

Активные среды, автоволны и самоорганизация.

От физико-химических систем к биологическим и социальным системам

В. А. Твердислов, Л. В. Яковенко

ВСЕВОЛОД АЛЕКСАНДРОВИЧ ТВЕРДИСЛОВ — доктор физико-математических наук, заслуженный профессор МГУ, действительный член РАЕН, заведующий кафедрой биофизики Физического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова. Область научных интересов: биофизика сложных систем.

ЛЕОНИД ВЛАДИМИРОВИЧ ЯКОВЕНКО — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник кафедры биофизики Физического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова. Область научных интересов: биофизика сложных систем.

119899 Москва, Ленинские горы, МГУ им. М.В. Ломоносова, тел. (095)939-30-25, факс (095)939-11-15,
E-mail tverd@bio522b.phvs.msu.su

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

Аристотель

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

Многие достижения последних лет в области физики, химии, биологии, биотехнологии и экологии явным или неявным образом связаны с представлениями об активных средах, способных к пространственно-временной самоорганизации. Эти представления позволили создать модели, описывающие такие несхожие процессы и явления, как работа лазеров, периодические химические реакции, распространение волны кристаллизации в переохлажденной жидкости и нервного импульса, свертывание крови, взаимодействие популяций, распространение эпидемий, динамика почвенных биоценозов и т.д. [1—15]. В целом данный подход не предполагает обязательного рассмотрения физических основ систем, но призван отражать общую синергетическую природу их поведения [7].

Большинство биологических объектов — биоценозы, экосистемы, социальная сфера общества — должно рассматриваться как иерархия сопряженных протяженных систем, каждая из которых является активной средой, поддерживающей развитие происходящих в ней процессов на всем ее пространстве [8—11].

Одна из целей настоящей работы — привлечь внимание к возможности создания единой модели эволюции социоэкологических систем, образующих ноосферу, на основе представлений об активных средах. Речь идет не о простом механическом перенесении успешно развиваемых методов описания биофизических процессов на эколого-экономические системы, а о методологически едином подходе к рассмотрению самоорганизующихся природных систем.

Общие представления об автоколебательных и автоволновых процессах.

Физико-химические и биологические активные среды

Многие динамические системы независимо от того, являются ли они физическими, химическими или биологическими, могут быть описаны в традиционных терминах «реакция—диффузия» [1—5]. Пусть в какой-то области пространства протекает некий процесс («реакция») со своим характерным временем. При этом между соседними областями происходит перенос — диффузия — исходных компонентов или продуктов процесса. Если характерное время основного процесса значительно больше времени массопереноса, то мы имеем дело с сосредоточенной, или *точечной* системой (или с идеальным точечным реактором). Процессы в такой системе синхронны (синфазны). На первый взгляд такая система представляется как единое целое, хотя ее параметры могут изменяться со временем, например осциллировать.

Если же времена массопереноса сопоставимы с характерными временами самих процессов или превышают их, система становится *распределенной*. Таким системам свойственно образование регулярной, согласованной в пространстве и времени структуры или хаотическое чередование процессов в различных точках.

Распределенные системы являются *пассивной* средой, когда перенос массы или какого-либо возмущения, например распространение волны, осуществляется из определенной точки (точек) и оттуда же питает-

ся энергией. Запас свободной энергии может быть обеспечен, например, градиентом концентрации какого-либо компонента смеси, а его диффузия может сопровождаться образованием нерастворимого осадка. Известно формирование разнообразных регулярных структур (рис. 1—3), яркий пример — равновесные слои Лизеганга («ритмические осадки») в виде колец или спиралей. В какой-то мере эти известные с прошлого века структуры могут служить очень упрощенной моделью биологического морфогенеза.

Способность к более высокому уровню самоорганизации распределенные системы приобретают, когда они становятся *активной средой*. Важнейшей особенностью активной среды является ее способность подпитывать энергией идущие в системе процессы в каждой точке пространства. После завершения процесса в каждой малой области системы начинается процесс самовосстановления — локальное накопление энергии, способной обеспечить следующую фазу процесса.

Известно много систем разной природы — физической, химической, биологической, в которых процессы развиваются подобным образом, не затухая. Так распространяется фронт горения высушенной травы в степи, волна кристаллизации в переохлажденной жидкости, волна излучения в лазере, нервный импульс. Распространяющиеся таким способом волны называются *автоволнами*. В однородной среде фронт волны движется с постоянной скоростью и его форма не изменяется.

Наиболее известный пример, который позволяет выделить характерные режимы поведения активной среды — колебательная химическая реакция Белоусова—Жаботинского—Заикина [1—5]. 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. Детальное изучение механизма реакции и автоколебаний провел выпускник кафедры биофизики А.М. Жаботинский, а ее пространственно-временное поведение — А.Н. Заикин.

Эта реакция по своей природе такова, что в каждой точке реакционной системы возникают самопроизвольные осцилляции, сопровождающиеся изменением цвета раствора. Если вся система интенсивно перемешивается, то она ведет себя как точечная — осцилляторы связаны за счет перемешивания. В этом случае во всем объеме системы осуществляются синфазные самоподдерживающиеся осцилляции — *автоколебания* — раствор периодически изменяет цвет. В отсутствие перемешивания в тонком слое жидкости реакционная система Белоусова—Жаботинского—Заикина становится распределенной системой — двумерной активной средой, в которой точечные осцилляторы последовательно взаимодействуют друг с другом, что сопровождается появлением распространяющихся концентрационных цветных пространственных структур — автоволн (рис. 1Б). Эти кольцевые волны распространяются вокруг так называемых водителей ритма — спонтанно возникающих центров колебаний. 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. Распространяясь, автоволны не изменяют своей амплитуды, как это бывает с волнами в пассивной среде, где они затухают (как, например, звуки в возду-

хе). Автоволны не проходят сквозь друг друга, а аннигилируют при столкновении.

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 поток ветровой энергии и специальные граничные условия: закрепленный и свободный края флага.

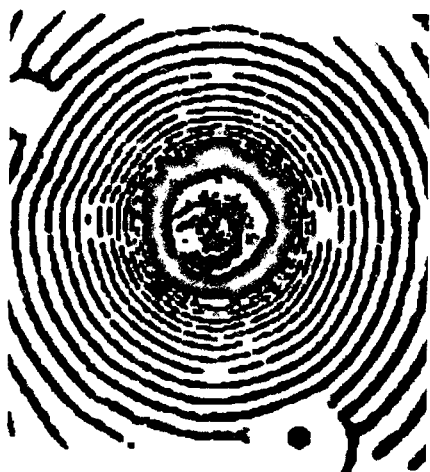
Еще один пример автоволновой физико-химической системы дает «сконструированная» в 1983 году В.Н. Буравцевым (выпускник кафедры биофизики Физического факультета МГУ) автоволновая система с фазовыми переходами первого рода [11] — интерфазный осциллятор. Впоследствии нами были обнаружены и исследованы электрические колебания в осцилляторе Буравцева, генерирующем в отсутствие термодинамического равновесия колебательные фазовые переходы первого рода на границе раздела воздуха и жидкости, содержащей летучий компонент [11а]. В тонком поверхностном слое водного раствора аммиака при температуре ниже температуры замерзания воды, но выше температуры замерзания смеси, за счет испарения аммиака из поверхностного слоя и обеднения им раствора, а также по причине последующей диффузии аммиака в поверхностный слой из объемной фазы происходят последовательные процессы образования льда и его таяния (рис. 4). Граница раздела фаз в данном случае является распределенной активной средой, в которой развиваются автоволновые процессы.

