

## Активная среда.

# I. От физико-химических к социальным системам

В.А. Твердислов

Кафедра биофизики физического факультета МГУ им. М.В.Ломоносова

*"Рост научного знания 20-го века быстро стирает грани между отдельными науками. Мы все больше специализируемся не по наукам, а по проблемам"*

В.И. Вернадский

*"При изучении наук примеры полезнее правил"*

И. Ньютон

Этому правилу следует автор статьи

### Аннотация

Представления об активных средах, сопрягающих разнородные процессы энергетически и информационно во времени и пространстве, позволяют рассматривать с общих позиций конкретные механизмы самоорганизации в физико-химических, биологических, экологических и социальных системах (часть I):

1. Сосредоточенные и распределенные физико-химические и биологические системы, активная среда, автоколебания, автоволны.
2. Биоценозы почвы как активная среда. Автоволны в трофических цепях.
3. Ноосфера как сопряженные экологическая и экономическая активные среды. Концепция "устойчивого развития" на стадии глобализации.

Далее в части II речь пойдет о поверхности Мирового Океана как активной среде, о проблеме происхождения предшественников живых клеток и о молекулярных машинах.

## Введение

Многие достижения последних лет в области физики, химии, биологии, биотехнологии, экологии, медицины явным или неявным образом связаны с представлениями об "активных средах", способных к пространственно-временной самоорганизации. Эти представления позволили создать модели, описывающие такие несхожие процессы как работа лазеров, периодические химические реакции, распространение волн кристаллизации в переохлажденных жидкостях, распространение нервного импульса, свертывание крови, взаимодействие популяций, распространение эпидемий и т.д. [1 - 7]. В целом данный

подход не должен быть обязательно тесно связан с рассмотрением физической основы систем, но призван отражать общую синергетическую природу их поведения [8, 9].

Отдельные физические, физико-химические и некоторые биологические системы в рамках представлений об активных средах могут рассматриваться как изолированные, самодостаточные объекты. Однако значительное число биологических объектов, биоценозы, экосистемы, а также социальная сфера общества в принципе должны рассматриваться как иерархии сопряженных протяженных систем, каждая из которых является активной средой, поддерживающей развитие происходящих в ней процессов на всем ее пространстве [10]. Основой процессов самоорганизации в активных средах является возможность возникновения в них автоколебательных и автоволновых режимов, приводящих к эволюционированию систем, их пространственно-временной регуляризации.

## **1 Сосредоточенные и распределенные физико-химические и биологические системы, активная среда, автоколебания, автоволны**

*"Правильно в философии рассматривать сходство даже в вещах, далеко отстоящих друг от друга"*

*Аристотель*

Многие динамические системы, независимо от того являются ли они физическими, химическими или биологическими, как правило, могут быть описаны в традиционных терминах "реакция - диффузия" (локальное прохождение некоего процесса сопровождается взаимодействием реакционных центров в пространстве) [1, 2, 4 - 6, 9]. Пусть в какой-то области пространства протекает некий процесс ("реакция") со своим характерным временем (это может быть, к примеру, время смены поколений бактерий в биореакторе или производственный процесс). Между соседними областями происходит перенос компонентов или продуктов процесса. Если характерное время основного процесса значительно больше времени переноса, то мы имеем дело с сосредоточенной или точечной системой (или с идеальным, точечным реактором). Процессы в такой системе синхронны (синфазны). Со стороны она выглядит, как единое целое, хотя в ней могут происходить непостоянные во времени процессы, например, колебательные. Когда же времена переноса сопоставимы с характерными временами самих процессов или превышают их, система становится распределенной системой.

Распределенные системы являются пассивной средой, когда перенос массы или какого-либо возмущения, к примеру, волны, направляется из определенной точки (точек) и оттуда же питается энергией. Сама же среда пассивно относится к переносу, не поддерживая его энергией и допуская явление интерференции, т.е. сложения и взаимопогашения волн. Примером образования регулярных структур являются диссипативные системы, исходно термодинамически неравновесные. Запас свободной энергии

может быть, к примеру, обеспечен градиентом концентрации какого-либо компонента смеси, а его диффузия может сопровождаться образованием нерастворимого осадка. Известно образование регулярных равновесных структур [4, 9] - слоев Лизеганга ("ритмических осадков" в пробирке), кольцевых (рис.1А, 1Б) или спиральных (рис.3А) застывших волн. В 1896 году немецкий химик Рафаэль Лизеганг наблюдал, что вокруг кристалла нитрата серебра, помещенного в желатиновый гель, содержащий дихромат калия, образуются концентрические кольца дихромата серебра. Здесь мы имеем дело с гетерогенным процессом, а сама периодичность обусловлена последовательным переходом раствора из метастабильного состояния в лабильное и регулярной кристаллизацией малорастворимых веществ.

Эти известные с прошлого века структуры могут служить "экспресс-моделью" формирования рисунчатых халцедонов - агатовых структур с зональной окраской. На рис. 1В видны статические волновые структуры в уральском агате с множественными центрами генерации волн. На рис. 1Г изображен агат, на котором сверху и внизу видны угловые стыки полос, являющиеся результатом взаимодействия волновых пакетов, исходящих от независимых центров генерации волн.

Долгое время структуры Лизеганга служили упрощенной, но достаточно наглядной моделью биологического морфогенеза.

Примеры развивающихся концентрических структур представлены на рис. 2А, 2Б: Годовые кольца на спиле ствола дерева и годовые кольца в циклоидной чешуе костистых рыб - системы с "вынужденным" морфогенезом.

Способность к более высокому уровню динамической самоорганизации распределенные системы приобретают, когда они становятся активной средой [1, 4 - 6]:

1. Термодинамически неравновесная активная среда содержит распределенный источник или запас энергии. Ресурс может быть однократным или возобновляемым извне.

2. Локальные кинетические свойства среды определяются параметрами нелинейного трансформатора энергии.

3. Пространственно-временная фазировка кинетических переменных в среде определяется как локальными нелинейными взаимодействиями, так и процессами переноса. Каждый элемент пространства может быть автоколебательной системой, триггером, ждущим импульсным генератором и т.д.

4. В активных средах могут распространяться незатухающие возмущения - волны активности, автоволны. Энергия волной не переносится, а высвобождается.

5. В однородной среде скорость распространения, длина и форма автоволны не изменяются и не зависят от начальных и граничных условий.

6. Из-за существования "рефрактерного хвоста" автоволны не интерферируют и не отражаются.

7. Источники концентрических волн - "ведущие центры" ("водители ритма") возникают спонтанно и возбуждают волны разной длины. Длина волны спиральных волн одинакова, она же является минимальной для концентрических волн, у которых она

может быть больше в несколько раз.

8. В определенных условиях распространяющееся возмущение может иметь экситонный характер [6].

Распространение в пространстве процессов такого рода хорошо известно в науке. Так бежит фронт горения высушенной травы в степи (однократный ресурс, ежегодно возобновляемый), так бежит волна кристаллизации в переохлажденной жидкости, волна излучения в лазере, так распространяется нервный импульс. Известно много систем разной природы - физической, химической, биологической, в которых возбуждение распространяется подобным образом, не затухая. Распространяющиеся таким способом волны называются автоволнами. В однородной среде они не изменяют скорости и формы импульса.

Наиболее известный пример, который позволяет выделить характерные режимы поведения активной среды - колебательная химическая реакция Белоусова-Жаботинского-Заикина [3 - 6]. Открытая в 1951 году Б.П.Белоусовым, реакция впервые была воспроизведена в 1961 году на кафедре биофизики физического факультета МГУ С.Э.Шнолем, Г.Н.Зацепиной и А.Е.Букатиной. Первыми детальное изучение химизма реакции и автоколебаний выполнили А.М.Жаботинский и В.А.Вавилин, ее пространственно-временного поведения - А.Н.Заикин (все - с той же кафедры). В основе периодического процесса лежит гомогенная окислительно-восстановительная реакция перехода, к примеру, от 3-х валентного церия к 4-х валентному и обратно в присутствии серной кислоты, малоновой кислоты, бромата калия. Эта реакция по своей природе такова, что в каждой точке реактора происходят самопроизвольные осцилляции, сопровождающиеся изменением цвета раствора. Если весь объем реактора быстро перемешивается, система ведет себя, как точечная - осцилляторы связаны перемешиванием. В этом случае во всем объеме наблюдаются синфазные самоподдерживающиеся осцилляции - автоколебания - раствор периодически изменяет цвет.

При отсутствии перемешивания в тонком слое жидкости реакция Белоусова-Жаботинского-Заикина становится распределенной системой - двумерной активной средой, в которой точечные осцилляторы последовательно взаимодействуют друг с другом, что сопровождается появлением распространяющихся концентрических цветных пространственных структур - автоволн (рис. 2В). Эти кольцевые волны распространяются вокруг так называемых водителей ритма - спонтанно возникающих центров колебаний. Распространяясь, автоволны не изменяют своей амплитуды, как это бывает с волнами в пассивной среде, где они затухают (как, например, звуки в воздухе). Автоволны не проходят друг сквозь друга, а аннигилируют при столкновении. Водитель ритма с самой высокой собственной частотой постепенно "съедает" всех своих конкурентов и втягивает всю систему в работу со своей частотой вплоть до полного истощения запаса свободной энергии в системе.

