

Министерство образования и науки Украины
Сумский государственный университет

Л. Д. Пляцук, Е. Ю. Черныш

**СИНЕРГЕТИКА:
НЕЛИНЕЙНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭКОЛОГИИ**

Монография

Рекомендовано ученым советом Сумского государственного университета



Сумы
Сумский государственный университет
2016

УДК 502.211
ББК 28.081
П40

Рецензенты:

М. С. Малёваный – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой экологии и сбалансированного природопользования Национального университета «Львовская политехника»;

В. И. Склабинский – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой процессов и оборудования химических и нефтеперерабатывающих производств Сумского государственного университета

*Рекомендовано к изданию
ученым советом Сумского государственного университета
(протокол № 2 от 8 октября 2015 года)*

Пляцук Л. Д.

П40 Синергетика: нелинейные процессы в экологии : монография /
Л. Д. Пляцук, Е. Ю. Черныш. – Сумы : Сумский государственный университет,
2016. – 229 с.

ISBN 978-966-657-606-7

В монографии анализируются синергетические основы формирования экологических систем на разных уровнях организации: от микробных популяций до биосферы в целом. Кроме того, рассмотрен генезис природно-технических систем как эволюционный этап формирования ноосферы. Особое внимание уделено рассмотрению физических законов мира в приложении к эколого-синергетическим системам. Исследуются нелинейные закономерности развития экосистем разного уровня организации с точки зрения их синергетических свойств: открытости, сложности, неустойчивости, фрактальности, автоколебаний, самовосстановления. При этом особое внимание уделяется рассмотрению практических форм реализации синергетического подхода в разработке экологически безопасных технологий в различных сферах жизнедеятельности человека, в особенности в сфере охраны и восстановления природного потенциала экосистем.

Книга адресована ученым, преподавателям вузов, аспирантам, магистрантам, студентам, а также всем, кто интересуется проблемами прикладной экологии и возможными направлениями комплексных решений в контексте развития современной науки.

**УДК 502.211
ББК 28.081**

ISBN 978-966-657-606-7

© Пляцук Л. Д., Черныш Е. Ю., 2016

© Сумский государственный университет, 2016

Оглавление

Введение.....	
ГЛАВА 1 СИНЕРГИЗМ И СИНЕРГЕТИКА ПОЗНАНИЯ.....	
1.1 Экскурс в историю синергетики.....	
1.2 Категориальный аппарат синергетики.....	
1.2.1 Основные понятия синергетики.....	
1.2.2 Нелинейные структуры в синергетике.....	
1.2.3 Формализация системы.....	
1.2.4 Аттрактор нелинейных динамических систем.....	
1.2.5 Фрактальность.....	
1.2.6 Концепция самоорганизации систем.....	
1.3 Синергетика и научное познание.....	
1.3.1 Интертеории научных теорий.....	
1.3.2 Системный и синергетический подход в исследованиях.....	
1.4 Математический аппарат синергетики.....	
1.4.1 Модель «жертва-хищник».....	
1.4.2 Модель «загрязнение-экосистема».....	
1.4.3 Моделирование технических систем.....	
ГЛАВА 2 ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ.....	
2.1 Введение в синергетику экологических процессов.....	
2.2 Основные подходы в экологических исследованиях.....	
ГЛАВА 3 СИНЕРГЕТИКА МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....	
3.1 Микробное сообщество как целостность.....	
3.2 Саморегуляция микробиологической системы.....	
3.2.1 Флуктуации микробиологических показателей качества речной воды.....	
3.2.2 Флуктуации в анаэробных биотехнологических системах.....	
3.3 Нелинейная кинетика распада органического вещества.....	
ГЛАВА 4 СИНЕРГЕТИКА В БИОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ВЫСШЕГО УРОВНЯ.....	
4.1 Синергетический подход в медицинских исследованиях.....	
4.2 Моделирование организма человека как синергетической системы.....	
4.3 Моделирование самоорганизации нейронной сети мозга.....	
4.3.1 Модели нейронной системы мозга.....	
4.3.2 Моделирование внутринеуронных процессов при воздействии электромагнитных полей.....	

ГЛАВА 5 СИНЕРГЕТИКА НА ЭКОСИСТЕМНОМ УРОВНЕ.....

- 5.1 Саморегуляция в экосистеме.....
- 5.1.1 Синергетическая концепция экологических систем.....
- 5.1.2 Атомно-молекулярная самоорганизация структур.....
- 5.2 Бифуркционный механизм.....
- 5.2.1 Закон перехода количественных изменений в качественные. Теория катастроф.....
- 5.2.2 Бифуркация удвоения периода.....
- 5.3 Автоколебательный режим экосистемы.....
- 5.3.1 Понятие об автоволновых процессах в живых системах.....
- 5.3.2 Математическое описание активных сред.....
- 5.3.3 Предельный цикл – основной признак автоколебательной системы.....
- 5.4. Теория биосферного моделирования.....
- 5.4.1 Фрактальные свойства биосферы.....
- 5.4.2 Бифуркация в биосфере.....
- 5.4.3 Концепция адаптивной самоорганизации.....
- 5.5 Антропогенный фактор и динамическое равновесие в экосистеме.....

ГЛАВА 6 СИНЕРГЕТИКА ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....

- 6.1 Синергия проектирования: моделирование взаимодействия загрязнения с окружающей средой.....
- 6.2 Оптимизация работы природно-технической системы на примере агропромышленного комплекса.....
- 6.2.1 Эксергетический подход к эффективности функционирования агроэкосистемы.....
- 6.2.2 Приборное оформление процесса управления агротехноценозами в различных экологических условиях.....
- 6.3 Биогазовая технология утилизации органических отходов.....
- 6.3.1 Моделирование процесса деструкции в анаэробном биореакторе: повышение эффективности метанообразования.....
- 6.3.2 Центры инициации метаногенеза и влияние интенсивности перемешивания на них.....
- 6.4 Управление отходами на примере осадков сточных вод.....
- 6.4.1 Трансформации осадков сточных вод в экосистеме: эколого-синергетический подход.....

6.4.2 Моделирование анаэробной микробиологической деструкции в условиях сульфидогенеза на основе процесса автокатализа.....	
6.5 Синергетика нефтяных дисперсных систем: управление в нештатных ситуациях.....	
6.5.1 Нефтяные дисперсные системы.....	
6.5.2 Исследовательская схема управления нештатными ситуациями.....	
6.5.3 Нелинейные модели описания новых структур в критических точках.....	
6.5.4 Параметры порядка и модель критерия подобия	
6.5.5 Передвижение лёгких нефтепродуктов в грунтовых водах.....	
Заключение.....	
Список литературы.....	

Введение

Синергетика считается синтетической наукой, основанной на единой концепции самоорганизации динамических систем различной природы. Ее идеи не являются простой совокупностью физических теорий и математических методов. Это новый концептуальный взгляд на науку. Однако в синергетике еще не сформирована целостная теория самоорганизации, которую можно одинаково справедливо применить ко всем системам физического мира, как к природным так и техническим. Поэтому в зависимости от конкретных свойств той или иной отрасли науки синергетический подход трансформирует свои отличные особенности и содержание. Не исключением стало применение этого подхода к экологическим процессам, представляющим собой интегральную совокупность химических, биологических, геологических, гидрологических, техногенных и других процессов, протекающих в экосистемах разного уровня организации, и являющим по своему существу открытые системы. Синергетика экологических процессов – сравнительно новое направление в мире науки, ее развитие даст возможность эволюционировать естествознание на совершенно новый уровень, близкий к концепции В. И. Вернадского о ноосфере.

ГЛАВА 1

СИНЕРГИЗМ И СИНЕРГЕТИКА ПОЗНАНИЯ

1.1 Экскурс в историю синергетики

Как произошло становление синергетики? Синергетика наследует и развивает универсальные, общедисциплинарные подходы своих предшественниц: тектологии А. И. Богданова [1], теории систем Л. фон Берталанфи [2], кибернетики Н. Винера [3]. Однако ее язык и методы опираются на нелинейную математику и результаты естественных наук, изучающих эволюцию сложных систем, существенно обогащая наши представления о сложном.

Начнём с некоторых определений.

Редукционизм (от лат. *reductio* – возвращение, отодвигание назад) – методологический принцип, согласно которому сложные явления могут быть полностью объяснены с помощью законов, свойственных явлениям более простым (например, социологические явления объясняются биологическими или экономическими законами). Редукционизм абсолютизирует принцип редукции (сведения сложного к простому и высшего – к низшему), игнорируя появление эмерджентных свойств в системах более высоких уровней организации.

Холизм (от др.-греч. ὅλος – целый, цельный) – учение о целостности нашего мира, о том, что все его элементы, живая и неживая природа связаны как части единой большой системы – Бога, Мира, Вселенной. Исходная трактовка холизма более функциональна и близка к синергетике. Все свойства некоторой системы – физической, биологической, химической, социальной, экономической, психической, языковой или любой другой, не могут быть определены или объяснены по свойствам отдельных составных ее частей. Вместо этого, наоборот, система как целое определяет способ поведения своих частей.

Синергизм – совместное действие для достижения общей цели, основанное на принципе, что целое представляет нечто большее, чем сумма его частей. Синергизм означает превышение совокупным результатом суммы слагающих его факторов. Так, доходы от совместного использования ресурсов превышают сумму доходов от использования тех же ресурсов по отдельности. Данное понятие также называется синергетическим эффектом (эффектом $2 + 2 = 5$).

Синергетика (от греч. *synergeia* – совместно, согласованно действующий) – это научное направление, которое изучает связи между элементами структуры (подсистемы), образующиеся в открытых системах, благодаря интенсивному (потокосому) обмену веществом и энергией с окружающей средой в неравновесных условиях. Общий эволюционный процесс как процесс самоорганизации, несмотря на его стихийность, обладает определённой направленностью: идёт рост разнообразных форм, сложности структур. Это утверждение сохраняет силу для любых объектов мира и для биосферы в целом. Отсюда вытекает одна из задач синергетики – выяснение законов построения организации, возникновения упорядоченности. Здесь акцент делается на принципах построения организации, ее возникновении, развитии и самоусложнении. Синергетика изучает самоорганизации физических, биологических и социальных систем, неустойчивые состояния, предшествующие катастрофе и их дальнейшей эволюции (теория катастроф), а также универсальные законы эволюции Природы. Это научное направление также называют теорией открытых систем, теорией диссипативных структур, термодинамикой необратимых процессов [4–10].

Редукция предполагает, что сложные явления могут быть объяснены на основе законов, свойственных более простым системам. Сводя сложное к более простому, анализ игнорирует специфику более высоких уровней организации. Аналитический подход показал свою эффективность при решении многих задач теории и практики. Но чем глубже внедряли аналитику, тем больше усиливались технические науки и приходили в упадок гуманитарные. Начались кризисы: политические, экономические, экологические и т. п.

В стремлении противодействовать этому возникло учение о холизме. Холизм (философия цельности) – направление в философии, рассматривающее мир как результат творческой эволюции, направляющейся нематериальным «фактором цельности». Основоположник – Ян Смэтс, студентом написавший книгу «Эволюция личности», которая так и не была опубликована. Но в 1926 г. у него вышла книга «Холизм и эволюция». Когда Альберт Эйнштейн прочитал эту книгу, он сделал следующий прогноз: в грядущем тысячелетии холизм, – раньше или позже, – станет главной концепцией естествознания [4, 5, 7].

Между двумя крайностями: редуктивизмом и холизмом возникла промежуточная наука – синергетика, попытавшаяся установить связь между крайностями.

Ричард Фуллер (1895–1983) – автор термина «синергетика»: дизайнер, архитектор и изобретатель из США, не имея законченного образования, он получил множество почётных докторских научных степеней и полсотни

международных премий [9]. Основным его изобретением является лёгкий и прочный «геодезический купол» – пространственная стальная сетчатая оболочка из прямых стержней. Автор книг: «Синергетика: исследование геометрии мышления» (1975) и «Синергетика 2: дальнейшие исследования геометрии мышления» (1979), в которой высказана идея об упаковке шарами как основе организации пространства. Под синергетикой Фуллер понимал геодезическую синергию, т. е. новую векторную геометрию, следствием которой и являются геодезические купола [4].

Определение термина «синергетика», близкое к современному пониманию (междисциплинарное научное направление, задачей которого является изучение природных явлений и процессов на основе принципов самоорганизации систем), ввёл немецкий физик-теоретик Герман Хакен в 1977 г. в своей книге «Тайны природы. Синергетика – учение о взаимодействии». Именно он считается основателем науки синергетики. Согласно Хакену [5, 7] синергетика относится к направлению универсализма, занимающего промежуточное место между редукционизмом и холизмом. Синергетика не сводит поведение системы ни к её поведению на микроскопическом уровне (редукционизм), ни к её макроскопическому поведению (холизм), она пытается понять, как устанавливается и функционирует связь между этими двумя уровнями. Это удается ей благодаря понятию параметров порядка и принципу подчинения.

Основателем синергетики является профессор Штутгартского университета Г. Хакен (род. 12.07.1927), немецкий физик-теоретик, основатель синергетики, директор Института теоретической физики и синергетики университета Штутгарта, автор книг: «Синергетика», «Тайны природы», «Принципы работы головного мозга», «Тайны восприятия», «Квантополевая теория твёрдого тела», «Лазерная светодинамика», «Информация и самоорганизация» и др.

Созданием теории самоорганизации в современном ее понимании многим обязаны И. Р. Пригожину (1917–2003) – бельгийский и американский физик и химик, нобелевский лауреат в области химии (1977) [9]. Он основатель и директор Центра по изучению сложных квантовых систем (США); им доказано существование неравновесных термодинамических систем, которые при определённых условиях, поглощая вещество и энергию из окружающего пространства, могут совершать качественный скачок к усложнению (диссипативные структуры). Автор таких книг: «Введение в термодинамику необратимых процессов», «Неравновесная статистическая механика», «Химическая термодинамика», «Термодинамическая теория структуры,

устойчивости и флуктуаций», «Самоорганизация в неравновесных системах», «Порядок из хаоса», «Новый диалог человека с природой», «Познание сложного», «Молекулярная теория растворов», «Современная термодинамика» и др.

Развивая основы неравновесной термодинамики, Пригожин показал, что «универсальные законы» отнюдь не универсальны, а применимы лишь к локальным областям реальности. Его парадигма акцентирует внимание на таких аспектах, как разупорядоченность, неустойчивость, разнообразие, неравновесность, выражающихся в нелинейных соотношениях, в которых малый сигнал на входе может вызвать сколь угодно сильный отклик на выходе, и темпоральности – повышенной чувствительности к ходу времени. Некоторые части Вселенной действительно могут действовать как механизмы. Таковы замкнутые системы, но они составляют лишь малую долю физической Вселенной. Большинство же систем, представляющих для нас интерес, открыты – они обмениваются энергией, веществом или информацией с окружающей средой. В мире господствуют не порядок, стабильность и равновесие, а, наоборот, неустойчивость и неравновесность, порядок – лишь редкий частный случай [4, 10].

В первой половине XX века большую роль в развитии методов нелинейной динамики играла русская и советская школа математиков и физиков: А. М. Ляпунов, Н. Н. Боголюбов, Л. И. Мандельштам, А. А. Андронов, А. Н. Колмогоров, А. Н. Тихонов. Эти исследования стимулировались в большой мере решением стратегических оборонных задач: создание ядерного оружия, освоение космоса. Западные ученые также использовали первые оборонные ЭВМ при обнаружении неравновесных тепловых структур: модель морфогенеза (А. М. Тьюринга) и уединенных волн – солитонов (Э. Ферми) [11–13]. Этот период можно назвать «синергетикой до синергетики», т. к. сам термин еще не использовался.

В 60–70 годы XX века происходит подлинный прорыв в понимании процессов самоорганизации в самых разных явлениях природы и техники. Перечислим некоторые из них: теория генерации лазера Г. Б. Басова, А. М. Прохорова, Ч. Таунса; колебательные химические реакции Б. П. Белоусова и А. М. Жаботинского – основа биоритмов живого; теория диссипативных структур И. Пригожина; теория турбулентности А. Н. Колмогорова и Ю. Л. Климонтовича. Неравновесные структуры плазмы в термоядерном синтезе изучались Б. Б. Кадомцевым, А. А. Самарским, С. П. Курдюмовым. Теория активных сред и биофизические приложения самоорганизации исследовались А. С. Давыдовым, Г. Р. Иваницким,

И. М. Гельфандом, А. М. Молчановым, Д. С. Чернавским. В 1963 году происходит эпохальное открытие динамического хаоса, сначала в задачах прогноза погоды (Э. Лоренц), затем – теоретически, начинается изучение странных аттракторов в работах Д. Рюэля, Ф. Такенса, Л. П. Шильникова [4, 10, 14–18].

В 80–90 годы XX века продолжается изучение динамического хаоса и проблемы сложности. В связи с созданием новых поколений мощных ЭВМ развиваются фрактальная геометрия (Б. Мандельброт), геометрия самоподобных объектов (типа облака, кроны дерева, береговая линия), описывающая структуры динамического хаоса и позволяющая эффективно сжимать информацию при распознавании и хранении образов. Были обнаружены универсальные сценарии перехода к хаосу М. Фейгенбаума, Ив. Помо. В 1990 году открыт феномен самоорганизованной критичности. Его можно исследовать, рассматривая кучу песка (П. Бак). Сходящие лавинки воспроизводят распределения Парето по величинам событий для биржевых кризисов, землетрясений, аварий сложных технических комплексов и т. д. [4, 17–20].

Развитие синергетики в XXI столетии связано с формированием новых направлений исследования. Это, в первую очередь, синергия проектирования технических систем, в частности, энергетических (А. А. Колесников) [21–23], кроме того, моделирование гидрологических и экологических процессов, в частности, нелинейной кинетики трансформации примесей в водной среде и ферментных процессов деструкции органических веществ в технических (биореакторах) и природных системах (Б. М. Долгоносков, В. А. Вавилин и др.) [24–27], а также разработка нелинейных моделей распространения в атмосфере загрязняющих веществ [28–29]. Исследования в этой области синергетики также направлены на популяционную экологию [30–32].

В то же время сейчас такой общенаучной единой картины мира нет. Существуют ее отдельные фрагменты, именуемые специальными картинами мира, дисциплинарными онтологиями, такие, например, как физическая, биологическая, космологическая картины мира, репрезентирующие предметы каждой отдельной науки. Синергетика и пытается навести мосты между этими картинами, создать единое поле междисциплинарной коммуникации, сформировать принципы новой картины мира.

Научные школы в синергетике

В синергетике к настоящему времени сложилось уже несколько научных школ.

В числе этих школ – *брюссельская школа И. Р. Пригожина*, разрабатывающего теорию диссипативных структур, раскрывающую исторические предпосылки и мировоззренческие основания теории самоорганизации. Эта школа рассматривает самоорганизацию в физических и химических процессах. Изучая физику неравновесных систем, И. Пригожин открыл новые эффекты, которые лаконично отражены в названии известной книги «Порядок из хаоса»: из хаоса рождается порядок. Впрочем, этой формуле не одна тысяча лет [33].

Школа Пригожина развивала классическую неравновесную термодинамику, основанную на фундаментальном предположении о локальном равновесии, которое предполагает, что равновесные термодинамические соотношения справедливы для термодинамических переменных, определенных в элементарном объеме. Считается, что рассматриваемая система может быть разделена в пространстве на множество элементарных ячеек, достаточно больших, чтобы рассматривать их как макроскопические системы, но и достаточно малых для того, чтобы состояние каждой из них было близко к состоянию равновесия. Данное предположение справедливо для широкого класса физических систем, что и определяет успех классической формулировки неравновесной термодинамики. Отметим, что предположение о локальном равновесии является грубым допущением для обширного класса систем и процессов. Примеры включают в себя такие явления, как распространение ультразвука в газах, суспензии, растворы полимеров, гидродинамика фононов, ударные волны, разреженные газы и т. д.

Важным направлением неравновесной термодинамики является решение проблемы необратимости времени.

Напомним, что согласно традиционным представлениям необратимость времени возникает не на фундаментальном уровне (где все элементарные процессы описываются обратимыми уравнениями Ньютона), а позднее – при усреднениях или учёте краевых и начальных условий. По мнению школы Пригожина, необратимость возникает на фундаментальном уровне вследствие конечной разрешающей способности прибора, с помощью которого производится наблюдение. Важно, что все системы содержат подсистемы, которые непрерывно флуктуируют. Иногда отдельная флуктуация или комбинация флуктуации может стать (в результате положительной обратной связи) настолько сильной, что существовавшая прежде организация не

выдерживает и разрушается. В этот переломный момент (точка бифуркации) принципиально невозможно предсказать, в каком направлении будет происходить дальнейшее развитие: станет ли состояние системы хаотическим или она перейдет на новый, более дифференцированный и более высокий уровень упорядоченности или организации (диссипативную структуру).

Интенсивно работает также школа Г. Хакена, профессора Института синергетики и теоретической физики в Штутгарте (Германия), изучающая лазеры. Он объединил большую группу ученых вокруг шпрингеровской серии книг по синергетике, в рамках которой к настоящему времени увидели свет уже более 60 томов. Г. Хакен является одним из «пионеров» создания теории экситонов и поляронов в твердых телах. Ему принадлежат работы по теории лазеров, а именно флуктуации лазерного излучения, из которой берет начало известный термин «неравновесные фазовые переходы». Г. Хакен определял ее не только как науку о самоорганизации, но и как теорию совместного действия многих подсистем, в результате которого на макроскопическом уровне возникают новая структура и соответствующее функционирование [4, 5, 7, 9, 17].

В 80-х гг. XX века единая наука о самоорганизации была названа в Германии синергетикой (Г. Хакен), во франкоязычных странах – теорией диссипативных структур (И. Пригожин), в США – теорией динамического хаоса (М. Фейгенбаум).

Классические работы, в которых развивается математический аппарат для описания катастрофических синергетических процессов, принадлежат перу российского математика В. И. Арнольда и французского математика Р. Тома. Эту теорию называют по-разному: теорией катастроф, особенностей или бифуркаций.

Среди российских ученых следует упомянуть также академика А. А. Самарского и члена-корреспондента РАН С. П. Курдюмова [15]. Их школа разрабатывает теорию самоорганизации на базе математических моделей и вычислительного эксперимента на дисплеях компьютеров. Эта школа выдвинула ряд оригинальных идей для понимания механизмов возникновения и эволюции относительно устойчивых структур в открытых (нелинейных) средах (системах). Школой С. П. Курдюмова зафиксирован такой тип неустойчивости сложных систем, когда формирующаяся аттрактор-структура при достижении определенных пределов обнаруживает крайнюю чувствительность и склонность к распаду под влиянием флуктуаций. Учитывая характер неустойчивости и направленность последующей эволюции сложной системы, можно синергетическую ситуацию первого типа обозначить как

кризис изоляции компонентов системы, а синергетическую ситуацию второго типа – как кризис интеграции. Нетрудно обнаружить эти типы ситуаций в явлениях биологической и социальной эволюции (например: зарождение, рост и деление клеток; возникновение, рост и деление на филиалы разросшихся организаций).

Широко известны также работы академика Н. Н. Моисеева, разрабатывающего идеи универсального эволюционизма и коэволюции человека и природы, работы биофизиков, членов-корреспондентов РАН М. В. Волькенштейна и Д. С. Чернавского (биофизическая школа) [34–37].

Концепция универсального эволюционизма, сформулированная Н. Н. Моисеевым [38], является «физикалистской», но логика вынуждает автора обратиться к биологическим, социальным и культурологическим аспектам эволюции, что придает концепции системно-синергетический характер, проявляющийся уже в ее постулатах: о Вселенной как Универсуме, об индетерминизме Вселенной, о механизмах самоорганизации, лежащих в основе вселенской эволюции. Самоорганизация Вселенной, по Моисееву, происходит в соответствии с дарвиновской триадой: изменчивость, наследственность, отбор. В основе рациональной деятельности – простой «дарвиновский» тип механизмов, обеспечивающих быструю коренную перестройку характера развития системы и отличающихся принципиальной непредсказуемостью результатов. Если знание механизмов дарвиновского типа позволяет человеку планировать и направлять развитие, то изучение бифуркации открывает возможность предвидеть и избегать непредсказуемых катастрофических ситуаций. В основе «сборки» лежит свойственное элементам стремление к объединению («кооперативность»), приводящее к возникновению свойств, отсутствующих у объединяющихся элементов.

Такое разнообразие научных школ, направлений, идей свидетельствует о том, что синергетика представляет собой скорее парадигму, чем теорию. Это значит, что она олицетворяет определенные, достаточно общие концептуальные рамки, фундаментальные идеи и методы (образцы) научного исследования.

Современная наука в лице синергетики получает уникальный категориальный аппарат, способный описать практически любую сложную многоуровневую систему с точки зрения таких ее свойств, как открытость и закрытость, линейность и нелинейность, устойчивость и неустойчивость, порядок и хаос, способность к самоорганизации, диссипативность, фрактальность и т. д.

1.2 Категориальный аппарат синергетики

1.2.1 Основные понятия синергетики

Первоначально необходимо рассмотреть элементарные понятия, без знания которых невозможно осознание законов синергетики и ее методологического аппарата.

Что же является линией? По выражению из «Начал» Евклида [39] – «длина без ширины», то есть объект, имеющий одно пространственное измерение. Со школы все знают, что линия на графике задается функцией $y = kx + b$, где k – показатель угла наклона к оси абсцисс (коэффициент), а b – это отступ по оси ординат от начала системы отсчета. Так можно изобразить линию в двухмерной системе координат.

Если x и y заменить показателями каких-либо взаимосвязанных процессов, то уже в двухмерной системе координат можно получить не просто отображение линии, а отображение линейности некоторого процесса, если конечно такая установлена.

Линейные процессы в зависимости могут быть заданы прямой линией, отличаться они могут только по параметрам k и b . Все линейные процессы можно разделить на три типа: возрастающие или развивающиеся, убывающие или деградирующие, постоянные.

Линейность (от лат. *linea* – нить, черта, граница) – это свойство быть линейным, в частности, свойство системы, характеризующееся тем, что отношения между переменными, описывающими поведение системы, (например, между переменными входа и выхода, независимой и зависимой переменными, аргументом и функцией), описываются линейной функцией (значения выходных сигналов пропорциональны значениям входных сигналов) [35].

Одно из самых общих понятий, применяемых при описании объектов в синергетике, – понятие «система». В литературе встречается более 40 различных определений этого понятия. Все они в зависимости от подхода могут быть разделены на три группы. В первой группе системы рассматриваются как некоторые классы математических моделей. Вторая группа определяет систему через понятия системного подхода – «элементы», «отношения», «связи», «целое», «целостность». В третьей группе система определяется с позиций теории регулирования через понятия «вход», «выход», «переработка информации», «закон поведения», «управление» [40]. Наиболее общим и в то же время достаточно простым является определение, приведенное ниже.

Система (от др.-греч. σύστημα – целое, составленное из частей; соединение) – совокупность элементов, определенным образом связанных и взаимодействующих между собой для выполнения заданных целевых функций.

Термин **«целостность»** в синергетической методологии познания имеет два смысла: как обозначение открытого незамкнутого процесса становления системы целым (предмет) и как обозначение свойства (признака) системы, уже ставшей целым, свойства «быть целым» [9,10]. Различие словоупотребления будет очевидно из контекста.

Важные свойства линейных процессов:

- устойчивость;
- легкопрогнозируемые;
- позволяют на основе прошлых фактов определить тенденцию и поэтому удобны для приспособления под них.

Общим свойством живых систем является их нелинейность. Линейные модели (модели, обладающие свойством линейности) живых существ и явлений являются намеренным отвлечением от реальности, упрощением представлений о ней.

Линейные уравнения можно применять для описания равновесных процессов и поведения равновесных систем.

Приведем основные определения систем [1–10, 37–45].

Равновесной системой называется такая система, все параметры которой во всех точках одинаковы и не меняются в течение достаточно долгого времени.

Длительное время в состоянии равновесия могут находиться лишь закрытые системы, не имеющие связей с внешней средой, тогда как для открытых систем равновесие может быть только мигмом в процессе непрерывных изменений. Равновесные системы не способны к развитию и самоорганизации, поскольку подавляют отклонения от своего стационарного состояния, тогда как развитие и самоорганизация предполагают качественное его изменение.

Неравновесность, наоборот, можно определить как состояние открытой системы, при котором происходит изменение ее макроскопических параметров, то есть ее состава, структуры и поведения [20].

Таким образом, отличия неравновесной системы от равновесной заключаются в следующем:

- 1 Система реагирует на внешние условия (гравитационное, электромагнитное поля и т. п.).

2 Поведение системы случайно и не зависит от начальных условий, т. е. не зависит от предыстории.

3 Приток энергии создает в системе порядок, и, стало быть, энтропия уменьшается.

4 Наличие в развитии системы бифуркации – переломной точки в развитии системы.

5 Когерентность – система ведет себя как единое целое, т.е. согласованность действий всех ее элементов.

Открытость – способность системы постоянно обмениваться веществом (энергией, информацией) с окружающей средой и обладать как «источниками» – зонами подпитки ее энергией окружающей среды, действие которых способствует наращиванию структурной неоднородности данной системы, так и «стоками» – зонами рассеяния, «сброса» энергии, в результате действия которых происходит сглаживание структурных неоднородностей в системе [9, 17].

Эмерджентность (от англ. emergence – возникающий, неожиданно появляющийся) в теории систем – наличие у какой-либо системы особых свойств, не присущих её подсистемам и блокам, а также сумме элементов, не связанных особыми системообразующими связями; несводимость свойств системы к сумме свойств её компонентов; синоним – «системный эффект». В биологии и экологии понятие эмерджентности можно выразить так: одно дерево – не лес, скопление отдельных клеток – не организм. Например, свойства биологического вида или биологической популяции не представляют собой свойства отдельных особей, понятия «рождаемость», «смертность» не применимы к отдельной особи, но применимы к популяции или виду в целом [4].

Нелинейностью называется свойство системы иметь в своей структуре различные стационарные состояния, соответствующие различным допустимым законам поведения этой системы [9]. Всякий раз, когда поведение таких объектов удастся выразить системой уравнений, эти уравнения оказываются нелинейными в математическом смысле. Нелинейность в математическом смысле означает определенный вид математических уравнений, содержащих искомые величины в степенях больше 1 или коэффициенты, зависящие от свойств среды.