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

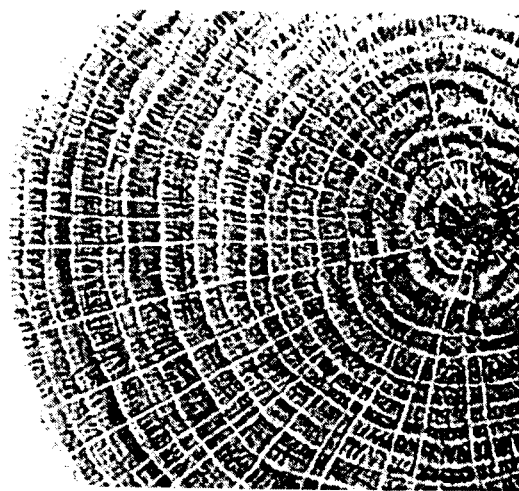
До сих пор речь шла об автоволнах в однородной среде. В неоднородной активной среде происходит искажение волнового фронта, возможен его разрыв, возникновение и размножение спиральных автоволн, так называемых *ревербераторов* (рис. 2Б). Ревербераторы иногда представляют собой сочетание право- и левозакрученных спиралей или вложение нескольких спиралей, соответственно, правых и левых (рис. 3А). В специальных условиях могут образовываться возбужденные, движущиеся со скоростью автоволны квази-частицы — экситоны [5], в других случаях — неподвижные слоистые или ячеистые структуры (упомянутые выше слои или кольца Лизеганга).

На рис. 1В,Г и 3Б,В представлены однотипные кольцевые физико-химические и биологические структуры. Концентрические круги на рис. 1Г, образуемые лишайниками при росте, обусловлены истощением питательных веществ и их последующей регенерацией в субстрате. На рис. 3Б, где приведена электронно-микроскопическая фотография среза аксоподии представителя простейших — солнечника *Actinosphaerium eichhorni* [16], хорошо видна двойная вложенная спираль, образованная микротрубочками. Повидимому, здесь мы встречаем уже фиксированный результат автоволнового формирования аксоподии.

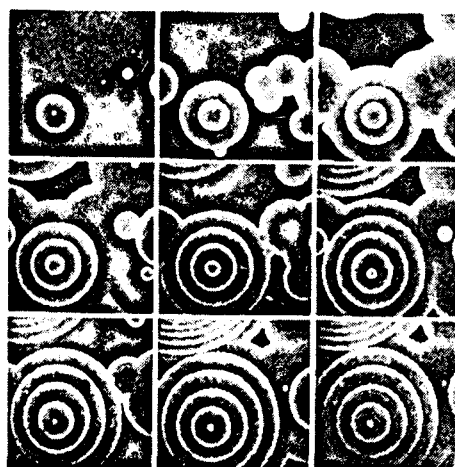
Поистине фантастическую картину спиральной автоволновой самоорганизации демонстрирует рис. 3Б, где показаны так называемые «социальные»



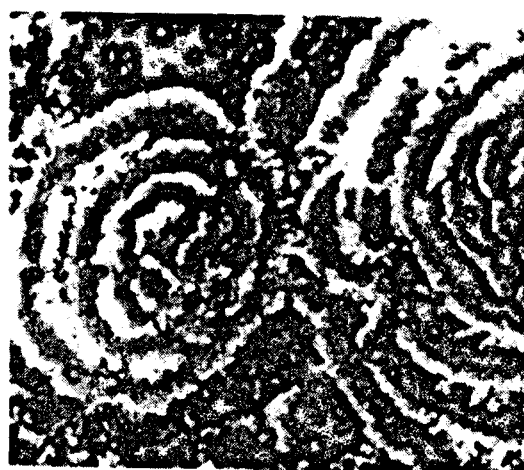
А



В



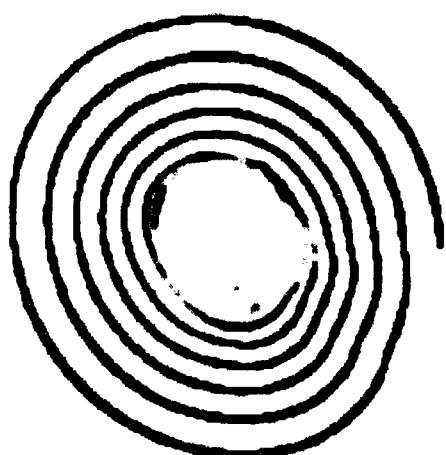
Б



Г

Рис. 1. Примеры концентрических физико-химических и биологических структур:

А — кольца Лизеганга — равновесная структура, образующаяся к концу реакции. Б — концентрические концентрационные волны, наблюдаемые в ходе реакции Белоусова. В — поперечный разрез ствола дерева. Г — концентрические кольца, образуемые лишайником *Parmelia centrifuga*



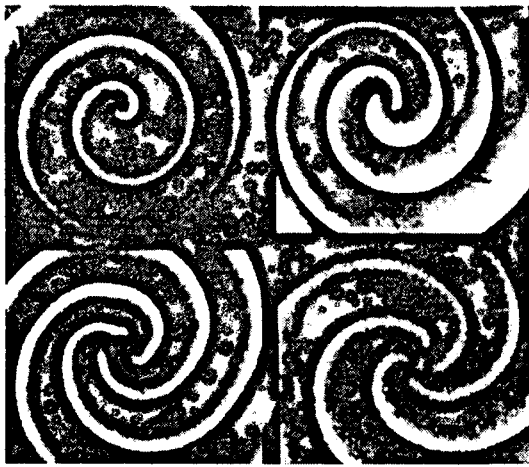
А



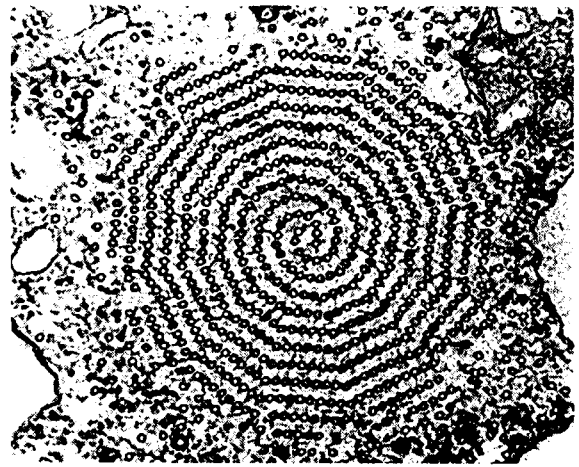
Б

Рис. 2. Примеры односпиральных физико-химических структур:

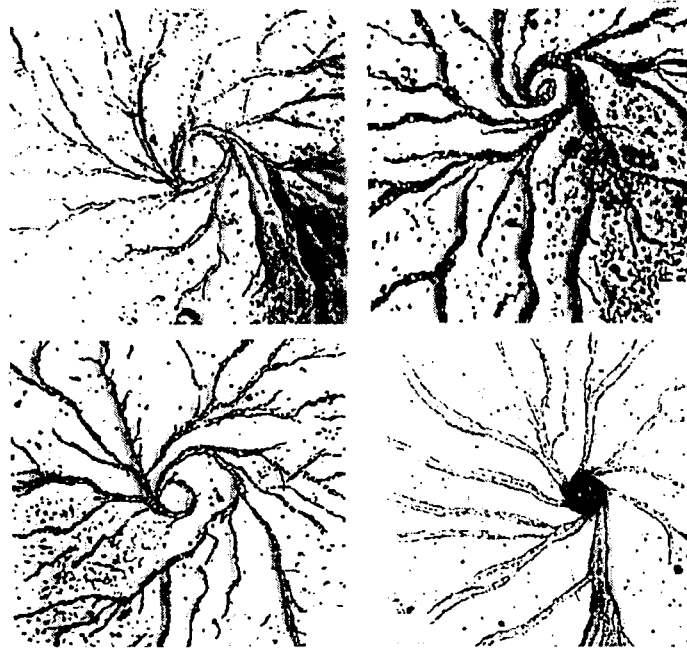
А — равновесная спиральная структура, образовавшаяся в ходе реакции Лизеганга.
Б — спиральные волны в реакции Белоусова



А



Б



В

Рис. 3. Примеры многоспиральных физико-химических и биологических структур:

А — спиральные концентрационные волны разных порядков в реакции Белоусова. Б — поперечный разрез аксоподии солнечника; микротубулы на поперечном срезе образуют две вложенные спирали. В — аттракторы разных порядков при агрегации слизевика *Dityostelium discoideum*

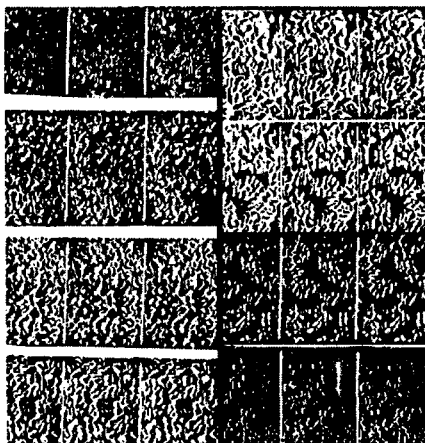


Рис. 4. Последовательность смены состояний поверхности в осциляторе Буравцева — от почти свободной поверхности до почти замерзшей

амебы *Dictyostelium discoideum*, объединяющиеся в определенной фазе жизненного цикла в единый организм под действием специфического аттрактанта цАМФ, выделяемого отдельными клетками [16].

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 регулярного автоволнового режима к хаотическому, т.е. при фибрилляции.

Заметим, что не во всех случаях явно выраженная автоволновая самоорганизация является благом для биологической системы. Так, в головном мозге при эпилептическом припадке возникают регулярные волновые электрического возбуждения. Более того, по установленным данным многим патологиям предшествует появление строго регулярных колебательных процессов.

Менее известны двухавтоволновые модели. До сих пор мы говорили об автоволнах одной природы. В многокомпонентной активной среде в принципе возможно возникновение автоволн разной природы.

Несколько лет назад Ф.И. Атауллахановым с соавт. была высказана автоволновая гипотеза свертывания крови [6]. Согласно этой гипотезе, впоследствии подтвержденной экспериментально, рост тромба обеспечивается распространением в крови концентрационной автоволны тромбина. 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 крови.

Авторами работы [6] обнаружен один весьма необычный для данной системы феномен, который укладывается в рамки гипотезы о двухавтоволновой природе свертывания крови — феномен образования слоистых, или кольцевых структур. В ходе нормального роста тромба его остановка, согласно гипотезе, происходит тогда, когда волна ингибитора тромбина нагоняет волну самого тромбина. Ингибитор и тромбин перестают генерироваться, но продолжают диффузионно распространяться с сильным снижением своих концентраций. При этом вокруг тромба возникает зона с повышенной концентрацией ингибитора — «зона торможения». В нормальных условиях благодаря этой зоне концентрация тромбина надежно удерживается в допороговой области.

Однако, как показало рассмотрение математической модели данного явления, если несколько изменить кинетические параметры процесса свертывания крови, например, уменьшить порог активации свертывания для тромбина, то может произойти следующее. Тромбин, хотя и выйдет за пределы «зоны торможения» в очень низкой концентрации, но эта концентрация все равно будет выше пороговой. Это приведет к новому витку быстрого нарастания 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, что приведет в итоге к формированию некой слоистой

структуры — многослойного сгустка, в котором чередуются твердые и жидкие слои. Слоистые структуры были обнаружены авторами работы [6] экспериментально.

Ф.И. Атауллаханов считает, что с общебиологической точки зрения образование тромба связано с разделением исходной изотропной среды на две части и формированием между ними 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 новый подход к выяснению механизмов морфогенеза.

Другой пример двухволнового биологического процесса — перистальтика стенок пищевода, желудка, кишечника, мочеочника и других полых органов, обеспечивающая перенос 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 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 [5].

Поверхность Мирового океана как активная среда. Фракционирование ионов и хиральных соединений. Происхождение предшественников клеток

Морская поверхность является термодинамически неравновесной структурой, поскольку за счет испарения воды и инфракрасного излучения в атмосферу поверхностный слой толщиной 100—300 мкм охлаждается на 0,5—1,0 °С. Вследствие возникающего значительного градиента температуры могут происходить термодиффузионные процессы разделения ионов и органических веществ, формироваться регулярные динамические структуры (колебательные и волновые).