Замечательной биологической аналогией этой физико-химической системе могут служить концентрические кольца, образуемые лишайником *Paramelia ctntrifuga* (рис.2Г,

снимок сделан С.Э.Шнолем на Беломорской биостанции МГУ). Концентричность распределения лишайников при их распространении вызвана истощением питательных веществ и их последующей регенерацией на субстрате.

До сих пор речь шла об автоволнах в однородной среде. В неоднородной активной среде происходит искажение волнового фронта, возможен его разрыв, возникновение и размножение спиральных автоволн, т.н. ревербераторов (рис.3Б). Ревербераторы представляют собой сочетание право- и левозакрученных спиралей. В живой природе имеется великое множество примеров односпиральных структур и организмов. Примером могут служить правозакрученные раковины виноградных улиток *Helix pomatia* (рис.3В).

В специальных условиях в активной среде могут образовываться возбужденные движущиеся со скоростью автоволны - квазичастицы экситоны [6].

Химические ревербераторы в управляемых ситуациях могут образовывать вложенные спирали разных порядков. На рис.4А показаны вложенные спирали вплоть до 4-го порядка (реакция Белоусова).

На рис.4Б приведена электронно-микроскопическая фотография среза аксоподии представителя простейших - солнечника *Actinosphaerium eichhorni* [11]. Хорошо видна двойная вложенная спираль, образованная микротрубочками. По-видимому, здесь мы встречаем уже фиксированный результат автоволнового формирования аксоподии. Эволюционный выбор подобной структуры, по-видимому, связан с ее высокой эффективностью для совершения аксоподией поворотов, вращений и укорочения при захвате частичек пищи.

На рис.4В представлена картина спиральной автоволновой самоорганизации так называемых "социальных" амёб *Dictyostelium discoideum*, объединяющихся в определенной фазе жизненного цикла в единый организм под действием специфического аттрактанта цАМФ, выделяемого отдельными клетками [12]. Отмечено волновое движение протоплазмы на представленной стадии морфогенеза, формирующее структуру из вложенных спиралей. Следует заметить, что волновые движения протоплазмы скорее не исключение, а правило. К примеру, в работе Д.П.Николаева и соавторов рассмотрены эксперименты и модели механо- химических автоволн в протоплазме клеток плазмодия *Physarum polycephalum* и в яйцеклетках лягушки *Rana temporaria* [13].

В настоящее время исследован целый ряд биологических систем, в которых формируются концентрические или спиральные автоволновые структуры: в культуре дрожжевых клеток [14], в ретине глаза цыпленка [15], в изолированной мышце желудка [16] и т.д.

Отметим, что не во всех случаях автоволновая система формируется взаимодействующими точечными осцилляторами. Примером такой, отличающейся от рассмотренной, системы может служить развевающийся на древке флаг, который при обдувании его ветром становится распределенной автоколебательной системой, хотя никаких осцилляторов в нем нет. Есть проток ветровой энергии и специальные граничные условия: закрепленный и свободный края флага.

Необычной, но очень интересной автоволновой системой является "интерфазный осциллятор Буравцева". В 1983 году В.Н.Буравцев (выпускник кафедры биофизики физического факультета МГУ) "сконструировал" автоволновую систему с фазовыми переходами первого рода [17]. Схема установки представлена на рис.5А. Водный раствор аммиака выдерживают при температуре ниже температуры замерзания воды (при  $-5^{\circ}\text{C}$ ), но выше температуры замерзания смеси ( $-10^{\circ}\text{C}$ ). За счет испарения аммиака из поверхностного слоя и обеднения им раствора, а также вследствие последующей диффузии аммиака в поверхностный слой из объемной фазы происходят последовательные процессы образования льда и его таяния. Частота колебаний существенным образом зависит от концентрации раствора (рис.5Б). Граница раздела фаз в данном случае является распределенной активной средой, в которой развиваются автоволновые процессы. Впоследствии в приповерхностном слое нами были обнаружены колебания электрического потенциала, синхронные с фазовыми переходами (рис.5В) [18]. На рис.5Г приведены фотографии поверхности раствора на разных стадиях замерзания и таяния.

Следует отметить, что в клеточных мембранах, определяющих возбудимость некоторых клеток и распространение нервного импульса, фазовые переходы в липидах играют важную функциональную роль [19].

В принципе, возможно существование экзотических активных сред, в которых автоволны интерферируют - проходят друг друга насквозь, если, распространяясь, волна не "выедает" всей свободной энергии до ее локальной регенерации. При этом волны могут изменить свою скорость, амплитуду и форму.

Пример трехмерной активной среды, в которой возникают электрические и механические автоволны - сердечная мышца. Существенно, что в сильно неоднородных системах или при рассинхронизации циклов в соседних локусах происходит переход от регулярности и взаимосогласованности к хаотическому автоволновому режиму. Подобное явление наблюдается в сердечной мышце при переходе от стандартного автоволнового режима к хаотическому, т.е. фибрилляции.

Заметим, что не во всех случаях регулярное автоволновое поведение является благом для биологической системы. Так в головном мозге при эпилептическом припадке возникают весьма регулярные волны электрического возбуждения. Более того, по известным данным, многим патологиям предшествует появление строго регулярных колебательных процессов.

Эритроциты относятся к клеткам, способным изменять свою форму. Однако в "дискомфортных" условиях на поверхности эритроцитов могут образовываться статические волновые структуры, абсолютно несвойственные нативным эритроцитам. На рис.6 приведены такие примеры, там же указаны условия, при которых получены волновые профили.

Менее известны двухавтоволновые модели. До сих пор мы говорили об автоволнах одной природы. Однако же многокомпонентная активная среда, в принципе, может обеспечить возникновение и взаимодействие автоволн разной химической природы.

Несколько лет назад Ф.И.Атауллахановым, выпускником кафедры физфака и ныне ее профессором, была высказана автоволновая гипотеза свертывания крови [20]. Было предположено, а затем и подтверждено экспериментально, что рост тромба обеспечивается распространением в крови концентрационной тромбиновой автоволны. При этом в зоне за движущимся фронтом этой волны создаются условия для зарождения еще одной автоволны - волны торможения свертывания. Последняя, двигаясь с большей, чем первая скоростью на некотором расстоянии от места повреждения сосуда настигает тромбиновую волну, останавливая дальнейшее свертывание.

Авторами цитируемой работы обнаружен ранее неизвестный для данной системы феномен, который вытекает из гипотезы о двухавтоволновой природе свертывания - феномен образования слоистых, или кольцевых структур (см. выше). В ходе нормального роста тромба, его остановка, согласно гипотезе, происходит тогда, когда волна ингибитора нагоняет волну тромбина. Ингибитор и тромбин перестают генерироваться, но продолжают диффузионно распространяться, сильно уменьшаясь в своих концентрациях. При этом вокруг тромба возникает зона с повышенной концентрацией ингибитора - "зона торможения". В нормальных условиях эта зона надежно удерживает тромбин в допороговой области концентраций. Однако, как показало рассмотрение математической модели процесса, если несколько изменить кинетические параметры процесса свертывания, например, уменьшить порог активации свертывания для тромбина, может произойти следующее. Тромбин, хоть и выйдет за пределы "зоны торможения" в очень низкой концентрации, но эта концентрация все равно окажется выше пороговой. Это приведет к новому быстрому нарастанию концентрации тромбина и рождению новой волны роста тромба. Вокруг первичного сгустка, на некотором расстоянии от него, начнет расти второй сгусток, отделенный от первого жидким слоем. Процесс может повториться несколько раз, приводя к формированию некой слоистой структуры - многослойного сгустка, в котором чередуются твердые и жидкие слои.

Слоистые структуры были обнаружены экспериментально. Свертывание плазмы крови происходило в тонком слое и инициировалось стеклянным шариком (известно, что стекло сильно активизирует свертывание). Последовательно возникали кольцевые слои твердой фазы.

Ф.И.Атауллаханов считает, что образование тромба, если посмотреть на задачу с общебиологической точки зрения, связано с разделением исходно изотропной среды на две части и формированием между ними четко выделенной резкой границы. Такая задача является типичной при формировании структур многоклеточного организма, при дифференцировке органов в ходе развития. Возможно, механизм, основанный на двух взаимодействующих автоволнах, природа использует при решении задач дифференцировки многоклеточных организмов. Эта заманчивая идея открывает, быть может, новый подход к выяснению механизмов морфогенеза.

Другой пример двухволнового процесса - перистальтика стенок пищевода, желудка, кишечника, мочеточника и других полых органов, волнообразно обеспечивающая пере-

нос их содержимого в дистальном направлении. Встречная автоволна - антиперистальтика - формируется, например, в толстом кишечнике. Движение волны сокращений в оральном направлении обеспечивает удержание содержимого, а также лучшее всасывание воды и ионов.