Математическим объектам с таким свойством соответствует возникновение спектра решений вместо одного единственного решения системы уравнений, описывающих поведение системы [22]. Каждое решение из этого спектра характеризует возможный способ поведения системы. В отличие

от линейных систем, подсистемы которых слабо взаимодействуют между собой и практически независимо входят в систему, то есть обладают свойством **аддитивности** (целая система сводима к сумме ее составляющих), поведение каждой подсистемы в нелинейной системе определяется в зависимости от координации с другими [21]. Система нелинейна, если в разное время, при разных внешних воздействиях ее поведение определяется различными законами. Это создает феномен сложного и разнообразного поведения, не укладывающегося в единственную теоретическую схему. Из этой поведенческой особенности нелинейных систем следует важнейший вывод по поводу возможности из прогнозирования и управления ими.

Следует отметить, что линейность абсолютизирует поступательность, безальтернативность, торжество постоянства. Нелинейность фиксирует непостоянство, многообразие, неустойчивость, отход от положений равновесия, случайности, точки ветвления процессов, бифуркации.

Нелинейные системы – колебательные (волновые) системы, процессы в которых не удовлетворяют принципу суперпозиции в отличие от линейных систем. Все реальные физические системы нелинейны, их можно считать линейными лишь приближённо при малой интенсивности колебательных и волновых процессов.

Мир с синергетической точки зрения – это иерархия нелинейных структур, формирующихся в ходе эволюции с нарастающей избирательностью. Чем многообразнее и сложнее компоненты, тем специфичнее условия достижения их когерентности.

Когерентность (от лат. *cohaerens* – находящийся в связи) – 1) кооперативное, согласованное действие; 2) упорядоченность и стабильность в волновом сигнале, отражающем ритмическую активность любой физиологической системы в течение заданного периода времени; 3) согласованное протекание во времени и в пространстве нескольких колебательных или волновых процессов, проявляющееся при их сложении [10, 17, 18].

Принцип когерентности заключается в утверждении, что все существующее находится во взаимосвязи.

Нелинейные системы считаются априори динамическими.

Динамическая система – математический объект, соответствующий реальным физическим, химическим, биологическим и др. системам, эволюция во времени которых на любом интервале времени однозначно определяется начальным состоянием.

Таким математическим объектом может быть система автономных дифференциальных уравнений. Эволюцию динамической системы можно наблюдать в пространстве состояний системы.

Математическим образом нелинейные системы описываются нелинейными уравнениями (дифференциальными и др.) [5–7, 9]. Изучением колебательных и волновых процессов в конкретных нелинейных системах занимаются гидродинамика, нелинейная оптика, нелинейная акустика, физика плазмы, а также химия, биология, экология, социология и др. В то же время многие нелинейные системы различной природы имеют одинаковое математическое описание. Соответственно совпадает и характер протекающих в них процессов. Это послужило основой для развития единого подхода к изучению нелинейных систем, позволило выработать базовые модели, образы и понятия и проанализировать основные колебательные и волновые явления в таких системах вне зависимости от их конкретной природы. В синергетике есть очень много нерешённых проблем, она находится в состоянии интенсивного развития.

Аналитическое описание процессов в нелинейных системах затруднено ввиду отсутствия общих методов решения нелинейных уравнений. Наиболее доступно изучение динамики слабонелинейных систем. Описывающие их уравнения содержат нелинейные члены с малым параметром, что позволяет использовать различные варианты метода возмущений. Нелинейность в таких системах проявляется либо в возникновении малых поправок к решению системы линеаризованных уравнений, получаемой в пренебрежении нелинейными членами, либо, что более важно, в медленном изменении ее параметров. При исследовании сильнонелинейных систем, за исключением ограниченного числа точно решаемых случаев, используется численное моделирование [34, 44, 45].

Понятие «*устойчивость*» используется в различных областях знаний, отражает отношение человека к природе и присуще всем природным образованиям и социальным формированиям. Активно изучается устойчивость биологических, географических, физико-географических и других природных систем от молекулярного до биосферного уровней [18].

Проблема устойчивости – одна из центральных проблем современной экологии. Несмотря на относительную «молодость» понятия «устойчивость», обширный диапазон его использования определял широкую терминологию и множество вариантов интерпретации. При характеристике устойчивости природных систем используются термины «устойчивость», «стабильность», «гомеостазис», «толерантность» и др.

Развитие понимается в синергетике как процесс становления качественно нового, того, что еще не существовало в природе и предсказать которое невозможно [4]. Механизм, который ею предлагается, – это спонтанная флуктуация, событие в точке бифуркации, экспоненциальный процесс до определенного момента [10]. Основным понятием предстает понятие неустойчивости.

В замкнутых системах процессы развиваются в направлении возрастания энтропии и приводят к хаосу [5]. В открытых же системах в соответствующие моменты – моменты неустойчивости – могут возникать малые возмущения, флуктуации, способные разрастаться в макроструктуры. То есть хаос и случайность в них могут выступать в качестве активного начала, приводящего к развитию новой самоорганизации.

В синергетике в противоположность кибернетике исследуются механизмы возникновения новых состояний, структур и форм в процессе самоорганизации, а не сохранения и поддержания старых форм. Поэтому она опирается на *принцип положительной обратной связи*, когда изменения, возникающие в системе, не подавляются и корректируются, а, наоборот, постепенно накапливаются и в конце концов приводят к разрушению старой и возникновению новой системы, *т. е. через неустойчивость происходит процесс самоорганизации*.

Самоорганизация – элементарный процесс эволюции, состоящий из неограниченной последовательности процессов самоорганизации. Термин «самоорганизация» используется для обозначения диссипативной самоорганизации, т. е. образования диссипативных структур [17]. Наряду с диссипативной самоорганизацией существуют и другие формы самоорганизации, такие как консервативная самоорганизация (образование структур кристаллов, биополимеров и т. д.) и дисперсионная самоорганизация (образование солитонных структур).

1.2.2 Нелинейные структуры в синергетике

Рассмотрим типы структур, которые изучает синергетика [5, 6, 10, 28, 41, 42].

Диссипативные структуры – структуры, возникающие в процессе самоорганизации, для осуществления которых необходим рассеивающий (диссипативный) фактор. Возникновение диссипативных структур носит пороговый характер.

Понятие диссипативности непосредственно связано с понятием параметров порядка.

Параметр порядка – термодинамическая величина, характеризующая дальний порядок в среде, возникающий в результате спонтанного нарушения симметрии при *фазовом переходе*.

Понятие «параметр порядка», также важнейшее в синергетике, тесно связано с принципом подчинения. *В общем случае параметром порядка называется та переменная, через которую можно выразить все остальные, что и возможно в случае действия принципа подчинения.* При самоорганизации в системах разной природы в качестве параметра порядка могут выступать разные величины. Важно то, что они являются макроскопическими характеристиками системы (например, температура для тепловых структур).

Спонтанное нарушение симметрии – частичная или полная потеря системой имеющейся в ней симметрии, выражающаяся в том, что энергетически или термодинамически наиболее выгодные состояния системы обладают меньшей симметрией, чем уравнения, её описывающие, причём преобразования симметрии переводят эти состояния друг в друга.

Фазовый переход (фазовое превращение) – переход между различными макроскопическими состояниями (фазами) многочастичной системы, происходящий при определенных значениях внешних параметров (температуры T , давления P , магнитного поля H и т. п.).

Новая структура всегда является результатом раскрытия неустойчивости в результате флуктуаций.

Флуктуация (от лат. fluctuatio – колебание) – случайное отклонение физической величины от ее среднего значения.

Флуктуации – движения элементов микроуровня, обычно расцениваемые как случайные. В зависимости от своей силы флуктуации, воздействующие на систему, могут привести ее к различным вариантам дальнейшего существования. Выбор вариантов происходит в точке бифуркации.

Бифуркация (от лат. bifurcus – «раздвоенный») – изменение характера движения динамической системы на большом временном интервале при изменении одного или нескольких параметров. Те значения параметров, при которых изменяются качественные или топологические свойства движения, называются **критическими, или бифуркационными значениями**. Например, при сжатии стержня происходит выпучивание, и одно состояние равновесия, потеряв устойчивость, сменяется новыми устойчивыми состояниями равновесия.

Точкой бифуркации (или бифуркационным значением параметров) называется такое значение параметров, при котором динамическая система

является структурно неустойчивой – малое шевеление параметров приводит к качественно различным картинам поведения.

Точка бифуркации представляет собой переломный, критический момент в развитии системы, в котором она осуществляет выбор пути; иначе говоря, это точка ветвления вариантов развития, точка, в которой происходит катастрофа.

Нестационарные (эволюционирующие) структуры возникают за счет активности нелинейных источников энергии. Здесь структура – это локализованный в определенных участках среды процесс, имеющий определенную геометрическую форму и способный развиваться, трансформироваться или же переноситься в среде с сохранением формы.

В цикле развития самоорганизующихся на проектных началах систем наблюдаются две принципиальные фазы: 1) период плавного эволюционного развития с предсказуемыми квазилинейными изменениями, подводщими к критическому неустойчивому состоянию; 2) выход из критического состояния скачком и переход в новое устойчивое состояние большей сложности и упорядоченности. Во второй фазе эволюционный путь как бы разветвляется, возможно развитие процесса по крайней мере по двум направлениям (точка бифуркации).

Синергетика сформулировала принцип самодвижения в неживой природе – создание более сложных систем из более простых. С этой парадигмой в физику проник эволюционный подход, и наука приходит к пониманию творения как создания нового. Синергетика ввела случайность на макроскопический уровень, подтвердив тем самым выводы механики для микроскопического уровня.

Для самоорганизующихся систем существует несколько различных путей развития. В равновесном или слабобалансированном состоянии в системе существует только одно стационарное состояние, которое зависит от некоторых управляющих параметров (факторов в экологии). Изменение этих управляющих параметров будет уводить систему из равновесного состояния. В конце концов вдали от равновесия система достигает некоторой критической точки (точки бифуркации).

Начиная с этого момента, на дальнейший ход эволюции системы могут оказывать воздействия даже ничтожно малые флуктуации, которые в равновесном состоянии системы попросту не различимы. Поэтому невозможно точно предсказать, какой путь эволюции выберет система за порогом бифуркации.

1.2.3 Формализация системы

Систему можно определить как некоторый класс множеств:

$$S = \{M_S^i, L_S^j, K_S^k\}, \quad (1.1)$$

где M_S^i – подкласс множеств элементов системы S ; L_S^j – подкласс множеств, образующихся в результате деления элементов системы S на подэлементы; K_S^k – подкласс таких множеств, в которые рассматриваемая система S сама входит в качестве элемента.

Последнее определение фиксирует некоторое множество элементов и их взаимоотношения, подчеркивая, что любая система состоит из набора взаимосвязанных элементов (т. е. подсистем, вглубь которых анализ не распространяется), каждый из которых может быть системой, состоящей из большой совокупности элементов. В то же время исходная система S сама является элементом системы более высокого порядка (метасистемы). Элементы системы S могут быть физическими (механическими, электрическими, термодинамическими и др.), химическими, биологическими и смешанными. Любая система характеризуется наличием входов и выходов, элементным составом и структурой, набором параметров, описывающих ее внутреннее состояние, и законом поведения, связывающим выходные сигналы (эффекты, ответы, реакции) с входными (причиной, стимулом, воздействием, возмущением) (рис. 1.1)[43].

Закон поведения системы в общем случае выражается системой нелинейных уравнений вида

$$y_i = f_i(x_1, x_2, \dots, x_n, u_1, u_2, \dots, u_r), \quad (1.2)$$

где y_j – выходной сигнал на j -м выходе системы при $j = \overline{1, m}$; x_1, x_2, \dots – входные сигналы; u_1, u_2, \dots – определяющие параметры системы; f_j – функционал, связывающий сигнал на j -м выходе с входными сигналами и определяющими параметрами.

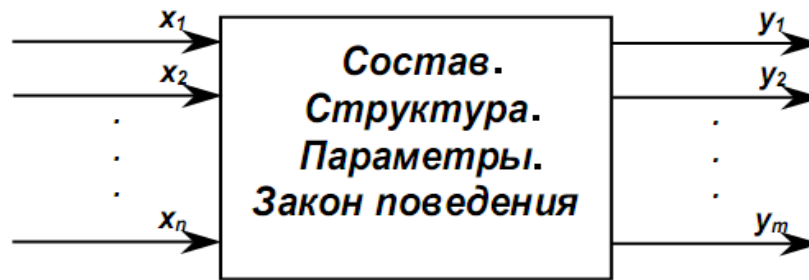


Рисунок 1.1 – Общая схема системы [43]

Понятие целого предполагает устойчивость, повторяемость, воспроизводимость процесса становления.

Необратимость, связанная не только с появлением, но и с удержанием нового, хотя и предполагает в качестве своего условия неустойчивое поведение исходной среды, с необходимостью требует устойчивости вновь сформировавшихся систем.

В синергетике понятие *диссипативной структуры* отражает именно устойчивые результаты самоорганизации.

Понятие структурной устойчивости, играющее важную роль в теории самоорганизации, открывает большие возможности для рассмотрения диссипативных структур как органического целого. Дело в том, что образование таких структур не зависит ни от разброса в начальных условиях, ни (коль скоро они уже образовались) от флуктуаций значений параметров [41]. Например [33], свойства автоволны в возбужденной среде полностью определяются лишь характеристиками самой среды, скорость, амплитуда и форма автоволны не зависят от начальных условий, система как бы «забывает» их. Математически это может выражаться возникновением так называемого предельного цикла для траектории в фазовом пространстве решений соответствующих уравнений, т. е. со временем любая начальная точка в фазовом пространстве приближается к одной и той же периодической траектории [45]. Это означает, что диссипативная структура способна к самовоспроизведению. Возникновение предельных циклов – не единственная форма поведения систем в «закритической» области их существования. Но в любом случае устойчивые диссипативные структуры характеризуются периодичностью своего поведения. Так, автокаталитические химические реакции, играющие важную роль в жизнедеятельности организма, имеют циклический характер.

Переход системы в новое состояние может сопровождаться появлением новых связей и исчезновением старых, изменениями типа связей,

изменением элементного состава системы, который может привести к изменению функции.

Все это приводит к значительным трудностям при изучении систем даже при относительно небольшом количестве элементов, содержащихся в системе. Совокупность n изолированных элементов еще не является системой. По характеру поведения различают детерминированные и стохастические системы. Для детерминированных систем точно известен закон поведения, для стохастических можно определить вероятность того или иного ее состояния, той или иной реакции.

Состояние системы определяется значениями ее характеристических параметров, параметров составляющих ее элементов (положением системы в пространстве, а также значениями производных. Эти значения могут изменяться во времени и пространстве, что означает переход системы из одного состояния в другое. Любую систему можно представить в виде блок-схемы графа, отражающих ее структуру, т. е. как совокупность выявленных элементов (подсистем) и их взаимосвязей (рис. 1.2) [43].

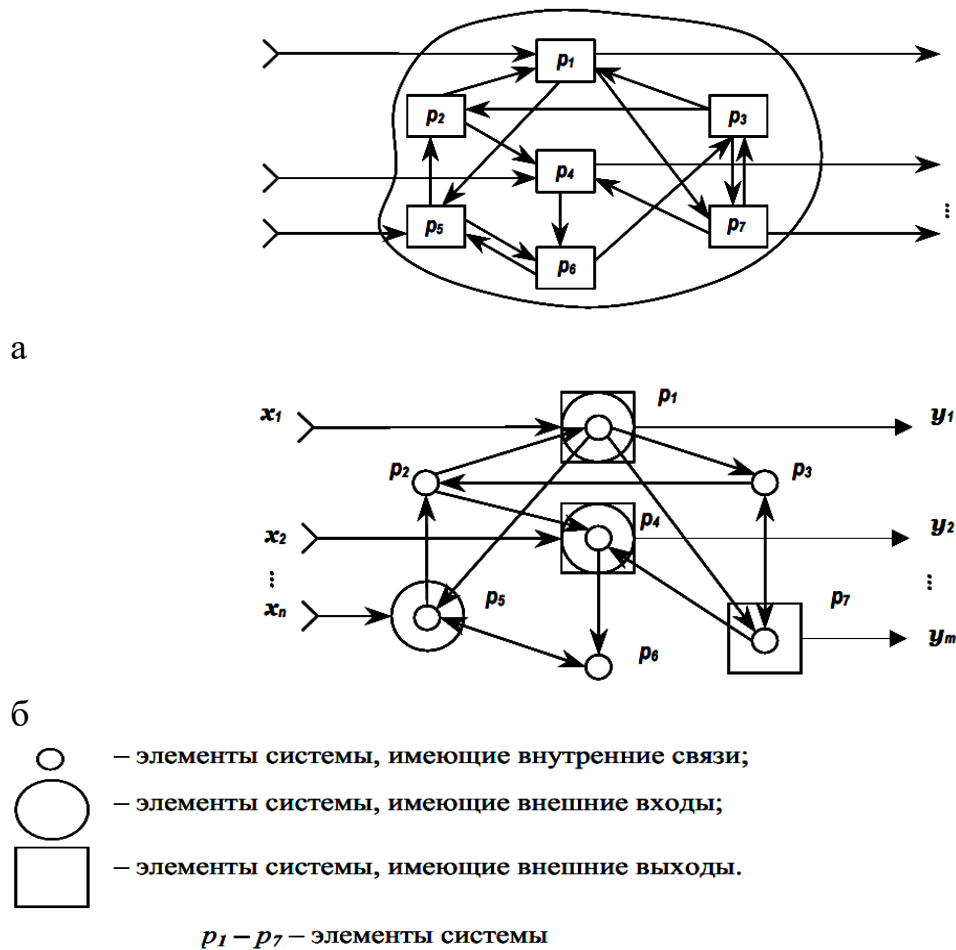


Рисунок 1.2 – Изображение структуры системы в виде блок-схемы (а) и графа (б) [43]

Граф – это множество точек или вершин и множество линий или ребер, соединяющих между собой все или часть этих точек.

Системы, способные изменять состояние под влиянием воздействий, становятся динамическими. Если производные равны нулю, динамическая система переходит в состояние покоя и становится статической [44]. Переход системы из одного состояния в другое под воздействием внешних или внутренних факторов называется процессом, совокупность процессов составляет сущность управления, при этом управление обязательно предусматривает наличие управляющего канала.

При взаимодействии с внешней средой система становится открытой. Если изменением энтропии среды можно пренебречь по сравнению с изменением энтропии системы, то такую среду будем считать энтропостатом [45].

Неравновесные системы принципиально открыты, поскольку и энергетически малое воздействие, если оно резонансно характеристическим особенностям системы, может привести к существенным изменениям. В этом смысле понятие замкнутой (не обменивающейся со средой веществом), а тем более изолированной (не обменивающейся со средой энергией) системы соответствует лишь некоторым искусственно созданным и специально поддерживаемым ситуациям (например, термостат), а по отношению к природным объектам оказывается основанным на идеализации.

Энтропостат – среда, изменением энтропии которой можно пренебречь по сравнению с изменением энтропии системы, взаимодействующей с этой средой. Иначе говоря, внешняя среда является энтропостатом, если ее влияние на систему значительно превышает обратное влияние системы на среду.

Можно показать, что для стационарных состояний, отличающихся друг от друга величиной взаимодействия системы с энтропостатом, выполняется неравенство [44]:

$$S(X) > S(X|Y_1) > S(X|Y_1Y_2) > \dots > S(X|Y_1Y_2\dots Y_i) > \dots, \quad (1.3)$$

где $S(X)$ – равновесное значение энтропии замкнутой системы, структура которой описывается обобщенной переменной X ; $S(X|Y_1Y_2\dots Y_i)$ – условная энтропия, соответствующая значению энтропии системы в i -м стационарном состоянии, отличающемся от замкнутого изменениями в структуре, появившимися благодаря внешнему воздействию и описываемыми обобщенными переменными – Y_1, Y_2, \dots, Y_i .

Введем новый параметр α – степень открытости системы, который обобщает собой величину всех изменений в системе, обусловленных взаимодействием последней с внешней средой (величина взаимодействия с энтропостатом). Очевидно, что $\alpha = 0$ в абсолютно замкнутом состоянии, $\alpha = \alpha_{\max}$ в абсолютно разомкнутом состоянии.

Анализируя неравенство (1.3), нетрудно заметить, что каждому стационарному значению энтропии из этого неравенства однозначно соответствует определенная степень открытости α_i . Учитывая связь энтропии с порядком, получаем, что между степенью открытости и стационарным уровнем порядка в системе, названным критическим уровнем организации, существует однозначное соответствие.

В связи с тем, что в стационарном состоянии действия процессов самоорганизации и дезорганизации уравниваются друг друга, предыдущий вывод фактически означает, что если по каким-либо причинам система будет организована ниже (выше) своего критического уровня, соответствующего данной степени открытости, то указанное равновесие нарушится, и в системе будут преобладать процессы самоорганизации (дезорганизации) до тех пор, пока порядок в системе не станет соответствовать ее степени открытости.

Изменить значение критического уровня организации системы можно, только изменив ее степень открытости. При этом, увеличив степень открытости, мы перейдем в новое стационарное состояние с меньшим значением энтропии, т. е. с более высоким критическим уровнем организации. Наоборот, уменьшив степень открытости, уменьшается и критический уровень организации [45].

Синергетические системы как открытые динамические нелинейные системы обладают рядом общих свойств и характеристик [4–10, 17, 32, 33, 36–38, 45, 46]:

1 Каждая система имеет определенную структуру. Она не может состоять из абсолютно идентичных элементов; для любой системы справедлив принцип необходимого разнообразия элементов. Разнообразие зависит от числа разных элементов, составляющих систему, и может быть измерено. В экологии оно обычно оценивается по показателю К. Шеннона [46]:

$$V = -\sum_{i=1}^n p_i \lg p_i, \quad (1.4)$$

где V – индекс разнообразия; p_i – нормированная относительная численность i -го вида организмов в совокупности n видов ($\sum p_i = 1$).

2 Выделение системы делит ее мир на две части: саму систему и ее среду. При этом сила связей элементов внутри системы больше, чем с элементами среды. В природе реально существуют только открытые системы. Системы, между внутренними элементами которых и элементами среды осуществляются переносы вещества, энергии и информации, носят название динамических систем. Любая живая система – от вируса до биосферы – представляет собой открытую динамическую систему.

3 Преобладание внутренних взаимодействий в динамической системе над внешними определяет ее устойчивость, способность к самоподдержанию. Если внешние силы, действующие на машину, оказываются больше сил механической связи между частями машины, она разрушается. Подобно этому внешнее воздействие на биологическую систему, превосходящее силу ее внутренних связей и способность к адаптации, приводит к необратимым изменениям и гибели системы. Устойчивость динамической системы поддерживается непрерывно выполняемой ею внешней циклической работой («принцип велосипеда»).

4 Действие системы во времени называют поведением системы. Изменение поведения под влиянием внешних условий обозначают как реакцию системы, а более или менее стойкие изменения реакций системы – как ее приспособление, или адаптацию. Адаптивные изменения структуры и связей системы во времени рассматривают как ее развитие, или эволюцию. Возникновение и существование всех материальных систем обусловлено эволюцией. Самоподдерживающиеся динамические системы эволюционируют в сторону усложнения организации и возникновения системной иерархии – образования подсистем в структуре системы. При этом наблюдается определенная последовательность становления эмерджентных свойств (качеств) системы – устойчивости, управляемости и самоорганизации.

5 С возрастанием иерархического уровня системы возрастает и сложность ее структуры и поведения. Все реальные природные биосистемы очень сложны. Если система способна к акту решения, т. е. к выбору альтернатив поведения (в том числе и в результате случайного изменения), то такая решающая система считается сложной. Следствием увеличения сложности систем в ходе их эволюции является ускорение эволюции, все более быстрое прохождение ее стадий, равноценных по качественным сдвигам.

6 Важной особенностью эволюции сложных систем является неравномерность, отсутствие монотонности. Периоды постепенного накопления незначительных изменений иногда прерываются резкими качественными скачками, существенно меняющими свойства системы. Обычно

они связаны с так называемыми точками бифуркации – раздвоением, расщеплением прежнего пути эволюции. От выбора того или иного направления развития в точке бифуркации очень многое зависит, вплоть до появления и процветания нового мира веществ, организмов, социумов или, наоборот, гибели системы. Даже для решающих систем результат выбора часто непредсказуем, а сам выбор в точке бифуркации может быть обусловлен случайным импульсом.

7 Любая реальная система может быть представлена в виде некоторого материального подобия или знакового образа, называемого соответственно аналоговой или знаковой моделью системы. Моделирование неизбежно сопровождается некоторым упрощением и формализацией взаимосвязей в системе.

8 Если система организована выше критического уровня, то в ней преобладают процессы дезорганизации, если ниже – процессы упорядочения и самоорганизации: на самом критическом уровне действия указанных процессов уравнивают друг друга, и состояние системы становится стационарным.

9 Между степенью открытости системы и критическим уровнем ее организации существует однозначное соответствие. Чтобы увеличить порядок в системе, необходимо увеличить ее степень открытости, новому значению которой будет соответствовать новый более высокий критический уровень организации, в результате чего в системе будут преобладать процессы, упорядочивающие ее до нового критического уровня; наоборот, чтобы дезорганизовать систему, необходимо уменьшить ее степень открытости, при этом понизится и критический уровень, что вызовет преобладание процессов, дезорганизующих систему до нового его значения.

1.2.4 Аттрактор нелинейных динамических систем

Аттрактор (от лат. *attrahere* – притягивать) – совокупность внутренних и внешних условий, способствующих «выбору» самоорганизующейся системой одного из вариантов устойчивого развития; идеальное конечное состояние, к которому стремится система в своем развитии. Пространство внутри аттрактора, в котором каждая частица (система), туда попавшая, постепенно смещается в заданном направлении, называют **зоной аттрактора**.

Аттракторы – это множества, к которым приближаются точки при последовательных итерациях (повторениях) отображения [47].

Итерация (от лат. *iteratio* – повторение) – повторное применение математической операции в серии аналогичных операций, производимых для получения результата.

С отображениями работать гораздо легче, чем с дифференциальными уравнениями. Если необходимо найти аттрактор, то не нужно вычислять эти итерации и анализировать отображение. Оно само найдёт свой аттрактор. Очень легко поверить, что последовательность вложенных множеств имеет что-то типа «ядра», а говоря формально, что пересечение всех этих множеств непусто.

На рисунке 1.3 это «ядро» изображено чёрным цветом. Это и есть то множество, которое динамическая система сама для себя находит. Именно его называют аттрактором динамической системы (динамическая система — это синоним и дифференциального уравнения, и отображения).

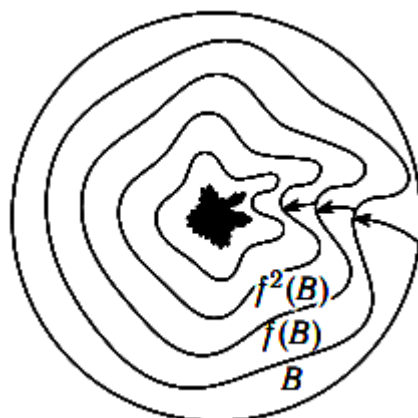


Рисунок 1.3 – Отображение $f(B)$

Аттрактор A отображения $f: B \rightarrow B$ – это пересечение образов фазового пространства при итерациях отображения [47]:

$$A = \bigcap_{n \geq 0} f^n(B). \quad (1.5)$$

Примеры аттракторов: устойчивое состояние равновесия и предельный цикл – режим периодических автоколебаний (замкнутая фазовая траектория, к которой приближаются все соседние траектории, как показано на рис. 1.3–1.4).

Соленоид – это электромагнитная катушка. Почему же аттрактор на рис. 1.4 называется соленоидом? Множество B , т. е. сам бублик, наматывается вокруг своей дырки один раз, 2 раза, 4 раза, 8 раз и т. д., и напоминает катушку.

При состояниях системы, определяемых *простым аттрактором*, траектория развития системы является предсказуемой. При состояниях системы, определяемых *странным аттрактором*, становится невозможным определить положение частиц (их поведение) в каждый данный момент, хотя они находятся в зоне аттрактора [48].

Нелинейные диссипативные системы естественно приводят к понятию странного аттрактора.

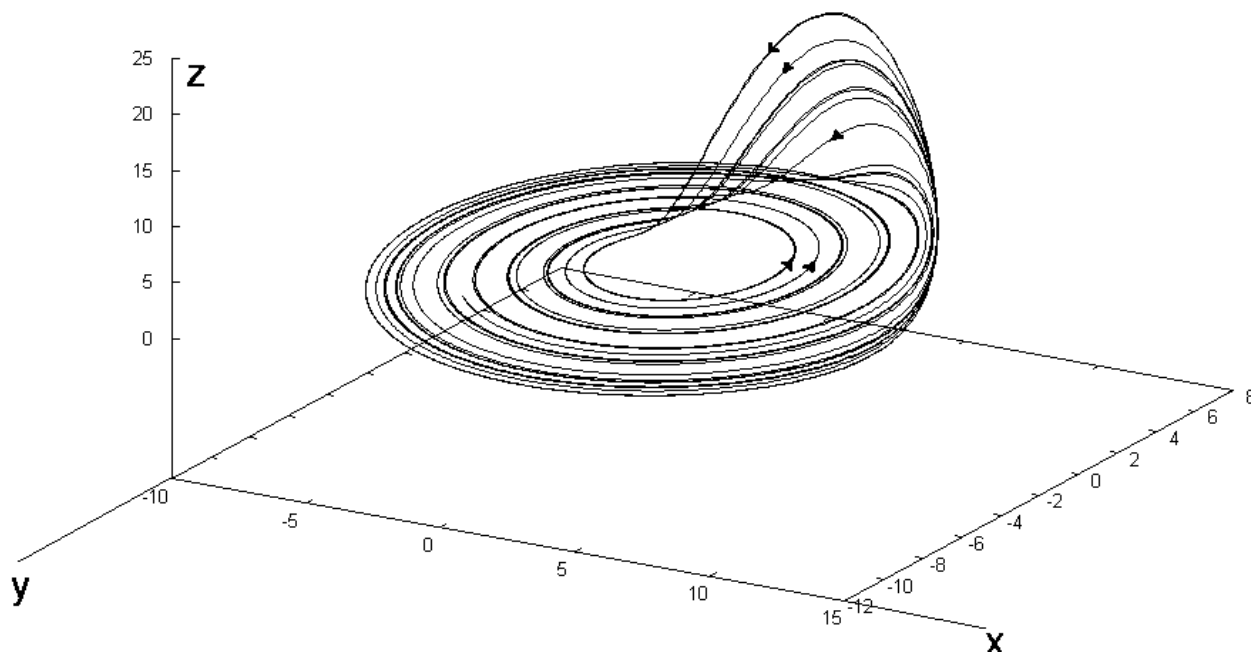


Рисунок 1.4 – Селеноид Смейла–Вильямса

Так, одним из сенсационных открытий было обнаружение Лоренцом сложного поведения сравнительно простой динамической системы из трех обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка с квадратичными нелинейностями. При определенных значениях параметров траектория системы вела себя столь запутанным образом, что внешний наблюдатель мог бы принять ее характеристики за случайные.