В настоящем разделе мы рассмотрим спонтанные природные физико-химические процессы, которые могли привести к возникновению предшественников живых клеток — именно предшественников, а не самих живых клеток. Нам придется обратиться к идеям 70—30-летней давности относительно процессов еще более далеких, по-видимому, имевших место на Земле более 3 млрд. лет назад. Речь пойдет не столько о «биохимическом предопределении» появления живого, но о более раннем, базовом «физико-химическом, геофизическом предопределении». Это и составляет предмет нашего исследования [12, 13]. Естественно, мы опираемся на классические исследования и публикации А.И. Опарина [17], Дж.Б.С. Холдейна [18], Дж.Д. Бернала [19], М.Г. Руттена [20] и их последователей. Обращение к классическим работам Луи Пастера связано с проблемой хиральности (см. [21]).

Живая природа в своем развитии использовала все размерности реального физического мира. К точечным компонентам живого, крайне малым по сравнению с размерами организмов или клеток, можно отнести, например, неорганические ионы и молекулы

воды. К одномерным (линейным) компонентам следует отнести неразветвленные биополимеры — белки и нуклеиновые кислоты, к двумерным — биологические мембраны, к трехмерным — объемные образования, т.е. клетки и органеллы, формируемые компонентами более низких размерностей.

По-видимому, основой термодинамической неравновесности первичных трехмерных добиологических образований стала ионная асимметрия между протоклетками и окружающей средой. Без специальных механизмов поддержания ионной асимметрии мембранными насосами, приобретенными уже в ходе биологической эволюции, электрохимические градиенты исчезают.

Еще одной уникальной находкой природы стало использование одномерных цепей, белков и нуклеиновых кислот, в качестве информационно значимых молекул. Необходимое условие для этого — хиральная чистота мономеров, L-аминокислот и D-сахаров. Принципиальный вопрос состоит в том, в какой мере добиологическая или биологическая стадия эволюции предопределила хиральную асимметрию, обеспечившую стереоспецифичность однозначно формируемых биополимеров. Этот выбор — информационный (или антиэнтропийный). Разумеется, и такая система термодинамически неравновесна, поскольку в хирально асимметричных физико-химических системах осуществляется спонтанная рацемизация. Однако этот процесс сильно заторможен кинетически, поэтому в интересующих нас масштабах времени (возникновения и сохранения везикул-протоклеток) он существенной роли не играет.

Пожалуй, главной идеей настоящего раздела является утверждение, что бифуркация, в результате которой появились две неравновесные несимметрии, фундаментальные для живых систем, могли возникнуть и, вероятно, возникли в одно и то же время и в одном и том же месте в ходе общих процессов. Это место — неравновесная граница океан/атмосфера. И как указано выше, на этой межфазной границе в условиях значительного градиента температуры могут происходить термодиффузионные процессы разделения ионов и органических веществ и могут формироваться регулярные динамические структуры.

Прежде чем перейти к изложению экспериментальных данных, касающихся формирования прототипов клеток в природных условиях, укажем основные постулаты гипотезы относительно предбиологической стадии эволюции живой природы.

1. Период «абиогенной молекулярной эволюции» обеспечил необходимыми органическими веществами процесс самоорганизации протоклеток [18—20].

2. Начальные стадии предбиологической эволюции происходили в «первичном бульоне» древнего океана, ионный состав которого с тех пор существенно не изменился [20].

3. Дискретность живых организмов обусловлена требованиями эволюции и естественного отбора. В водной среде обособленность частиц, содержащих водорастворимые ингредиенты, обеспечивается гидрофобными оболочками — мембранами [22].

4. Протоклетка должна обладать определенным запасом свободной энергии для создания систем реагирования и регуляции нарождающегося метаболизма. В морской воде естественными претендентами на роль

регуляторов (специфических, осмотических, электрических) являются неорганические ионы [12, 13, 23].

5. Классические схемы возникновения ионной несимметрии основаны на избирательной адсорбции некоторых ионов морской воды (в частности, K^+ или Ca^{2+}), их концентрировании ионообменниками (алюмосиликатами, кварцем или же коацерватами). Для рассматриваемого периода развития эти схемы неприемлемы, поскольку перераспределение ионов морской воды в данном случае завершается термодинамическим равновесием — нет запаса свободной энергии. Предрасположенность ряда адсорбентов к калию или кальцию существенна для процессов регуляции. Регуляторная роль катионов обусловлена преимущественно полианионной природой биомакромолекул [12—20, 23].

6. Принципиальной характеристикой перераспределения неорганических ионов между первичными клетками и морской водой должно быть приблизительное осмотическое равенство при отсутствии термодинамического равновесия. Простейший вариант определен естественными причинами — протоклетка обогащается ионами, которых мало в морской воде, вместо тех, которых там много. Концентрации осмотически активных частиц внутри и снаружи примерно равны, но вместе с ионной асимметрией в системе появляется запас свободной энергии [12, 13].

В условиях неспецифического синтеза органических хиральных соединений образуется их рацемическая смесь, что заведомо не соответствует особенностям живых систем. Должна ли была природа «ждать» биологической эволюции или она могла «приступить» к фракционированию рацематов на предбиологической стадии? [12, 13, 21, 24].

Таким образом, встает вопрос: существует ли природная система, в которой возможно возникновение обособленных структур — везикул, образованных амфифильными поверхностно-активными веществами. При этом везикулы должны содержать электролит, инвертированный по ионному составу по отношению к морской воде, и смесь абиогенно возникших хиральных соединений, возможно, с выраженным изменением соотношения исходных L- и D-компонентов в их смесях.

Известны структуры Бенара — гексагональные конвекционные ячейки, возникающие в слое вязкой жидкости при прохождении через него теплового потока [7]. Однако малоизвестно, что при активном испарении воды, особенно при наличии летучих компонентов, на поверхности воды образуются достаточно правильной формы конвекционные структуры, напоминающие ячейки Бенара или ревербераторы, о которых мы говорили выше (рис. 5).

Отчасти руководствуясь доступными литературными сведениями, отчасти интуитивно мы обратились к исследованию поверхностной, так называемой «холодной» пленки морской воды. В основе образования такой пленки лежат процесс испарения воды и инфракрасное излучение Мирового океана [25, 26]. Ранее нами было экспериментально установлено, что возникающая при тепло- и массопереносе между морской поверхностью и атмосферой «холодная поверхностная пленка» обогащается ионами калия и кальция [13, 26, 27]. Коэффициенты фракционирования этих ионов в естественных условиях сильно зависят от

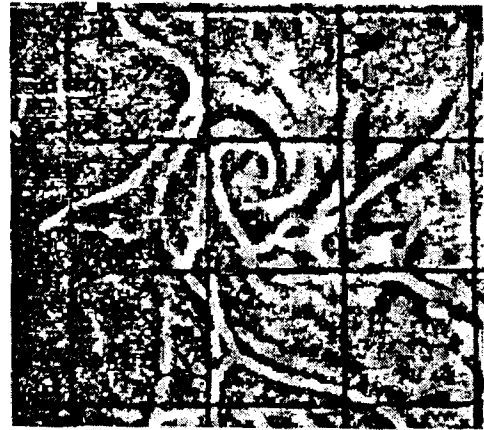
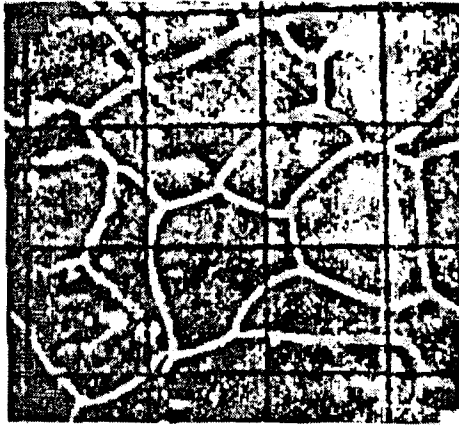


Рис. 5. Ячейки Бенара, образующиеся на поверхности жидкости при испарении.