Представления об активных средах действительно приводят к неожиданным гипотезам. Так, А.Н.Заикиным было высказано достаточно парадоксальное соображение о том, что в биологических системах возможна морфологически недетерминированная связь посредством информационных взаимодействий в активной среде. [6]

## **2 Биоценозы почвы как активная среда.**

### **Автоволны в трофических цепях**

*"Хоть простота приятней людям,  
Но сложное доступней им"*

*Б.Пастернак*

В качестве конкретного примера биологической автоволновой системы рассмотрим систему почвенных биоценозов на уровне трофических (пищевых) цепей. Распределенная модель почвенной трофической цепи, рассматриваемой в качестве активной среды, впервые была представлена в работах, выполненных А.Н.Заикиным и П.С.Ивановым совместно с автором [21, 22].

Необъятные просторы России, значительная протяженность климатических и природных зон, рассеянность трудоспособного населения и хозяйственной деятельности, запределные локальные уровни антропогенного прессинга делают актуальным рассмотрение биоценозов с помощью представлений об активной среде.

По сравнению с атмосферой и водами суши почва как часть окружающей среды гораздо более уязвима в отношении антропогенных воздействий, что обусловлено гетерогенностью ее физико-химической структуры и многочисленностью процессов, ответственных за перемещение различных веществ. Это обстоятельство определяет актуальность теоретического изучения почвенных систем и в то же время заметно усложняет задачу моделирования. Основной результат, которого ожидают от моделей почвы, должен представлять собой оценки характерных пространственных и временных масштабов распространения поллютантов и процессов самоочищения для локальной области с заданными физико-химическими свойствами, указания на возможность существования в почве тех или иных типов динамического поведения и, по возможности, содержать определенные рекомендации по восстановлению исходного состояния данного почвенного биогеоценоза.

При построении модели предполагается, что, во-первых, первичное органическое вещество образуется в поверхностном слое малой толщины, от которого берет начало трофическая цепь, уходящая в глубину; во-вторых, распределение органики по глубине не монотонно и варьирует как в пространстве, так и во времени; в-третьих, в деструкцион-



ном (катаболическом) процессе имеются как биологические, так и физико-химические стадии, в частности реакции химической деградации и переноса с гидродинамическими потоками (часто - турбулентной природы).

При моделировании процессов трансформации органики в почве авторы использовали в качестве "функциональных" блоков не почвенные горизонты, как это делалось ранее, а звенья трофической цепи. Органика передается из блока в блок и частично подвергается минерализации. Фактически модель представляет собой модифицированную распределенную схему Лотки, адаптированную для описания большого (в пределе - бесконечно большого) ансамбля жертв и хищников.

Сама математическая модель подробно изложена в уже упомянутых работах [22, 23]. Мы же остановимся на принципиальных ее положениях и выводах. Модель эквивалентна рассмотрению почвы как активной среды. В этой связи можно было ожидать, что она будет демонстрировать динамические режимы, которые характерны для других активных сред. Уникальной особенностью данной системы является ее принадлежность к активным средам "последовательного типа": энергия, необходимая для возбуждения, передается от одного звена к другому. Длина трофической цепи в различных модификациях базовой модели составляла от нескольких десятков до нескольких сотен звеньев.

Звено трофической цепи состоит из редуцента и редуцируемой органики (в нужной для редуцента фазе переработки). В процентном отношении масса редуцента существенно меньше массы органики и может составлять менее 1%. Редуцент не должен влиять на общую подвижность органической массы звена. Следовательно, подвижность редуцируемой органики зависит, в основном, от коэффициента диффузии и пористости субстанции, в которой перемещается органика.

Вычислительные эксперименты на модельной системе проводились при следующих ограничениях: система однородна, то есть параметры всех звеньев одинаковы, все звенья цепи, кроме первого, являются катаболическими. На первое звено возложены анаболические функции: плотность особей в нем можно считать постоянной в течение заданного интервала времени.

Исходное состояние цепи - стационарное значение некоторых "запальных" концентраций в каждом звене. Короткое возмущение в первом звене вызывает появление бегущего импульса, амплитуда которого при достаточной длине цепи плавно уменьшается до нуля.

В случае продолжительного возмущения в первом звене возможны следующие варианты поведения системы:

- 1) система приходит к состоянию гладкого уменьшения плотности органики вдоль цепи;
- 2) происходит возникновение источника импульсов, периодически излучаемых первыми звеньями. Эти импульсы, представляющие собой возбуждения в двух звеньях, постепенно уменьшаясь по амплитуде и скорости, затухают, а распределение плотности переходит в гладкое уменьшение до "запального" уровня (рис. 7),

3) в трофической цепи возникает режим прерывистой генерации. При сохраняющихся периодах генерируемых пачек импульсов, внутри этих периодов ситуация существенно меняется от звена к звену.

Модель двумерной распределенной цепи выявляет некоторые особенности стационарного распределения:

- трансформаторы первых звеньев цепи, расположенные в поверхностных слоях почвы перерабатывают органику сами, не допуская погружения ее в нижние слои;

- так же ведут себя и редуценты последних звеньев, до которых по цепи доходит значимое количество органики;

- максимум плотности органики, уменьшаясь, смещается одновременно в глубину и вдоль цепи, так что наибольшей глубины достигают значимые количества органики, "принадлежащей" средним звеньям.

Модель позволяет рассмотреть и случаи болезни почвенного организма - выпадение звена. Звено (или звенья) трофической цепи могут выпадать в результате инфекционных заболеваний, механических травм почвенного тела (глубокая вспашка с оборотом пласта), антропогенных загрязнений. В отдельных случаях наблюдается избирательное угнетение или уничтожение отдельных звеньев или групп звеньев поллютантами. В модельной почвенной системе выпадение звена трофической цепи приводит к накоплению органики в предыдущих, поскольку выпавшее звено образует непроницаемую границу. Если вести счет от этой границы к началу цепи, то, как показывают численные эксперименты, нечетные звенья накапливают органику, тогда как в четных увеличивается скорость ее переработки.

В случае неактивного продуцента для восстановления выпавшего звена на сельскохозяйственных угодьях естественным, хотя и весьма дорогостоящим решением может быть засевание соответствующим видом дефектного поля. При наличии активного продуцента засев оказывается достаточно провести на краю поля, поскольку инокуляцию всего поля довершит инокуляционная автоволна.

При переходе к трехмерной задаче путем добавления еще одной пространственной координаты в плоском слое возникают кольцевые инокуляционные автоволны, общий характер которых (распределение плотности органики и т.д.) остаются теми же, что и в одномерном случае.

Дальнейшее развитие модели может состоять в переходе от рассмотрения отдельной трофической цепи к описанию совокупности таких цепей, функционирующих параллельно (модель трофической сети). Привносимые за счет этого дополнительные структурные элементы и связи способны привести к выявлению новых особенностей динамического поведения системы.

Сравнение некоторых результатов, полученных для развиваемой модели, с данными наблюдений реальных почвенных систем, свидетельствуют о том, что рассмотрение почвы в качестве распределенной активной среды позволяет количественно предсказать основные параметры, которые характеризуют распространение токсикантов в почве, а

также процессы ее самоочищения. Указанные результаты могут быть применены и для описания миграции неорганических веществ, поскольку многие из них, в том числе тяжелые металлы, оказываются включенными в метаболические пути. (В этой связи достаточно привести только один пример: как показывает фракционный анализ почвенных проб, около 60% присутствуют в почвах в связанных формах в составе органических соединений.)

В трофических цепях водных и почвенных биоценозов вполне могут происходить также и двухавтоволновые процессы, о которых мы говорили выше.

Есть основания надеяться на то, что адаптация нашей модели к почвенно-климатическим условиям конкретных регионов позволит выявить новые особенности динамического поведения почвенных систем и, кроме того, получить теоретическое объяснение явлений совместного неаддитивного действия токсикантов и их неоднородного пространственно-временного распределения, что, как известно, наблюдается в почвах в течение нескольких лет после загрязнения.

### **3 Ноосфера как сопряженные экологическая и экономическая активные среды.**

#### **Концепция "устойчивого развития" на стадии глобализации**

*"Жизнь - это способ существования активных сред"*

*А.Н. Заикин*

Сравнивая первые четыре рисунка, можно отметить поразительное сходство картин самоорганизации в живой и неживой природе. Подобных примеров можно привести множество. В какой-то мере это служит основой для экстраполяции наших подходов и на социоэкологические системы. Рассмотрение связанных общими переменными систем, экологической и экономической, позволит создать макроэкономическую модель, способную прогнозировать и планировать эволюцию нашего государства, взаимодействие хозяйственных сетей и регионов.

