономерностей проявляется в виде образования гексагональных ячеек при достижении градиентом физической величины критического значения в том случае, когда одна из поверхностей системы свободна (рис. 16). В хаотических системах при этом возможно появление упорядоченных областей или изменение внутреннего устройства.

В частности, гексагональные ячейки наблюдаются при производстве пористого алюминия. Уникальность структуры пористого анодного оксида алюминия состоит в том, что она позволяет изготавливать наноразмерные элементы с различной геометрией (столбчатые, нитевидные, конусообразные, пирамидальные и др.) [41]. Такие элементы невозможно воспроизвести известными методами микрообработки, в частности нанолитографией.

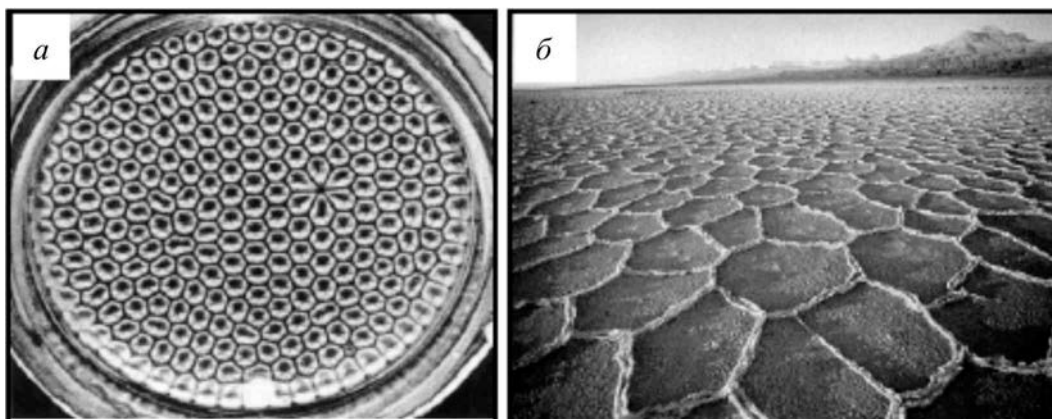


Рис. 16. Ячейки Бенара, возникающие в подогреваемом слое жидкости (а), и гексагональные солевые структуры высыхающего озера (б) [4]

Изменяя состав электролита и режимы электрохимического травления, можно получать полости с размером от нескольких нанометров до десятков микрометров, вертикально расположенные поры на одинаковом расстоянии друг от друга, добиваться высокой воспроизводимости характеристик рабочего режима, геометрии пор и формы ячеек (рис. 17). Процесс травления обладает скейлинговой инвариантностью, т.е. достаточно легко переносится на образцы с бóльшей площадью.

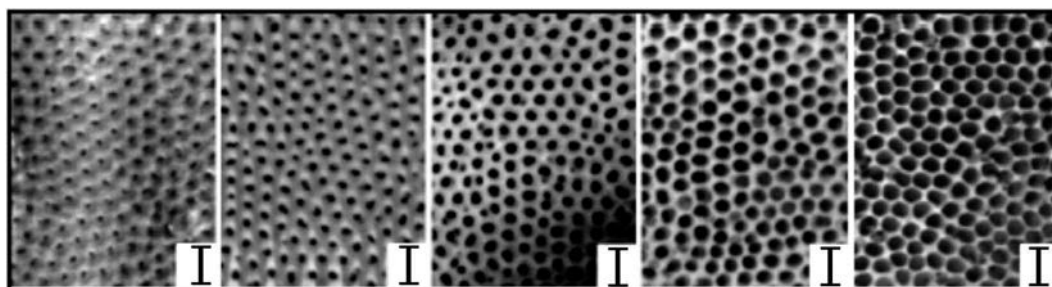


Рис. 17. Пористый оксид алюминия с размером пор от нескольких нанометров до десятков микрометров. Масштаб равен 200 nm

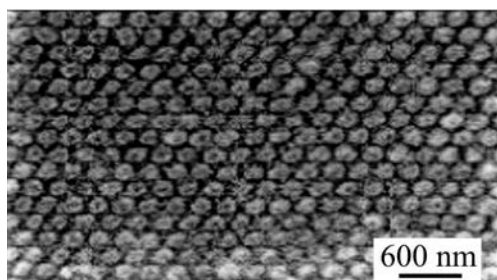


Рис. 18. Мезоскопические структуры из серебряных точек на кремниевой подложке, полученные осаждением через маску из пористого оксида алюминия [42]