Система уравнений Лоренца — это трехмерная система нелинейных автономных дифференциальных уравнений первого порядка вида. Эта система уравнений связывает скорость жидкости x с величинами y и z , характеризующими ее температуру [49]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dx}{dt} = \sigma y - \sigma x, \\ \frac{dy}{dt} = rx - y - xz, \\ \frac{dz}{dt} = xy - bz. \end{array} \right. \quad (1.6)$$

Здесь

$$r = R/R_c, \quad (1.7)$$

где R – число Рэлея; R_c – критическое число Рэлея; σ – число Прандтля; b – постоянная. Отметим, что σ , r , b – управляющие параметры системы.

Эта система возникла в задаче о моделировании конвективного течения жидкости, подогреваемой снизу. Такое течение описывается системой дифференциальных уравнений в частных производных. Система (1.6) получается из нее проектированием на специальное трехмерное подпространство.

Фазовый портрет аттрактора Лоренца

Фазовый портрет – графическое изображение системы на фазовой плоскости (или в многомерном пространстве), по координатным осям которого отложены значения величин переменных системы. Поведение переменных во времени при таком способе представления для каждой начальной точки описывается фазовой траекторией. Совокупность таким фазовых траекторий для любых начальных условий представляет собой фазовый портрет.

В результате численного интегрирования системы (1.6) Э. Лоренц обнаружил, что при $\sigma = 10$, $b = 8/3$ и $24,74 \leq r \leq 28$ у этой динамической системы, с одной стороны, наблюдается хаотическое, нерегулярное поведение всех траекторий (см. рис. 1.5, на котором изображена зависимость координаты x одной из траекторий от времени t), а, с другой стороны, все траектории притягиваются при $t \rightarrow +\infty$ к некоторому сложно устроенному множеству – аттрактору [49].

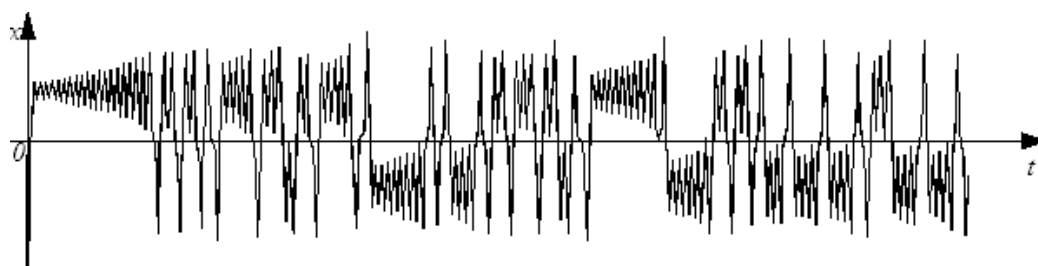


Рисунок 1.5 – Колебательная функция системы

Вначале происходит несколько колебаний увеличивающейся амплитуды в области, где $x > 0$. Далее функция «перескакивает» в область отрицательных значений и также совершает несколько колебаний, после чего вновь

происходит «перескок» в положительную область. Число колебаний между «перескоками» может меняться в широких пределах.

При $r \rightarrow r_3 \approx 24,74$ седловые предельные циклы L_1 и L_2 стягиваются соответственно к стационарным точкам O_1 и O_2 и при $r = r_3$ исчезают, сливаясь с ними; согласно условию $r > r^*$:

$$\begin{aligned} \sigma &> b + 1, \\ r &> r^*, \\ r^* &= \sigma \frac{\sigma + b + 3}{\sigma - b - 1}, \end{aligned} \tag{1.8}$$

стационарные точки O_1 и O_2 становятся при этом неустойчивыми.

При $r_3 < r \leq r_4 = 28$ все стационарные точки (O , O_1 и O_2) являются неустойчивыми. Единственным устойчивым предельным множеством – аттрактором – будет B_2 , т. е. аттрактор Лоренца (рис. 1.8). Следовательно, в системе (1.8) при любых начальных условиях будет устанавливаться хаотический режим движения. Хаотическая траектория аттрактора, представленного на рисунке 1.6 (внизу), просчитывалась при $\sigma = 10$, $b = 8/3$, $r = 28$ и начальных условиях $x(0) = y(0) = z(0) = 0$, плоскость (x, y) соответствует $z = 27$.

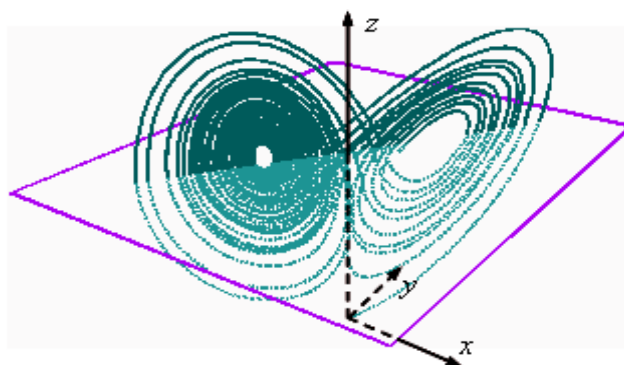
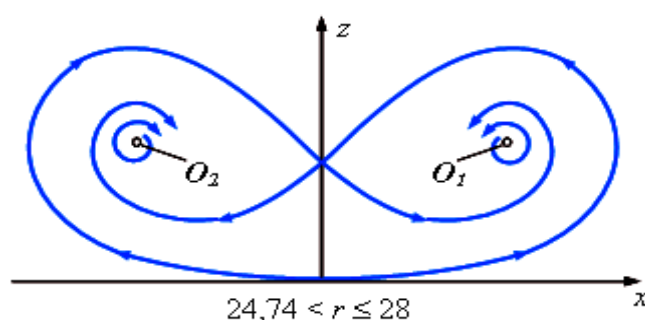


Рисунок 1.6 – Аттрактор Лоренца

Таким образом, исследуемая система ведет себя случайным образом. Объясняется это тем, что решения системы Лоренца оказываются неустойчивыми: разность двух решений может быстро увеличиваться со временем, даже если их начальные данные были очень близки. Отсюда следует, что погода и климат (а система уравнений Лоренца была предложена как одна из упрощенных моделей физики атмосферы) в своей основе непредсказуемы, поскольку им присуще основное свойство хаотической динамики – существенная зависимость от начальных условий.

Математическим представлением такого хаотического поведения диссипативных систем является притягивающее множество сложной структуры – *странный аттрактор*.

Природа странного аттрактора Лоренца была изучена совместными усилиями физиков и математиков. Как и в случае многих других моделей синергетики, выяснилось, что система Лоренца описывает самые различные физические ситуации – от тепловой конвекции в атмосфере до взаимодействия бегущей электромагнитной волны с инверсно-заселенной двухуровневой средой, когда частота волны совпадает с частотой перехода.

Из экзотического объекта странный аттрактор Лоренца оказался довольно быстро низведенным до положения заурядных «нестранных» аттракторов – притягивающих особых точек и предельных циклов. Однако в запасе у странного аттрактора оказалась еще одна довольно необычная характеристика, оказавшаяся полезной при описании фигур и линий, обойденных некогда вниманием Евклида, – так называемая фрактальная размерность.

1.2.5 Фрактальность

Слова «фрактал», «фрактальная размерность», «фрактальность» появились в научной литературе сравнительно недавно и не успели еще войти в большинство словарей, справочников и энциклопедий.

Важное значение для синергетического метода проектирования имеет понятие «фрактальности» – самоподобия.

Фрактáл (от лат. fractus – дроблёный, сломанный, разбитый): 1) это геометрическая фигура, обладающая свойствами самоподобия; 2) это фигура, каждый элемент которой является подобием фигуры в целом.

Фрактальная размерность показывает, насколько плотно и равномерно элементы данного множества заполняют эвклидово пространство.

Под **фрактальностью** понимают явление масштабной инвариантности, когда последующие формы самоорганизации систем напоминают по своему строению предыдущие. Такие «самоподобные» явления довольно часто наблюдаются в природе. Фрактальные аналогии в синергетике являются одним из методов познания природных и социальных феноменов, часто служат основой для построения научных гипотез и теорий. Синергетика, пользуясь данным методом, дает объяснение, почему на тех или иных этапах эволюционного развития повторяются определенные структуры (например, вихревые), раскрывает их роль в процессах самоорганизации в нелинейных системах различных масштабов [50].

Известно, что нелинейные динамические системы обладают несколькими устойчивыми состояниями. То состояние, в котором оказалась динамическая система после некоторого числа итераций, зависит от ее начального состояния. Поэтому каждое устойчивое состояние (т. е. аттрактор) обладает некоторой областью начальных состояний, из которых система обязательно попадет в рассматриваемые конечные состояния. Таким образом, фазовое пространство системы разбивается на *области притяжения* аттракторов. Если фазовым является двухмерное пространство, то, окрашивая области притяжения различными цветами, можно получить *цветовой фазовый портрет* этой системы (итерационного процесса). Меняя алгоритм выбора цвета, можно получить сложные фрактальные картины с причудливыми многоцветными узорами. В качестве примера рассмотрим множество Мандельброта (рис. 1.7 и рис. 1.8) [35, 41, 51].

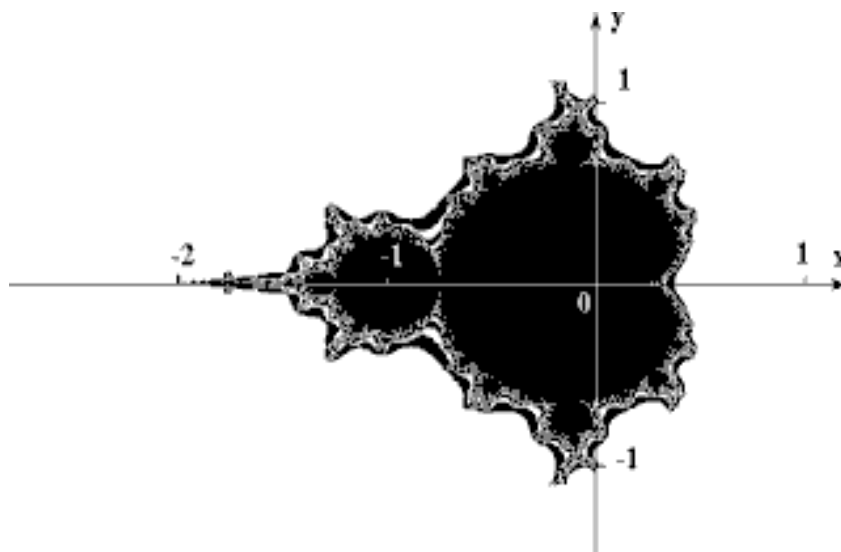


Рисунок 1.7 – Множество Мандельброта

Алгоритм его построения достаточно прост и основан на простом итеративном выражении:

$$Z [i + 1] = Z [i] \cdot Z [i] + C, \quad (1.9)$$

где Z_i и C – комплексные переменные. Итерации выполняются для каждой стартовой точки C прямоугольной или квадратной области – подмножества комплексной плоскости. Итерационный процесс продолжается до тех пор, пока $Z [i]$ не выйдет за пределы окружности радиуса 2, центр которой лежит в точке $(0, 0)$, (это означает, что аттрактор динамической системы находится в бесконечности), или после достаточно большого числа итераций (например, 200–500) $Z [i]$ сойдется к какой-нибудь точке окружности. В зависимости от количества итераций, в течение которых $Z [i]$ оставалась внутри окружности, можно установить цвет точки C (если $Z [i]$ остается внутри окружности в течение достаточно большого количества итераций, итерационный процесс прекращается, и эта точка раstra окрашивается в черный цвет).

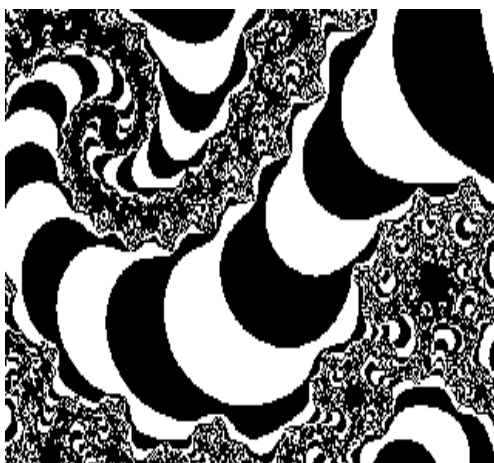


Рисунок 1.8 – Участок границы множества Мандельброта, увеличенный в 200 раз

Вышеописанный алгоритм дает приближение к так называемому множеству Мандельброта. Множеству Мандельброта принадлежат точки, которые в течение бесконечного числа итераций не уходят в бесконечность (точки, имеющие черный цвет). Точки, принадлежащие границе множества (именно там возникают сложные структуры), уходят в бесконечность за конечное число итераций, а точки, лежащие за пределами множества, уходят в бесконечность через несколько итераций (белый фон).

Фракталы часто встречаются в природе. То, как расположены ветки на деревьях, то, как течение реки закручивается или поворачивает, то, как расположены прожилки на листьях, то, как галька скатывается вниз с горы, как образуются колонии микроорганизмов в чашке Петри и даже то, как сосуды в теле человека разветвляются снова и снова, – все это является примерами фрактального движения (рис. 1.9) [7, 52, 53].

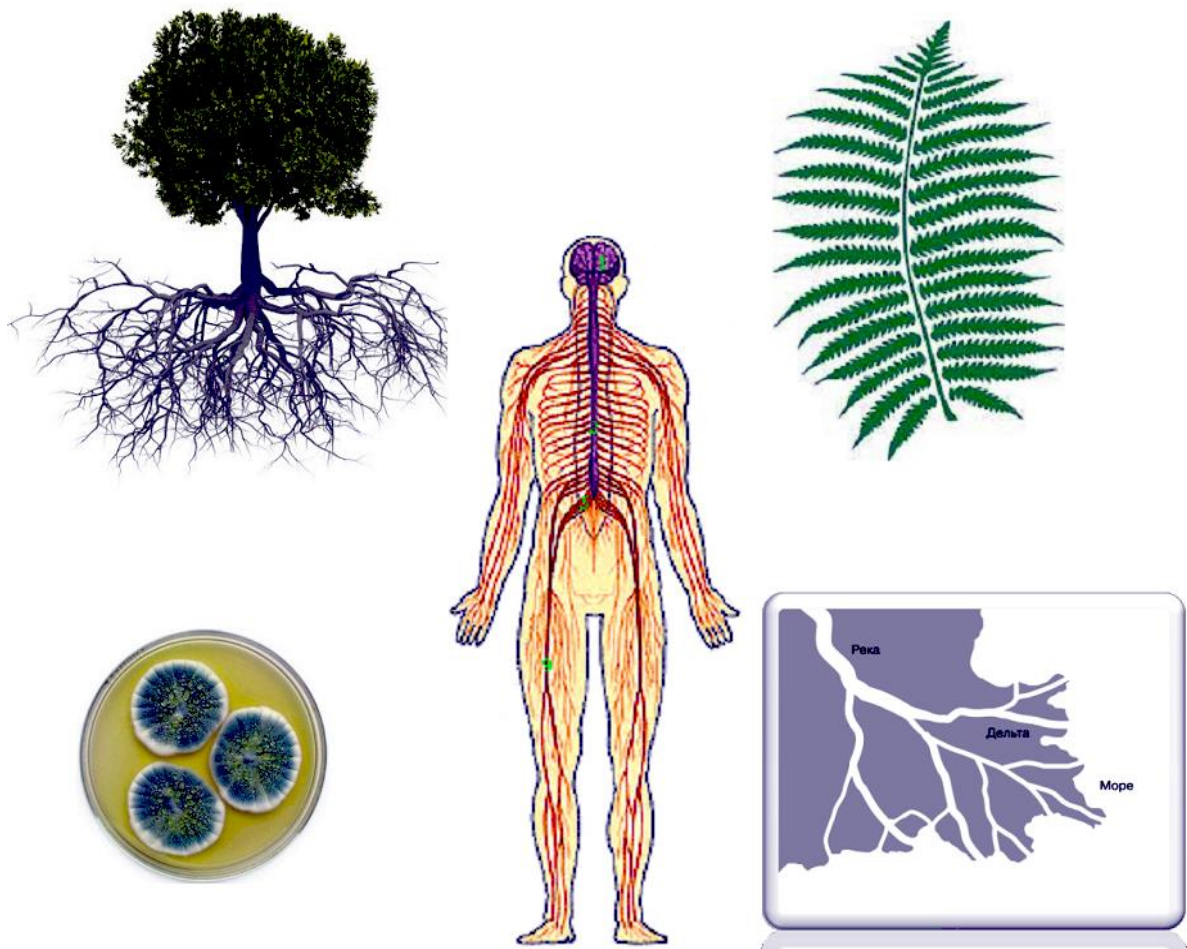


Рисунок 1.9 – Примеры фракталов в природе

С синергетикой связано формирование науки нового типа – нелинейной науки, изучающей нелинейные, открытые и неравновесные системы в отличие от науки классического типа, изучающей закономерности линейного характера – результат изменения системы прямо пропорционален внешнему воздействию.

1.2.6 Концепция самоорганизации систем

Рассмотрим основные концептуальные моменты синергетической теории самоорганизации [4–8, 41, 42, 45, 54–56].

1 Объектами исследования являются открытые системы в неравновесном состоянии, характеризующиеся интенсивным (потокowym, множественно-

дискретным) обменом веществом, энергией и информацией между подсистемами и между системой с ее окружением.

Конкретная система погружена в среду, являющейся также ее субстратом.

В открытых системах, обменивающихся с окружающей средой потоками вещества или энергии, однородное состояние равновесия может терять устойчивость и необратимо переходить в неоднородное стационарное состояние, устойчивое относительно малых возмущений. Такие стационарные состояния и являются *диссипативными структурами*.

При взаимодействии открытых систем с внешней средой происходит диссипация энергии – переход энергии упорядоченного процесса в энергию неупорядоченного процесса, в конечном счете в тепловую энергию. В общем случае *диссипативными* именуют такие системы, в которых энергия упорядоченного процесса переходит в энергию неупорядоченного, в конечном счете *теплового (хаотического) движения*. В открытых системах с нелинейным протеканием процессов возможны термодинамически устойчивые неравновесные состояния, далекие от состояния термодинамического равновесия и характеризующиеся определенной пространственной и временной упорядоченностью (структурой), которую называют диссипативной, так как ее существование требует непрерывного обмена веществом и энергией с окружающей средой. При этом огромное количество микропроцессов приобретает интегративную результирующую на макроуровне, которая качественно отличается от того, что происходит с каждым отдельным ее микроэлементом. Благодаря этому могут спонтанно возникать новые типы структур, характеризующиеся переходом от хаоса и беспорядка к порядку и организации.

Самоорганизующиеся системы характеризуются множеством параметров, причем эти параметры улавливают воздействие окружающей среды неодинаково. С течением времени в системе выделяется несколько ведущих, определяющих параметров, к которым «подстраиваются» остальные. Такие параметры системы именуются параметрами порядка. Соотношения, связывающие параметры порядка, обычно намного проще, чем математические модели, детально описывающие систему в целом, поскольку параметры порядка отражают содержание оснований неравновесной системы. Поэтому выявление параметров порядка – одна из важнейших задач, решаемых при изучении самоорганизующихся систем.

2 Среда – совокупность составляющих ее (среду) объектов, находящихся в динамике. Взаимодействие исследуемых объектов в среде характеризуется как близкодействие – контактное взаимодействие. Среда объектов может быть

реализована в физической, биологической и другой среде более низкого уровня, характеризующихся как газоподобная, однородная или сплошная. (В составе системы реализуется дальное действие – полевое и опосредствованное (информационное) взаимодействие).

3 Различаются процессы организации и самоорганизации. Общим признаком для них является возрастание порядка вследствие протекания процессов, противоположных установлению термодинамического равновесия независимо взаимодействующих элементов среды (также удаления от хаоса по другим критериям). (Организация в отличие от самоорганизации может характеризоваться, например, образованием однородных стабильных статических структур).

4 Результатом самоорганизации становится возникновение, взаимодействие, также взаимосодействие (например, кооперация) и, возможно, регенерация динамических объектов (подсистем) более сложных в информационном смысле, чем элементы (объекты) среды, из которых они возникают. Система и ее составляющие являются существенно динамическими образованиями.

5 Направленность процессов самоорганизации обусловлена внутренними свойствами объектов (подсистем) в их индивидуальном и коллективном проявлениях, а также воздействиями со стороны среды, в которую «погружена» система.

6 Поведение элементов (подсистем) и системы в целом существенным образом характеризуется спонтанностью – акты поведения не являются строго детерминированными.

7 Процессы самоорганизации происходят в среде наряду с другими процессами, в частности противоположной направленности, и могут в отдельные фазы существования системы как преобладать над последними (прогресс), так и уступать им (регресс). При этом система в целом может иметь устойчивую тенденцию или претерпевать колебания к эволюции либо деградации и распаду.

Самоорганизация может иметь в своей основе процесс преобразования или распада структуры, возникшей ранее в результате процесса организации. Функциональная общность процессов самоорганизации систем, их устойчивость поддерживаются законами ритма (день – ночь, подъем – спад в творческой активности человека, в экономике и т. п.).

Приведенное развернутое определение является если и не вполне совершенным, то все-таки необходимым шагом на пути конкретизации

содержания, относящегося к синергетике, и выработки критериев для создания моделирующей самоорганизующейся среды.

О соотношении синергетики и самоорганизации следует вполне определенно сказать, что содержание, на которое они распространяются, и заложенные в них идеи неотрывны друг от друга. Они, однако, имеют и различия. Поэтому синергетику как концепцию самоорганизации следует рассматривать в смысле взаимного сужения этих понятий на области их пересечения.

1.3 Синергетика и научное познание

При решении самых разных задач – от физики и химии до экономики и экологии – создание и сохранение организации, формирование упорядоченности являются либо целью деятельности, либо ее важным этапом.

Временная эволюция синергетических систем зависит от причин, которые не могут быть предсказаны с абсолютной точностью. Непредсказуемость поведения синергетических систем связана не только с неполнотой информации о состоянии их многочисленных подсистем (что заставляет ограничиваться вместо индивидуального описания каждой подсистемы описанием ансамблей подсистем) и неизбежными флуктуациями, но и с тем, что эволюция некоторых систем очень чувствительна к начальным условиям. Даже небольшое различие в начальных условиях в корне изменяет последующую эволюцию системы («эффект бабочки», Р. Брэдбэри). Непредсказуемость эволюции синергетических систем соответствует понятию «стохастичность».

Стохастичность (др.-греч. στόχος – цель, предположение) – свойство полностью детерминированной нелинейной системы, состоящее в возникновении в ней нерегулярных колебаний, которые внешне не отличимы от случайных процессов. Физическая природа возникновения этого эффекта – неустойчивость траекторий системы в ее фазовом пространстве.

Фазовое пространство – это множество всевозможных состояний физической системы.

Идеи, методы и алгоритмы нелинейной динамики уже начали успешно применяться в экологии, радиоэлектронике, медицине, биофизике, биохимии, химических технологиях, психологии и еще десятках других областей. Для любого междисциплинарного подхода рост «вширь» будет продолжаться еще много лет. Однако рост «вглубь» столкнулся с серьезными трудностями, которые необходимо решать.

Теория состояний, далеких от равновесия, возникла в результате синтеза трех направлений исследований [21]:

1 Разработка методов описания существенно неравновесных процессов на основе статистической физики. В рамках этого направления создаются кинетические модели, определяются параметры, необходимые для описания, выявляются корреляции, крупномасштабные флуктуации, устанавливаются закономерности перехода в состояние равновесия.

2 Разработка термодинамики открытых систем, изучение стационарных состояний, сохраняющих устойчивость в определенном диапазоне внешних условий, поиск условий самоорганизации, т. е. возникновения упорядоченных структур из неупорядоченных. Было показано, что процессы диссипации энергии являются необходимым условием самоорганизации (поэтому возникающие структуры получили название диссипативных).

3 Определение качественных изменений решений нелинейных дифференциальных уравнений, определяющих состояния, далекие от равновесия, в зависимости от входящих параметров. Этот раздел математики получил название теории катастроф. С ее помощью описываются качественные перестройки общей структуры решений – катастрофы, определяются границы устойчивости и изменения структуры состояний.

Исходные принципы новых теорий в современной науке уже не могут быть получены на основе обобщения эмпирического материала (как это было, например, в классической термодинамике), а могут лишь выступать как воплощение более общих принципов, полученных в результате обобщающего анализа теоретического материала, т. е. построение фундаментальных теорий опосредуется созданием абстрактной базисной теории, о чем и идет речь в концепции физических исследовательских программ. Проблема здесь состоит не только в том, чтобы выделить тот общий принцип, который неявно присутствует в фундаментальной теории, построенной на основе обобщения эмпирических законов или синтеза предшествующих теоретических систем.

*Специфика нынешней ситуации заключается в вопросе о том, как при крайней удаленности от возможностей экспериментальной проверки и при огромном количестве теоретически возможных вариантов приложения общих принципов найти способы селекции этих вариантов с точки зрения их возможной истинности. Тогда включение в концепцию физических исследовательских программ *интертеоретического подхода* позволит методологически осмыслить всю динамичность существования программы как формы теоретического освоения действительности с момента ее становления до*

успешного воплощения в случае прогрессивного сдвига проблем и демонтажа в результате их регрессивного сдвига.

1.3.1 Интертеории научных теорий

Методологическая уместность интертеоретического подхода к формированию и функционированию физической исследовательской программы определяется тем, что *интертеория является средством понимания теоретического знания научным сообществом, и не просто понимания, но и оценки его истинности.*

Интертеория – совокупность всех сведений, учитываемых при рассмотрении теории. При этом теория «развертывается» как сериал относительно самостоятельных моделей-описаний предметной области – закономерностей и механизмов возникновения, функционирования и развития сложных систем. Это дает возможность рассматривать теорию не как постоянную, неизменную величину, а динамическую сущность, что постоянно развивается [57].

Естественнонаучные теории, разрабатывавшиеся в недалеком прошлом, опирались на эмпирические или экспериментальные данные, обладающие тем свойством, что течение изучаемых процессов или строение изучаемых объектов никак не нарушалось самим фактом изучения этих объектов или процессов. Так, например, движение планет или взаимное расположение звезд никак не зависит от того, наблюдают ли их астрономы или нет. Палеонтологическая летопись Земли, строение атмосферных или океанических течений тоже никак не меняются от того, занимается ли человек их изучением. В таких случаях естественно строить теории, в которых объекты рассматриваются как изучаемые объекты. Процесс изучения объекта оказывается неотделимым от самого объекта. В последнем случае соответствующие теории невозможно развивать, пренебрегая этим обстоятельством. Либо в интертеории, либо внутри самой теории *необходимо предусмотреть взаимное влияние свойств изучаемого явления и процесса его изучения.*

Перечислим ряд научных областей, в которых это явление имеет место [57–59]:

1 Квантовая механика, основанная на экспериментах над частицами, обладающими тем свойством, что, для того чтобы их можно было наблюдать, необходимо воздействовать вспомогательной частицей на наблюдаемую

частицу. При этом состояние наблюдаемой частицы существенным образом изменяется, а результат наблюдений зависит как от исходного, так и от нового её состояния. Нужно иметь в виду, что происходящее в эксперименте изменение состояния наблюдаемой частицы определяется исходным состоянием частицы лишь в вероятностном смысле, т. е. даже при известном состоянии частицы могут предсказываться лишь вероятности её перехода в те или иные новые состояния. В таком духе строится весь теоретический аппарат квантовой механики.

2 Теория относительности, в которой необходимо принимать во внимание не только координатную систему, связанную с наблюдаемым объектом, но также и координатную систему наблюдателя, так как описание наблюдаемых явлений зависит от того, относительно какой системы координат оно проводится.

3 Изучение явлений жизнедеятельности в микроскопических или ультрамикроскопических масштабах внутриклеточной биохимией, гистохимией, молекулярной биологией, биохимической генетикой. Все эти области направлены на изучение процессов жизнедеятельности и специфики строения живых объектов. В то же время экспериментальные методы этих наук требуют умерщвления изучаемого объекта. Другими словами, в процессе исследования основные, подлежащие изучению свойства объекта коренным образом нарушаются, и суждения о них извлекаются из косвенных данных.

Предварительная оценка тем более важна, что теоретическая деятельность, которая должна привести к созданию сопоставимых с экспериментом конструкций, может быть очень трудоемкой, но тем не менее бесперспективной. Двадцатилетний труд многих физиков-теоретиков привел к построению множества теорий, принципиально не сопоставимых с экспериментом. Речь идет о методологической реконструкции способа удержания и использования подобного опыта в научной практике.

Интертеоретический механизм становления синергетики почти очевиден: установление математических аналогий в теоретическом описании далеких друг от друга групп явлений, вовлечение этих теоретических описаний за счет единства математического аппарата в общую интертеорию.

Вблизи точки возникновения неустойчивости можно провести различие между устойчивыми коллективными движениями (*модами*).

Устойчивые моды подстраиваются под неустойчивые и могут быть исключены. Остающиеся неустойчивые моды служат в качестве параметров порядка, определяющих макроскопическое поведение системы. Получающиеся в результате такой процедуры уравнения для параметров порядка можно

сгруппировать в несколько универсальных классов, описывающих динамику параметров порядка. Некоторые из этих уравнений напоминают уравнения, описывающие фазовые переходы первого и второго рода в равновесных физических системах. Однако возникают и новые классы, например, описывающие пульсации или колебания. На основе этого математического аппарата могут быть описаны нелинейные колебания в электротехнике, вспучивание оболочек при закритическом нагружении и нелинейные колебания строительных конструкций, временные колебания численности популяций в системе хищник – жертва, некоторые черты морфогенеза животных, формирование общественного мнения и пр. В этом направлении является перспективным использование клеточных автоматов.

Клеточный автомат – дискретная динамическая система, представляющая собой совокупность одинаковых клеток, одинаковым образом соединенных между собой. Все клетки образуют так называемую решетку клеточного автомата. Решетки могут быть разных типов, отличаясь как по размерности, так и по форме клеток. Впервые идея таких автоматов отмечена в работах Неймана в 40-х годах XX века, когда он работал над идеей саморепродуцирующихся машин [60–61].

Каждая клетка является конечным автоматом, состояния которого определяются состояниями соседних клеток и, возможно, ее собственным состоянием. Необходимо отметить, что в клеточных автоматах как моделях вычислений не рассматриваются входные и выходные воздействия. При аппаратной реализации клеточные автоматы обычно называют однородными структурами. Пространственная подразделенность является имманентным свойством клеточных автоматов.