Экономика России заметно отличается от экономики наиболее развитых капиталистических стран неоднородностью, спонтанностью и непрогнозируемостью. Во многих случаях создается субъективное впечатление хаоса. Однако нерегулярные, хаотические колебания могут быть проявлением строгих динамических законов развития системы. Таким образом, в принципе, возможно предсказать пути развития такой системы, в какой-то мере даже управлять ее эволюцией.

С точки зрения биофизика российская экономическая система относится к динамическим распределенным системам. Хозяйственная деятельность на просторах государства формирует активную среду, для которой чрезвычайно критично соотношение

рыночной компоненты и государственного регулирования. Данное соображение основывается на аналогиях с выше рассмотренными системами.

Сразу же можно отметить, что малые по размерам территории, т.н. "развитые страны" Европы с развитой инфраструктурой и даже "большие" по территории США, где "перенос" сырья и продуктов производства, энергии, информации и финансов осуществляется относительно быстро по отношению к производственным процессам, должны быть отнесены к сосредоточенным системам. Россия же с ее просторами, слабо или неравномерно развитой инфраструктурой заведомо относится к распределенным системам.

Рассмотренные выше автоволновые системы только в простейших случаях с малым числом параметров и компонентов поддаются точному количественному моделированию. Конечно же, это относится и к рассмотрению сложнейшей двумерной иерархической активной среды - хозяйственному механизму государства. Действительно, экономический потенциал отдельных регионов, экономическая активность и демографическая структура населения, природные условия и т.д. делают рассматриваемую систему чрезвычайно гетерогенной, что принципиальным образом затрудняет детальные расчеты. Поэтому не имеет смысла искать какие-либо буквальные пространственные аналогии между относительно регулярными химико-биологическими примерами и географическими привязками.

И, тем не менее, подход, основанный на рассмотрении систем как активных сред, показавший свою эффективность для ряда областей современной науки, может принести определенную пользу и экономическим наукам. Представления относительно активных сред, способных к автоволновой самоорганизации, имеют весьма общий характер, рассматривают самые общие свойства динамических систем и потому обладают самыми общими прогностическими качествами.

Если в рамках нашего подхода рассматривать в качестве локальных процессов промышленные и сельскохозяйственные производственные процессы, в качестве процессов переноса - транспортные перевозки сырья и продуктов, в качестве энергии - финансовые ресурсы, требующие возобновления, то подобная распределенная система действительно является активной средой. В ней могут возникать драматические конкурентные взаимодействия между региональными "водителями ритма", могут возникать не взаимодействующие спиральные волны, т.е. зоны структурно разделенные, могут возникать и полностью хаотические режимы. Известно, что региональные или отраслевые экономические подсистемы могут входить в колебательный режим, и для нас не представляется странным возникновение пространственных автоколебаний. Видимо, имеет смысл воспринимать представление о "водителях ритма" как о центрах экономического роста, регионального или же отраслевого.

Плотность народонаселения, удельная мощность производств на данной территории, зоны экологического риска - все это делает регионы страны неоднородными. Характерное для наших дней состояние стагнации в российской экономике может быть рассмот-

рено в рамках обсуждаемого подхода: уровень энергообеспечения является в данном случае недостаточным, подпороговым. В данном случае наша распределенная система не может стать классической активной средой, но может проявлять элементы хаотического поведения.

При качественном рассмотрении поведения распределенной экономической модели в рамках данного подхода, в принципе, можно выделить три предельные ситуации.

В первом случае распределенная система насильственно сводится к системе точечной за счет абсолютно жесткой экономической и политической централизации. В предшествующие годы в нашей стране в условиях развитого производства этого не получилось и не могло получиться из-за принципиальной невозможности такого сведения, начиная с определенного уровня развития народного хозяйства.

Во втором случае система на всем пространстве "отпускается" полностью, и какой-то из пространственно-временных режимов возобладает на всей территории, но это приводит к формированию или самого эгоцентрического (с точки зрения поглощения материальных ресурсов и неэффективности затрат труда) режима или попросту режима хаотического.

Третий случай представляется оптимальным: локальное поведение частей системы может иметь особенности, но взаимодействие подсистем регулируется извне в их же общих интересах. Этот случай реализуется, например, при государственном регулировании рыночных отношений. Упрощенную аналогию этому случаю мы можем увидеть в распределенной реакции Белоусова, когда внешним вмешательством или исходной неоднородностью среды вместо самых простых концентрических волн образуется более сложная пространственная структура. Однако возможен и переход к хаотическому режиму при "зарегулированности" системы. "О, бурь заснувших не буди, под ними хаос шевелится" (Ф.И.Тютчев).

Ранее мы упоминали о необычных активных средах, где автоволны, частично отличающиеся по своей природе, могли бы интерферировать. На наш взгляд этот случай соответствует экологическим и экономическим макросистемам. В этой связи хотелось бы высказать также соображение о том, что многие направления геоэкономики обрели бы новое звучание в трактовке распределенных активных сред [23]. С точки зрения сосредоточенных и распределенных активных сред в пространстве геоэкономики можно понять болезненность экономической стыковки стран с различными укладами хозяйствования и даже неоднородных по экономическому развитию регионов отдельных государств. Мировая система межгосударственных отношений в последние годы претерпевает значительные изменения, получившие общее название глобализации. Развитие международной торговли, инфраструктур, сети Интернет и т.д. снова переводят локальные экономики в разряд распределенных систем с непредсказуемыми режимами поведения. Не случайно в самое последнее время в экономически развитых странах мира активизировалось движение "интуитивных" противников "глобалистики".

Из общих условий эволюции сложных систем следует, что устойчивое развитие воз-

можно только при достаточном разнообразии возможных его путей [24, 25]. Какие это пути, т.е. какое разнообразие системе необходимо в каждом конкретном случае - надо выяснять. Существенно, что для значительных "энергетических" изменений в системе достаточно слабых "информационных" воздействий.

Предельно упрощая ситуацию, можно сказать, что Жизнь на Земле представляет собой систему, состоящую из двух сопряженных подсистем - биосферы и "человеческой" экономики, каждая из которых является иерархически организованной активной средой. Ни одна из подсистем уже не может существовать сама по себе. Поэтому основным условием сохранения жизни на планете является гармоничное взаимодействие, т.е. коэволюция, обеих подсистем. Как известно, выбор экономической модели, сосредоточенной или распределенной, в значительной мере связан с общественным строем государства. "Чистые" случаи, по-видимому, экологически наиболее опасны. Известный американский биофизик впервые использовавший метод ЭПР-спектроскопии в биологии и в последние годы пришедший в экологию Барри Коммонер высказался по этому поводу таким образом: "Социализм губит Природу в борьбе за План, а капитализм - в борьбе за Прибыль". По всей видимости, наибольшую экологическую безопасность может обеспечить смешанная система - система регулируемой государством и международными соглашениями экономика.

В настоящей статье в значительной мере речь шла об инвариантном описании разнородных систем, сходным образом самоорганизующихся в пространстве и времени. Сейчас представляется возможным, используя опыт естественнонаучных подходов, разработать очень упрощенную динамическую модель активной эколого-экономической среды, поскольку многие параметры, характеризующие оба "пространства", являются общими [26 - 28]. Одним из реальных подходов к созданию реальной модели концепции "устойчивого развития" может быть использование самообучающихся "нейронных сетей" [29].

Автор выражает глубокую признательность Ф.И.Атуллаханову, Л.А.Блюменфельду, А.А.Бутылину, А.Н.Заикину, А.С.Зарецкому, П.С.Иванову, Ю.М.Осипову, В.В.Пешехонову, И.Л.Твердисловой, С.Э.Шнолю, Л.В.Яковенко за помощь в работе и полезное обсуждение материалов статьи.

## Список литературы

- [1] Романовский Ю.М., Степанова Н.В., Чернавский Д.С. Математическая биофизика, Наука, М., 1984, 304 с.
- [2] Murray J.D. Mathematical Biology. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-N.Y., Biomathematics, 1993, V. 19, 767 pp.
- [3] Белоусов Б.П. Периодически действующая реакция и ее механизм. В сб. рефератов по радиационной медицине за 1958 год, "Медгиз", М., 1959, с. 145 - 148
- [4] Жаботинский А.М. Концентрационные автоколебания, "Наука", М., 1974, 178 с.