Слева — гексагональные ячейки, справа — ревербератор

температуры и влажности воздуха и, например, могут достигать 1,18 для ионов кальция (Японское море) и 9,8 для ионов калия (Каспийское море). Напомним, что морская вода, как и кровь млекопитающих, содержит примерно на порядок больше натрия, чем калия, тогда как внутри обычной клетки соотношение ионов обратное. Для такой усредненной клетки коэффициент разделения по отношению к этим одновалентным катионам равен примерно 100.

Мы исследовали состав поверхностной пленки вод Белого, Черного, Каспийского и Японского морей. По понятным причинам там, где влажность воздуха близка к 100% и испарение минимально (это — Белое море, университетская биостанция на широте Полярного круга) «холодная пленка» практически отсутствует и фракционирование ионов незначительно. Противоположная ситуация отмечена на Каспийском море — температура высокая, воздух сухой, испарение воды значительно, «холодная пленка» — контрастна, фракционирование ионов — максимальное.

Инвертированность ионного состава «холодной пленки» наиболее ярко проявляется при образовании «пленочных» микробрызг, возникающих при разруше-

нии пузырей воздуха, поднимающихся на поверхность морской воды (рис. 6). Более тяжелые «реактивные» капли, как правило, падают обратно в море. Поведение пленочных микробрызг, обогащенных калием и кальцием и имеющих размеры, сравнимые с клеточными (примерно 100 мкм), более сложно. Частично с их участием формируются облака.

В модельных системах в присутствии рацемических смесей некоторых аминокислот поверхностный слой (50—300 мкм) обогащался L-энантиомерами, причем относительное обогащение могло достигать 5—10% (например, для валина и лейцина), и этого заведомо достаточно для эволюционной реализации преобладания одного из энантиомеров [27].

В равновесных условиях «холодная пленка» не формируется, и фракционирования ионов и энантиомеров не происходит. Если на поверхности раствора находится разреженный монослой фосфолипидов, то при разрушении на ней пузырьков воздуха образуются липидные везикулы, захватывающие раствор из поверхностного слоя, обогащенный ионами калия и кальция и L-аминокислотами (рис. 7). Подобные образования могут рассматриваться как прототипы кле-

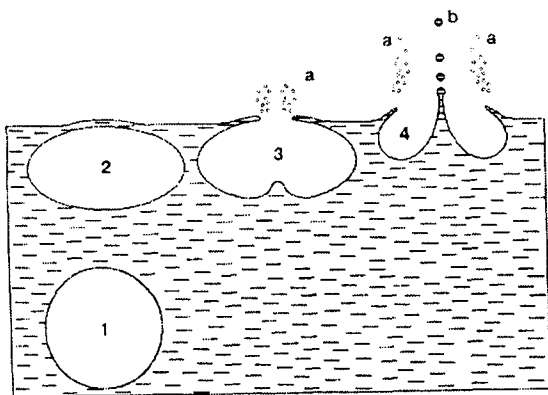


Рис. 6. Механизм образования аэрозоля при барботировании поверхности раствора

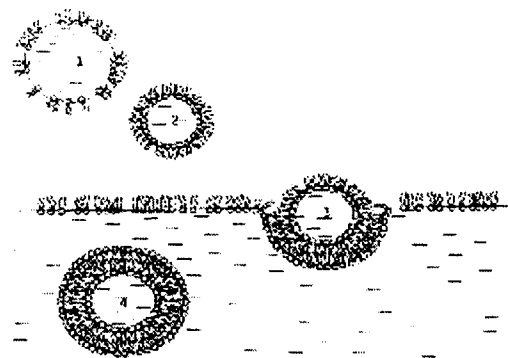


Рис. 7. Схема образования бислоидной липидной везикулы при падении капли аэрозоля на поверхность воды океана:

1 — капля аэрозоля, покрытая разреженным монослоем амфифила; 2 — конденсация монослоя амфифила при испарении капли; 3 — «одевание» капли вторым монослоем при падении на поверхность воды океана; 4 — сформировавшаяся везикула

1—4 последовательные стадии разрушения пузырька на поверхности; а — пленочные капли; б — реактивные капли

ток, способные служить объектами отбора в ходе биологической эволюции.

Обнаруженные эффекты фракционирования не могут быть объяснены в рамках только простых моделей термодиффузии [28]. Хотя известно, что более тяжелые частицы концентрируются в холодной зоне поля температурного градиента (дегидратированные ионы калия и кальция имеют более высокую атомную массу по сравнению соответственно с натрием и магнием), термодиффузионная модель недостаточна для описания высокой степени фракционирования ионов, наблюдаемой в эксперименте. Нами проведено математическое моделирование процессов на границе раздела электролит/воздух с учетом разных типов конвекции при тепломассообмене между фазами [26].

Что касается фракционирования энантиомеров аминокислот, то самые общие соображения о разделении хиральных молекул в комбинированных гравитационных, магнитных, электрических полях в сочетании с конвекцией приведены в работах В.А. Авестисова, В.И. Гольданского и В.В. Кузьмина (см., например, [24]). Ими было отмечено, что для разделения смеси энантиомеров достаточно воздействия некоторых физических факторов, например, циркулярно поляризованного света или комбинации конвекции с постоянным магнитным полем в дополнение со всегда существующим постоянным электрическим или гравитационным полем. Возможно, действие комбинации постоянного магнитного поля и линейно поляризованного света. Поскольку наши эксперименты проводились в темноте, действие света можно не учитывать. Однако постоянное электрическое поле, как и постоянное магнитное поле, на границе раздела фаз всегда существует. При испарении воды возникают конвекционные потоки. Таким образом, необходимый набор дифференцирующих хиральные молекулы факторов на границе океан/атмосфера имеется.

Отметим, что в случае нашего подхода значимыми для предбиологической эволюции были районы Мирового океана, воды которых характеризуются ионной силой, сравнимой с ионной силой биологических жидкостей, например крови. А это примерно соответствует ионной силе современной морской воды. Поэтому распресненные зоны океана, как и засоленные, по-видимому, не могут рассматриваться в качестве «колыбели» жизни.