Интерес к пористому оксиду алюминия связан с возможностью формирования наноструктур на его основе: наноточек, нанонитей, столбиков, рельефных поверхностей, сеток и мембран. Например, регулярная сеть гексагональных ячеек (рис. 17) может использоваться в качестве селективной маски для формирования серии мезоскопических структур из одного вещества на подложке из другого материала (рис. 18). Такие и аналогич-

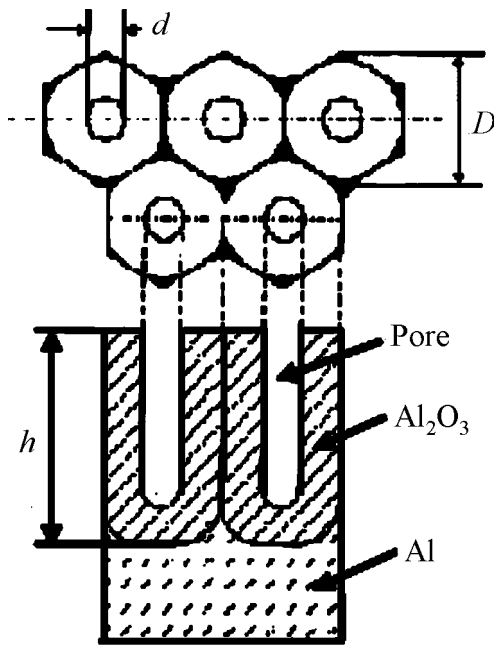


Рис. 19. Ячеистая структура нанопористого оксида алюминия [42]

В начальный период времени ячейки будут иметь разные размеры, однако по мере достижения стационарного состояния градиенты анионов и катионов принимают критические значения, способствующие выравниванию радиусов полусфер и формированию гексагональных ячеек Рэлея–Бенара (рис. 19) [43]. Оксид алюминия нарастает на стенках шестиугольной призмы с высотой h и диаметром D , а пора с диаметром d растет вдоль ее оси симметрии. Время возникновения и формирования ячеистой структуры зависит от типа используемого электролита и определяется временем достижения током минимального значения при постоянном напряжении. Поры преимущественно растут в оксидной пленке, по мере увеличения более развитые поры поглощают менее развитые полости. После длительного промежутка времени в областях соприкосновения вершин гексагонов образуются треугольные столбики алюминия. На репликах с поверхности пористого оксида алюминия они выглядят темными участками так же, как и поры. Металл из треугольных столбиков расходуется на полное смыкание шестиугольников. В силу того, что в местах соприкосновения гексагонов плотность тока превышает ее значение в других точках, процесс оксидирования в них протекает быстрее. Это явление приводит к тому, что круговое сечение поры приобретает вид шестиконечной звезды («звезда Давида»).

ные им наноструктуры представляют значительный интерес при производстве фотографических и эмиссионных приборов, фильтров, мембран, устройств опто- и нанoeлектроники, а также сенсоров. На поверхности алюминиевой пластины зародышами для образования пор являются места выхода дислокаций на поверхность, границы зерен, структурные дефекты, линии скольжения и другие неоднородности. В силу случайного и хаотичного распределения неоднородностей на поверхности пластины места зарождения пор также случайны, хаотичны и не поддаются упорядочению. Совместно с ростом пор начинает нарастать и новый оксидный слой, который имеет ячеистую структуру (ячейка имеет вид полусферы).

5. Заключение

Исследования нелинейных и неравновесных систем, подобие и аффинность их геометрического строения, вырожденность процессов случайных

блужданий отдельных частиц и их кооперативного поведения, преобразование структур разных по своей природе систем при достижении градиентами той или иной физической величины порогового значения ставят *проблему выделения классов универсального поведения*. Классы должны отображать виды процессов поиска сложной системой стационарных состояний, выбора архитектуры строения и упорядоченных структур, а также переходы между ними. Приведенные примеры наглядно демонстрируют, что большинство природных процессов опираются не на геометрию Евклида, а на фрактальное строение, соответствующее динамическому равновесию. Классификация объектов, явлений и процессов по типам универсальности может послужить аксиоматической базой новой физической парадигмы.