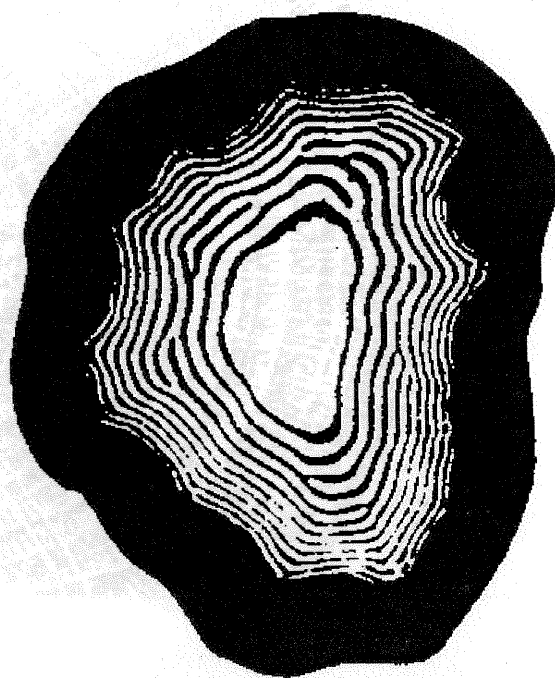
- [5] Колебания и бегущие волны в химических системах, Ред. Р.Филд, М.Бургер, "Мир", М., 1988, 720с.
- [6] Заикин А.Н., Формирование, распространение и взаимодействие экситонов (автоволн- квазичастиц) в активной среде, Физическая мысль России, 1995, N 1, стр.54 - 63
- [7] Атауллаханов Ф.И., Волкова Р.И., Гурия Г.Т., Сарбаш В.И., Сафрошкина А.Ю. Автоволновая гипотеза свертывания крови, Физическая мысль России, 1995, N 1, стр. 64 - 73
- [8] Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса, Прогресс, М., 1986, 431 с.
- [9] Кольцова Э.М., Гордеев Л.С. Методы синергетики в химии и химической технологии. "Химия", М., 1999, 253 с.
- [10] Твердислов В.А., Яковенко Л.В. Активные среды, автоволны и самоорганизация. От физико- химических систем к биологическим и социальным системам. Российский химический журнал (Журнал Российского химического общества им. Д.И.Менделеева), 2000, т. 44, вып. 3, с. 21 - 32
- [11] Raven P.H., Johnson G.B. Biology, Times Mirror/Mosby College Publishing, St. Louis-Toronto, 1986, 1300 pp.
- [12] Кравченко В.В., Медвинский А.Б., Деев А.А., Асланиди К.Б., Иваницкий Г.Р. Пространственная структура популяции *Dictyostelium discoideum* в условиях, обеспечивающих возникновение колец Лизеганга в окружающей среде. ДАН. 1998, т. 363, 6, с. 827-830.
- [13] Николаев Д.П., Теплов В.А., Божкова В.П., Романовский Ю.М. Механико-химические автоволны в живых клетках. В сб. "Труды семинара. Время, хаос и математические проблемы", Институт математических исследований сложных систем МГУ, Выпуск 1, М., 1999, с. 181 - 202
- [14] Muller S.C., Mair t., Steinbock O. Traveling waves in yeast extract and in cultures of *Dictyostelium discoideum*, Biophysical Chemistry, Elsevier Science B.V., 72, 1998, pp. 37 - 47
- [15] Dahlem M.A., Muller S.C. Self-induced splitting of spiral-shaped spreading depression waves in chicken retina. Exp Brain Res, 1997, 115, pp. 319 - 324
- [16] Davidenko J.M., Kent P., Jalife J. Spiral waves in normal isolated ventricular muscle, 1991, Physica D, v. 49, pp. 182 - 197
- [17] Буравцев В.Н. Периодический фазовый переход в растворе аммиака. Журнал физ. химии, 1983, т. 57, с. 1822 - 1824

- [18] Твердислов В.А., Яковенко Л.В. Электрические эффекты в интерфазном осцилляторе Буравцева. В сб.: Нелинейные явления в открытых системах, 59-66. Гос. ИФТП, Москва 1995, ред. акад. Лупичев Л.Н.
- [19] Твердислов В.А., Тихонов А.Н., Яковенко Л.В. Физические механизмы функционирования биологических мембран, Изд. МГУ, М., 1987, 189 с.
- [20] Атауллаханов Ф.И., Волкова Р.И., Гурия Г.Т., Сарбаш В.И., Сафрошкина А.Ю. Автоволновая гипотеза свертывания крови, Физическая мысль России, 1995, N 1, стр. 64 - 73
- [21] Заикин А.Н., Иванов П.С., Твердислов В.А., Твердислова И.Л., Яковенко Л.В. Пространственно-временная структура процессов трансформации, переноса и фракционирования органического вещества почвы, Биофизика, М., 1999, том 44, вып. 5, с.933 - 939
- [22] Ivanov P., Tverdislov V., Zaikin A. An Active-Medium Model of Organic Substance Transformation in Soil and Its Dynamic Properties, Gen. Physiol. Biophys., (1999), v.18, № 4, pp. 357 - 370
- [23] Кочетов Э.Г. Геоэкономика (Освоение мирового экономического пространства), Изд. БЕК, М., 1999, 462 с.
- [24] Гирусов Э.В., Бобылев С.Н., Новоселов А.Л., Чепурных Н.В. Экология и экономика природопользования, Ред. Э.В.Гирусов, ЮНИТИ, М.,1998, 455 с.
- [25] Моисеев Н.Н. Человек и ноосфера, Молодая гвардия, М.,1990, 352 с.
- [26] Твердислов В.А. Экономика России как активная среда, В сб.: Творческое наследие С.Н.Булгакова и современное социально-экономическое знание. Материалы международной конференции. Ред. Ю.М.Осипов., Изд. Диалог - МГУ - Москва, 1996, с. 178 - 181.
- [27] Твердислов В.А. Особенности пространственно-временной самоорганизации в социо-экологической системе России, В сб. Россия в в актуальном времени-пространстве, ред. Ю.М.Осипов, Е.С.Зотова, Москва-Волгоград, 2000, сс.256-262
- [28] Твердислов В.А., Яковенко Л.В. От биофизических к экологическим и социальным системам: автоволны и самоорганизация, В сб. Экологическая адаптация общества на постсоветском пространстве, Ред. В.В. Аникиев, М., 2000, с.196- 201
- [29] Пешехонов В.В., Твердислов В.А. О применении "нейронных сетей" в экономике, В сб. Альманах Центра общественных наук №4, Издание Московского университета, М. 1998, с. 61 - 64