Есть основания полагать, что колебательные и, возможно, автоволновые процессы, возникающие на неравновесной границе океан/атмосфера, участвуют в процессах параметрического фракционирования ионов и хиральных молекул. (Краткое обсуждение параметрического насоса приведено в конце следующего раздела.)

В заключение обратимся к двум широко известным давним толкованиям о происхождении жизни. В них можно увидеть определенные аналогии с обсуждаемыми нами гипотезами и их взаимодополняемость.

По одной из них — библейской — Бог создал человека из глины. Мы говорили ранее об адсорбентах (алюмосиликатах), являющихся ионообменниками с повышенным сродством к калию. При адсорбционном насыщении система равновесна. По этой причине библейская гипотеза представляется вполне приемлемой, хотя формально ограничивается термодинамически равновесным случаем. Однако глины (алюмосиликаты) могли быть катализаторами простых органических реакций. На этой стадии предбиологической

эволюции могло начаться «привыкание» первичного метаболизма к калиевой среде. Как только мы переходим от равновесной адсорбции к катализу, то в этом аспекте система может рассматриваться только как неравновесная.

Другая гипотеза — эллинская — об Афродите, которая вышла из пены морской. Собственно, этот случай мы и рассматривали, когда говорили о поверхностно-активных веществах, брызгах и везикулах. Поэтому древнегреческая гипотеза представляется вполне адекватной обсуждаемой проблеме и действительно отражает термодинамически неравновесный случай.

Биоценозы почвы как активная среда. Автоволны в трофических цепях

Рассмотрим еще один пример биологической автоволновой системы, а именно, системы почвенных биоценозов на уровне трофических (пищевых) цепей. Распределенная модель почвенной трофической цепи, рассматриваемой как активная среда, впервые была представлена в работах А.Н. Заикина и П.С. Иванова с соавт. [14, 15].

По сравнению с атмосферой и природными водами почва как часть окружающей среды гораздо более уязвима по отношению к антропогенным воздействиям, что обусловлено гетерогенностью ее физико-химической структуры и многочисленностью процессов, ответственных за перемещение различных веществ. Эти обстоятельства заметно усложняет задачу моделирования почвенных систем. Основными задачами исследования на основе моделей почвы являются оценка характерных пространственных и временных масштабов процессов распространения поллютантов и самоочищения почвы для локальной области с заданными физико-химическими свойствами, выявление возможностей развития тех или иных типов динамического поведения почвенных систем и, как итог, разработка определенных рекомендаций по восстановлению исходного состояния данного почвенного биоценоза.

При построении почвенной модели предполагается, что, во-первых, первичное органическое вещество образуется в поверхностном слое малой толщины, от которого берет начало трофическая цепь, уходящая в глубину почвы, во-вторых, распределение органической массы по глубине немонотонно и варьирует как в пространстве, так и во времени, в-третьих, деструкционный (катаболический) процесс включает как биологические, так и физико-химические стадии, в частности, реакции химической деградации и массопереноса с гидродинамическими потоками (часто — турбулентной природы).

При моделировании процессов трансформации органического вещества в почве авторы [14, 15] использовали в качестве «функциональных» блоков не почвенные горизонты, как это делалось ранее, а звенья трофической цепи. Органические вещества передаются из блока в блок и частично подвергаются минерализации. Фактически модель [14, 15] представляет собой модифицированную распределенную схему Лотки [1, 2], адаптированную для описания большого (в пределе — бесконечно большого) ансамбля жертв и хищников.

Построение математической модели пространственно-временного поведения почвенных биоценозов

подробно изложено в уже упомянутых работах [14, 15]. Мы же остановимся на принципиальных ее положениях и выводах. Как указано выше, модель эквивалентна рассмотрению почвы как активной среды. В этой связи можно 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 распространения возмущений по трофической цепи передается последовательно от одного звена к другому. Длина трофической цепи в различных модификациях базовой модели составляет от нескольких десятков до нескольких сотен звеньев.

Звено трофической цепи состоит из редуцента и редуцируемого органического вещества (в нужной для редуцента фазе переработки). Масса редуцента существенно меньше массы органического вещества и может составлять менее 1% их общей массы. Очевидно, что подвижность редуцента не должна влиять на общую подвижность органической массы звена. Следовательно, подвижность редуцируемой органической массы зависит, в основном, от коэффициента диффузии и пористости почвы, в которой перемещается органика.

Вычислительные эксперименты с модельной системой проводились при следующих ограничениях: система однородна, т.е. 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 органического вещества 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 монотонного уменьшения плотности органического вещества вдоль цепи;

2) происходит возникновение автоколебаний, периодически излучаемых первыми звеньями. Эти импульсы, представляющие собой возбуждения в двух звеньях, постепенно уменьшаясь по амплитуде и скорости, затухают, а распределение плотности органики переходит в монотонное снижение до «запального» уровня;

3) в трофической цепи возникает режим прерывистой генерации автоколебаний. 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 органическое вещество, не допуская погружения его в нижние слои;

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

— максимум плотности органики, уменьшаясь, смещается одновременно в глубину почвы и вдоль цепи, так что наибольшей глубины достигает органическое вещество, принадлежащее средним звеньям.

Модель позволяет исследовать болезни почвенного организма — выпадение звена. Звено (или звенья) трофической цепи могут выпадать вследствие инфекционных заболеваний почвы, механических травм почвенного тела (глубокая вспашка с оборотом пласта), под действием антропогенных загрязнений. В отдельных случаях наблюдается избирательное угнетение или уничтожение отдельных звеньев или групп звеньев поллютантами. Выпадение звена трофической цепи приводит к накоплению органического вещества в предыдущих звеньях, поскольку выпавшее звено представляет собой непроницаемую границу. Если вести отсчет от этой границы к началу цепи, то, как показывают численные эксперименты, нечетные звенья накапливают органическое вещество, тогда как в четных увеличивается скорость ее переработки.

В случае неактивного продуцента естественным, хотя и весьма дорогостоящим способом восстановления выпавшего звена на сельскохозяйственных угодьях может быть засеивание дефектного поля соответствующим видом биоценоза. При наличии активного продуцента достаточно провести засев на краю поля, поскольку засев 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 органического вещества и т.д.) остаются теми же, что и в одномерном варианте.

Дальнейшее развитие модели может состоять в переходе от рассмотрения отдельной трофической цепи к описанию совокупности таких цепей, функционирующих параллельно (модель трофической сети). С привнесением дополнительных структурных элементов и связей модель приобретает способность выявлять новые особенности динамического поведения почвенной системы.