Например. Если в качестве начального состояния установить случайное распределение живых и мертвых клеток, запустить модель и проследить за ее эволюцией, то можно увидеть следующее. Часть структур стабилизируются и не изменяются во времени (рис. 1.10 а), часть претерпевает циклические изменения (рис. 1.10 б), и, наконец, некоторые развиваются, не повторяясь, практически неограниченное время (рис. 1.10 в: показаны первые 10 поколений; при этом отмечено, что на 114-м поколении конфигурация стабилизируется) [61–62].

Эти модусы поведения структур в клеточном автомате соответствуют в дифференциальных уравнениях фиксированной точке, предельному циклу и хаосу.

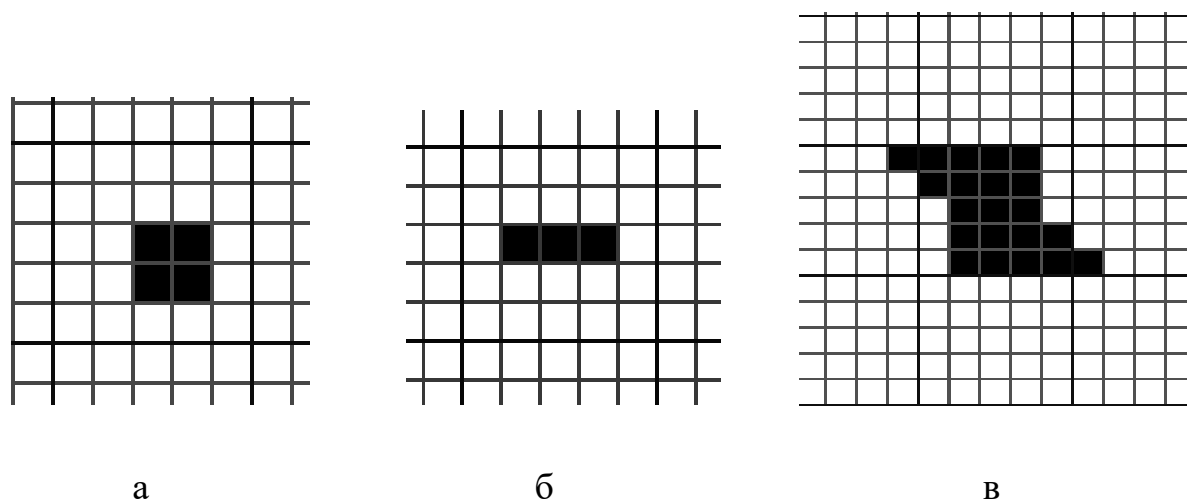


Рисунок 1.10 – Перемещающиеся конфигурации клеток

Модус (лат. *modus* – мера, способ, образ, вид) – свойство предмета, присущее ему только в некоторых состояниях и зависящее от окружения предмета и тех связей, в которых он находится.

Предельный цикл есть изолированная замкнутая кривая на фазовой плоскости, к которой в пределе при $t \rightarrow \infty$ стремятся все интегральные кривые. Предельный цикл представляет стационарный режим с определенной амплитудой, не зависящий от начальных условий, а определяющийся только организацией системы. Существование предельного цикла на фазовой плоскости есть основной признак автоколебательной системы.

Хаос (др.-греч. *χάος* от *χαίνω* – раскрываюсь, разверзаюсь) – это состояние системы, характеризующееся большой степенью энтропии.

Таким образом, клеточные автоматы представляют альтернативный дифференциальным уравнениям путь анализа поведения сложных систем.

Существует много типов клеточных автоматов: одномерные, двумерные и автоматы больших размерностей, детерминированные и стохастические, локальные и автоматы с глобальным параметром, статичные и подвижные и т. д.

Во всех случаях происходит переход от менее упорядоченного к более упорядоченному состоянию или типу движения; этот переход происходит самопроизвольно, когда некоторый параметр превышает критическое значение. Такие хорошо организованные устойчивые структуры существуют при постоянной диссипации энергии за счет энергии, поступающей извне. Еще в 20–30-е гг. XX века свойства, типичные для автоволн, были обнаружены в прохождении нервного импульса по нервному волокну. Однако автоволны наблюдаются не только в биологических системах. Уже известно большое

число возбудимых сред небиологического происхождения, в основе которых лежат простые физические и физико-химические процессы.

Важная особенность синергетических систем состоит в том, что ими можно управлять извне, изменяя действующие на системы факторы. Например, скорость роста клеток можно регулировать извне, обрабатывая клетки различными химическими веществами. Параметры, описывающие действующие на систему факторы, называются управляющими.

Новые возможности для решения поставленных выше мировоззренческих вопросов и методологических проблем появились благодаря новым открытиям в области физики живого. Техническое развитие производства генераторов электромагнитного излучения сверхвысокой частоты открыло перед исследователями такую область частот электромагнитного поля, к воздействию которых живые организмы оказались неожиданно чувствительны. Так, хотя электромагнитное поле в этом диапазоне особенно сильно поглощается водой (поэтому в солнечной радиации у поверхности земли эти частоты практически отсутствуют – их поглощают водяные пары в атмосфере), а живые организмы на Земле содержат много воды, воздействие на точно определенных частотах низкоинтенсивным полем очень сильно (носит резонансный характер). Также возникает возможность выработки единого физического критерия целостности для живых и неживых систем при экспериментальном обнаружении резонансного воздействия электромагнитного излучения (в диапазоне миллиметровых волн) на живые системы – от простейших до человека.

Рассмотрение живого организма как целостной физической системы при развитии понимания целостности в физике не означает редукции биологии к физике, поскольку причина того, что система оказалась целостной и в физическом смысле, имеет биологический характер.

Высокая степень общности законов самоорганизации, их применимость в равной мере к физическим, химическим, биологическим, экологическим и другим системам, с одной стороны, создают предпосылки для синтеза естественнонаучного знания, а с другой – совершенно меняют ситуацию в осуществлении интеграционных процессов в науке. Речь идет прежде всего о соотношении методов естественных наук при исследовании живого.

Несоответствие между методологическими установками наук, использовавшихся при изучении живого, создавало больше трудности для теоретического синтеза получаемых ими результатов; сведения об атомно-молекулярной структуре биологических объектов, даваемые физикой и химией, не сопрягались с биологическим знанием о функциях, выполняемых структурными элементами, организованными в части биологического целого.

Сейчас, когда физика и химия подошли к проблеме становления, оказалось, что у этих наук открылась возможность для исследования биологических систем как целостных образований. Действительно, если *живой организм является целостной системой, то, очевидно, целостность его должна обеспечиваться на всех уровнях: и на биологическом, и на химическом, и на физическом.* Другой вопрос: насколько близко та или иная наука подошла к тому, чтобы объяснить эту целостность со своих позиций. Если физика, химия, биология выработали свои критерии целостности, то и целостная биологическая система должна отвечать всем этим критериям.

Таким образом, живой организм рассматривается как квантовая система и диссипативная структура, образовавшаяся в результате неравновесного фазового перехода и постоянно воспроизводящая себя благодаря процессам самоорганизации.

Указанный подход позволяет исследовать различные уровни организации экосистемы как класс целостных систем с самоорганизацией.

1.3.2 Системный и синергетический подход в исследованиях

Системный метод познания представляет собой последовательность действий по установлению структурных связей между переменными или элементами исследуемой системы. Это методология решения сложной проблемы путём последовательной декомпозиции её на взаимосвязанные частные подпроблемы. Любой объект бесконечно сложный, поэтому задача упрощается выделением только элементов и связей, обеспечивающих достижение цели. Системное исследование представляет собой процедуру описания объекта, способа его функционирования и тенденций развития. Основная процедура – построение обобщенной модели, отображающей взаимосвязи реальной ситуации. Системный анализ применяется для решения задач, для которых отсутствуют стандартные решения и которые, в принципе, не могут быть формализованы без использования методов системного анализа. Идеи системного анализа используются для управления. Полезность системного анализа обусловлена глубоким проникновением в суть проблемы, выявлением взаимосвязей, способствующих обнаружению нестандартных решений, большей четкости формулирования целей, большей эффективности распределения ресурсов. Ограниченность системного анализа обусловлена неизбежной неполнотой анализа (принцип непознаваемости), приближённой оценкой эффективности, отсутствием способов точного прогнозирования перспективы [4].

Системный подход – направление методологии научного познания, в основе которого лежит рассмотрение объектов как систем в целостности, выявленных в нём многообразных типов связей.

Синергетический подход в науке во многом напоминает системный. Для синергетики, как и для теории систем, важны не поверхностные аналогии между явлениями различной природы, а достаточно строгое соответствие между всеми элементами сравниваемых систем. Такое требование означает поиск изоморфных законов различной физической (химической, биологической) природы. Общая теория систем изучает системы самого различного характера – концептуальные, материальные, слабо- и сильно-структурированные и т. д., в то время как для синергетики основным предметом исследования является самостоятельная междисциплинарная область самоорганизующихся систем [21]. В синергетическом подходе в отличие от общесистемного изучаются конкретные принципы и механизмы самоструктурирования естественных и технических систем. Это значит, что в отличие от общей теории систем синергетика сосредотачивает свое внимание на кооперативных, когерентных и самосогласованных процессах, возникающих в сложных нелинейных системах. Необходимо отметить, что как для общей теории систем и кибернетики, так и для синергетики объединяющим понятием является понятие системы. Однако в синергетическом подходе, помимо формирования общей системной концепции самоорганизации, обязательно учитывается конкретное физическое (химическое, биологическое) содержание рассматриваемых явлений и процессов.

Существенное отличие стратегий технологической деятельности XXI столетия состоит в освоении принципиально новых типов объектов и процессов, представляющих собой достаточно сложные саморазвивающиеся макросистемы, которые уже нельзя рассматривать отдельно от природных систем. В таких открытых системах возникают кооперативные явления, базирующиеся на энергетических, информационных, вещественных потоках.

Таким образом, синергетика впитала в себя все значимые для исследования процессов самоорганизации теоретические и методологические выводы системных исследований. Соотношение синергетики и системных исследований показывает табл. 1.1.

Таблица 1.1 – Соотношение системных исследований и синергетики

Системное исследование	Синергетика
Основано на статистике систем, их морфологическом и внутреннем функциональном описании	Основана на рассмотрении различных процессов в системе: «рост, развитие и разрушение»
Принципиальный аспект – упорядоченность и равновесие систем	Хаос играет ведущую роль в процессах развития системы, как деструктивного так и положительного (роста)
Изучение процесса организации систем	Исследование процесса самоорганизации системы и подобия ее составляющих с выявлением эмерджентных свойств системы
При рассмотрении структуры системы нет анализа кооперативных процессов	Процессы кооперации и ассоциации лежат в основе самоорганизации системы
Динамические характеристики системы заложены в самой системе	Открытость системы ведет к значительному влиянию внешней среды в развитии системы
Проблематика взаимосвязи рассматривается только в контексте внутренних связей между компонентами системы	Проблематика взаимосвязи рассматривается на уровне воздействий и процессов с внешней средой, включая и внутренние связи в системе

В результате проявления кооперативных эффектов развивающиеся системы порождают новые структуры без каких-либо внешних силовых воздействий, т. е. происходит процесс самоорганизации. Такого рода кооперативные эффекты в макросистемах необходимо учитывать при разработке эффективных стратегий технологической деятельности человека.

1.4 Математический аппарат синергетики

Как же следует математически описывать все те (и многие другие) явления, о которых шла речь ранее. Решающую роль должен играть параметр «время». Необходимо исследовать эволюцию систем во времени. Поэтому такие уравнения часто называют «эволюционными». Рассмотрим структуру

таких уравнений. Начнем с одной переменной q , изменяющейся со временем. Такой переменной могут быть число клеток в ткани, число молекул или координата частицы. Скорость изменения q со временем обозначим [5]:

$$\frac{dq}{dt} = \dot{q}. \quad (1.10)$$

Во многих случаях q зависит от текущего состояния системы, например, от числа имеющихся в данный момент времени клеток.

В простейшем случае соответствующее уравнение имеет вид [5]:

$$\dot{q} = a \cdot q. \quad (1.11)$$

Такие уравнения встречаются, например, в химии, если скорость образования некоторого вещества q пропорциональна его концентрации q («автокаталитическая реакция»), или в динамике популяций, где q соответствует числу особей. Уравнение (1.10) представляет собой линейное дифференциальное уравнение первого порядка, и методы решения таких уравнений хорошо известны. Первая особенность уравнений синергетики в том, что все уравнения синергетики *нелинейны*.

Важной особенностью синергетических систем является, как уже отмечалось, то, что они состоят из большого числа подсистем. Следовательно, в уравнения таких систем должно входить много переменных, которые будут обозначены как q_1, q_2, \dots, q_n . Поскольку значения этих переменных при заданном значении времени описывают состояние системы, их называют «*переменными состояниями*». Все переменные q_1, q_2, \dots, q_n можно объединить в вектор состояния:

$$\bar{q} = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}. \quad (1.12)$$

Г. Хакен [5] предложил описать самоорганизацию, включая внешние силы как части полной системы, т. е. теперь для новой расширенной системы уравнение организации становится уравнением самоорганизации. В данном случае не представляется возможным ограничиться детерминистскими уравнениями, так как теперь *внешние силы следует рассматривать не как заданные величины, а как переменные, подчиняющиеся уравнениям*

движения. Одним из примеров влияния внешних сил на макроскопический уровень является загрязнение окружающей среды: увеличение зараженности на несколько процентов может привести к вымиранию популяции, например к гибели всей рыбы в озере.

Таким образом, в общем виде соответствующие уравнения могут быть записаны следующим образом:

$$\dot{q}_1 = y_1 q_1 + q_1(q_1, \dots, q_n), \quad (1.13)$$

$$\dot{q}_2 = y_2 q_2 + q_2(q_1, \dots, q_n), \quad (1.14)$$

$$\dot{q}_n = y_n q_n + q_n(q_1, \dots, q_n). \quad (1.15)$$

Здесь имеется полный набор подсистем (от 1 до n), описываемый различными переменными. Эти уравнения также применимы к широкому классу материальных систем.

Поскольку задачей является исследование процессов образования временных или пространственно-временных структур, то считается, что вектор состояния \bar{q} является функцией пространственного положения и времени:

$$\bar{q} = \bar{q}(\bar{x}, t), \quad (1.16)$$

где $\bar{x} = \{x, y, z\}$ – вектор, определяющий пространственное положение точки в декартовой прямоугольной системе координат. Помимо временных изменений необходимо рассматривать и пространственные изменения, учитываемые с помощью производных по пространственным координатам. Примером может служить уравнение диффузии вещества:

$$\dot{q} = D \left(\frac{\partial^2 q}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 q}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 q}{\partial z^2} \right), \quad (1.17)$$

где D – коэффициент диффузии.

Подводя некоторые итоги рассмотрения, посвященного особенностям уравнений, описывающих синергетические системы, следует отметить, что необходимо решать *нелинейное, стохастическое дифференциальное уравнение в частных производных* общего типа:

$$\dot{\bar{q}} = \bar{\Phi}(\alpha, \bar{q}, \bar{V}, x, t), \quad (1.18)$$

где \bar{V} – оператор $\left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z}\right)$.

Исследование таких уравнений – задача весьма сложная, и это приводит к необходимости выделения простейших элементов и понятий, встречающиеся достаточно часто, например, бифуркации решений. Эти решения могут качественно изменяться при изменении управляющих параметров конфигурации.

Управляющие параметры системы – это такие ее параметры, которые можно менять независимо от остальных параметров, через них можно как бы управлять поведением всей системы в целом.

Сложность поведения простых моделей и неисчерпаемое разнообразие моделируемых объектов наводят на мысль о поиске некоего универсального класса моделей, которые могли бы воспроизводить требуемый тип поведения любой системы.

В теории моделирования сложными системами, в том числе техно-природными, с точки зрения синергетики можно выделить следующие ключевые задачи:

- формирование критериев функционирования системы как единого целого;
- синтез объективных законов протекания процессов самоорганизации на макро- и микроуровне систем;
- математическое моделирование нелинейных динамических систем.

К числу отличительных свойств синергетических систем относится и *стохастичность*. Временная эволюция систем часто зависит от причин, не предсказуемых с абсолютной точностью. Тогда окончательно в матричной форме уравнение для количественного описания организации системы имеет вид

$$\dot{q}_m = Aq_m + Bq_m + C(F), \quad (1.19)$$

где q_m – набор переменных, описывающих каждую из подсистем; A, B, C – коэффициенты связи, зависящие от внешних сил (F – «флуктуирующие силы»). Таким образом, внешние воздействия обязательно отражаются в

уравнениях путем добавления вектора силы в правую часть дифференциального уравнения, являющегося строго детерминистским.

Появление «флуктуирующих сил» может быть объяснено с учетом двух уже известных читателю причин. Первая – подход, связанный со статистической механикой, где флуктуации встречаются всякий раз, когда осуществляется переход от микроскопического описания к описанию, использующему макроскопические переменные. Вторая – квантовые флуктуации, связанные с невозможностью, даже в принципе, предсказывать с абсолютной точностью положения и скорости частиц. Можно назвать и третью причину – «хаотическая динамика».

1.4.1 Модель «жертва-хищник»

Рассмотрим пример из динамики популяций – модель Лотки–Вольтерра [63], описывающая сообщество рыбы-хищники (рыбы-жертвы).

Изменение со временем числа рыб имеет вид

$$q_j = \text{Прирост}_j - \text{Потери}_j, (j = 1, 2). \quad (1.20)$$

Обозначим рыб-жертв индексом 1. Если хищников нет, то рыбы-жертвы размножаются по закону

$$\text{Прирост}_1 = a \cdot q_1. \quad (1.21)$$

Число рыб-жертв однако уменьшается, поскольку они поедаются хищниками. Скорость убывания пропорциональна числу жертв и числу хищников:

$$\text{Потери}_1 = \chi \cdot q_1 \cdot q_2. \quad (1.22)$$

Рассмотрим теперь уравнение для $j = 2$ (рыб-хищников). Очевидно, что

$$\text{Прирост}_2 = \beta \cdot q_1 \cdot q_2. \quad (1.23)$$

Поскольку хищники живут за счет жертв, скорость размножения хищников пропорциональна их собственному числу и числу рыб-жертв. С другой стороны, так как хищники умирают сами, их число убывает пропорционально числу имеющихся рыб-хищников:

$$\text{Потери}_1 = \delta \cdot q_2. \quad (1.24)$$

Уравнения Лотки-Вольтерра имеют вид:

$$q_1 = a \cdot q_1 - \chi \cdot q_1 \cdot q_2, \quad (1.25)$$

$$q_2 = \beta \cdot q_1 q_2 - \delta \cdot q_2. \quad (1.26)$$

Из полученных уравнений видно, что взаимодействие, т. е. синергетика, частей (в нашем случае рыб) описывается нелинейным членом.

Эти уравнения имеют стационарное решение: $q_1 = \frac{\delta}{\beta}$, $q_2 = \frac{a}{\chi}$, которое может перестать быть устойчивым, и система перейдет на циклическое поведение. Соответствующее поведение решений этой системы изображено на графике (рис. 1.11).

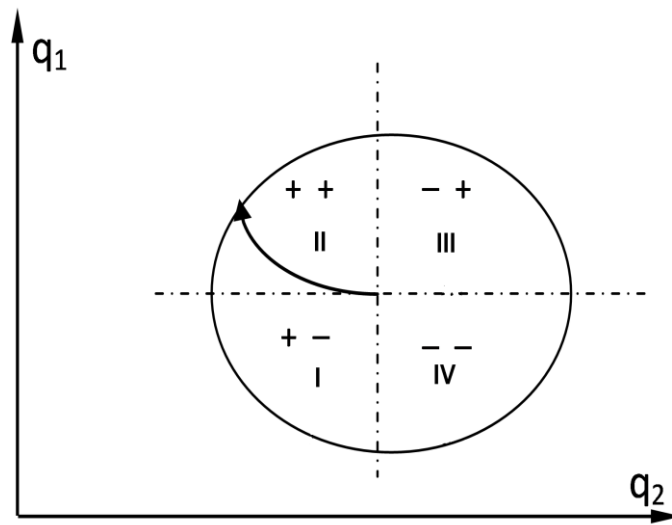


Рисунок 1.11 – График «Циклическое поведение системы»

Во второй и четвертой фазах жертвы и хищники одновременно находятся в сходных ситуациях (II – золотой век, IV – апокалипсис), в первой и третьей меняются ролями (I – пир жертвы, III – пир хищника). Такие отношения автоматически поддерживают колебание численности видов [64].

Одна существенная особенность систем состоит в том, что ими можно управлять, изменяя действующие на них внешние факторы. Изменяя температуру, загрязненность, уровень радиации и т. д., можно изменять

коэффициенты $\alpha, \beta, \chi, \delta$. Это *управляющие параметры*. Разным значениям управляющих параметров могут соответствовать совершенно различные типы поведения популяции: рост, стационарное состояние, распад.

Модель Лотки–Вольтерра имеет достаточно широкую область приложений, таким колебаниям подчиняются спрос и предложение, борьба с преступностью, экономические циклы, колебания моды, волны эпидемий, загрязнение окружающей среды и т. д.

1.4.2 Модель «загрязнение-экосистема»

Ситуацию «загрязнение-природа» можно трактовать как частный случай модели «хищник-жертва», когда природа выступает в качестве жертвы, а загрязнение – хищника. Главное предположение, лежащее в основе модели, состоит в том, что экосистема активно абсорбирует и перерабатывает загрязнение вплоть до определенного предела.

Из качественных соображений в этой системе возможны три следующих принципиально различных сценария взаимодействия.

1 При малых выбросах загрязнения окружающая среда его полностью перерабатывает (устойчивая ситуация).

2 При увеличении выбросов загрязнения в зависимости от внешних условий и случайных причин окружающая среда может находиться в удовлетворительном состоянии, а может и погибнуть (бистабильная ситуация).

3 Наконец, третья ситуация соответствует экологической катастрофе – полному вымиранию биоты.

Описанная математическая модель в работах [65, 66] соответствует трем сценариям взаимодействия в системе «загрязнение-экосистема». Рассмотрим эту модель.

Предположим, что общий фон загрязнения и состояние окружающей среды можно характеризовать следующими переменными: концентрацией загрязнения P и плотностью биомассы ε соответственно. В том случае, если существует постоянно действующий источник загрязнения, процесс эволюции загрязнения можно описать уравнением

$$\frac{dP}{dt} = a - bP, \quad (1.27)$$

где a – мощность источника загрязнения за единицу времени; b – коэффициент естественного уничтожения загрязнения (такое уничтожение называют «мертвым», или естественной диссипацией). При начальном условии

$P(t = 0) = P_0$ решение уравнения (1.26) имеет вид

$$P(t) = \frac{a}{b} + \left(P_0 - \frac{a}{b} \right) e^{-bt}, \quad (1.28)$$

то есть со временем концентрация загрязнения уменьшается естественным образом.

Предположим далее, что загрязнение находится в постоянном взаимодействии с окружающей средой, оказывающей очищающий эффект на загрязнение. Будем также считать систему «окружающая среда – загрязнение» замкнутой. Тогда процесс взаимодействия с окружающей средой можно описать следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{dP}{dt} &= a - bP - f(\varepsilon, P), \\ \frac{d\varepsilon}{dt} &= g(\varepsilon) - h(\varepsilon, P), \end{aligned} \quad (1.29)$$

где функция $f(\varepsilon, P) > 0$ – описывает абсорбирование и переработку загрязнения окружающей средой; $g(\varepsilon)$ – слагаемое, описывающее динамику окружающей среды при отсутствии загрязнения; $h(\varepsilon, P)$ – функция, описывающая вредное влияние загрязнения на окружающую среду.

Примем в качестве функций взаимодействия загрязнения и живой природы

$$\begin{aligned} f(\varepsilon, P) &= c\varepsilon P, \\ h(\varepsilon, P) &= d\varepsilon P, \end{aligned}$$

где c и d – постоянные коэффициенты.

Будем считать, что при отсутствии загрязнения поведение окружающей среды можно описать логистическим уравнением, то есть $g(\varepsilon) = r\varepsilon(1-\varepsilon/K)$, где r – постоянный коэффициент, а K – соответствует максимальному значению E при $dE = dt = 0$. Подставив выражения для $f(\varepsilon, P)$, $h(\varepsilon, P)$, и $g(\varepsilon)$ в систему уравнений (1.28), получаем

$$\begin{aligned}\frac{dP}{dt} &= a - bP - c\varepsilon P, \\ \frac{d\varepsilon}{dt} &= r\varepsilon \left(1 - \frac{\varepsilon}{K}\right) - d\varepsilon P.\end{aligned}\tag{1.30}$$

Переходя в системе уравнений (1.29) к безразмерным переменным

$$\begin{aligned}P &= \frac{bu}{d}, \varepsilon = \frac{bv}{c}, \tau = bt, \alpha = \frac{ad}{b^2}, u_0 = \frac{r}{b}, p = \frac{r}{cK}, \\ \frac{d\varepsilon}{dt} &= g(\varepsilon) - h(\varepsilon, P),\end{aligned}\tag{1.31}$$

получаем простейшую математическую модель взаимодействия загрязнения с окружающей средой в виде следующих уравнений:

$$\begin{aligned}\frac{du}{dt} &= a - u - uv, \\ \frac{dv}{dt} &= v(u_0 - u) - pv^2.\end{aligned}\tag{1.32}$$

Легко видеть, что система уравнений (1.30) есть система «хищник-жертва», где в качестве жертвы выступает загрязнение (небиологический объект), а в качестве хищника – биологически активная окружающая среда.

В системе уравнений (1.32) параметр a можно трактовать как обобщенную мощность источника загрязнения; u_0 – предельно допустимая концентрация для данной экосистемы (если $u > u_0$, $dv/dt < 0$, и природа вымирает); p – характеристика экосистемы – коэффициент внутривидовой конкуренции природы.

Положения равновесия системы уравнений (1.32), соответствующие условиям $du/dt = 0$ и $dv/dt = 0$, нетрудно найти из уравнений

$$\begin{aligned}\alpha - u(1 + v) &= 0, \\ -v(u - u_0) - pv^2 &= 0.\end{aligned}\tag{1.33}$$

Тогда

$$A_1 = (\alpha, 0); A_2 \left(\frac{u_0 + p + Q}{2}, \frac{u_0 - p - Q}{2p} \right);$$

$$A_3 \left(\frac{u_0 + p - Q}{2}, \frac{u_0 - p + Q}{2p} \right), Q = \sqrt{(u_0 + p)^2 - 4\alpha p}. \quad (1.34)$$

Второе и третье положения равновесия существуют, если $[(u_0 + p)^2 - 4\alpha p] > 0$. Стандартный линейный анализ на устойчивость указанных положений равновесия приводит к параметрическому портрету системы уравнений (1.32), приведенному на рис. 1.12.



Рисунок 1.12 – Параметрический портрет системы уравнений (1.31). При фиксированном u_0 вся область допустимых параметров разбивается на четыре множества

На рисунке 1.13 приведены соответствующие фазовые портреты системы уравнений (1.32).

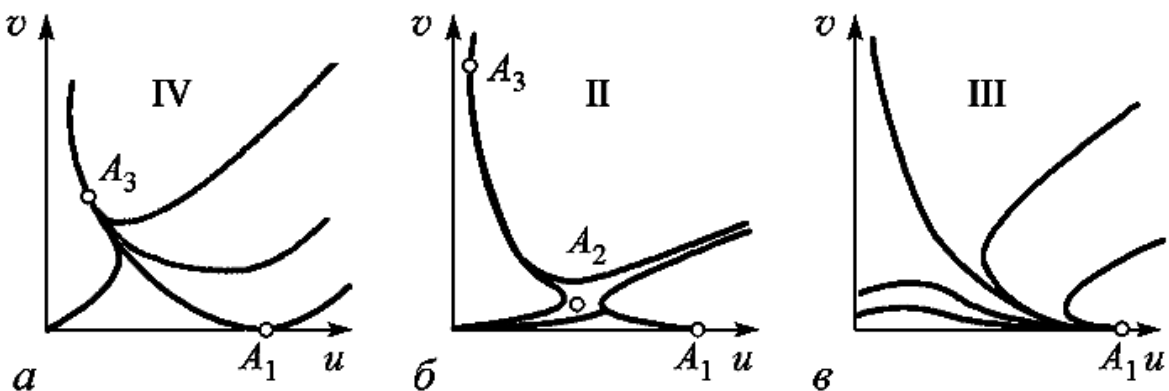


Рисунок 1.13 – Фазовые портреты системы уравнений (1.31)

Если параметры принадлежат области IV, то все траектории, за исключением устойчивого многообразия A_1 , стремятся при $t \rightarrow \infty$ к A_3

(рис. 1.13 а). Области II соответствует фазовый портрет на рис. 1.13 б. В области III существует единственный глобальный аттрактор A_I (рис. 1.13 в). Кроме того, модель должна содержать пороговую величину загрязнения, которое способна переработать природа. Этот эффект нужно учесть в математической модели.

Для этого в [65] предлагается использовать одну из трофических функций, описывающих процесс насыщения, например,

$$f(\varepsilon, P) = \frac{c\varepsilon P b / d}{A + P}. \quad (1.35)$$

Тогда при малой концентрации загрязнения $f(\varepsilon, P) \approx c\varepsilon P$, при высокой концентрации $f(\varepsilon, P) \approx c\varepsilon$, что более реалистично, чем первоначальное выражение.

После приведения системы уравнений (1.29) к безразмерному виду с учетом соотношения (1.35) и переобозначений в [65] получена следующая система уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{du}{dt} &= a - u - \frac{uv}{\lambda + u}, \\ \frac{dv}{dt} &= v(u_0 - u) - pv^2, \end{aligned} \quad (1.36)$$

где $\lambda = A(d/b) > 0$ описывает степень влияния природы на загрязнение: чем больше его величина, тем меньше степень поглощения живой природы и наоборот.

По мнению авторов [65, 66], параметр λ можно считать количественной характеристикой восприимчивости данной экосистемы к выбросам загрязнения.

1.4.3 Моделирование технических систем

Большинство технических систем относятся к классу нелинейных систем. В отличие от линейных систем в нелинейной системе характер собственных движений зависит от начальных условий, и одна и та же система при различных начальных условиях может совершать различные по своему характеру движения.

Особенности поведения нелинейных систем и многообразие процессов в них создают трудности точного их математического описания и теоретического

изучения. Несмотря на это, задачи исследования нелинейных систем постепенно приобретают в современной технике все более актуальное значение. Особенное значение приобретают проблемы связанные со звеньями, обладающими существенной нелинейностью.