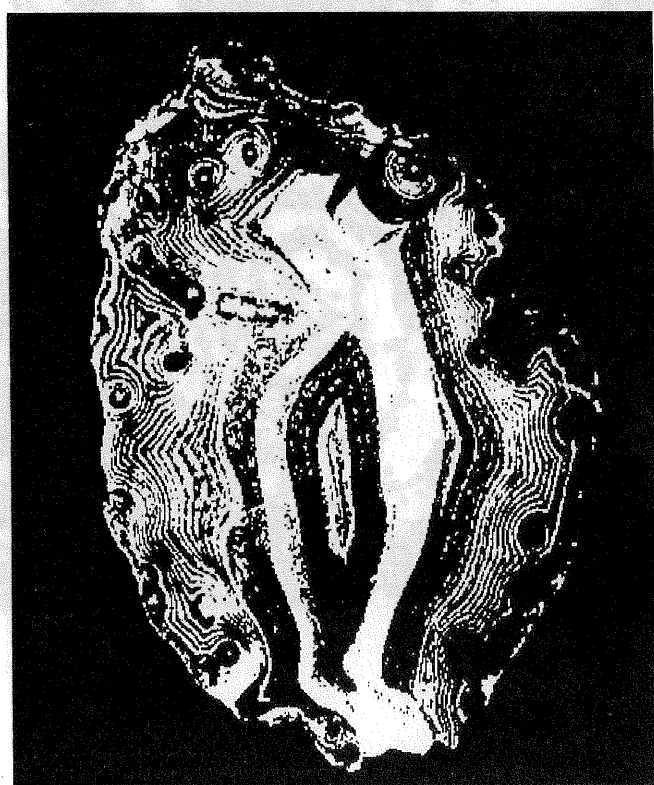




А



Б

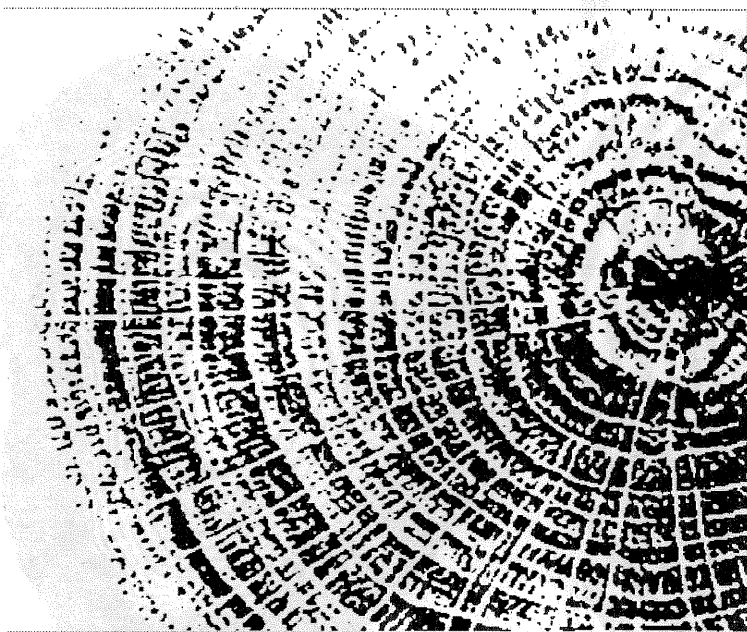


В

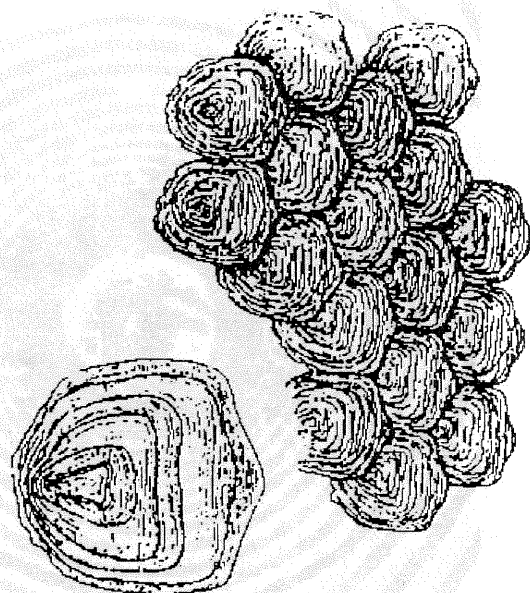


Г

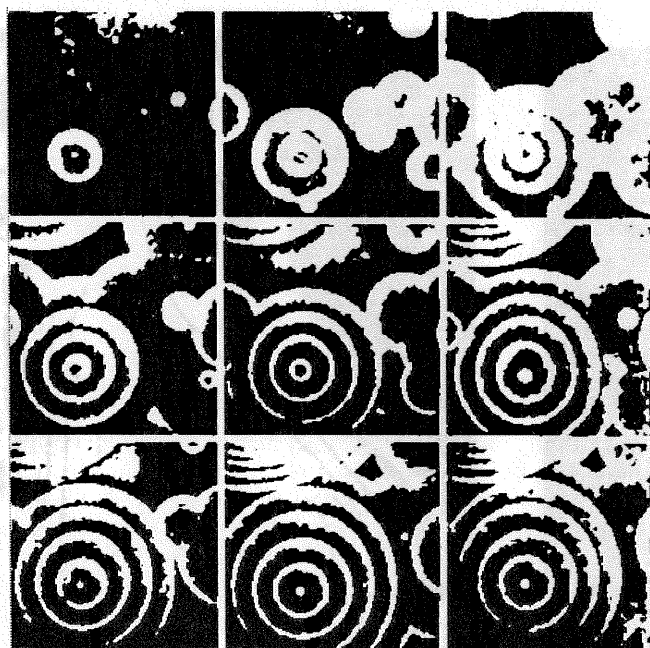
Рис.1. Статические волновые структуры, образовавшиеся в ходе однократного прохождения реакции. А, Б - кольца Лизеганга, В, Г - уральские агаты: В - с множественными центрами генерации волн, Г - типичная картина границы волновых пакетов, выходящих из разных участков поверхности.



А



Б



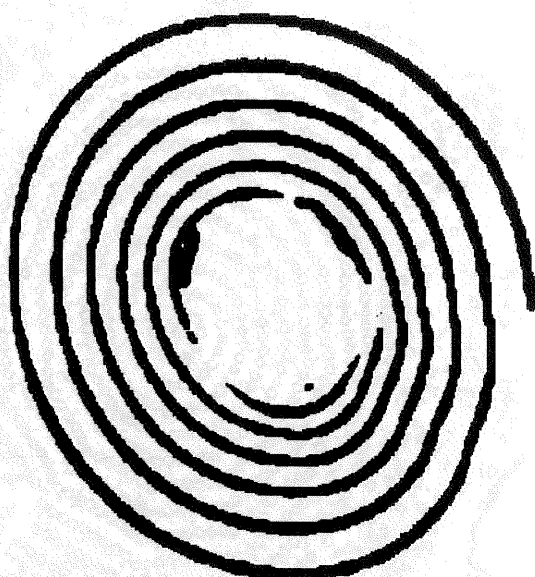
В



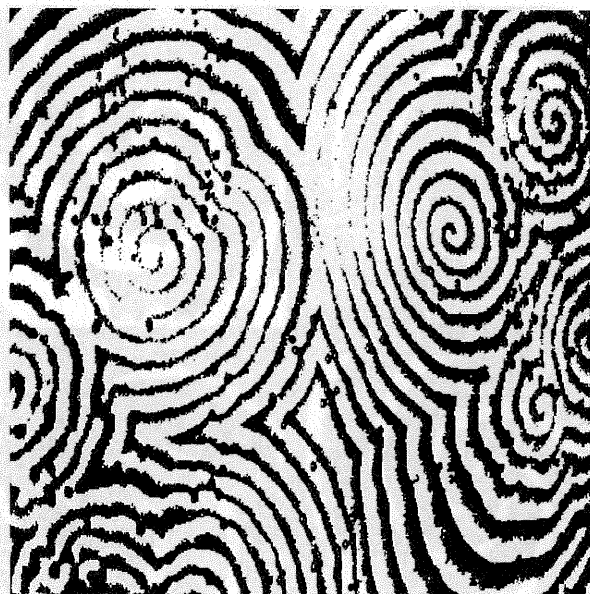
Г

Рис.2. Динамически развивающиеся структуры, "вынужденные" и "самопроизвольные".

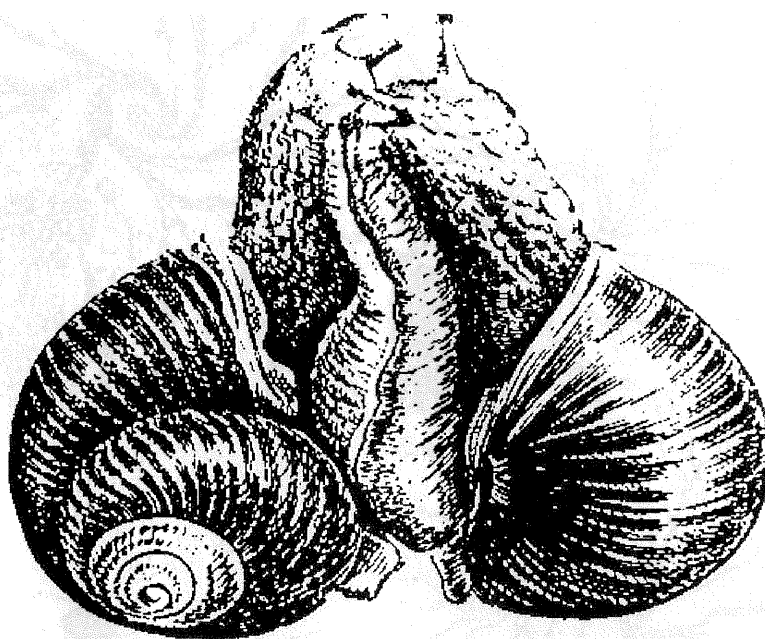
А - годовые кольца на срезе ствола дерева, Б - циклоидная чешуя рыб, В - концентрические концентрационные волны в реакции Белоусова, Г - концентрические кольца, образуемые лишайником *Parmelia centrifuga*.