Сравнение некоторых результатов, полученных с использованием развиваемой модели, с данными наблюдений реальных почвенных систем, свидетельствуют о том, что моделирование почвы по принципу рассмотрения ее как распределенной активной среды позволяет количественно предсказать основные параметры, которые характеризуют распространение токсикантов в почве, а также процессы ее самоочищения. На этом основании можно полагать, что данная модель может быть применена и для изучения миграции неорганических веществ, поскольку многие из них, в том числе тяжелые металлы, оказываются включенными в метаболические пути. (В этой связи приведем один пример: по данным фракционного анализа почвенных проб около 60% свинца и кадмия присутствуют в почвах в связанных формах в составе органических соединений.)

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

Заканчивая обсуждение развиваемой нами модели почвенных систем, сформулируем основной вывод: 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.

Вернемся к вопросу параметрического разделения жидких смесей в гетерогенных системах [12]. Работа параметрического насоса основана на взаимодействии двух синхронных периодических полей с гетерогенной системой, содержащей твердую и жидкую фазы и смесь веществ, распределенных между ними. Одно периодическое поле (например, температура) является параметром, определяющим периодическое перераспределение компонентов смеси между фазами. Другое, синхронное с ним периодическое поле (например, поле механических сил, поверхностное натяжение, электрическое поле) смещает одну фазу (или ее компоненты) относительно другой в прямом и обратном направлениях. В результате циклической работы параметрического насоса возникают встречные потоки разделяемых компонентов против градиентов их химических или электрохимических потенциалов.

В работе [29] приведено описание экспериментального разделения ионов калия и натрия с помощью ионообменной колонки, температуру которой периодически изменяли, а раствор синхронно возвратно-поступательно смещали специальной помпой. Сходные результаты были получены на ионообменной мембране при смещении ионов в переменном электрическом поле. В той же статье изложена теория фракционирования.

Процессы параметрического разделения компонентов жидких смесей могут протекать в гетерогенных системах с вынужденными колебаниями, в автоколебательных и автоволновых системах. Так, в почвах осуществляется перенос воды с растворенными веществами вниз и вверх при разных температурах. Поэтому возможно концентрирование отдельных веществ или ионов в различных почвенных горизонтах при нормальном существовании почв и в условиях техногенного прессинга, когда в почву попадают вредные вещества. На границе раздела океан/атмосфера, на прибрежной части морского дна также могут иметь место ситуации, приводящие к параметрическому фракционированию. Представления о параметрическом принципе разделения жидких смесей могут оказаться полезными при разработке метода очистки и регенерации почв с использованием переменного электрического поля.

Ноосфера, концепция «устойчивого развития»

Сравнивая рис. 1—3, можно отметить поразительное сходство картин самоорганизации в живой и неживой природе. Подобных примеров можно привести множество. В какой-то мере это служит основанием для экстраполяции наших подходов и на социоэкологические системы. Существование взаимосвязи через общие переменные между экологической и экономической системами, позволяет создать макроэкономическую модель, способную прогнозировать и

планировать развитие государства, взаимодействие хозяйственных сетей и регионов.

Обратимся к России как к одному из самых своеобразных государств в своем развитии. Экономика России заметно отличается от экономики наиболее развитых капиталистических стран неоднородностью, спонтанностью и непрогнозируемостью. Во многих случаях создается впечатление хаоса. Однако нерегулярные, хаотические колебания могут быть проявлением строгих динамических законов развития системы [2—5], т.е. в принципе можно предсказать пути развития такой системы и в какой-то мере даже управлять ее эволюцией.

С точки зрения концепции автоколебательного развития процессов и явлений и самоорганизации систем российская экономическая инфраструктура относится к динамическим распределенным системам. Хозяйственная деятельность на огромной территории России формирует активную среду, для которой чрезвычайно критично соотношение рыночной компоненты и государственного регулирования.

Что касается малых территорий, так называемых развитых стран Европы с развитой инфраструктурой и даже США, в которых «перенос» сырья и продуктов производства, энергии, информации и финансов осуществляется сравнительно быстро по отношению к производственным процессам, то их можно отнести к сосредоточенным системам. Россия же с ее просторами, слабо или неравномерно развитой инфраструктурой заведомо относится к распределенным системам.

Переходя к анализу возможности моделирования развития социальных систем в рамках развиваемого подхода, отметим, что рассмотренные выше автоволновые системы только в простейших случаях (с малым числом параметров и компонентов) поддаются точному количественному описанию. Конечно же, это относится и к такой сложнейшей двумерной иерархической активной среде как хозяйственно-экономический потенциал государства. Действительно, экономический потенциал отдельных регионов, экономическая активность и демографическая структура населения, природные условия и другие факторы делают социально-экономическую систему чрезвычайно гетерогенной, что принципиально затрудняет детальные расчеты. Поэтому не имеет смысла искать какие-либо буквальные пространственные аналогии между относительно регулярными химико-биологическими примерами и географическими привязками.

Если в рамках нашего подхода рассматривать в качестве локальных процессов промышленные и сельскохозяйственные производства, 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 зародиться невзаимодействующие спиральные волны, т.е. зоны структурно разделенные, могут реализоваться и полностью хаотические режимы. Известно, что региональные или отраслевые экономические подсистемы могут входить в колебательный режим, т.е. возникать пространственные автоколебания. Видимо, имеет смысл воспринимать представление о «водителях ритма» как о центрах экономического роста, регионального или отраслевого подразделения.

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

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

В первом случае распределенная система насильственно сводится к точечной системе за счет абсолютной жесткой экономической и политической централизации. В предшествующие годы в нашей стране в условиях развитого производства этого и не могло получиться из-за принципиальной невозможности стягивания сложной распределенной системы к точечной.

Во втором случае социально-экономическая система на всем пространстве «отпускается». В результате какой-то из пространственно-временных режимов может возобладать на всей территории, что приведет к формированию эгоцентрического режима (с точки зрения поглощения материальных ресурсов и неэффективности затрат труда), или хаотического режима.

Третий случай представляется оптимальным: локальное поведение отдельных частей системы может иметь свои особенности, но взаимодействие подсистем регулируется извне в их же общих интересах. Этот вариант реализуется, например, при государственном регулировании рыночных отношений. Упрощенную аналогию этой ситуации мы можем увидеть в распределенной системе реакции Белоусова, когда внешним вмешательством или исходной неоднородностью среды вместо самых простых концентрических волн образуется более сложная пространственная структура. Однако и в этом случае возможен переход к хаотическому режиму при «зарегулированности» системы.

В начале статьи мы говорили об активных средах, в которых автоволны способны интерферировать. На наш взгляд этот случай соответствует поведению экологических и экономических макросистем. В связи с этим хотелось бы высказать соображение о том, что многие направления геоэкономики обрели бы новое звучание в трактовке распределенных активных сред [30]. Рассматривая пространство геоэкономики с позиций представлений о сосредоточенных и распределенных активных средах в можно понять болезненность экономической стыковки стран с различными укладами хозяйствования и даже неоднородных по экономическому развитию регионов отдельных государств. Не случайно в последнее время в самых экономически развитых странах мира активизируется движение противников глобализации экономики — «глобалистики».