Нелинейности данной группы чрезвычайно разнообразны, а элементы с такими характеристиками имеют широкое применение в автоматических системах. Среди нелинейностей подобного рода выделяют группу нелинейностей, выход $y(t)$ которых зависит не только от значения входа $x(t)$, но и от направления его изменения, т. е. от знака $x'(t)$. Характеристики таких звеньев называются многозначными [67].

Распространенными примерами звеньев с многозначными характеристиками являются звенья с нелинейностями типа гистерезиса. **Гистерезис** (Γ) – это существенная нелинейность, которая имеет место во многих промышленных, экономических и физических системах.

Можно предложить, что нелинейность типа гистерезиса – это вид преобразователя Γ , связывающий переменный вход $x(t)$ и переменный выход $y(t)$. Данный преобразователь Γ не является функцией, поскольку для одного и того же входного значения $x(t_*)$, могут быть различные значения выхода $y(t_*)$. Другими словами, выход $y(t)$ зависит не только от входа $x(t)$, $t \geq t_*$, но и от начального состояния $\omega = \omega(t_*)$ системы Γ [67].

Для исследования систем с гистерезисом в начале 70-х годов прошлого века группой математиков под руководством профессора Красносельского М. А. была выработана следующая концепция [68]:

1 Выделение элементарных нелинейностей типа гистерезиса, называемых гистеронами.

2 Рассмотрение сложных нелинейностей в виде схемы соединения гистеронов.

3 Установление принципов идентификации.

В наши дни такой подход к исследованию нелинейностей типа гистерезиса является стандартным и содержит большое количество разновидностей в зависимости от выбора гистеронов и типа схемы соединения.

Среди гистеронов наиболее важными признаются нелинейности типа «неидеальное реле». Неидеальное реле (с пороговыми значениями $\alpha < \beta$) является простейшим гистерезисным преобразователем. Такая система обозначается $R_{\alpha,\beta}$. Ее выходные значения могут принимать одно из двух значений (0 или 1): в любой момент реле либо «выключено», либо «включено».

Изменение выхода $y(t)$ зависит от изменения входа – произвольной непрерывной скалярной функции $x(t)(t \geq t_0)$ и начального состояния η_0 , значение

которого может быть либо 0, либо 1 и в момент времени t определяется по следующей формуле [67]:

$$y(t) = R_{\alpha, \beta} [t_0, \eta_0] x(t) = \begin{cases} \eta_0, \alpha < x(\tau) < \beta \forall \tau \in [t_0, t]; \\ 1, \exists t_1 \in [t_0, t] | x(t_1) \geq \beta, x(\tau) > \alpha \forall \tau \in [t_1, t]; \\ 0, \exists t_1 \in [t_0, t] | x(t_1) \leq \alpha, x(\tau) < \beta \forall \tau \in [t_1, t]. \end{cases} \quad (1.37)$$

Простейшая схема соединения гистеронов по своей сути ничем не отличается от стандартного параллельного соединения гистеронов. Если предположить, что мы имеем несколько реле:

$$R^j = R_{\alpha_j, \beta_j}, 1 \leq j \leq N, \quad (1.38)$$

параллельное соединение реле R^j с весами $\mu_j = \mu(j) > 0$, будет описываться следующей формулой [67]:

$$y(t) = y[t_0, \eta_0](t) = \sum_{j=1}^N \mu_j R^j [t_0, \eta_0(j)] x(t), t \geq t_0. \quad (1.39)$$

Непрерывным аналогом параллельного соединения ряда реле является модель Прейзаха. Она была впервые предложена почти две трети века назад для описания ферромагнетизма.

Вычисление бифуркационных параметров на примере систем фазовой автоподстройки [69]

Проблемы синхронизации систем возникают в различных областях науки и техники, в таких, например, как системы фазовой автоподстройки (ФАП). Система ФАП получила широкое применение в технике связи (в синтезаторах частоты радиопередающей и радиоприемной аппаратуры, в качестве следящих фильтров, в системах тактовой синхронизации и т. д.).

Рассмотрим блок-схему простейшей дискретной ФАП с аналоговым входом (рис. 1.14) [69].

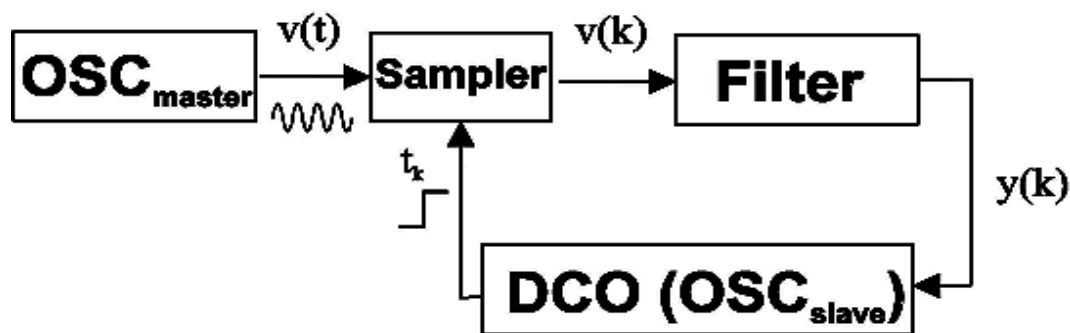


Рисунок 1.14 – Функциональная блок-схема ФАП

Здесь эталонный генератор OSC_{master} вырабатывает синусоидальный сигнал [69]:

$$v(t) = A \sin(\omega_{in} t + \theta_0), \quad (1.40)$$

где A – амплитуда; θ_0 – сдвиг по фазе; ω_{in} – частота; $\varphi(t) = \omega_{in}t + \theta_0$ – фаза входного сигнала; $T_{in} = 2\pi / \omega_{in}$ – период входного сигнала.

Сигнал $v(t)$ поступает на Sampler (дискретизатор) и преобразуется в дискретный сигнал $v(k)$ в моменты времени $\{t_k\}_{k=1,2,\dots}$, определяемые импульсами управляемого генератора DCO. Выход дискретизатора $v(k)$ пропускается через фильтр (Filter), и оставшийся на выходе фильтра сигнал $y(t)$ поступает на вход управляемого генератора DCO.

Случай совпадения начальных частот эталонного и подстраиваемого генераторов имеет большое значение в инженерной практике дискретных ФАП [70–71]. Определяя значение сдвига по фазе в интервале $[-\pi, \pi]$ с учетом кратности 2π , можно в этом случае перейти к уравнению

$$x_{n+1} = x_n - r \sin x_n, n \in N, \quad (1.41)$$

где r – положительное число.

В работе [70] указана верхняя граница параметра r , при котором система (2) является отображением отрезка в себя, и аналитически получены первые три бифуркационных параметра системы $r_1=2$, $r_2 = \pi$, $r_3 = \sqrt{\pi^2 + 2}$. Было доказано, что при $r < r_1$ система является глобально асимптотически устойчивой, параметры r_1 и r_2 соответствуют бифуркации удвоения периода, а параметр r_2 соответствует бифуркации «расщепления» цикла: глобально устойчивый цикл

периода 2 теряет устойчивость и рождаются два локально устойчивых цикла периода 2. В дальнейшем система переходит к хаосу через каскад бифуркаций удвоения периода.

Явление перехода к хаосу через бифуркации удвоения периода хорошо изучено для целого класса отображений отрезка в себя. В 1975 г. при исследовании бифуркаций удвоения периода логистического отображения

$$x_{n+1} = \lambda x_n (1 - x_n), n \in N, \quad (1.42)$$

М. Фейгенбаум заметил, что для последовательных бифуркационных значений параметра λ справедлива сходимость:

$$\frac{\lambda_n - \lambda_{n-1}}{\lambda_{n+1} - \lambda_n} = \sigma_n, \lim_{n \rightarrow \infty} \sigma_n = 4,6692..., \quad (1.43)$$

и что аналогичный эффект имеет место для многих других отображений.

Отметим, что функция $f(x) = x - r \sin x$, представленная на рис. 1.15, не является унимодальной или бимодальной [69].

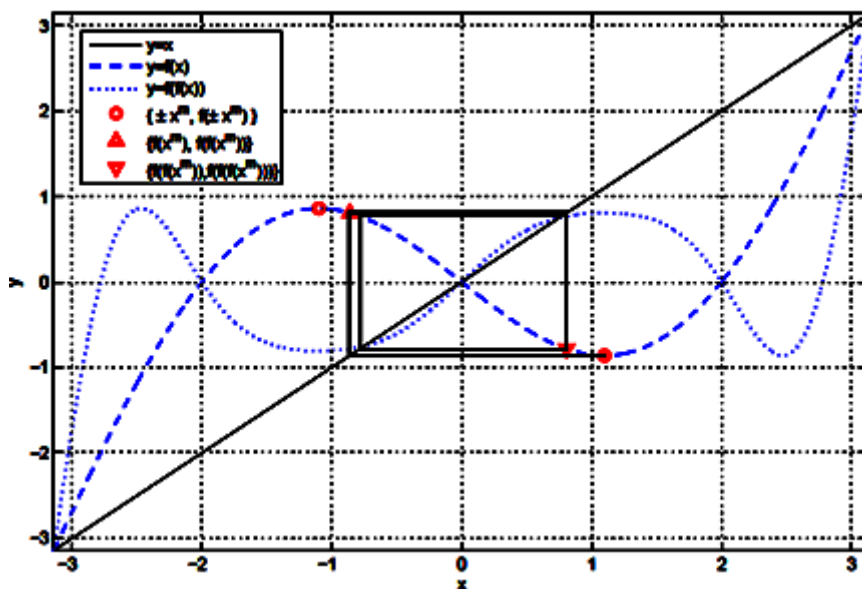


Рисунок 1.15 – Отображение $f(x) = x - r \sin x$, $r = 2.2$

Здесь $f(x)$ является нечетной функцией и имеет два локальных экстремума $\pm x^m$, а последовательность $\{x_n\}$, начатая в точке x^m , не проходит через точки локальных экстремумов $f(x)$ и $f(f(x))$ – последовательность отображена на

рисунке в виде линий, последовательно соединяющих точки $(x, f(x))$, $(f(x), f(x))$, $(f(x), f(f(x)))$, $(f(f(x)), f(f(x)))$...

ГЛАВА 2 ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

2.1 Введение в синергетику экологических процессов

Основа синергетики – термодинамика неравновесных процессов, теория случайных процессов, теория нелинейных колебаний и волн. Все земные системы (биологические, геологические, географические, экологические и др.) – в значительной степени открытые неравновесные системы, и их развитие происходит по законам синергетики.

Законы физического мира описывают процессы, протекающие в различных средах, обобщая их. В конечном итоге один и тот же общесистемный закон может иметь различные формулировки в зависимости от предмета приложения. Рассмотрим, каким образом можно приложить данные законы к эколого-синергетическим системам.

Закон Гесса – один из основных законов термохимии, отражающих первое начало термодинамики. Обычно он формулируется в виде положения, что энергетический эффект какой-либо реакции зависит лишь от начального и конечного состояний системы, но не зависит от пути, по которому шел процесс [72].

Для природного сообщества действует закон Гесса, согласно которому для системы сопряженных реакций важна только разность между исходным и конечным состояниями. При этом допускается множество путей между исходными субстратами и конечными продуктами, лишь бы выход энергии был достаточен. Тот же закон действует и для системы реакций внутри клетки. Однако для сообщества имеется ограничение, заключающееся в том, что для каждого вида, входящего в метаболическую систему сообщества, выход энергии должен быть достаточен для его существования. Таким образом, в многоступенчатой системе реакций деструкции органического вещества каждая ступень, осуществляемая видом микроорганизмов, должна быть выше некоторого минимального уровня.

Второе начало (закон, принцип) термодинамики имеет несколько формулировок, из которых для экологии наиболее важное значение имеют [6, 73–75]:

- энергетические процессы могут идти самопроизвольно только при условии перехода энергии из концентрированной формы в рассеянную;

- потери энергии в виде недоступного для использования тепла всегда приводят к невозможности стопроцентного перехода одного вида энергии в другую;

- закон возрастания энтропии: в замкнутой системе энтропия либо остается неизменной (в случае обратимых процессов), либо возрастает (при неравновесных процессах), что следует рассматривать как проявление все увеличивающегося хаоса, т. е. процессы в такой системе идут только в одном направлении: от упорядоченной структуры к хаосу (беспорядку), от неравномерного к равномерному распределению энергии.

Энтропию рассматривают как меру неупорядоченности системы. Природные системы не относятся к абсолютно замкнутым. Процессы в них относительно обратимы, поэтому их энтропия условно бесконечно долго стремится к нулю.

На достижение данного состояния направлены самоорганизация и саморегуляция природных систем, в том числе иерархия экосистем, в которых подсистемы контролируются надсистемами и, наоборот, надсистемы – входящими в нее системами. Например, в биотических сообществах контроль за числом и качеством особей идет, начиная с молекулярного уровня (генетический), во внутривидовых и межвидовых отношениях, в пределах сообщества, биогеоценоза, экосистем более высокого иерархического уровня вплоть до биосферы, всей планеты, Солнечной системы, Галактики [6, 76–77].

От способности системы противостоять разрушительной силе, внешней по отношению к себе надсистемы и в более коротком интервале времени воздействию сил развития каждой из подсистем, зависит ее устойчивость.

Чем больше отклонение в подсистемах и надсистемах от значения энтропии, близкого к нулю, тем это разрушительнее для рассматриваемой системы или тем активнее она воздействует на свою среду.

До определенной степени это воздействие может быть конструктивным. Но постепенно возникает порочный круг: сопротивление собственной деструкции (разрушению нормальной структуры) ведет ко все большему разрушению среды, а следовательно, и еще более широкомасштабным процессам деградации. Именно в этом скрыта глубокая первопричина экологических кризисов и необходимости всемирной охраны природы как среды, окружающей человечество и человека, а также контроля за развитием самой антропосистемы (техносферы).

Получение вещества и энергии извне неизбежно ведет к тому, что любая природная система не может развиваться иначе как за счет окружающей ее среды.

Второе начало термодинамики указывает на то, что вследствие необратимого характера протекающих процессов в термодинамических системах они не могут быть управляемыми до конца.

Для живого объекта рост энтропии, т. е. деградация (хаос), приводит к его деструкции (нарушению, разрушению) и, в конечном счете, – к смерти. С термодинамической точки зрения старение и смерть организма – проявление энтропии, а рождение новых организмов – ее преодоление [77].

Следовательно, живое вещество оказывает существенное влияние не только на геохимическую миграцию на поверхности Земли, но и на происходящие в биосфере превращения энергии. Присутствие живого вещества придает энергетическим явлениям в биосфере особые черты, не характерные для других сфер планеты – гидросферы, атмосферы и др. В рамках концепции устанавливается взаимосвязь между вторым началом термодинамики и явлениями, происходящими в биосфере.

Таким образом, в процессе «следования» нелинейной термодинамики биосфера с присущей только ей живым веществом вышла на высокий уровень самоорганизации.

Второй закон термодинамики биологических систем [77]:
устойчивость неравновесного термодинамического состояния биологических систем обеспечивается непрерывным чередованием фаз потребления и выделения энергии посредством управляемых реакций синтеза и расщепления АТФ соответственно.

Из этого закона вытекают следующие следствия [77–79]:

1 В живых организмах ни один процесс не может происходить непрерывно, а должен чередоваться с противоположно направленным: вдох с выдохом, работа с отдыхом, бодрствование со сном, синтез веществ с расщеплением и т. д.

2 Состояние живого организма никогда не бывает статическим, а все его физиологические и энергетические параметры всегда находятся в состоянии непрерывных колебаний относительно средних значений, как по частоте, так и по амплитуде.

Таким образом, природой биоритмов являются непрерывные чередования фаз потребления и выделения энергии посредством управляемых реакций синтеза и расщепления АТФ, направленные на обеспечение устойчивого неравновесного термодинамического состояния биологических систем.

Форма реализации законов термодинамики в биосфере существенно отличается от их проявления в неживых системах. Живые системы не только подчиняются законам термодинамики, но и адаптируются к ним. Живые

объекты и их системы «консервируют» свободную энергию, способную к дальнейшим превращениям. Более того, живое вещество обогащает свободной энергией внешнюю среду (выброс кислорода, улучшение почвы и т. д.).

Биосфера, адаптируемая к законам термодинамики, саморегулирует свой энергетический уровень и управляет накоплением и преобразованием свободной энергии, поступающей из внешней космической среды. Следовательно, биосфера имеет принципиальную возможность реализовывать тенденции к уменьшению энтропии, росту упорядоченности. Биосфера как целое способна к самообновлению.

Адаптация заключается в поддержании структуры и функций всех ключевых систем организма при воздействии на него различных по природе факторов среды. Адаптация является основой устойчивости и продуктивности всех организмов.

Всеобщий биологический закон – принцип устойчивого термодинамического равновесия (асимметрия) живых систем – определяет специфику биологической формы движения материи. Он применим в полной мере к экосистемам различного уровня сложности.

Если система (в том числе живой организм) претерпевает какие-либо превращения, ведущие к установлению равновесия, то общая энергия системы и окружающей среды остаётся постоянной, а общая энергия самой системы может либо уменьшаться, либо оставаться неизменной, либо увеличиваться. В ходе этих превращений система либо *отдаёт* тепло внешней среде, либо *поглощает* извне. Стремление энтропии к максимуму является истинной движущей силой любых процессов. Однако это не означает, что все процессы, ведущие к установлению равновесия, должны сопровождаться *увеличением энтропии самой системы*. Энтропия самой системы может увеличиваться, уменьшаться или оставаться неизменной. Если энтропия системы уменьшается, то, согласно второму закону термодинамики, энтропия окружающей среды должна увеличиваться таким образом, чтобы общая энтропия системы и окружающей среды увеличивалась. Именно это и происходит, когда растёт живой организм: *энтропия организма (как системы) уменьшается, а энтропия окружающей среды увеличивается* [77, 81–83] (рис. 2.1).

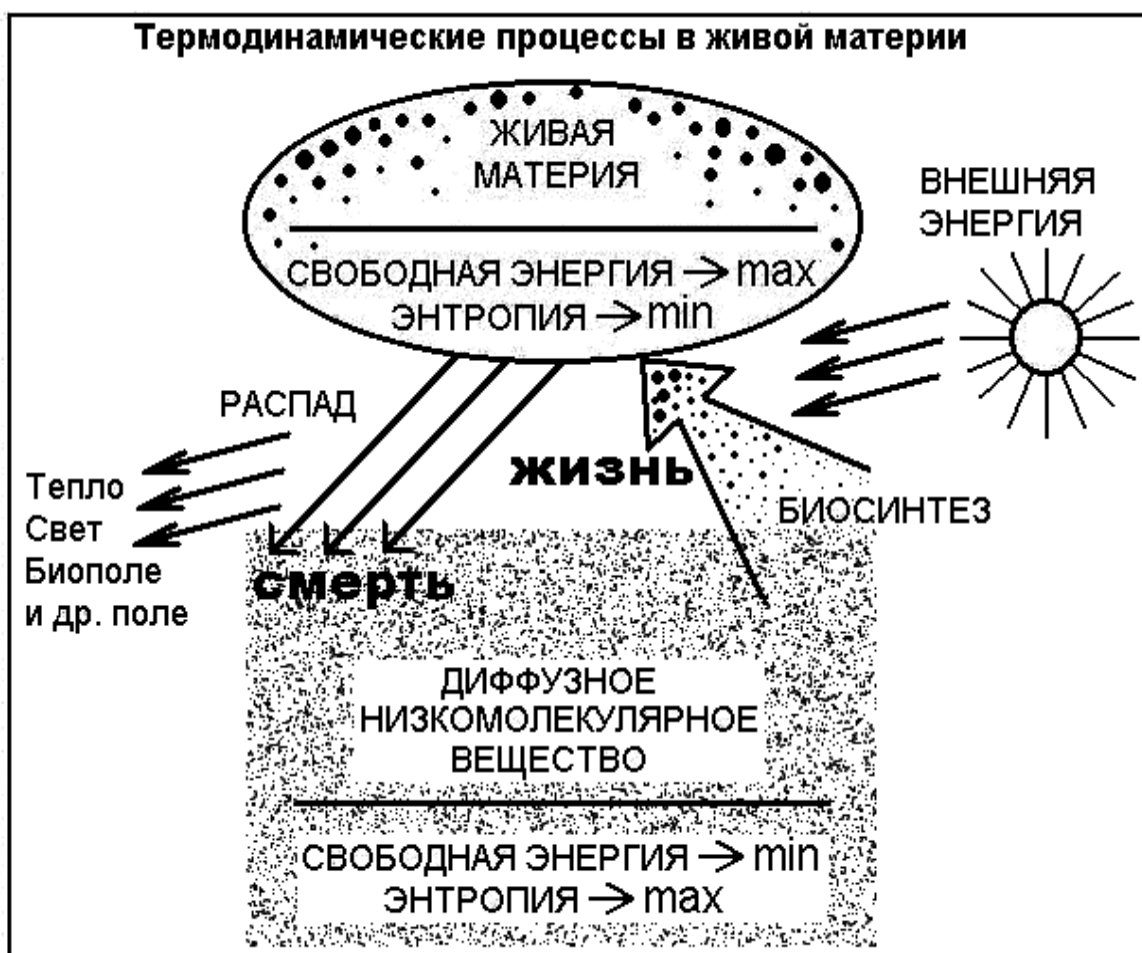


Рисунок 2.1 – Термодинамические процессы в живой материи (А. П. Анисимов, 2000) [83].

Математическими выражениями второго начала термодинамики для *открытых систем* являются [81]:

$$\frac{\Delta S}{\Delta \tau} = \frac{\Delta S_i}{\Delta \tau} + \frac{\Delta S_e}{\Delta \tau}, \quad (2.1)$$

где $\Delta S/\Delta \tau$ – общее изменение энтропии системы за промежуток времени $\Delta \tau$; $\Delta S_i/\Delta \tau$ – производство энтропии внутри системы, обусловленное протеканием в ней необратимых процессов (например, деструкция сложных молекул пищевых веществ и образование большого числа более простых молекул); $\Delta S_e/\Delta \tau$ – изменение энтропии, обусловленное взаимодействием открытой системы с окружающей средой;

$$\frac{\Delta G}{\Delta \tau} = \frac{\Delta G_i}{\Delta \tau} + \frac{\Delta G_e}{\Delta \tau}, \quad (2.2)$$

где $\Delta G/\Delta\tau$ – изменение энергии Гиббса, противоположное по знаку изменению энтропии; $\Delta G_i/\Delta\tau$ – изменение энергии Гиббса внутри системы; $\Delta G_e/\Delta\tau$ – разница между изменением энергии Гиббса внутри системы и во внешней среде.

В стационарном состоянии $\Delta S/\Delta\tau = 0$ и $\Delta G/\Delta\tau = 0$, следовательно

$$\frac{\Delta S_i}{\Delta\tau} = -\frac{\Delta S_e}{\Delta\tau}, \quad \frac{\Delta G_i}{\Delta\tau} = -\frac{\Delta G_e}{\Delta\tau}, \quad (2.3)$$

т. е. производство энтропии внутри системы компенсируется отдачей ее в окружающую среду, а убыль энергии Гиббса в связи с протеканием необратимых процессов восполняется за счет поступления энергии из внешней среды.

Одна из основных теорем *термодинамики открытых систем* (И. Пригожин, 1946): ***в стационарной термодинамически открытой системе скорость производства энтропии, обусловленного протеканием в ней необратимых процессов, принимает минимальное для данных условий положительное значение:***

$$\frac{\Delta S_i}{\Delta\tau} \rightarrow 0. \quad (2.4)$$

При этом в системе вещество распределяется неравномерно и организуется таким образом, что местами энтропия возрастает, а в других местах резко снижается. В целом же, используя поток энергии, система не теряет упорядоченности в открытых системах.

Закон временных иерархий позволил обосновать, что подавляющее большинство супрамолекулярных и других процессов (в первую очередь процессов структурообразования) в биомире протекает в квазизакрытых системах, в режимах, близких к состоянию равновесия [83]. Отсюда, например, следовал вывод, что соответствующие процессы *in vivo* и *in vitro* одинаково обоснованно могут исследоваться с позиций химической, супрамолекулярной и, в целом, иерархической термодинамики.

Закон временных иерархий позволяет выделять в биообъектах квазизакрытые термодинамические системы заданных иерархий и исследовать их развитие (онтогенез) и эволюцию (филогенез) путем изучения изменения величины удельной (на единицу объема или массы) функции Гиббса

образования данной высшей моноиерархической структуры из моноиерархических структур низшего уровня. Использование этого общего закона природы применительно к супрамолекулярным структурам организмов дает возможность использовать методы равновесной термодинамики для исследования открытых живых систем [84–85]. Супрамолекулярная термодинамика является одним из ключей, позволяющих понять явление жизни. Термодинамическая теория старения делает ряд предсказаний, имеющих важное прикладное значение. Так, установлено, что в процессе онтогенеза (а также филогенеза и эволюции в целом) удельная функция Гиббса образования супрамолекулярных структур тканей организмов, \bar{G}_i^{im} стремится к минимуму [84]:

$$\bar{G}_i^{im} = \frac{1}{V} \int_0^V \frac{\partial \tilde{G}^{im}}{\partial m} (x, y, z) dx dy dz \rightarrow \min, \quad (2.5)$$

где V – объем системы; m – масса выделяемых микрообъемов; x, y, z – координаты. Величина \bar{G}_i^{im} является удельной, т. е. относительной к микрообъему, система имеет гетерогенный характер.

Заметим, что соотношение (2.5) предполагает учет межмолекулярных (супрамолекулярных) взаимодействий во всех иерархических структурах биотканей (внутриклеточные и внеклеточные взаимодействия). Это вполне оправдано, поскольку структурная иерархия не всегда совпадает с временной иерархией. Например, некоторые типы клеток не делятся и подобно органам стареют одновременно с организмом. Однако для любой супрамолекулярной иерархии ($j - 1$) существует какая-либо высшая ($j + x$) иерархия, так что

$$t^{j-1} \ll t^{j+x}, \quad (2.6)$$

где t^{j-1} и t^{j+x} – средние значения времен существования (продолжительности жизни) элементарных структур соответствующих структурных иерархий в живой системе, $x = 0, 1, 2, \dots$ и т. д.

Следует заметить, что внутренняя среда и многие фрагменты неделищихся клеток все же обновляются вследствие наличия обмена веществ.

Использование соотношения (2.5) фактически означает, что мы применяем закон временных иерархий в виде

$$\dots \ll t^m \ll t^{im} \ll t^{organism} \ll t^{pop} \ll \dots \quad (2.7)$$

Здесь t^m – среднее время жизни (существования) молекул (химических соединений) в организме, участвующих в метаболизме; t^{im} – среднее время жизни любых межмолекулярных (супрамолекулярных) структур тканей организма, обновляющихся в процессе его роста и развития; $t^{organism}$ – среднее время жизни организмов в популяции; t^{pop} – среднее время жизни популяции. В ряд неравенств (2.7) были осознанно не включены времена жизни клеток и некоторых других сложных супрамолекулярных структур. Однако, разумеется, данный ряд представляет общий закон природы, согласующийся с реальностью и отражающий существование временных иерархий в живых системах. Закон временных иерархий связан с наличием обмена вещества на всех иерархических уровнях. Надо отметить, что существование обмена веществ (вещества) является неотъемлемой характеристикой живого. Указанный закон (Gladyshev's law) [84] позволяет строго обосновывать возможность выделения (вычленения) квазизакрытых моноиерархических систем (подсистем) в открытых полииерархических биологических системах. Данное утверждение полностью согласуется с опытом теоретической и экспериментальной физики и, на наш взгляд, не может вызывать каких-либо возражений.

Принцип Ле Шателье – Брауна имеет следующую формулировку [75]: при внешнем воздействии, выводящем систему из состояния устойчивого равновесия, само равновесие смещается в сторону, ослабляя внешнее воздействие.

На рис. 2.2 поданы основные пути поступления и трансформации потоков энергии в экосистеме, которые описаны Ф. Рамадом (1981) [86] и не включают процессы техногенного преобразования энергии и вещества.

С точки зрения характеристики энтропии системы можно трактовать данный принцип таким образом: система, выведенная внешним воздействием из состояния с минимальным производством энтропии, стимулирует развитие процессов, направленных на ослабление внешнего воздействия.

Благодаря действию принципа Ле Шателье в биосфере осуществляется биологическое регулирование концентрации веществ. Другими словами, поддерживая определенный химический состав окружающей среды, биота реализует принцип Ле Шателье, направленно изменяя соотношение между синтезом и разложением органических веществ, нарушенное в случае возмущения окружающей среды.