А

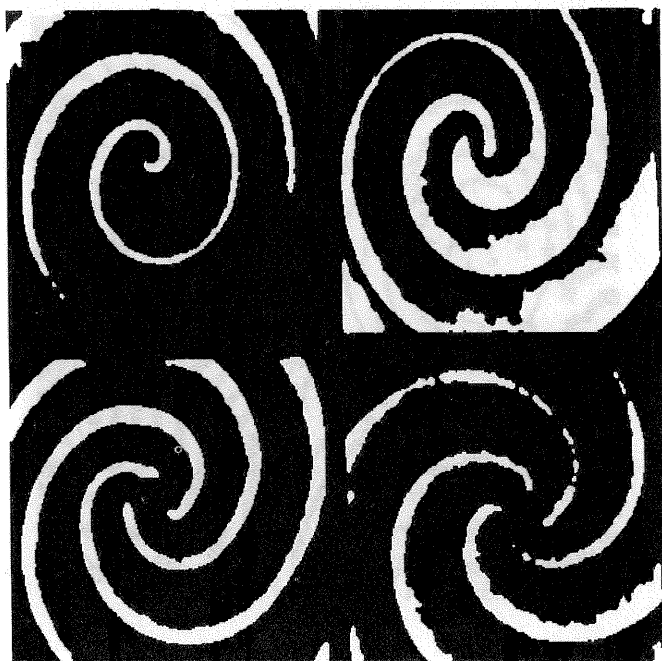


Б

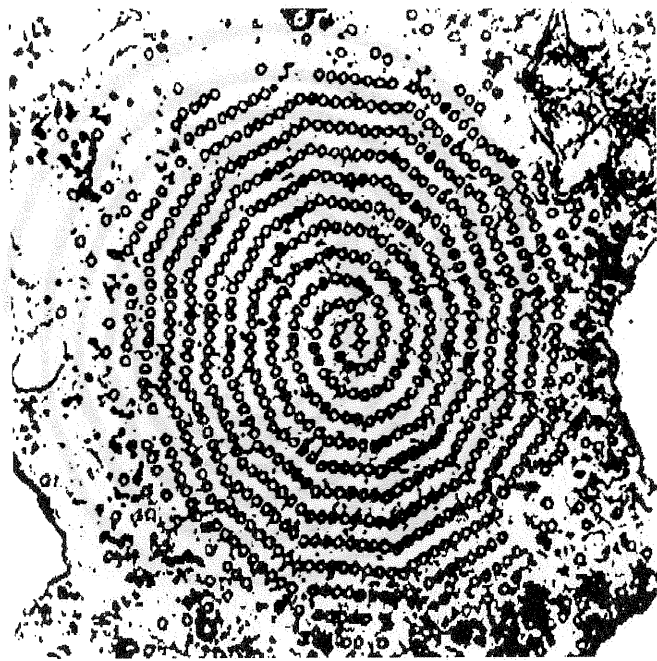


В

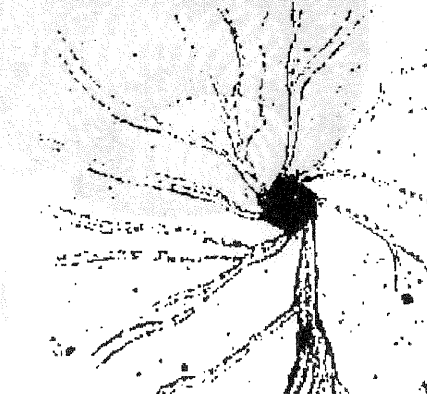
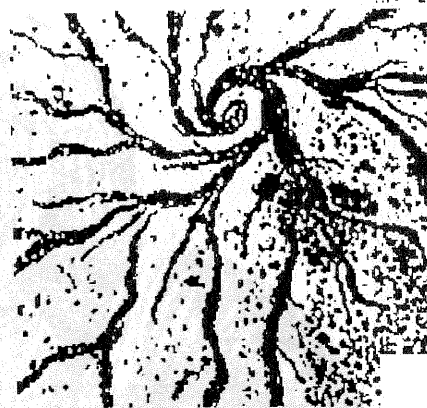
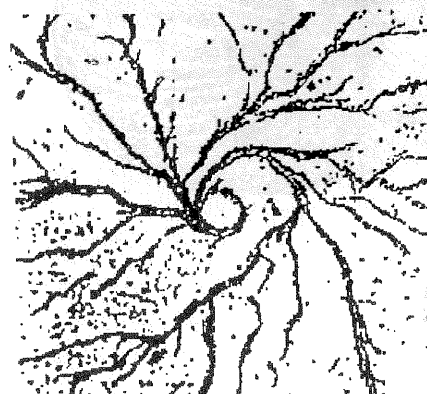
Рис. 3. Примеры односпиральных физико-химических и биологических структур.  
 А - статическая спиральная структура, образовавшаяся в ходе реакции Лизеганга; Б - спиральные волны в реакции Белоусова; В - спиральные раковины улиток *Helix pomatia* (правозакрученные).



А



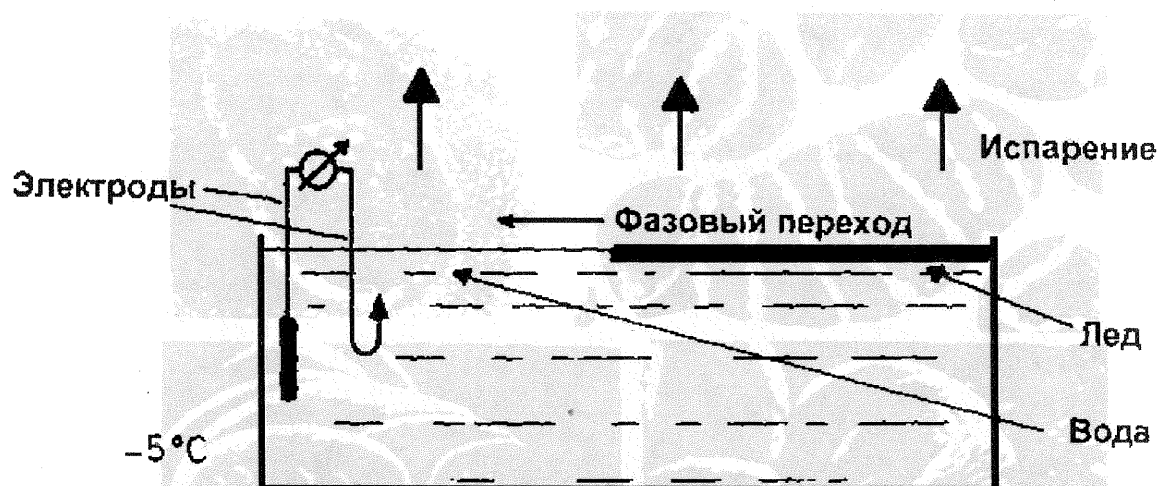
Б



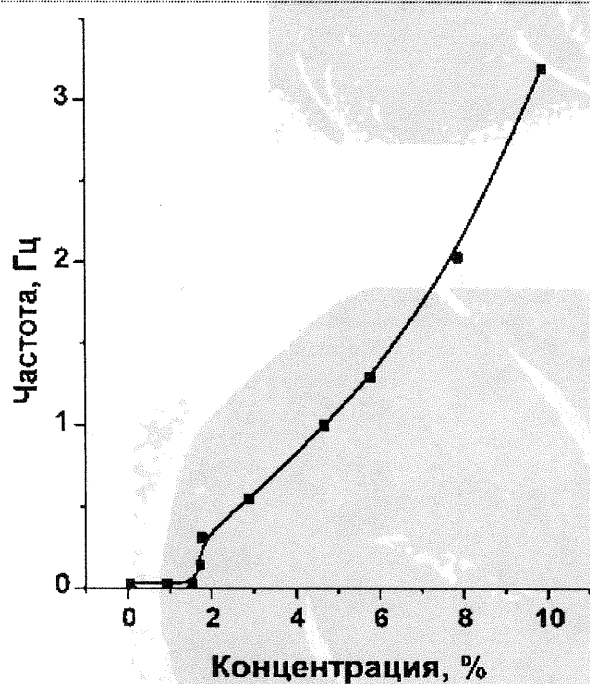
В

Рис. 4. Многоспиральные физико-химические и биологические структуры.  
А - спиральные волны разных порядков в реакции Белоусова; Б - двойная спираль микротрубочек на поперечном срезе аксоподии солнечника; В - спиральные структуры разных порядков, образующиеся при агрегации слизевика *Dictyostelium discoideum*.