1. Г. Хакен, Синергетика, Мир, Москва (1980).
2. Г. Хакен, Синергетика. Иерархии неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах, Мир, Москва (1985).
3. Г. Хакен, Информация и самоорганизация. Макроскопический подход к сложным системам, Мир, Москва (1991).
4. С.В. Терехов, Введение в синергетику, Цифровая типография, Донецк (2009).
5. Б. Мандельброт, Фрактальная геометрия природы, Институт компьютерных исследований, Москва (2002).
6. Р. Кроновер, Фракталы и хаос в динамических системах. Основы теории, Постмаркет, Москва (2000).
7. С.В. Терехов, Фракталы и физика подобия, Цифровая типография, Донецк (2011).
8. В.С. Иванова, А.С. Баланкин, Синергетика и фракталы в материаловедении, Наука, Москва (1994).
9. В.В. Зосимов, Л.М. Ляшнев, УФН **165**, 361 (1995).
10. Г.В. Козлов, В.У. Новиков, Синергетика и фрактальный анализ сетчатых полимеров, Классика, Москва (1998).
11. В.У. Новиков, Г.В. Козлов, Успехи химии **69**, 378 (2000).
12. Е. Федер, Фракталы, Мир, Москва (1991).
13. L. Olsen, Advances in mathematics **116**, 82 (1995).
14. M.F. Barnsley, Superfractals, Cambridge University Press, Cambridge (2006).
15. В.В. Погосов, Е.В. Васютин, В.П. Курбацкий и др., Наносистемы, наноматериалы, нанотехнології **5**, 39 (2007).
16. А.В. Кузнецов, Методы математической физики, Учебное пособие, Изд-во ЯГУ им. П.Г. Демидова, Ярославль (2003).
17. В.Я. Арсенин, Методы математической физики и специальные функции, Наука, Москва (1974).
18. С.К. Годунов, Уравнения математической физики, Наука, Москва (1979).
19. Н.А. Азаренков, А.А. Веревкин, Г.П. Ковтун, Основы нанотехнологий и наноматериалов, Учебное пособие, Изд-во ХНУ, Харьков (2009).
20. Ю.А. Осипьян, В.В. Кведер, Металловедение № 1, 2 (1997).
21. В.Ф. Мастеров, Сорровский образовательный журнал № 1, 92 (1997).

22. Г. Николис, И. Пригожин, Самоорганизация в неравновесных системах, Мир, Москва (1979).
23. А.М. Тьюрин, Phil. Trans. Roy. Soc. **B237**, 37 (1952).
24. В.Д. Русов, В.А. Тарасов, С.М. Ушеренко, М.М. Овсянко, Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение» № 4, 3 (2001).
25. Д.В. Нестеренко, В.В. Котляр, Компьютерная оптика **32**, № 1, 23 (2008).
26. С.В. Вонсовский, Магнетизм, Наука, Москва (1971).
27. W. Wernsdorfer, Adv. Chem. Phys. **118**, 99 (2001).
28. Т.В. Лютый, Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук, Изд-во СумГУ, Сумы (2004).
29. Я.Г. Дорфман, Беседы о магнетизме, Изд-во АН СССР, Москва–Ленинград (1950).
30. R.P. Cowburn, A.O. Adeyeye, M.E. Welland, New Journal of Physics **1**, 16.1 (1999).
31. С. Haginoya, S. Heike, M. Ishibashi, K. Nakamura, and K. Koike, J. Appl. Phys **85**, 8327 (1999).
32. В.П. Кравчук, Д.Д. Шека, ФТТ **49**, 1834 (2007).
33. <http://www.almaden.ibm.com/vis/stm/>
34. <http://biology-of-cell.narod.ru/cytoplasm13.html>.
35. П.М. Зоркий, И.Е. Лубнина, Вестник МГУ. Сер. 2. Химия **40**, 300 (1999).
36. А.М. Жаботинский, Концентрационные автоколебания, Наука, Москва (1974).
37. А.М. Жаботинский, Колебания и бегущие волны в химических системах, Мир, Москва (1988).
38. Д.О. Харченко, В.О. Харченко, А.В. Дворниченко, Процессы упорядочения сложных систем, Наукова думка, Киев, (2011).
39. А.И. Лаврова, Е.Б. Постников, Ю.М. Романовский, УФН **179**, 1327 (2009).
40. А.П. Кузнецов, С.П. Кузнецов, Н.М. Рыскин, Нелинейные колебания, Гос. изд-во физ.-мат. лит., Москва (2002).
41. С.П. Зимин, Сорровский образовательный журнал **8**, № 1, 101 (2004).
42. В.М. Анищик, В.Е. Борисенко, С.А. Жданок и др., Наноматериалы и нанотехнологии, Изд. центр БГУ, Минск (2008).
43. В. Эбеллинг, Образование структур при необратимых процессах. Введение в теорию диссипативных структур, Институт компьютерных исследований, Москва–Ижевск (2003).

С.В. Терехов

УНІВЕРСАЛЬНІСТЬ СИНЕРГЕТИЧНИХ ЗАКОНІВ.

І. ЗАГАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАСШТАБНИХ РІВНІВ

Продемонстрирована універсальність синергетичних закономірностей визначається подібністю або афінністю фізичних явищ і процесів, використанням однорідних функцій при їх опису, використанням рівняння Лапласа для опису структур дендритного типу. Утворення кластерів та їх прагнення набути форми правильних многогранників вказує на спільність механізмів побудови стабільних кластерів і гетерофазних систем. Прагнення прийняти геометрично та енергетично вигідну форму призводить систему до сфери. Реакція нерівноважної системи на зовнішні

умови, що змінюються, зводиться за певних умов до перетворень структури, тобто до пошуку оптимальної будови. Досягнення потоком фізичної величини критичного рівня викликає формування дисипативних структур гексагонального, лабіринтового, спірального та інших видів.

Ключові слова: синергетика, фрактали, кластери, солітони, домени, глобули, дисипативні структури

S.V. Terekhov

UNIVERSALITY OF SYNERGETIC LAWS.

I. GENERAL CHARACTERISTICS OF SCALE LEVELS

Universality of synergetic conformities to law has been demonstrated, being shown up in similarity or affinity of physical phenomena and processes, use of homogeneous functions at their description, application of Laplace's equation to description of dendritic type structures. Formation of clusters and their tendency to take the form of correct polyhedrons specifies on commonness of mechanisms of construction of stable clusters and multiphase systems. Aspiration of the system for geometry and power efficiency of the form brings it to the sphere. The reaction of a non-equilibrium system on changing external conditions comes at certain terms to structure transformations, i.e. to the search of optimal structure. The flow of a physical quantity achieving a critical level generates dissipative structures of hexagonal, labyrinth, spiral and other types.

Keywords: synergy, fractals, clusters, solitons, domens, globules, dissipative structures

Fig. 1. Cantor's «dust»

Fig. 2. VAD («coulomb stair») for structures on spherical metallic clusters (*a*) [15] and «devil stair» for the homogeneous Cantor's set at the endless number of iteration steps (*b*) [12]

Fig. 3. VAD for structures on semiconductor quantum points (*a*) [15] and «devil stair» for the heterogeneous Cantor's set at the endless number of iteration steps (*b*) [12]

Fig. 4. Treelike multifractal of Witten–Sander (*a*), aggregate of chemically deposited cobalt (*b*) and pattern of a colony of bacteria (*c*)

Fig. 5. Carbon molecules with the different number of atoms: *a* – 20, *b* – 40, *c* – 60, *d* – 120, *e* – 300, *f* – 400, *g* – 600, *h* – 1500

Fig. 6. A crystal (*a*) [19] and a cell (*b*) of fullerite C₆₀

Fig. 7. Temporal evolution of soliton-like solutions in a chemically active system limited by diffusion [24]: *a* – t_0 , *b* – $t_1 > t_0$, *c* – $t_2 > t_1$, *d* – $t_3 > t_2$

Fig. 8. Lattices of ensembles of nanoparticles in a superalloy of Ni₈₀Fe₁₄Mo₅ [30] (*a*) and in CoCrPt (*b*) [31]

Fig. 9. «Quantum pound» from 48 atoms of iron on the surface of copper (*a*) [33] and solitons on the surface of a magnetic liquid (*b*) [4]

Fig. 10. Image of ground-state of an electron in the atom of hydrogen (*a*) and the model of micro-phase stratification in the system of polystyrene–polybutadiene (by A.R. Khokhlov) (*b*): block *A* – glassy areas (polystyrene), block *B* – matrix of high elasticity (polybutadiene)

Fig. 11. Micro-phase stratifications in solutions of copolymers: polystyrene–polyisoprene–polystyrene (*a*); polystyrene–polyisoprene (*b*); polystyrene–copolymer of ethylene and butylene (*c*)

Fig. 12. Structure of molecules of phospholipide (*a*) and their reaction on water and oil (*b*) [42]

Fig. 13. Formation of structures at irreversible processes: reaction of Belousov–Jabotinski (*a*); magnetizing of magnetic bubble domain tape (*b*); spinodal decomposition of a phase (*c*); nucleation (*e*); cells of Rayleigh–Benar (*d*)

Fig. 14. Evolutional modification of spatially-periodic hexagonal structure in the reactionary-diffusive system at harmonic variations of external conditions [1]: $a - t_1 > t_0$, $b - t_2 > t_1$, $c - t_3 > t_2$

Fig. 15. Turing structures in the model of «brusselyator»

Fig. 16. Benar cells, arising up in the layer of liquid warmed up (*a*), and hexagonal salt structures of lake drying out (*b*) [4]

Fig. 17. Porous aluminium oxide with the size of pores from a few nanometres to tens of micrometres. The scale is 200 nm

Fig. 18. Mesoscopical structures from silver points on silicium substrate, which are obtained by deposition through a mask from the porous aluminium oxide [42]

Fig. 19. Cellular structure of nanoporous aluminium oxide [42]