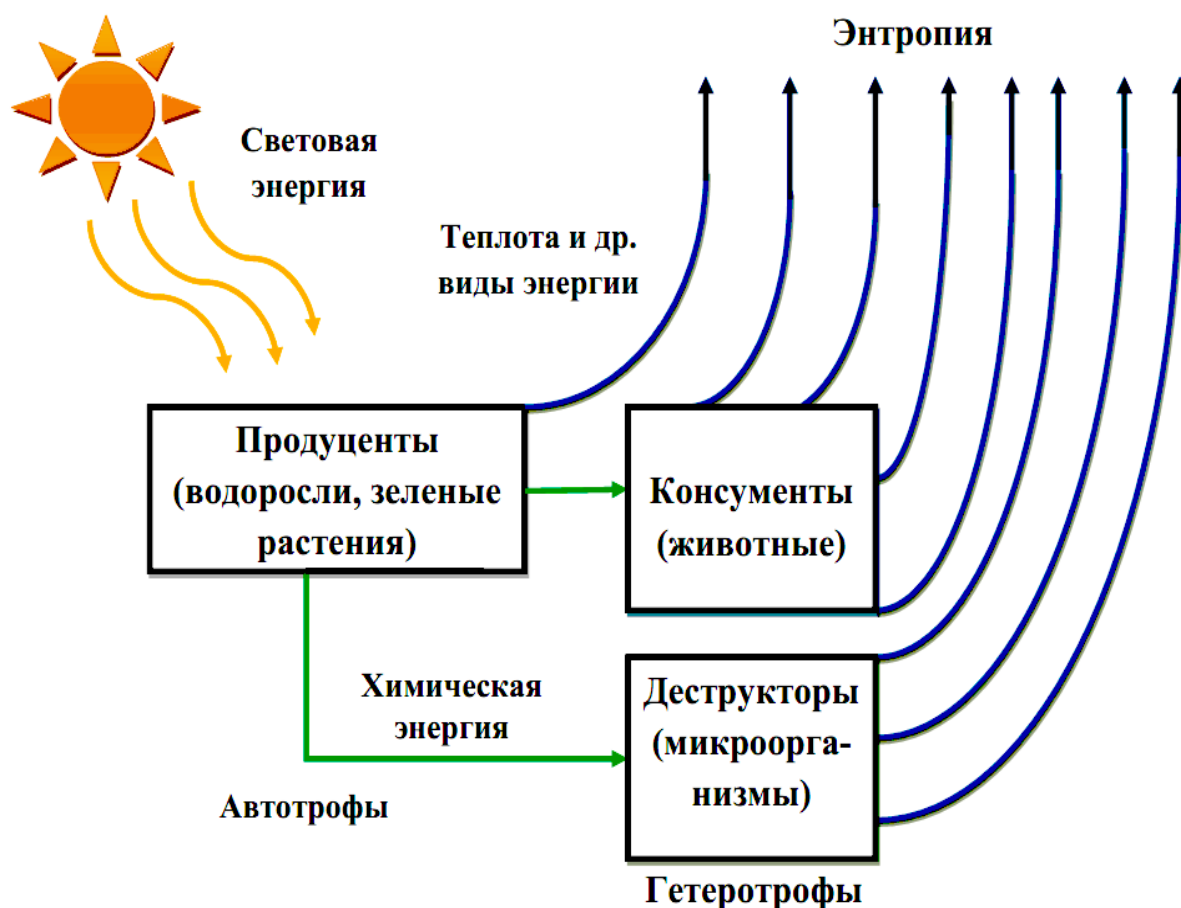


Рисунок 2.2 – Поток энергии в экосистеме (по Ф. Рамаду, 1981)

Так, биохимические реакции, катализируемые ферментами, не выходят за пределы классических законов термодинамики, и к ним (как и к химическим системам) применим принцип Ле Шателье – *равновесная точка системы смещается в направлении уменьшения эффекта производственного воздействия.*

«Метаболическое разнообразие» определяется не столько механизмами реакций, а сколько ферментным набором в клетках различных организмов и подходящими условиями для их проявления, то есть первичными здесь являются ферменты, а вторичными – катализируемые ими реакции [87].

Это подтверждается тем, что глобальные среднегодовые потоки синтеза и разложения органических веществ компенсируют друг друга с относительной точностью до сотых процента.

Отсюда следует фундаментальный вывод, что компенсация нарушений в окружающей среде может производиться только невозмущенной или слабо возмущенной биотой.

Температурный режим и концентрация большинства неорганических соединений в атмосфере и океане поддерживаются живыми организмами. Они

оказались бы «неравновесными», если бы жизнь на Земле была внезапно уничтожена. Однако при наличии жизни эти концентрации и температурный режим в целом остаются неизменными, несмотря на вулканизм и космические возмущения, в течение тысячелетий. Это означает, что современная биосфера после каждого возмущения (например, малый ледниковый период) возвращалась к первоначальному состоянию, которое, следовательно, было устойчивым, или динамически равновесным. Именно подобные наблюдения позволяют использовать принципы Ле Шателье для характеристики состояния биосферы [77, 80, 85, 88].

Принципы Ле Шателье характеризуют и процессы, протекающие на микроуровне. *Микробная система входит в фазу динамического равновесия только при наличии сбалансированных связей на уровне субстрата и продуктов метаболизма между разными группами микроорганизмов.* Например, для эффективной работы анаэробного сообщества критическим является наличие ацетокластических метаногенов или сульфатредукторов, способных усваивать ацетат в низких концентрациях, что не дает в дальнейшем возможности его накоплению в реакторе. Необходимо отметить, что в первую очередь в системе утилизируется водород и только с большой задержкой начинает утилизироваться ацетат. Поэтому взаимосвязь между гидрогенотрофными и ацетатокластическими метаногенами очень важна.

Ценность принципа Ле Шателье заключается в том, что он не требует знаний о структуре и динамике системы, а действует по отношению к любым переменным характеристикам системы. *В теории управления аналогичное явление носит название отрицательных обратных связей.*

Связь обратная – обратное воздействие чего-то на то, что воздействует на него, к примеру, обратное воздействие управляемого процесса на управляющий орган (подсистему).

Различают положительную и отрицательную обратную связь. **Положительная обратная связь** – это когда результат управляемого процесса усиливает его. Например, увеличение плотности населения животных до определенного предела вызывает повышение скорости размножения, т. к. пары легче находят друг друга. **Отрицательная обратная связь** – это когда результат управляемого процесса ослабляет его действие. Например, превышение упомянутого предела плотности населения животных ведет к депопуляции из-за факторов стресса.

В результате отрицательных обратных связей после любых малых возмущений система возвращается в первоначальное состояние, что

характеризует ее устойчивость. Можно говорить также, что такая система находится в динамическом равновесии.

Возмущения окружающей среды компенсируются естественной биотой до тех пор, пока возмущение в самой биоте не достигло порогового уровня. После этого порога биота теряет способность стабилизировать окружающую среду, начинаются ее локальные, региональные и глобальные изменения.

В биосфере механизм осуществления принципа Ле Шателье – Брауна основывается на функционировании живых систем. Он реализуется в виде способности экологических систем к авторегуляции.

В настоящее время действие данного принципа глубоко нарушено. К примеру, если в конце XIX в. еще происходило увеличение биологической продуктивности и биомассы в ответ на возрастание концентрации углекислого газа в атмосфере, то с начала XX в. данное явление не обнаруживается, т. к. биомасса на планете неуклонно снижается. Это вызывает усиление парникового эффекта, нехватку кислорода в промышленных районах и сопровождается массой других негативных явлений.

При очень больших воздействиях (сильное загрязнение) этот принцип нарушается. Отсюда следует однозначный вывод: самоочищение экосистем не безгранично, сильное загрязнение приводит к их разрушению и нарушению биосферы в целом.

Поскольку биосфера имеет лишь одно исторически достигнутое устойчивое состояние, то единственным способом восстановить действие принципа Ле Шателье – Брауна будет сокращение площадей антропогенно измененных экосистем, а также уменьшение доли потребления продукции биосферы человеком!

Следует помнить, что при естественном и искусственном изменении систем, в том числе и экосистем, действует принцип направленности эволюции (Л. Онеагер), или **закон минимума диссипации (рассеивания) энергии** [75]: при вероятности развития процесса в некотором множестве направлений, допускаемых началами термодинамики, реализуется то, которое обеспечивает минимум диссипации энергии (или минимум роста энтропии). То есть эволюция всегда направлена на снижение рассеивания энергии, на ее неравномерное распределение.

В мире действует закон всеобщей связи вещей и явлений в природе и в обществе. Он связан с **законом физико-химического единства живого вещества, законом развития системы за счет окружающей ее среды и законом постоянства количества живого вещества**, сформулированных В. И. Вернадским: любая система может развиваться только за счет

использования материально-энергетических и информационных возможностей окружающей ее среды; изолированное саморазвитие невозможно. Значительное увеличение числа каких-либо организмов за относительно короткий промежуток времени может происходить только за счет уменьшения числа других организмов. Это правило распространяется и на число видов организмов. В мире живых существ тотальность связей проявляется особенно ярко, потому что при материальном единстве жизни живые системы характеризуются наиболее разнообразными, разветвленными и интенсивными взаимопереходами вещества, энергии и информации. Они образуют экологические сети взаимосвязей. Богатство связей относится не только к локальным экосистемам. Глобальные круговороты веществ, ветры, океанские течения, реки, трансконтинентальные и трансокеанические миграции птиц и рыб, переносы семян и спор, деятельность человека и влияние антропогенных факторов – все это в той или иной степени связывает пространственно удаленные природные комплексы и придает биосфере признаки единой коммуникативной системы.

Густая динамичная сеть связей и зависимостей характерна и для человеческого общества. По сравнению с природой она многократно обогащена за счет потоков информации. Существует много примеров многоступенчатого опосредования и усиления частных изменений в технологических процессах, в производстве. В экономике все переплетено, любая оценка зависит от других экономических оценок и, в свою очередь, оказывает влияние на них. Не следует представлять себе данные закономерности так, будто все связано со всем отдельно в природе и отдельно в обществе, в экономике. На самом деле и природа, и общество находятся в одной сети системных взаимодействий.

Законы экодинамики. Помимо константности количества живого вещества в живой природе наблюдается постоянное сохранение вещественной, энергетической и информационной структуры, хотя она и несколько изменяется в ходе эволюции. Эти свойства Ю. Голдсмит (1981) обозначил как законы экодинамики. Первый из них – закон сохранения структуры биосферы, второй – закон стремления к климаксу, т. е. к достижению экологической зрелости и равновесности экосистем [75, 89].

Существуют и другие, более частные системные обобщения в экологии. Во многих руководствах часто цитируют аксиомы-поговорки известного американского ученого Б. Коммонера (1974), названные автором «законами экологии» [90]:

- «все связано со всем»;
- «все должно куда-то деваться»;

- «природа знает лучше»;
- «ничто не дается даром».

Все эти законы имеют интегральный характер и показывают динамичность процессов в экосистеме и эмерджентность ее характеристик, которые не могут быть восприняты лишь как совокупность свойств ее отдельных компонентов.

Закон экологической сукцессии

Динамические процессы природных систем характеризуются законом сукцессии.

Сукцессия представляется как закономерный последовательный ряд фаз развития какой-либо экосистемы, это ее путь, траектория развития. В аспекте первостепенное значение имеет понимание экосистемного кризиса. ***Кризис*** – событие на данном пути, имеющее специфический тип динамики и не являющееся характерным для какой-либо конкретной фазы сукцессии. Кризис представляет собой «скользящее» событие, которое может произойти не только в силу закономерных причин (например, смена сукцессионных фаз), но и случайным образом, на любом этапе развития экосистемы. Особое внимание необходимо уделять критериям, характеризующим изменения в сообществах, посредством изучения показателей структурно-функциональных изменений [91].

Сукцессии могут быть упорядочены по разным основаниям. С помощью классификации по различным признакам могут быть выделены разнообразные виды сукцессий. Среди таких признаков [92]: скорость образования / затухания, длительность существования, обратимость, постоянство, происхождение, тенденция развития (прогресс или деградация), изменение количества и разнообразия видов.

Модели сукцессии

По Ф. Клементсу (1928), все сукцессии развития экосистем в направлении климакса подчиняются одной модели: денудация; пионерность (иммиграция); колонизация (ойкоз); межвидовая конкуренция; биоценотическая реакция; стабилизация (климакс) [91, 93]. Так, при улучшении условий существования биоты происходит возрастание биоразнообразия и увеличение биопродукции в экосистемах (рис. 2.3).

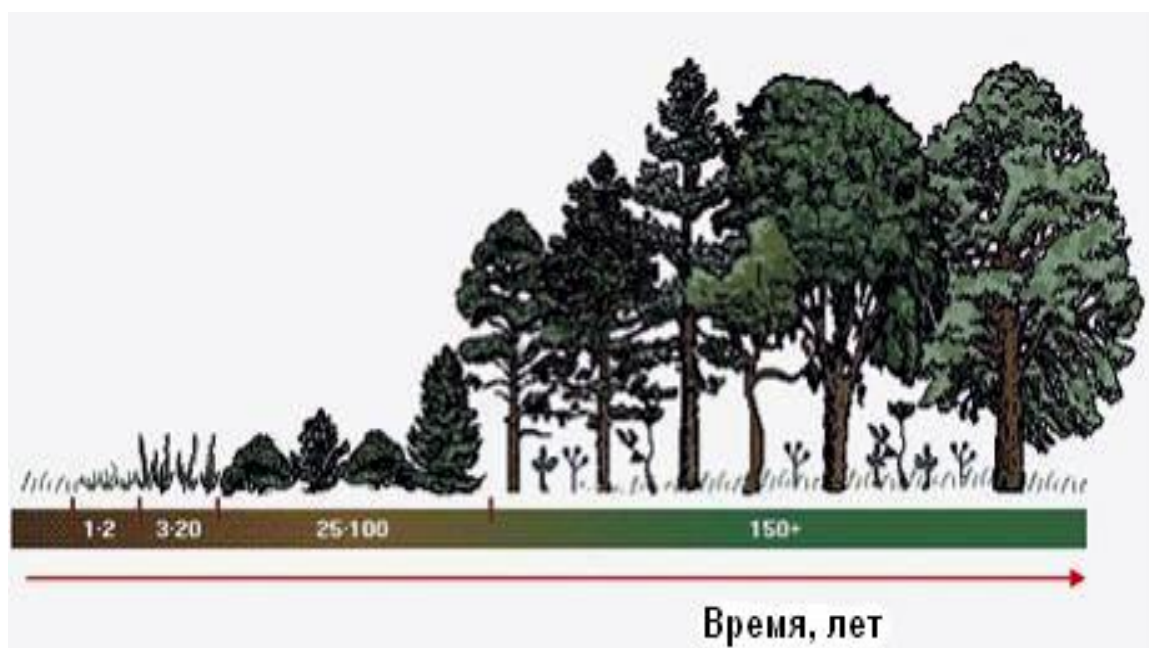


Рисунок 2.3 – Экологическая сукцессия (классический подход)

Экологическое моделирование рассматривает три класса моделей сукцессий [91–97]:

1 Модель благоприятствования, соответствует представлению о сукцессии Клементса: продуктивность и видовое богатство в ходе возрастает вплоть до стадии климакса. Классический пример такой сукцессии – зарастание скал, где друг друга последовательно сменяют стадии цианобактерий и водорослей, накипных лишайников, кустистых лишайников и мхов, трав, кустарников и деревьев.

2 Модель толерантности, при которой условия ухудшаются, пример – преобразование низинного болота в верховое. В ходе такой сукцессии происходит ухудшение условий минерального питания, поэтому снижаются продуктивность и видовое богатство. Ухудшаются условия для жизни биоты при восстановлении сукцессии на богатых субстратах (на вырубках, залежи, гари): первым растениям- поселенцам достается больше ресурсов минерального питания и света, чем вторым и третьим, которые должны обеспечивать себя ресурсами в условиях возрастающей конкуренции.

3 Модель ингибирования, при которой появляется ключевой вид, блокирующий дальнейшие изменения. В результате происходит остановка сукцессии и она не доходит до стадии климакса. Например, на лесных гарях в Шотландии кукушкин лен угнетает процесс роста деревьев, развитие уровня древостоя. В пустынях Средней Азии поселению кустарников и саксаула препятствует корка, которую образуют цианобактерии, водоросли и некоторые

мхи. Восстановление прерии в Северной Америки блокируется разрастанием интродуцентов – европейских злаков-однолетников (костра кровельного и др.). В горно-лесной зоне Южного Урала на территории заброшенных населенных пунктов не восстанавливается лес, потому что сукцессию блокируют нитрофильных рудеральные виды (крапива двудомная и др.). В южных районах Восточной Европы блокирующим видом является заносное американское растение циклахена. В степных предгорьях Северного Кавказа блокирующим видом является бородач (*Bothriochloa ischaemuni*).

В ходе сукцессии может происходить смена моделей. Например [94], смена благоприятствования моделью толерантности: на первых стадиях условия улучшаются, а по мере приближения к климаксу – ухудшаются. Это характерно для сукцессий зарастания лавовых потоков в теплом климате: на первых стадиях условия улучшаются за счет бобовых (особенно из рода люпин), способствующих обогащению субстрата азотом, а в дальнейшем – ухудшаются, так как обостряется конкуренция. Сходным образом происходит смена моделей сукцессий при зарастании субстратом, освобождающихся ото льда в Арктике: вначале за счет деятельности цианобактерий, а затем мхов, лишайников и кустарников условия улучшаются, а после поселения ели, которая затеняет поверхность и обостряет конкуренцию за почвенные ресурсы, – ухудшаются. В лесной подстилке можно исследовать сукцессии в нескольких стадиях одновременно. Такая возможность обусловлена сменой по направлению сверху вниз при движении. Помимо этого, явление может вызывать изменения влажности, содержания каких-либо особых соединений либо газов, температуры и т. п. Процесс почвообразования при этом сопровождается достаточно длительной сменой как растительного, так и микробного сообщества.

Автогенный механизм сукцессий описывается эколого-синергетическими законами, но человек может влиять на скорость сукцессии. Так, для ускорения самозарастания отвалов пустой породы проводится биологическая рекультивация – их поверхность покрывается тонким слоем торфа или почвы, в которой содержатся семена растений. Кроме того, процесс зарастания может быть ускорен посевом луговых трав или посадкой кустарников и деревьев.

2.2 Основные подходы в экологических исследованиях

В отличие от наук, возникающих на стыке двух дисциплин, например физической химии или химической физики, одна из которых предоставляет новой науке предмет, а другая – метод исследования, синергетика опирается на

методы, одинаково приложимые к различным предметным областям, и изучает сложные («многокомпонентные») системы безотносительно к их природе.

В зависимости от того, что является объектом, и какова цель исследований, используются разные подходы в экологии [80, 86, 92, 97–108]: популяционный, экосистемный, эксергетический, эволюционный и исторический. Все эти подходы имеют синергетическую основу. Рассмотрим их подробнее.

Популяционный подход предусматривает изучение размещения в пространстве, особенности поведения и миграции (у животных), процессов размножения (у животных) и возобновления (у растений), физиологических, биохимических, продукционных и других процессов, зависимости всех показателей от биотических и абиотических факторов. Исследования проводятся с учетом структуры и динамики (сезонной, онтогенетической, антропогенной) популяций, численности ее организмов. Популяционный подход обеспечивает теоретическую базу для прогнозирования рождаемости (в растительном сообществе – возобновления), выживания (динамики жизненного состояния) и смертности (распада, гибели) [96, 98]. Он позволяет прогнозировать вспышки вредителей в лесном и сельском хозяйстве, выявить критическую численность вида, необходимую для его выживания [99–101].

Экосистемный подход выдвигает на первый план общность структурно-функциональной организации всех экосистем, независимо от состава сообществ, среды и места их обитания. Основное внимание при данном подходе уделяется изучению потока энергии и циклам круговорота веществ в экосистемах, установлению функциональных связей между биологической составляющей и окружающей средой, т. е. между биотическими факторами и абиотическими. Экосистемный подход предусматривает всестороннее изучение всех популяций живых организмов сообщества (растения, микроорганизмы, животные) с учетом влияния на них ограничивающих факторов (эдафических, топографических, климатических). При этом подходе пристальное внимание уделяется анализу местообитания, так как параметры факторов среды [96]: физико-химические свойства почв, теплообеспеченность, влажность, освещенность, скорость ветра и др. – легко измеряются и поддаются классификации.

В качестве примера успешности экосистемного подхода к изучению биосферы можно привести итоги работы ученых из разных стран, работавших с 1964 по 1980 г. по Международной биологической программе (МБП). Конечной целью МБП было выявление запасов и законов воспроизводства органического вещества, его качественного (фракционного) состава по всем природным зонам

и в целом на планете, с тем, чтобы предотвратить возможные нарушения биологического равновесия в глобальном масштабе. Благодаря выполнению данной программы была решена актуальнейшая задача – выяснить максимально возможные нормы изъятия биомассы для нужд человечества [97, 102].

В последние десятилетия ведутся исследования деятельности ряда отраслей, производств и технологий с позиций эксергетической методологии. Величина, определяющая пригодность к действию (работоспособность) ресурсов вещества и энергии, была названа эксергией, а функции, определяющие ее значение, – эксергетическими. Термин «эксергия» был введен в 1956 году и происходит от греческого слова *ergon* – работа и приставки *ex*, означающей здесь высокую степень [103].

Эксергия – это мера превратимой энергии в полезную работу; максимальное количество работы, которое может быть получено от поточной системы в обратимом переходе её из исходного состояния в состояние равновесия с окружающей средой, имеющей постоянную температуру T_0 , энтальпию H_0 и энтропию S_0 (при отсутствии других источников теплоты, кроме окружающей среды).

Эксергетическим методом называется метод исследований, основанный на анализе потерь работоспособности в термодинамических процессах. Потоки энергии и эксергии всегда сосуществуют. Они могут быть равны друг другу, если речь идет о потоках механической или электрической энергии, и очень сильно отличаются в потоках теплоты.

Эксергия не только количественно характеризует энергию любого вида, но и позволяет оценить ее качественную сторону. Она определяет превращаемость, пригодность энергии для технического использования в любых заданных условиях.

Поскольку эксергия является единой мерой работоспособности, пригодности энергетических ресурсов, ее применение позволяет дать объективную оценку энергетических ресурсов любого вида, в том числе и вторичных. Использование эксергии отходов производства не только уменьшает расход соответствующего энергетического сырья, но и приводит к снижению капиталовложений в добычу и переработку этого сырья, например, экономия кокса при вдувании восстановительного газа в доменную печь ведет к уменьшению капиталовложений в развитие коксохимического производства [103–105]. Эксергетический подход используется для моделирования биоэнергетических процессов [107–108].

Эксергия связана с термодинамическими функциями состояния [104]:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S = \mathcal{E}'_{\phi}; \quad (2.8)$$

$$\Delta F = U - T\Delta S = \mathcal{E}^{\Gamma}_{\phi}; \quad (2.9)$$

$$\Delta X = \sum_{i=1}^N \Delta M_i n_i = \mathcal{E}_X, \quad (2.10)$$

где \mathcal{E}_{ϕ} – физическая эксергия, равная максимальной работе изобарно-изотермического или изохорно-изотермического потенциала; ΔM_i , n_i – изменение химического потенциала, число молей системы; ΔH – энтальпия; ΔS – внутренняя энергия; ΔU – химический потенциал; \mathcal{E}_X – химическая эксергия, равная химическому потенциалу системы ΔX ; ΔG , ΔF – изобарный и изохорный потенциалы.

Таким образом, эксергия представляет собой некоторую универсальную меру энергетических ресурсов.

Химическую эксергию жидких и твердых отходов производства можно использовать в дальнейших производственных процессах: доменный шлак – для производства строительных материалов, сталеплавильный шлак – для выплавки чугуна, бытовые отходы – для получения синтез-газа для отопления городов.

Весь энергетический комплекс от забоя или скважины до конечных потребителей энергии можно представить как процесс передачи эксергии от одного носителя к другому с постепенным или резким ее снижением или исчезновением.

Эксергетический баланс, на основании которого устанавливается масштаб использования сырьевых и энергетических ресурсов, указывает на возможность повышения коэффициента полезного действия процесса. Например, доменная печь является агрегатом с большим эксергетическим коэффициентом полезного действия (около 70 %) благодаря противотоку шихты и газа в печи. Для сравнения: эксергетический коэффициент полезного действия электростанции в составе предприятия составляет примерно 25 %. Эксергетический баланс доменной печи указывает на относительно высокие потери эксергии при сжатии и нагреве дутья, а также потери доменного газа и определяет пути ее сбережения [103].

Существует немало примеров успешного применения эксергетической методологии при технико-экономической оптимизации в промышленности, особенно в энергоемких отраслях.

В настоящее время стоимостные оценки не могут служить единственной мерой эффективности предприятий, перерабатывающих энергоресурсы. При изменении цен угля, газа, электроэнергии и транспортных расходов многие предприятия могут стать нерентабельными.

Эксергия является физическим, а не экономическим критерием, и определяет независимость этого параметра от конъюнктурных колебаний цен. Эксергетический метод позволил выявить связи термодинамических характеристик технических объектов с технико-экономическими и экологическими. Основанные на этих связях методики позволяют решать задачи оптимизации производства. Все затраты на предотвращение и компенсацию ущерба, наносимого окружающей среде различными технологиями, должны включаться в затраты на осуществление данных технологий. В некоторых ведущих европейских странах и США эксергетический анализ ввели в качестве обязательной составляющей разрабатываемых проектов, а также планов модернизации производств. Используется он также при оценке природных ресурсов. (Например, геологический комитет США учитывает геотермальные ресурсы по их эксергии) [103]. Применение эксергетической методологии для сравнения различных энергоисточников дает преимущество экологической схеме использования солнечной энергии.

Эволюционный и исторический подходы позволяют рассматривать изменения экосистем и их компонентов во времени. Эволюционный подход дает возможность понять основные закономерности, которые действовали в экосфере до того, как антропогенный фактор стал одним из определяющих. Он позволяет реконструировать экосистемы прошлого, принимая во внимание палеонтологические данные (анализ пыльцы, ископаемые остатки). В основе исторического подхода лежат изменения, обусловленные развитием цивилизации (от неолита до настоящего времени) и производствами, созданными человеком. К данным изменения относятся изменения климата, целенаправленное и случайное расселение человеком растений и животных [96–98]. В связи с этим следует более подробно остановиться на синергетическом подходе к эволюции систем.

Каждый из вышеуказанных подходов требует применения своих методов, специально разработанных с учетом состава объектов, условий местообитаний и поставленных задач.

Особое значение в аспекте изучения экосистемы с точки зрения эволюционного подхода отводится следующим факторам [6, 76–78, 81, 82, 84, 98]:

- неравновесному характеру системы, находящемуся на закритическом расстоянии от термодинамического равновесия;
- нелинейности (динамика системы существенно определяется эффектами, которые описываются уравнениями второго и более высокого порядка);
- способности к самовоспроизведению, т. е. к образованию относительно точных копий исходной системы или подсистем;
- конечности времени жизни системы, связанной с ней непрерывной смене поколений и процессу обновления;
- существованию нескольких устойчивых состояний экологической системы, зависимости текущего состояния от предыстории, потенциальной способности к хранению информации (генетической);
- отбору систем и механизмов с благоприятными свойствами из большого числа возможных конкурентных процессов;
- стабильности системы при случайной ошибке в процессе репродукции как источнику новых структур, механизмов и информации;
- обработке информации, т. е. способности к ее созданию, хранению, воспроизведению и использованию;
- оптимизации и адаптации, способности подстраиваться к изменяющимся внешним условиям, существованию критериев оптимизации;
- морфогенезу, т. е. формообразованию системы и ее органов;
- образованию эталонов с тенденцией к увеличению многообразия и сложности;
- ветвлению, т. е. все более сильному расщеплению реального и в еще большей мере потенциального пути эволюции;
- сетевой структуре с тенденцией к образованию все более сложных соотношений и зависимостей между подсистемами;
- дифференциации, специализации и распределению функций подсистем;
- объединению систем путем соединения в целое все более возрастающей сложности и все большей потенции к действию;
- иерархическому строению систем, элементы которых вложены один в другой (существование параметров порядка);
- ускорению эволюции, т. е. постоянному нарастанию средней скорости эволюционного процесса вследствие механизмов обратной связи;
- способности к уменьшению энтропии путем обмена энергией и веществом с окружающей средой.

В настоящее время эволюционно-синергетическая парадигма – важнейшая в экологии. С одной стороны, она дает представление о экосфере как о целостности, позволяет видеть законы и явления в их единстве, а с другой – ориентирует естествознание на выявление конкретных закономерностей самоорганизации и эволюции материи на всех ее структурных уровнях.

ГЛАВА 3

СИНЕРГЕТИКА МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

3.1 Микробное сообщество как целостность

Микроорганизмы получают энергию для своей жизнедеятельности от окислительно-восстановительных реакций, представляющих перенос электрона от донора к акцептору. Общее правило термодинамической устойчивости системы, которое согласуется со вторым началом термодинамики, имеет следующую формулировку [109]: *хемолитотрофный организм может развиваться в области термодинамической устойчивости продукта энергодающей реакции.*

Однако работает и обратная закономерность: в местообитании сообщества, создающего определенные окислительно-восстановительные условия, химические соединения переходят в формы, соответствующие области их устойчивости в так называемых биологически опосредованных реакциях [87]. В многоступенчатой системе реакций деструкции органического вещества каждая ступень, осуществляемая видом микроорганизмов, должна быть выше некоторого минимального уровня [24].

Трофическая организация бактериального сообщества основывается на специализации организмов по используемым субстратам и образуемым продуктам. Тогда достаточно составить список организмов, образующих продукты, и сопоставить его со списком организмов, использующих эти вещества, чтобы получить картину трофических взаимодействий в сообществе (рис. 3.1) [109]. Для ее построения использовалось три множества: веществ, организмов, взаимодействий. Она представлена ориентированным графом, в котором стрелки изображают потоки вещества, узлы, изображенные кружками, пулы веществ, другие узлы в виде блоков – функциональные группировки организмов. Поскольку организмы образуют различные продукты и могут использовать различные субстраты, то в один и тот же узел могут входить и выходить из него несколько стрелок.

Характеристики компонентов системы меняются в зависимости от двух процессов: адаптации вида организма или же от адаптивной динамики со сменой видов в функциональной группировке. Важно, что сообщество микроорганизмов функционирует как единое целое с кооперативными трофическими связями, определяющими план химических взаимодействий [87].

Ведущим в микробной системе служит *цикл органического углерода.* Для него важно построить карту метаболических связей с указанием ключевых

функциональных группировок. При этом в сообществе бактерий одни организмы используют продукты других, и такая ступенчатая организация наиболее наглядна для разложения вещества. Продукт-субстратные взаимодействия между компонентами сообщества лучше рассмотреть на примере анаэробного сообщества [24, 26, 27, 43, 87]. Здесь последовательно действуют группы организмов, взаимодействие которых обеспечивает полное разложение поступающего вещества в несколько этапов с максимальным использованием энергии [109].