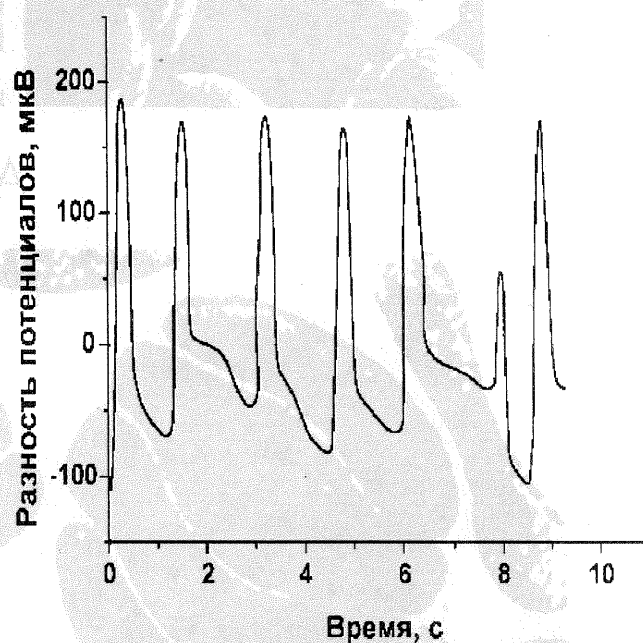




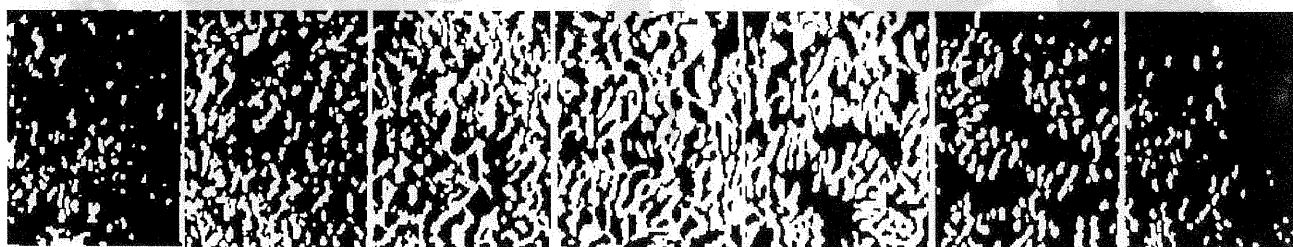
А



Б

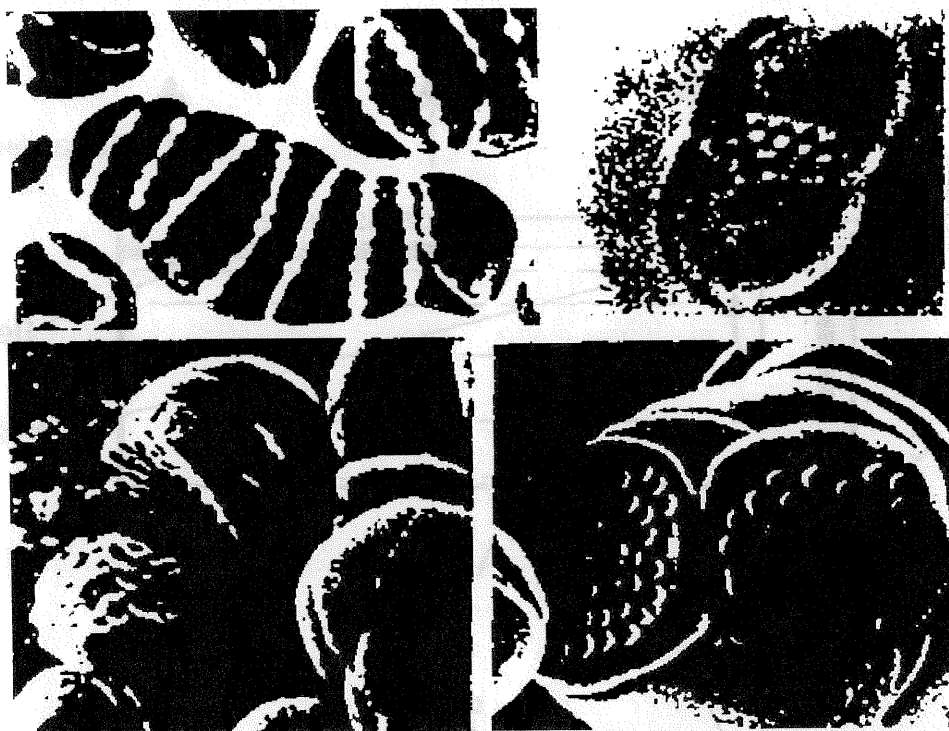


В

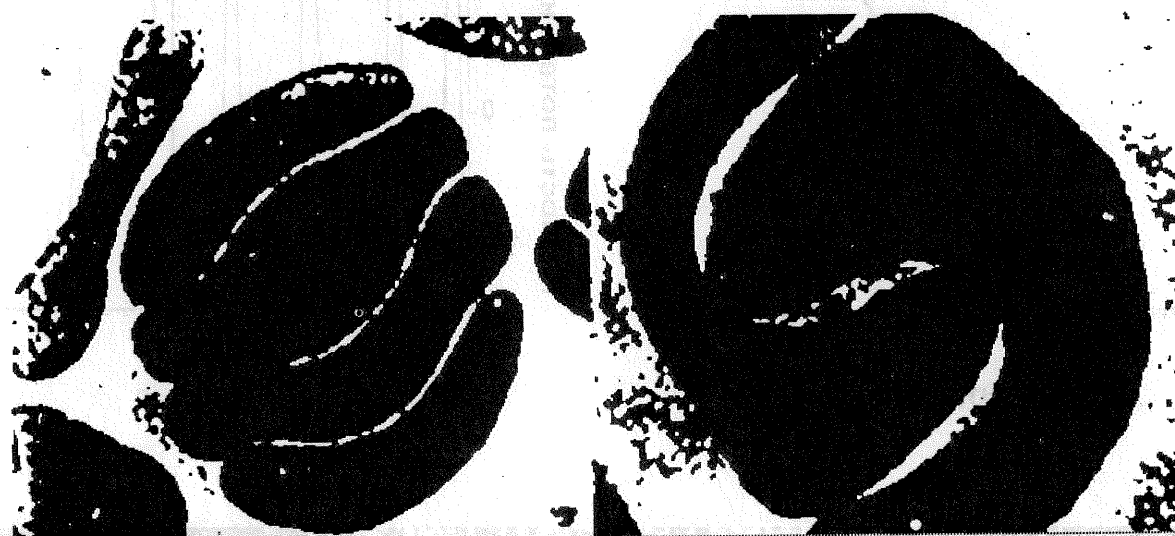


Г

Рис. 5. Периодический фазовый переход в осцилляторе Буравцева.  
 А - общая схема установки; Б - зависимость частоты колебаний от концентрации раствора; В - колебания электрического потенциала поверхности раствора относительно потенциала жидкой фазы раствора; Г - фотографии стадий одного периода циклического замораживания-оттаивания поверхности раствора (слева направо)



А



Б

Рис. 6. Статические регулярные структуры, образующиеся на поверхности эритроцитов при добавлении: А - полилизина (20 мг/л); Б - декстрана (слева - 2 справа - 4 на поверхности эритроцитов видны статические волновые образования, слева - электронная микрофотография, справа - фотография области контакта двух клеток через световой микроскоп; внизу - две микрофотографии разъединенных клеточных контактов, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа.

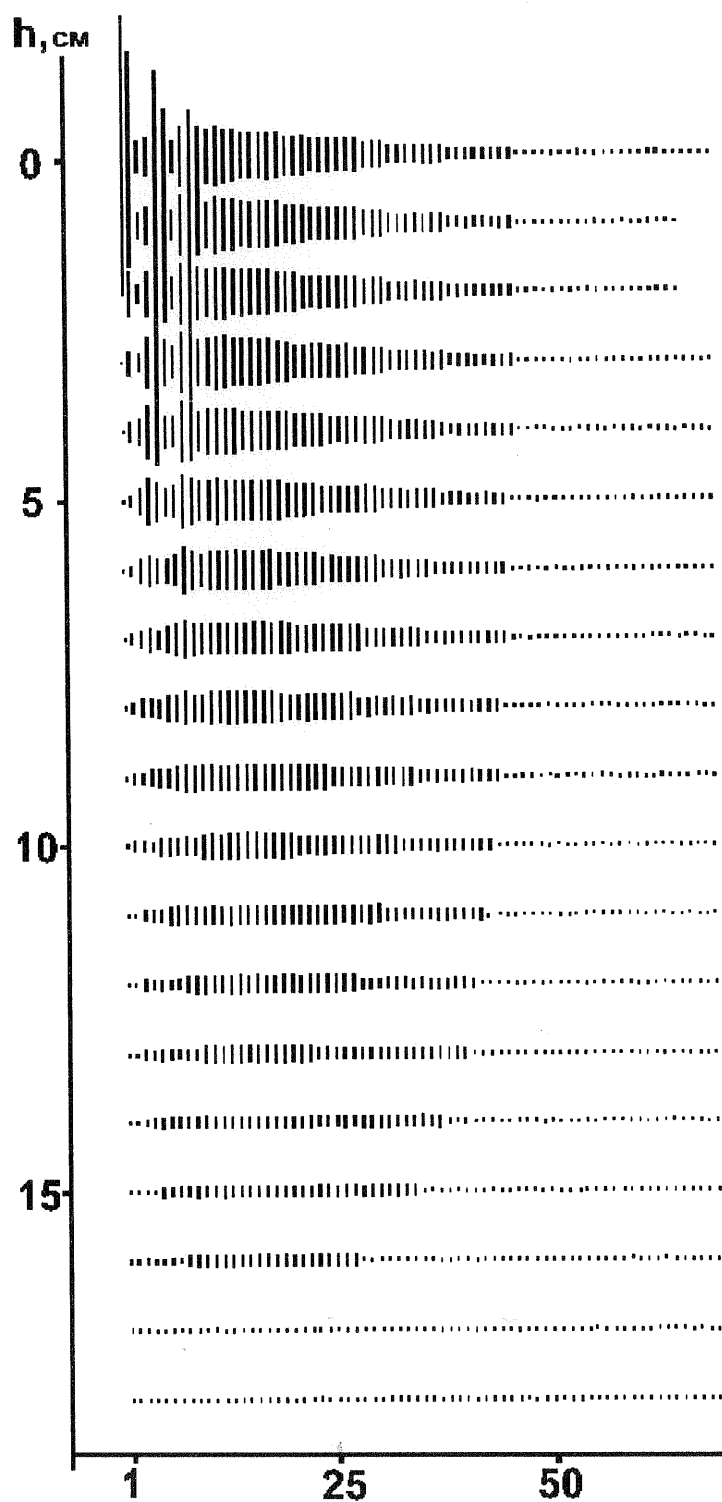


Рис.7. Генерация волн концентрации органического вещества на краю трофической цепи и их распространение вдоль цепи в зависимости от расстояния от поверхности почвы. Высота вертикальных столбиков пропорциональна плотности органики в соответствующем звене ( $k$  - номер звена,  $h$  - глубина).