Из общих условий эволюции сложных систем следует, что устойчивое развитие реализуется только при достаточном разнообразии возможных его путей [31, 32]. Какие это пути, т.е. какое разнообразие системе необходимо в каждом конкретном случае — надо выяснять.

Предельно упрощая ситуацию, можно сказать, что жизнь на Земле представляет собой систему, состоящую из двух 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 и развития 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» варианты, 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 так: «Социализм губит Природу в борьбе за План, а капитализм — в борьбе за Прибыль». По всей видимости, наибольшую экологическую безопасность может обеспечить смешанная система — экономическая система, регулируемая государством и международными соглашениями.

Поскольку экономика более энергична и подвижна в своей эволюции, человечеству следует принять меры для сохранения биосферы.

В настоящее время представляется возможным разработать очень упрощенную динамическую модель активной эколого-экономической среды, поскольку многие параметры, характеризующие оба «пространства», являются общими (см., например, модель [14, 15]). Одним из подходов к созданию реальной модели концепции «устойчивого развития» может быть использование самообучающихся «нейронных сетей» [33].

ЛИТЕРАТУРА

1. Романовский Ю.М., Степанова Н.В., Чернавский Д.С. Математическая биофизика. М.: Наука, 1984, 304 с.
2. Murray J.D. Mathematical Biology. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-N.Y., Biomathematics, v. 19, 767 p.
3. Жаботинский А.М. Концентрационные автоколебания. М.: Наука, 1974, 178 с.
4. Колебания и бегущие волны в химических системах. Под ред. Р.Филда, М.Бургера. М.: Мир, 1988, 720 с.
5. Заикин А.Н. Физическая мысль России, 1995, № 1, с. 54 — 63.
6. Атауллаханов Ф.И., Волкова Р.И., Гурия Г.Т. и др. Там же, 1995, № 1, с. 64 — 73.
7. Пригожин И., Стингерс И. Порядок из хаоса. М.: Прогресс, 1986, 431 с.
8. Твердислов В.А. В сб.: Творческое наследие С.Н.Булгакова и современное социально-экономическое знание. Мат. межд. конф. Под ред. Ю.М.Осипова. М.: Диалог — МГУ, 1996, с. 178 — 181.
9. Твердислов В.А. В сб.: Россия в актуальном времени-пространстве. Под ред. Ю.М.Осипова, Е.С.Зотовой. М.—Волгоград, 2000, с.256-262.
10. Твердислов В.А., Яковенко Л.В. В сб.: Экологическая адаптация общества на постсоветском пространстве. Под ред. В.В. Аникиева. М., 2000, с.196—201.
11. Буравцев В.Н. Ж. физ. химии, 1983, т. 57, с. 1822—1824.

- 11а. *Твердислов В.А., Яковенко Л.В.* В сб.: Нелинейные явления в открытых системах. Под ред. Л.Н. Лупичева. М.: Гос. ИФТП, 1995, с. 59-66.
12. *Твердислов В.А., Тихонов А.Н., Яковенко Л.В.* Физические механизмы функционирования биологических мембран. М.: изд. МГУ, 1987, 189 с.
13. *Tverdislov V.A., Yakovenko L.V.* In: Evolutionary Biochemistry and Related Areas of Physicochemical Biology, (Bach Institute of Biochemistry and ANKO), Moscow, 1995, p. 115-126.
14. *Заикин А.Н., Иванов П.С., Твердислов В.А. и др.* Биофизика, 1999, т. 44, вып. 5, с.933-939.
15. *Ivanov P., Tverdislov V., Zaikin A.* Gen. Physiol. Biophys., 1999, v.18, № 4, p. 357-370.
16. *Raven P.H., Johnson G.B.* Biology. St. Louis-Toronto: Times Mirror/Mosby College Publishing, , 1986, 1300 p.
17. *Опарин А.И.* Жизнь как форма движения материи. М.: изд. АН СССР, 1963, 48 с.
18. *Haldane J.B.S.* In: The Origins of Prebiological Systems. Ed. S.Fox. N.Y.: Academic Press, 1965; *Кеньон Д., Стейнман Г.* Биохимическое предопределение. М.: Мир, 1972, 336 с.
19. *Bernal J.D.* The Origin of Life. London: Weidenfeld and Nicolson, 1967, 345 p.
20. *Rutten M.G.* The Origin of Life (by natural causes). Amsterdam, London, N. Y.: Elsevier publishing company, 1971.
21. *Гутина В.Н., Кузьмин В.В.* Теория молекулярной диссимметрии Л.Пастера. М.: Наука, 1990, 215 с.
22. *Шноль С.Э.* Физико-химические факторы биологической эволюции. М.: Наука, 1979, 262 с.
23. *Маленков А.Г.* Ионный гомеостаз и автономное поведение опухоли. М.: Наука, 1976, 171 с.
24. *Goldanskii V.I., Kuz'min V.V.* Nature, 1991, v. 352, p.114.
25. *Твердислов В.А., Хунджава Г.Г., Яковенко Л.В.* В сб.: Физические проблемы экологии (Физическая экология), Мат. Всерос. науч. конф., 23-27 июня, 1997, Москва, т. 2, с.79.
26. *Яковенко Л.В., Кожевников А.А., Твердислов В.А., Салов Д.В.* В сб.: Нелинейные явления в открытых системах. М.: РАН, Гос. ИФТП, 1997, с. 109-120.
27. *Твердислов В.А., Яковенко Л.В.* Физическая мысль России, 1995, № 1, с. 31- 37.
28. *Рабинович Г.Д., Гуревич Р.Я., Боброва Г.И.* Термодиффузионное разделение жидких смесей. Минск: Наука и техника, 1971, 244с.
29. *Яковенко В.А., Салов Д.В., Твердислов В.А.* В сб.: Нелинейные явления в открытых системах. Под ред. Л.Н. Лупичева. М.: Гос. ИФТП, 1995, с. 59-66.
30. *Кочетов Э.Г.* Геоэкономика (Освоение мирового экономического пространства). М.: изд. БЕК, 1999, 462 с.
31. *Гирусов Э.В., Бобылев С.Н., Новоселов А.Л., Чепурных Н.В.* Экология и экономика природопользования. Под ред. Э.В.Гирусова. М.: ЮНИТИ, 1998, 455 с.
32. *Моисеев Н.Н.* Человек и ноосфера. М.: Молодая гвардия, 1990, 352 с.
33. *Пешехонов В.В., Твердислов В.А.* В сб.: Альманах Центра общественных наук, №4. М.: изд. МГУ, 1998, с. 61 - 64.