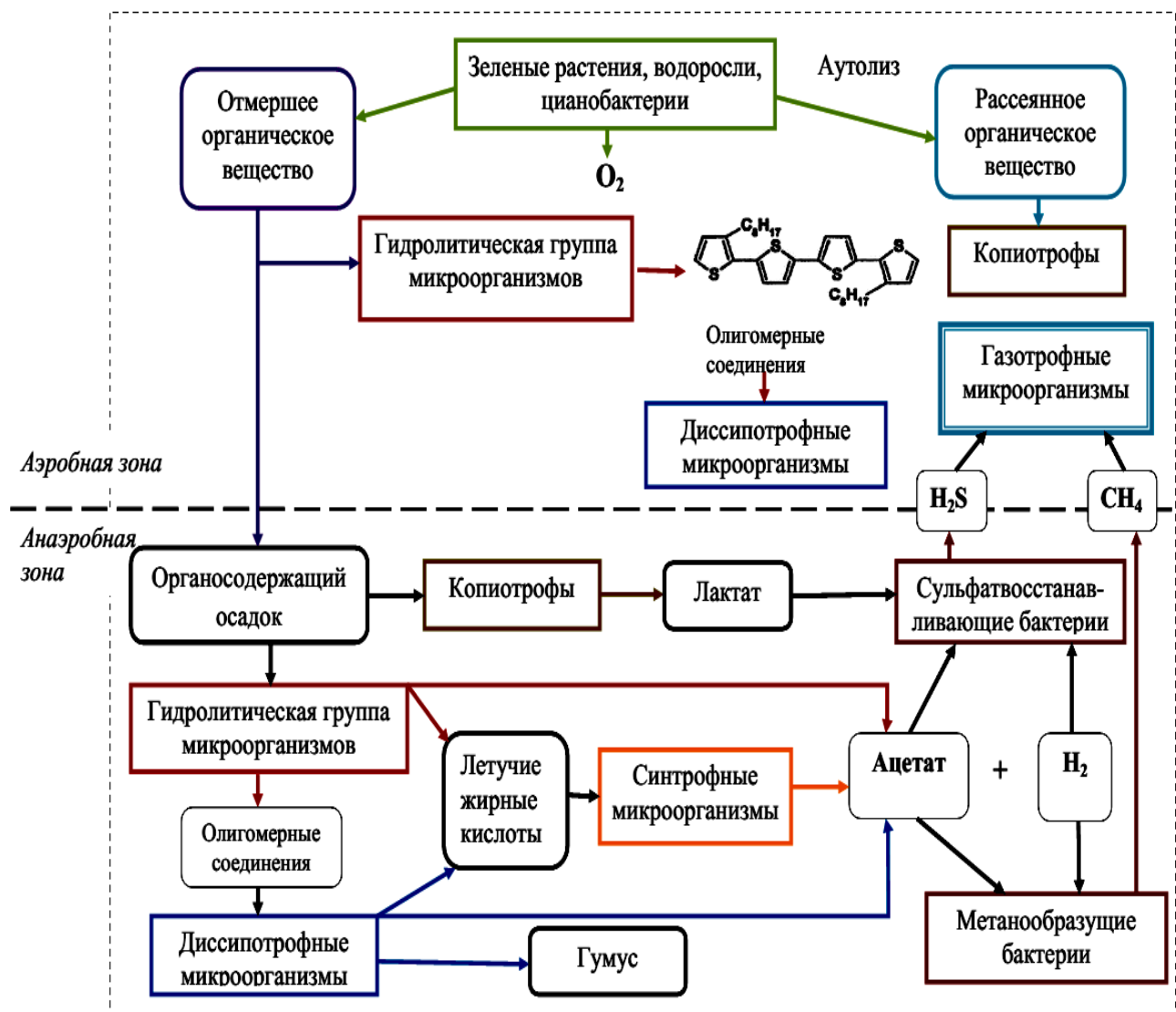


Рисунок 3.1 – Трофические взаимоотношения в микробном сообществе

Каждая группа отличается характерными субстратами и продуктами обмена, что позволяет следить за их деятельностью по результатам химического анализа. Функциональная группа микроорганизмов представляет компонент системы сообщества.

Рассмотрим группы микроорганизмов, которые формируют их ассоциацию и обуславливают в конечном итоге эмерджентные свойства анаэробной микроэкосистемы как единого целого.

В классической микробиологии [83, 87, 89, 109–111] приняты следующие этапы деструкции органического вещества, которые осуществляют специализированные группы микроорганизмов: гидролитический, ацидогенный (также можно выделить ацетатогенный) и метаногенный, который происходит, если в системе не сконцентрировано значительное количество сульфат-ионов, что обуславливает протекание сульфидогенеза.

Первый этап деструкции представляет гидролиз, осуществляемый гидролитами. Они осуществляют процесс, как правило, находясь в контакте с твердой фазой гидролизуемых веществ, хотя действие обусловлено внеклеточными гидролазами. Рассеиваемый при гидролизе полимера олигомерный продукт может быть использован «микрофлорой рассеяния», теперь называемой диссипотрофами. Они представлены в основном одиночными клетками, часто подвижными. В анаэробном сообществе их наглядными представителями служат спирохеты с очень выгодным отношением поверхности к объему. Диссипотрофы снижают концентрацию продуктов гидролиза ниже порогового уровня, регулирующего синтез гидролаз, находящийся под метаболическим контролем [109]. Это группа первичных анаэробов. Кроме этого, к ней относятся при анаэробных процессах бродильщики, отвечающие за ацидогенез. Важнейшими их продуктами являются H_2 , ацетат, а также летучие жирные кислоты (ЛЖК).

Второй этап анаэробной деструкции происходит при участии группировки *вторичных анаэробов* [111], которая включает организмы с анаэробным окислительным обменом, обусловленным использованием несбраживаемых продуктов первичных анаэробов как доноров электронов и внешних неорганических акцепторов электронов в окислительно-восстановительных реакциях, приводящих к образованию полностью окисленного продукта разложения органического вещества – CO_2 и восстановленного неорганического соединения [87, 109, 110].

Для неорганических соединений четко соблюдается термодинамическая последовательность окислительно-восстановительных потенциалов как предпочитаемых акцепторов; наименее термодинамически выгодные акцепторы используются в последнюю очередь. Существует правило [87]: *развитие вторичных анаэробов возможно лишь в поле термодинамической устойчивости восстановленного продукта реакции в координатах $Eh-pU$.*

Вторичные анаэробы используют все продукты первичных анаэробов. Поэтому получается трофическая структура сообщества с продукт-субстратным взаимодействием как основным принципом организации. Продукты обобществляются, образуя пулы. Поскольку разные организмы образуют сходные продукты, то ребра от нескольких узлов сходятся вместе и вместо цепей получаются сети [109].

В зависимости от доступного акцептора электрона могут доминировать различные группы вторичных анаэробов (нитрогены, ацетатогены или сульфатредукторы) с выделением различных продуктов их метаболизма, которые также должны быть утилизированы или в самом микробном сообществе или при обмене с окружающей средой.

Таким образом, *при внешнем воздействии, например притоке определенных веществ (как токсических, так и нетоксических) в систему, происходит переход микросистемы через бифуркацию в новое состояние, связанное с изменением доминирующих видов и появлением новых, а также в дальнейшем с изменением экологических функций системы.* Для того чтобы сообщество существовало сколько-нибудь длительное время и было автономным, необходимо, чтобы деструкция была полной и не накапливалось никаких продуктов. На самом деле данное требование выполняется лишь отчасти [111], и происходит накопление не полностью разложенных или устойчивых (в качестве гумусовых веществ) продуктов обмена сообщества, что ведет к сукцессии – последовательной смене сообществ.

Важно запомнить очень простое правило Виноградского [112]: для каждого природного вещества есть микроорганизмы, способные его разложить, согласно которому можно представить себе совокупность органотрофов, расположенных на маршрутах, ведущих от компонентов мортмассы (сложных органических веществ) к CO_2 как конечному продукту (по циклу круговорота углерода). Соответственно можно обозначить группы маршрутов как протеолитический, сахаролитический, липолитический пути. Помимо бактерий к аэробным органотрофам относятся грибы. Микромицеты составляют трофические группировки, аналогичные группировкам бактерий. Наконец, остаточное органическое вещество, наиболее труднодоступное, как лигнин, и возникший в результате поликонденсации гумус, разлагают автохтонные организмы, часто в процессе соокисления.

Таким образом, микробное сообщество представляет собой синергетическую систему с присутствием обмена веществом и энергией с внешней средой и кооперативными связями внутри системы, что определяет ее гомеостаз.

3.2 Саморегуляция микробиологической системы

В экологических исследованиях, относящихся к биологическим объектам, существует проблема адекватности экологического прогноза. В приложении к экологии сообществ, в частности микробиологических, она может быть переформулирована как проблема строгого количественного прогнозирования (расчета) численностей видов, образующих сообщество, как функций, аргументами которых являются факторы, определяющие жизнедеятельность организмов. Среди таких факторов одно из первых мест занимает обеспеченность особей ресурсами среды. Критерием адекватности расчетных схем может служить умение управлять структурой сообщества или, другими словами, умение поддерживать необходимый состав сообщества, представленного группами организмов в необходимых пропорциях. Например, в метантеке будут складываться определенные условия, провоцирующие развитие в большей степени тех или других видов микроорганизмов, таким образом, в данной ассоциации будет изменяться количество тех или иных видов бактерий и так же появляться новые виды, ведь отходы, идущие на переработку, имеют свой состав микроорганизмов. Это и является адаптивной динамикой сообщества, которая основана на изменении количественного соотношения входящих в него видов и, при рассмотрении крупномасштабных изменений в природных и антропогенно измененных средах (открытых системах), – на вербовке извне новых членов, соответствующих условиям и требованиям системы.

Таким образом, происходит саморегуляция микробиологической системы, и влиять на эту саморегуляцию искусственно следует обдуманно, к тому же такой контроль нельзя считать регуляторным по отношению к определенным видам бактерий в системе. Рассуждая таким образом, необходимо рассматривать не локальную герметичную систему типа лабораторного культиватора, а промышленные масштабы, например, переработка осадков и активного ила на очистных сооружениях крупных городов. Обеспечение увеличения выхода биогаза осуществляется путем улучшения условий метаногенеза – понижая значение рН и т. д., это непосредственно будет влиять на видовой состав самих метаногенов (гидрогенотрофных и ацитокластичных) и смежных с ними по трофических связях групп микроорганизмов (гомоацетогенов, сульфатредукторов).

Что же лежит в основе саморегуляции данной микробиологической системы?

Саморегуляция основывается на поддержании динамического равновесия между группами микроорганизмов путем изменения их метаболической активности.

Рассмотрим для начала внутриклеточную регуляцию [87, 110]. Клетка может вносить качественные преобразования в работу метаболического аппарата в ответ на изменение потребностей, вызванное, в свою очередь, изменениями в окружающей среде. Для осуществления данных функций у микроорганизмов возникли многочисленные регуляторные механизмы. О существовании высокоразвитой системы регуляции микробного метаболизма свидетельствуют многие наблюдения. Одно из них состоит в том, что макромолекулярный состав бактерий зависит от питательных веществ, доступных для клеток. Также есть следующие сведения: если имеется два органических субстрата, то бактерия сначала синтезирует ферменты, необходимые для усвоения соединения, поддерживающего более быстрый рост; только после того, как это соединение исчерпывается, синтезируются ферменты, необходимые для усвоения второго соединения. Дальнейшие исследования показали, что все быстро расщепляющиеся источники энергии подавляют образование ферментов, которые необходимы для усвоения более медленно расщепляющихся источников энергии. Это явление называется **катаболической репрессией**, что представляет собой один из регуляторных механизмов биосинтеза. Таким образом, изменяя состав среды при постоянной температуре, можно добиться, чтобы время удвоения биомассы культуры микроорганизма варьировало в значительных пределах (от десятков минут до нескольких часов), учитывая специфику данного вида. Более того, размер и состав клеток систематически изменяются в зависимости от скорости роста.

В клетке имеются два регуляторных механизма биосинтетических путей (по принципу обратной связи) [32, 83, 87]: регуляция синтеза ферментов (репрессия конечным продуктом и катаболическая репрессия) и регуляция ферментной активности (ингибирование конечным продуктом). Оба они действуют посредством низкомолекулярных соединений, которые либо образуются в клетке как промежуточные метаболиты, либо проникают в клетку из окружающей среды.

В основе феномена репрессии лежит принцип регуляции. **Репрессия конечным продуктом** основана на влиянии конечного продукта биосинтетического пути на концентрацию ферментов системы. При **катаболической репрессии** происходит подавление синтеза катаболических ферментов [83].

Исходя из вышесказанного, продукты самих первичных и вторичных метаногенов является регулятором, что формирует наличие именно таких трофических связей в системе и обуславливает количественный и качественный состав микробной ассоциации. Данные закономерности и лежат, на наш взгляд, в основе саморегуляции микробной системы. Таким образом, здесь существуют термодинамически обусловленные обратные связи и регуляторные связи между группами микроорганизмов.

Таким образом, выход метаболитов одного вида микроорганизмов обуславливает рост и активность другого вида (соответственно влияет на выход его метаболитов), а тот, в свою очередь, предотвращает возможность ингибирования первого вида его же продуктами жизнедеятельности.

Важно отметить, что H_2 может играть ключевую регуляторную роль в обмене анаэробного сообщества, термодинамически определяя возможное направление процесса. Роль других веществ возможна, но не универсальна. Далее важно, что обратимость реакции может останавливать весь процесс накоплением продуктов, как это происходит с водородом, но не происходит с метаном или ацетатом. Отсюда первостепенное значение для термодинамики имеет концентрация метаболитов в системе. Она определяется сродством организмов к субстратам, а отсюда и кинетикой их роста. С другой стороны, кинетика роста определяет конкуренцию между видами при занятии одной и той же экологической ниши и относится к сравнительной аутоэкологии видов.

Таким образом, микробное сообщество схематически можно подать как динамическую систему (рис. 3.2), с входными и выходными параметрами.

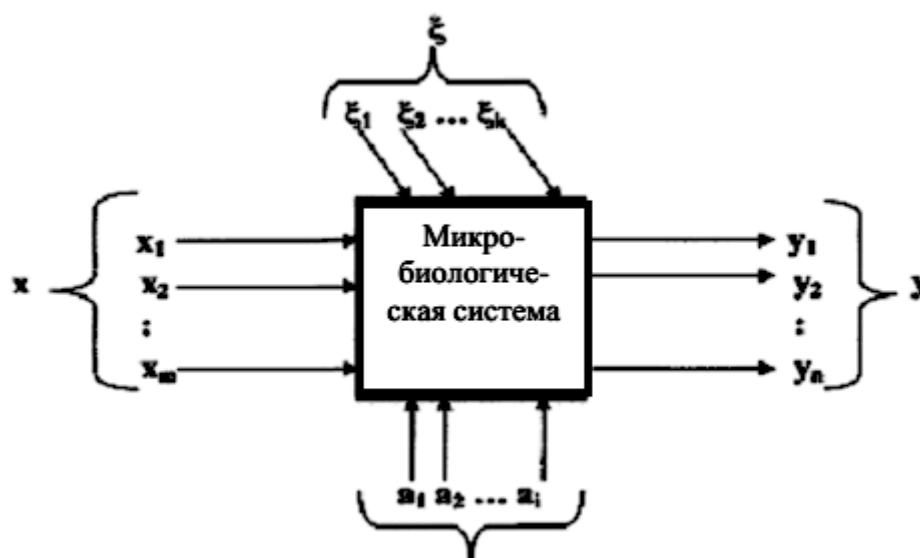


Рисунок 3.2 – Структурная схема микробиологической системы (Пляцук Л. Д., Черныш Е. Ю., 2015)[150]

Изменение этой системы основано на действии на нее внешних факторов (температуры, поступления питательных веществ и т. п.) и ответных реакций системы (качественные (видовые) и количественные (биомассы) изменения, выделение определенных продуктов биосинтеза и т. п.) [113]. Кроме того, данная биологическая система будет иметь ряд подсистем на уровне групп микроорганизмов или отдельных их видов со своей динамикой развития, которая входит в общий процесс функционирования системы. Соответственно эти подсистемы определяют внутренние параметры системы.

Математическая модель – приближенное описание объекта моделирования, выраженное с помощью математической символики.

Можно пользоваться таким определением *математической модели*, как зависимости вектора выходных переменных y объекта изучения (микробной системы) от векторов входных переменных – x , внутренних параметров – a , возмущающих воздействий – ξ , и структуру математической модели можно представить в виде [43]:

$$F(y, x, a, \xi) = 0, \quad (3.1)$$

где $x = (x_1, x_2, \dots, x_m)$ – вектор входных переменных объекта (системы); $y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ – вектор переменных состояния или выходных переменных объекта (системы); $a = (a_1, a_2, \dots, a_i)$ – вектор внутренних параметров объекта (системы); $\xi = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k)$ – вектор неопределенных параметров (часть входных переменных и внутренних параметров объекта (системы), значения которых мы не знаем точно), и возмущающих воздействий (внешних параметров).

В нашем случае внутренние параметры системы – кинетические характеристики подсистем. Между подсистемами есть связи так, выходные параметры одной подсистемы входят в состав входных параметров другой подсистемы. Изменение состояния подсистемы m в данный момент времени t_2 зависит от изменения состояния подсистемы n в определенный момент времени t_1 . Микробиоценоз структурно изменяется в пространстве и времени – это процесс сукцессии. Данная динамика заложена в «подрядной» структуре трофических взаимоотношений между популяциями разных микроорганизмов (подсистем), которую можно представить системой биохимических реакций и соответственной «сопряженной» кинетикой. Параметры неопределенности ξ , играют важную роль в точке бифуркации, при переходе сообщества на другой уровень организации. Например, при изменении доминирующих видов

микроорганизмов вследствие внесения новых акцепторов электронов в систему. В свою очередь, изменяется вектор выходных параметров у [113].

Возможна ли разработка биотехнологической системы с саморегулированием?

Чтобы разработать такую систему, необходимо решить ряд задач:

– определиться со схемой процесса, на которой будет базироваться кинетическая модель;

– разработать саму кинетическую модель, учитывающую специфику трофических взаимодействий между микроорганизмами (подход «извне»);

– определить составные части структурной модели ферментатора (биореактора), которая будет лежать в основе математического моделирования;

– обработать модель с помощью специального программного обеспечения.

Благодаря специфичности микроорганизмов возможно построение схемы трофических связей, основанных на продуктно-субстратных взаимодействиях между видами. Данный качественный аспект химических взаимодействий представляется главенствующим в конструировании сообщества. Следующий аспект связан с физической стороной организации сообщества в такую структуру, где физические потоки химических веществ достигают потребителя наилучшим образом. Это ведет к формированию «псевдоткани» из разнородных видов организмов. Следующий уровень занимают регуляторные взаимодействия, обусловленные прежде всего концентрацией метаболитов.

Для того чтобы реакция считалась энергодающей, во-первых, выход энергии должен быть достаточен для синтеза АТФ, в том числе и за счет протонной помпы, во-вторых, плотность потока вещества достаточная для поддержания популяции соответствующих организмов, т. е. их урожай Y для данной реакции должен обеспечить поддержание популяции организмов вопреки их естественному отмиранию и гибели. Если поток энергии от реакции превращения определенного вещества через локальное местообитание организмов недостаточен для поддержания популяции, то маловероятно и существование специализированной группы организмов.

В биохимической модели (рис. 3.3) изображены субстратно-продуктные связи, возникшие при наложении схем метаногенеза, гомоацетогенеза и сульфидогенеза, что вызвано содержанием в системе органических веществ (соединений серы и др.), потребляемых различными группами микроорганизмов [114].

Выход энергии суммарной реакции для сообщества зависит не только от донора электрона, но и от реакций, связанных с окислением. В результате для

анаэробного сообщества микроорганизмов-деструкторов будут существовать разные возможности, если заключительный этап осуществляется через эндогенные акцепторы, как при брожении или использовании образуемой органотрофами CO_2 для метаногенеза или ацетогенеза, или же при использовании внешних доноров, SO_4^{2-} . Поэтому здесь работает обратная связь от конечных этапов к начальным.

Соответственно биохимической модели анаэробного сообщества микроорганизмов-деструкторов (рис. 3.3), описывающей структуру данной биологической системы, мы составили субстрат-продуктные связи между группами микроорганизмов в виде графа (рис. 3.4).

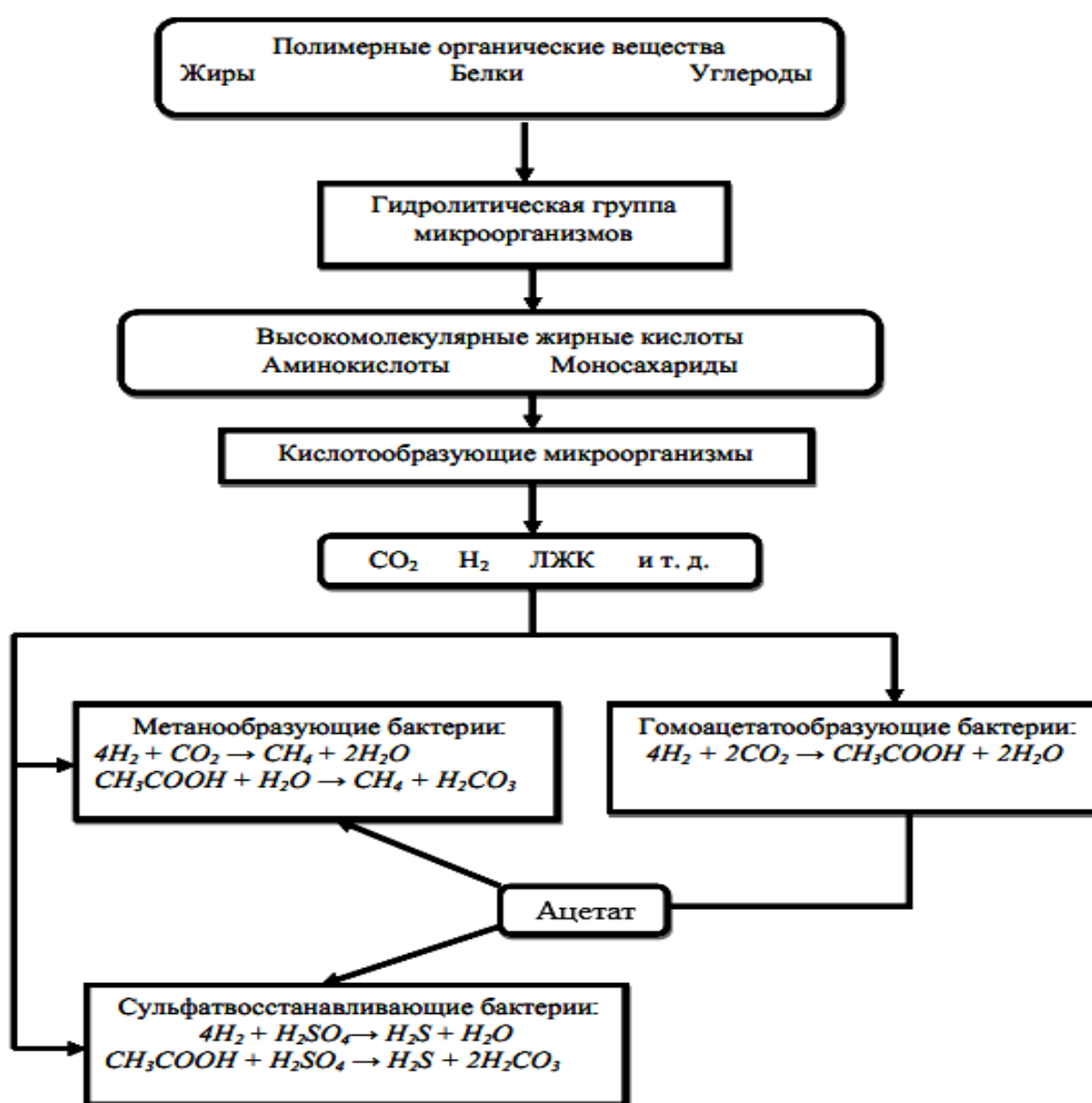


Рисунок 3.3 – Биохимическая модель анаэробного сообщества микроорганизмов-деструкторов (Пляцук Л. Д., Черныш Е. Ю., 2011) [114]

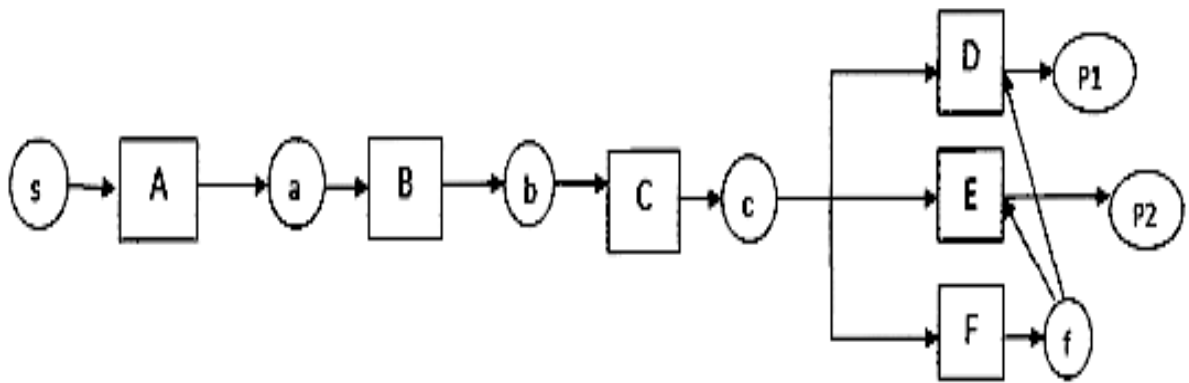


Рисунок 3.4 – Субстракт-продуктные связи между группами анаэробного сообщества микроорганизмов-деструкторов органического вещества

Пути метаболизма в сообществе, превращающем субстрат *s* в продукт *p* для организмов *A*, *B*, *C*, *D*, ... и образуемых ими промежуточных продуктов *a*, *b*, *c*, *d* (рис. 3.4).

На графе представлены комбинация с использованием разных промежуточных продуктов, конкуренция между организмами, образующими разные продукты *E* (метаногены) и *D* (сульфатредукторы), *F* (гомоацетатогены). Трофическая сеть в сообществе представляет комбинацию разветвленных цепей, ветвящихся либо по продуктам, либо по субстратам.

При рассмотрении цепи реакций важно отметить, что в условиях сообщества концентрация промежуточных метаболитов *a*, *b*, ... (полисахариды → моносахариды → H_2 , CO_2 , ЛЖК) снижается до минимума, обусловленного их потреблением следующим в цепи организмом.

3.2.1 Флуктуации микробиологических показателей качества речной воды

Микробное загрязнение природной водной среды представляет серьезную опасность для системы питьевого водоснабжения. Основными источниками микробного загрязнения воды являются фекальные выделения людей и теплокровных животных, попадающие в водные объекты вместе с хозяйственно-бытовыми сточными водами, стоком с животноводческих ферм и территорий, загрязненных навозом. В связи с этим на водопроводных станциях осуществляется регулярный микробиологический контроль исходной воды по группе показателей, включающих общие и термотолерантные колиформные бактерии, сульфитредуцирующие клостридии, общее микробное число,

колифаги, фекальные стрептококки. Известно, что данные показатели часто подвержены сезонным изменениям, на которые накладываются нерегулярные флуктуации, перемежаемые аperiodическими всплесками переменной амплитуды. Для нормального функционирования системы водоснабжения важен прогноз возможного уровня длительности микробного загрязнения водоисточника [115, 116]. Эта задача может быть решена на основе модели, описывающей формирование загрязнения такого типа.

Существенное воздействие случайных факторов на данный процесс предопределяет использование стохастических моделей. Этот класс моделей позволяет получить вероятностные оценки различных уровней загрязнения.

Временные ряды микробиологических показателей описываются либо с привлечением простых статистических оценок (сезонный тренд, коэффициенты корреляции) без применения моделей, либо с использованием вероятностного описания на основе различных типов распределений. Так, в работе (Hadas et al., 2004) исследовались индикаторные организмы (*E. coli*, энтерококки и фекальные колиформы), присутствующие в воде оз. Киннерет. Пробы отбирались каждые 2–4 недели в течение пяти лет. Описание рядов данных осуществлялось на основе плотности распределения Лапласа [24]:

$$f(Z) = \frac{1}{2b} \exp\left(-\frac{|Z-\mu|}{b}\right), \quad (3.2)$$

усеченной при больших значениях аргумента, и плотности распределения экстремальных значений [24]:

$$f(Z) = \frac{1}{2b} \exp\left[\frac{a-Z}{b} - \exp\left(\frac{a-Z}{b}\right)\right], \quad (3.3)$$

где μ – среднее, a и b – константы, $Z = Z(N)$ – некоторая функция численности организмов N , в качестве которой обычно используют $\ln N$, e^N , $N^{1/2}$, N^m и другие выражения.

Параметры распределений определялись подгонкой к эмпирическим данным на основе метода моментов или метода максимального правдоподобия. Учитывая ошибки данных и большие интервалы между измерениями, авторы констатировали удовлетворительное согласие обоих распределений с фактическими данными.

Для построения модели важно понимать смысл рассматриваемых микробиологических показателей. Исходные данные по микробиологическим

показателям речной воды включают колиформы, сульфитредуцирующие клостридии, общее микробное число, колифаги, фекальные стрептококки.

Основное внимание уделяется нахождению среднесуточного распределения численности микроорганизмов. Данной информации достаточно для решения долгосрочных задач [25]: для проектирования водопроводных очистных сооружений, которые будут функционировать длительное время и должны справляться с регулярно возникающими экстремальными уровнями микробного загрязнения поступающей воды. Многолетнее усреднение не позволяет в явном виде описать сезонные изменения микробиологических показателей.

3.2.2 Флуктуации в анаэробных биотехнологических системах

Микробиологические процессы, проходящие в отсутствие кислорода, характерны как для природных, так и технических систем. В разложении органических веществ участвует целое сообщество различных типов микроорганизмов, осуществляющих последовательно гидролиз, кислотогенез, ацетогенез и метаногенез. В ходе данных стадий из сложных молекул образуются жирные кислоты и конечные продукты – метан (CH_4) и углекислый газ (CO_2). Высокие концентрации продукта или субстрата могут ингибировать каждую реакцию, и в итоге конечный продукт CH_4 может и не появиться [109, 110].

Вавилиным В. А. была проведена серия экспериментов: один и тот же опыт повторялся дважды, при этом были получены резко отличающиеся значения для водорода, ацетата, метана и рН (рис. 4.5) [26].

В распределенных нелинейных химических системах без перемешивания наличие подсистемы активатор – ингибитор может вызвать спонтанное образование диссипативных структур и волновые явления. Вавилину [26, 27] впервые удалось наблюдать возникновение ячеистой структуры в ходе автокаталитической реакции в микробной системе метаногенеза (сбраживание твердых отходов с образованием биогаза).

Численное моделирование показало [26], что небольшие различия в начальных концентрациях микроорганизмов приводят к резкому отличию решений. Поскольку микроорганизмы сами – активаторы (именно они размножаются), то рассматривать необходимо подсистемы, такие как активатор – ингибитор.

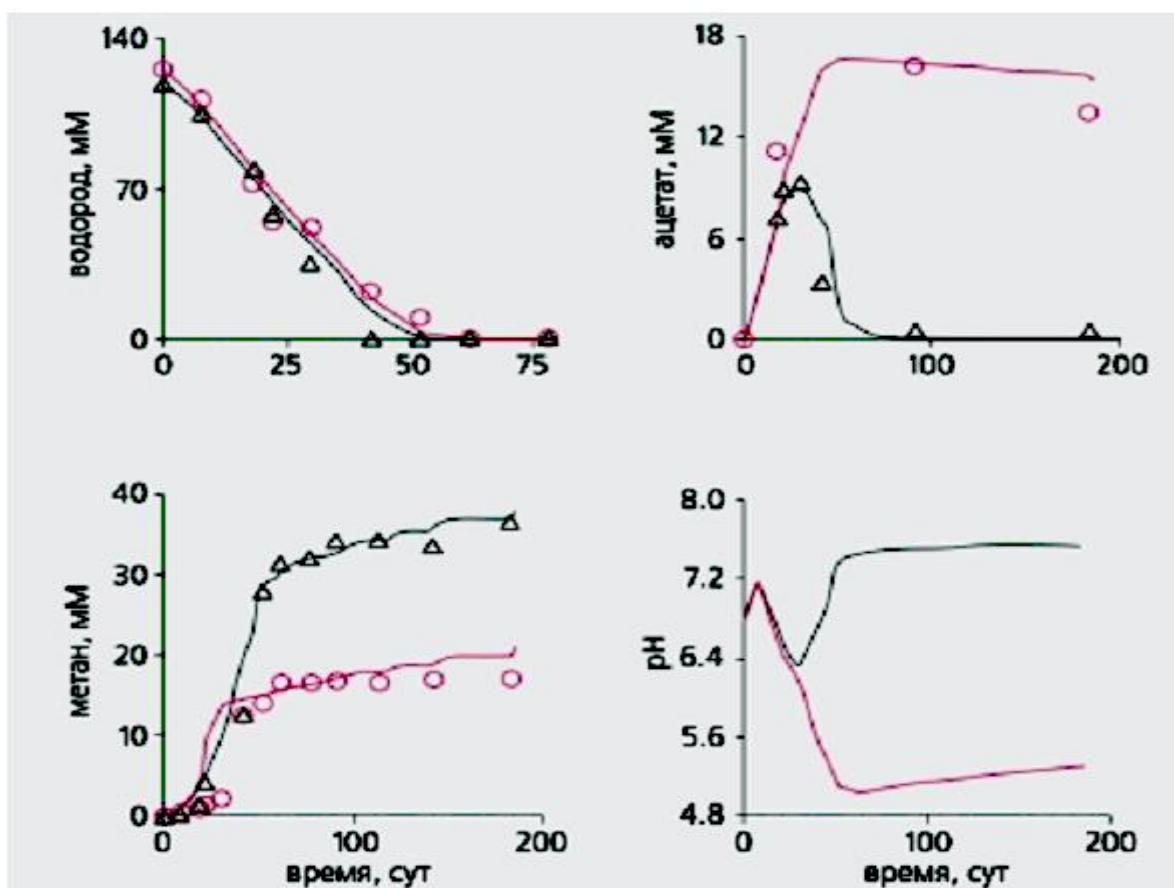


Рисунок 3.5 – Экспериментальные данные (символы) и результаты моделирования (кривые) поведения анаэробной микробиологической системы (Вавилин В. А., 2005) [26]

Двумерная модель реактора показала, что изначальное разделение зон активного метаногенеза и гидролиза / кислотогенеза способствует эффективному превращению бытовых отходов в метан, а интенсивное перемешивание блокирует метанообразование. Для выживания необходим достаточный размер зародыша. При слабом перемешивании концентрационные флуктуации могут перевести системы с одного динамического поведения на другое.

Биотехнологические системы отличительны от технических систем именно флуктуационной характеристикой, что усложняет проведение точной корректировки значений.

В процессе жизнедеятельности микроорганизмов происходит естественное изменение кислотно-щелочного баланса системы. Так, были проведены две серии экспериментов [117] по изучению кислотно-щелочного баланса биосульфидогенной системы с образованием биогенного газа с повышенным содержанием сероводорода (35–48 %) – процесс биосульфидогенеза в условиях без искусственной регуляции *pH* среды (X_2)

(эксперимент 1) и с регуляцией pH (X_2) (эксперимент 2), где регулирование проводится на фоне естественного процесса стабилизации кислотно-щелочного баланса системы для изменения направленности процесса в нейтрально-щелочную сторону в диапазоне 7,0–7,5 ед. pH .

Профиль выхода биогенного газа и изменения pH среды был разделен на несколько зон (рис. 3.6 и 3.7).

Эксперимент 1. Рост ацетатогенных микроорганизмов сопровождался закислением среды в биореакторе при падении pH на 1,31 ед. в период 2–6 суток (зона I), вероятно обусловленным гидролизом субстрата и выделением летучих жирных кислот (ЛЖК) и углекислого газа, который растворяется в жидкой фазе с образованием угольной кислоты.

На 6–10-е сутки кривая pH стабилизировалась (зона II) с незначительным падением значений pH , что свидетельствует о неполном удалении ЛЖК вторичными анаэробами, в первую очередь сульфатовосстанавливающими бактериями (СВБ). При этом максимум выделения биогенного газа припал на 8-е сутки и составил 3,32 дм³.

На 10–16-е сутки повышения pH не произошло, что соответствовало понижению выхода биогенного газа из биореактора (зона III). С увеличением времени удержания выход газовой фазы стабилизировался (зона IV) на уровне 0,80 дм³/сут., а pH составило 5,38 на 20-е сутки.

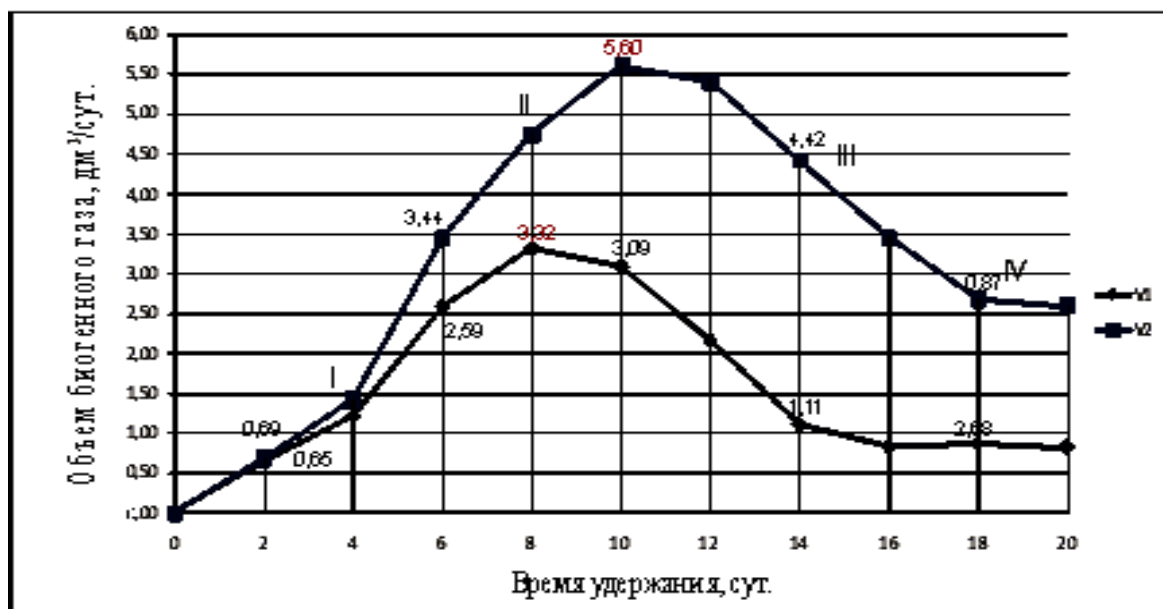


Рисунок 3.6 – Образование биогенного газа в зависимости от дозы загрузки биореактора: V1, V2 – объем выходящего из биореактора биогенного

газа в эксперименте № 1 и № 2 соответственно (Пляцук Л. Д., Черныш Е. Ю., 2013) [117]

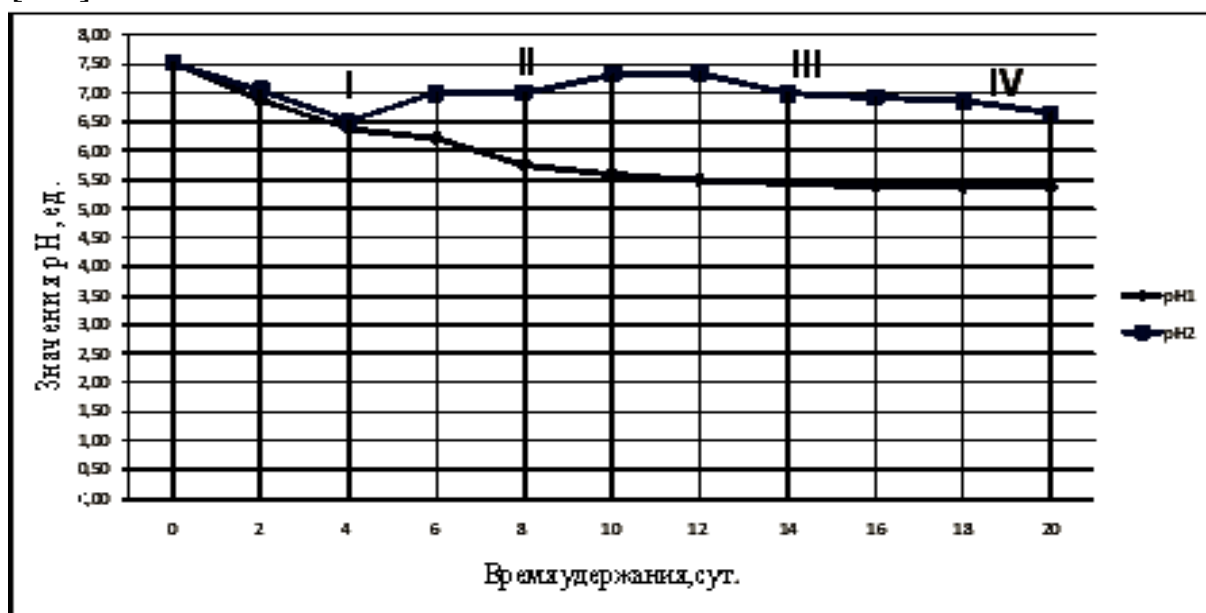


Рисунок 3.7 – Изменение pH (X_2) в системе: pH1, pH2 – значения pH в эксперименте № 1 и № 2 соответственно (Пляцук Л. Д., Черныш Е. Ю., 2013) [117]

Эксперимент 2. После полного окисления легкоразлагаемых органических веществ сообществом микроорганизмов происходит активное выделение углекислого газа (зона I), аналогично эксперименту 1, что происходит в соответствии с принципом Ле Шателье в результате смещения равновесия при поглощении растворенного CO_2 .

Происходит падение pH от первоначального значения на 1,03 ед. в период 2–6-е сутки (зона I).

Отметим, что выделение сероводорода наблюдалось при значениях $pH = 6,50$, что свидетельствует об адаптации сульфатредукторов к условиям среды и эффективному использованию малорастворимого минерального субстрата (добавки фосфогипса).

На 6–10-е сутки кривая pH стабилизировалась (зона II): для поддержания значений pH в оптимальных пределах был добавлен 1 % раствор $NaOH$ на 6-е сутки для доведения pH до 7,00, что стимулировало метаболическую активность микроорганизмов, а значит, образование биогенного сероводорода. Кроме того, каждый моль сероводорода, который оставляет жидкую фазу, соответственно удаляет два моля ионов водорода из системы, что стимулировало увеличение pH еще на 0,32 ед. (зона II).

При этом колебание значений pH было незначительным, а максимум выделения биогенного газа припал на 10-е сутки и составил $5,60 \text{ дм}^3$ при $pH = 7,32$.

Со временем процесс переходит в область со стабильным уровнем pH на 10–16-е сутки (зона III) (рис. 3.7). Однако интенсивность выделения биогенного газа падает вследствие уменьшения концентрации доступного микроорганизмам субстрата. При этом в газовой фазе концентрация сероводорода не убывает и остается на стабильно высоком уровне.

С увеличением времени удержания выход биогенного газа стабилизировался на уровне $2,60 \text{ дм}^3/\text{сут.}$ (зона IV). Уровень pH составил 7,2 на 20-е сутки.

Преимущественно значение pH прогнозируется на основе динамики микробиологических трансформаций смешанных слабых кислот. Разница между недиссоциированным и диссоциированным ацетатами (CH_3COOH и CH_3COO^- соответственно) регулируется областью значений pH . При понижении pH выход H_2S из жидкой фазы в газообразном состоянии приводит к сдвигу в равновесии сульфидной подсистемы, снижению соотношения H_2S/HS^- , тем самым повышая pH . Каждый моль H_2S удаляет 2 моля H^+ . При этом, когда значение pH устанавливается в нейтральной области, наступает равновесное состояние.

Таким образом, активная реакция среды в пространстве биореактора определяется не только составом биоразлагаемого органического вещества, но и типом протекающих биохимических процессов, сопряженных с жизнедеятельностью различных групп анаэробных микроорганизмов-деструкторов и развивающихся по законам синергетики.

3.3 Нелинейная кинетика распада органического вещества

Лигноцеллюлозный комплекс растительного субстрата состоит из трех основных компонентов: целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина.

Рассмотрим моделирование процесса деструкции органического вещества на примере разложения лигнина, которое представлено в работах [24, 25, 118]. Ведь наиболее устойчив к ферментативному разрушению именно лигнин, который состоит из различных фенольных мономеров. Деградация лигнина происходит под действием ферментов полифенолоксидаз: пероксидазы, лактазы, тирозиназы и других.

Основные процессы деструкции лигнина представлены на рис. 3.8.

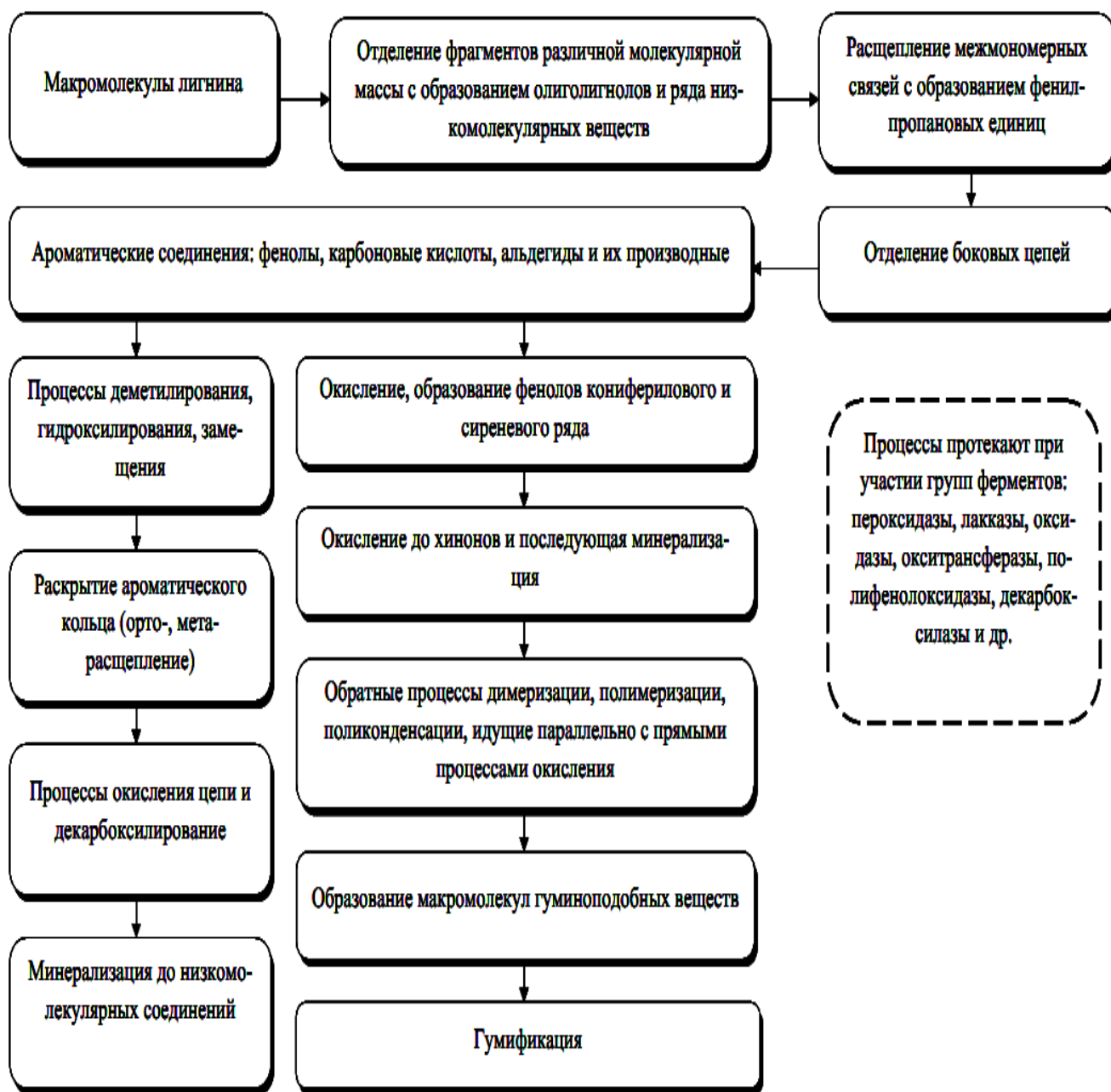


Рисунок 3.8 – Процессы ферментативной деструкции лигнина (Б. М. Долгонос, Т. Н. Губернаторова, 2011) [118]

Описанные особенности структуры лигнина приводят к мысли о наличии двух явлений [24]:

- 1) структурный хаос в ансамбле макромолекул; сущность данного явления состоит в том, что макромолекулы (даже если их размеры одинаковы) имеют различные структуры со случайно распределенными характеристиками;
- 2) фрактальность структуры отдельной макромолекулы; речь идет о самоподобии структуры при изменении масштаба, что проявляется в виде степенных зависимостей объема и поверхности макромолекулы от ее радиуса.

Основные положения, использованные при моделировании кинетики деструкции лигнина следующие [25]:

1) лигнин представляет собой ансамбль макромолекул с широким спектром размеров и структур. Структурные характеристики макромолекул распределены в ансамбле случайным образом (явление структурного хаоса);

2) топологическая структура отдельных макромолекул лигнина обладает фрактальными свойствами;

3) разрушение лигнина происходит при участии ферментов путем отрыва малых фрагментов от поверхности макромолекул. Скорость реакции отщепления отдельного фрагмента не зависит от размера макромолекулы.

Данные положения с той или иной степенью приближения выполняются не только для лигнина, но и для других органических веществ, макромолекулы которых получают поликонденсацией определенных структурных единиц, в частности для широко распространенных в почве и водной среде гумусовых веществ.

Биодеградация органического вещества осуществляется на основе ферментативных реакций, кинетика которых описывается полуэмпирическим уравнением Мозера (Moser, 1985):

$$\frac{dc}{dt} = -\mu X \frac{c^{\nu}}{c^{\nu} + K^{\nu}}, \quad (3.4)$$

где c – концентрация органического вещества; X – биомасса организмов, продуцирующих ферменты; μ – удельная скорость деструкции; K – константа полунасыщения; ν – порядок ферментативной реакции ($\nu > 0$).

Примем во внимание, что самоочищающая способность природной водной среды сохраняется только при достаточно низких концентрациях примеси: $c \gg K$. Это позволяет свести (3.4) к уравнению

$$\frac{dc}{dt} = -kc^{\nu} \quad (3.5)$$

($k = \mu X / K^{\nu}$ – константа скорости реакции), которое в терминах химической кинетики описывает реакцию ν -го порядка. Как будет показано далее, нелинейная модель (3.5) применима и в случаях, далеких от ферментативной деструкции (химическое окисление, фотодеструкция многокомпонентной примеси, седиментация коагулирующей взвеси).

Рассмотрим математические аспекты модели (3.5), которые понадобятся для последующего анализа эмпирических данных. Решение уравнения (3.5) при постоянном k имеет вид

$$c = c_0 \left[1 + (\nu - 1) c_0^{\nu-1} kt \right]^{1/(1-\nu)}, \nu \neq 1, \quad (3.6)$$

$$c = c_0 e^{-kt}, \nu = 1, \quad (3.7)$$

где c_0 — начальная концентрация примеси.

В зависимости от значения ν получим три частных случая. Первый:

$$c = c_0 \left(1 - \frac{t}{T} \right)^{1/(1-\nu)}, \quad (3.8)$$

$$T = \frac{c_0^{1-\nu}}{k(1-\nu)}.$$

Из (3.8) видно, что распад примеси при $\nu < 1$ завершается за конечное время T .

Второй частный случай $\nu = 1$ соответствует традиционной линейной кинетике $\frac{dc}{dt} = -kc$ и дает экспоненциальный закон распада (3.7).

В третьем частном случае $\nu > 1$ выражение (3.6) удобно представить в виде

$$c = \frac{c_0}{(1-t/T)^\varepsilon}, \quad (3.9)$$

$$\text{где } T = \frac{\varepsilon}{kc_0^{1/\varepsilon}}, \varepsilon = \frac{1}{\nu-1}. \quad (3.10)$$

Нелинейному уравнению (3.5) соответствует спектр реактивностей КОМПОНЕНТОВ

$$c_k(t) = c_{k0} \exp(-kt) = \frac{c_0 T^\varepsilon}{F(\varepsilon)} k^{\varepsilon-1} \exp[-k(t+T)]. \quad (3.11)$$

Отметим важное следствие из (3.9): на больших временах $t \gg T$ имеет место степенная асимптотика

$$c \sim t^{-\varepsilon}. \quad (3.12)$$

Время T в (3.9) характеризует длительность начальной стадии процесса распада лабильной фракции. Характерное время t_0 всего процесса определим из соотношения

$$c_0 t_0 = \int_0^{\infty} c(t) dt. \quad (3.13)$$

Подставляя в (3.12) выражение (3.9), можно убедиться, что интеграл в (3.13) существует только при $c > 1$, т. е. при $1 < \nu < 2$. Вычисление интеграла приводит к результату

$$t_0 = \frac{T}{\varepsilon - 1}, \quad \varepsilon > 1, \quad (3.14)$$

откуда следует, что t_0 пропорционально T . В случае $\varepsilon < 1$ (или $\nu > 2$) интеграл в (3.14) не существует, а значит, невозможно ввести характерное время для всего процесса, который длится бесконечно. В реальности длительность процесса будет намного превышать время начальной стадии T .

Сложность нелинейной кинетики микробного разложения органических веществ заключается в следующем: в большинстве случаев деструкции подвергается многокомпонентное органическое вещество. Так, в естественных донных отложениях – это вещества гумусового происхождения; в искусственных донных отложениях с добавками детрита сам детрит содержит вещества с различной усвояемостью микроорганизмами; в бытовых сточных водах содержится множество органических веществ разной природы; наконец, лигнины и хлорлигнины состоят из широкого спектра соединений с молекулярной массой до 104. Другое условие – сложная ферментативная реакция. В этом случае даже при распаде индивидуального соединения кинетика процесса отличается от линейной. Кинетику первого порядка следует ожидать в тех случаях, когда рассматривается одна стадия распада индивидуального соединения (как при фотодеструкции) либо когда из нескольких стадий распада только одна является лимитирующей (медленной), а остальные проходят быстро [25].

Принципиальное отличие нелинейной кинетики от линейной (первого порядка) [24] заключается в разном поведении при длительном времени. Линейная кинетика дает быстрый (экспоненциальный) распад, при котором вещество разлагается за некоторое характерное время. Для нелинейной кинетики свойственен более медленный (степенной) распад, а в случае, когда порядок реакции $\nu > 2$, процесс растягивается на длительное время (как, например, в донных отложениях, где временная шкала доходит до миллиона лет. Можно предположить, что экспоненциальный распад характерен для лабильной фракции органического вещества, а степенной – для широкого спектра компонентов стойкой фракции.

Из сказанного следует, что распределение компонентов органического вещества по реактивности должно играть важную роль в задачах мониторинга, поскольку на этом строят прогнозы экологической ситуации в водных бассейнах и планируют водоохранные мероприятия.

ГЛАВА 4

СИНЕРГЕТИКА В БИОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ВЫСШЕГО УРОВНЯ

4.1 Синергетический подход в медицинских исследованиях

Синергетический метод в медицинской диагностике состоит в классифицировании и интерпретации фундаментальных фактов и эмпирических данных о ходе эволюции заболевания человеческого организма. Синергетика, являясь по своей сути междисциплинарным методологическим подходом к познанию практически любого динамического процесса или явления, к которым, несомненно, относится и человеческое здоровье или болезнь, может рассматриваться как определенная разновидность интерпретации, указывающая возможные направления медицинского исследования (диагностики) и способствующая определению наиболее эффективной организации познавательных методов и процедур [119].

В соответствии с синергетической парадигмой любой эволюционный процесс выражается сменой противоположных качеств – условных состояний порядка (здоровья) и хаоса (болезни), которые соединены фазами перехода к хаосу (заболевание) и выхода из хаоса (выздоровления). Конечно, подобное разделение состояний является весьма условным, поскольку во всяком порядке есть доля хаоса, и наоборот, в хаосе можно найти элементы порядка. В качестве примера подобного «хаоса в порядке» может служить наличие легкой хаотичности ритмов сердца, являющееся признаком хорошей адаптивности сердечно-сосудистой системы; а «порядок в хаосе» можно обнаружить в четко выраженных закономерностях протекания болезни, выступающей причиной дезорганизации системы здоровья человека.

В современной научной литературе выделяется шесть основных принципов синергетики, имеющих непосредственное отношение к медицине. Два принципа характеризуют фазу порядка, то есть выражают аспекты стабильного функционирования системы (имеется в виду как «системы здоровья», так и «системы болезни»). К ним относятся [120]:

1 Принцип гомеостатичности, то есть поддержания программы функционирования системы в некоторых рамках, позволяющей ей следовать к своей цели. Цель-программу поведения системы в состоянии гомеостаза называют аттрактором. Медицинская диагностика направлена на выявление

аттрактора заболевания, клиническая практика ориентируется на активизацию аттрактора здорового состояния организма.

2 Принцип иерархичности, состоящий в передаче структуре части функций составляющих ее элементов. В медицине это будет проявляться в следующих закономерностях: 1) порядок здорового состояния организма служит хаосом (строительным материалом) состояния заболевания и наоборот; 2) различные проявления заболевания передают ему часть своих функций, которые начинают выражать свойства всего заболевания; 3) в процессе диагностики невозможно полностью редуцировать, то есть свести свойства заболевания к свойствам симптомов болезни.

Четыре принципа раскрывают аспекты становления системы «здоровья» или «болезни» [120]:

1 Принцип нелинейности, фиксирующий неравенство результата сумме воздействий, что представляется важным не только для процессов диагностики, но и для клинической практики. Нелинейность есть нарушение принципа суперпозиции в рассматриваемом явлении. Любая граница целостности здорового и больного состояния человека предполагает определенную нелинейность, поэтому, чтобы перейти от одного состояния гомеостаза к другому, мы вынуждены попасть в область их совместной границы, то есть сильной нелинейности. Нелинейными характеристиками обладают многие системы организма, что требует безусловного учета в процессе диагностики и лечения болезней.

2 Принцип открытости, обеспечивающий возможность обмена между иерархическими уровнями веществом, энергией и информацией, благодаря чему и существует возможность лечения болезней и сохранения здоровья.

3 Принцип неустойчивости, характеризующий открытость, нестабильность системы, стоящей на рубеже между новым и старым качеством (подобные состояния называют точками бифуркации, значимость которых состоит в том, что в них возможно очень слабыми воздействиями повлиять на выбор поведения системы; например, в состоянии кризиса, который отделяет больного от выздоровления или смерти, приобретают особую значимость любые положительные воздействия на него).

4 Принцип соотносительности, выражающий соответствие диагностической интерпретации данных масштабу рассмотрения; по этому принципу то, что является хаосом по отношению к макроуровню, выступает как система на микроуровне (например, болезнь вносит состояние хаоса в систему здоровья человека, но сама по себе она содержит определенный

порядок, выражающийся в законах собственного протекания, что и позволяет ее диагностировать и лечить).

Важную роль в синергетическом обосновании медицинской диагностики выполняют также следующие принципы [120]:

- всякая болезнь как сложная система имеет не единственный, а множество возможных путей эволюции, зависящих от индивидуальных особенностей больного и от условий лечения (степени развития медицинской теории и практики, доступности ее достижений для пациентов, социальных и экологических условий жизни пациентов);

- не все, что желаемо и входит в намерения субъекта медицинской деятельности (врача), реализуемо в открытой нелинейной системе «болезнь – диагностика – лечение».

Между двумя данными принципами прослеживается явная взаимосвязь. Более того, второй принцип является логическим развитием и следствием первого, а первый принцип служит обоснованием второго.

В определенных аспектах синергетическая парадигма соотносится с установками восточной медицины, рассматривающими человека как часть природы. Человек отражает в себе многие процессы и свойства не только материального мира и социума, но также и мира духовного, процессы космического характера. Современная наука уже не считает такие подходы мистическими, поскольку экспериментально доказана сильная зависимость развития всех жизненных процессов на нашей планете от влияния космоса. Это обосновывает значимость именно системного, синергетического осмысления здоровья человека как многоплановой сущности, что и должно найти достаточное выражение в процессе медицинской диагностики.

Парадигма синергетического обоснования в системе медицинской диагностики может быть реализована по следующим основным направлениям [119, 120]: 1) выделение главного системообразующего фактора, объединяющего выявленные симптомы; 2) рассмотрение в качестве аттрактора медицинской диагностики и обнаружение конкретных индивидуально-физиологических (связанных с состоянием организма пациента), социальных (раскрывающих условия и образ жизни пациента и доступность для него эффективных современных методов профилактики и лечения) и классификационно-атрибутивных (фиксирующих характерные для определенной болезни проявления и закономерности развития) причин, обусловивших рассматриваемое состояние пациента; 3) учет возможностей применения в медицинской практике не только научно-медицинских приемов и способов диагностики и борьбы с болезнями, но и достижений нетрадиционной

медицины, а также разделов других наук (естествознания, обществознания, психологии и т. п.), раскрывающих различные факторы, обуславливающие человеческое здоровье.

4.2 Моделирование организма человека как синергетической системы

Организм человека представляет собой комплекс взаимодействующих специализированных функциональных элементов, которые, объединяясь в единую систему, и обуславливают специфические характеристики эмерджентного содержания.

Как известно [121], единицей описания в традиционном системном подходе является отдельный элемент рассматриваемой системы, например клетка, нейрон, органелла и т. д. Единица описания в синергетике – это сеть, состоящая из клеток, нейронов, органелл. Если в обычном системном описании свойства приписываются индивидуальному объекту, в синергетике – ансамблям, множествам объектов.

Живой организм как самоорганизующаяся система является неравновесной и неустойчивой, так как любая неравновесная система, которая постоянно стремится к равновесию и достигает его в точке гомеостаза, содержит многочисленное количество функциональных элементов. И моделирование такой живой системы представляется сложной с алгоритмической точки зрения задачей. Необходимость такого моделирования обусловлено возможностью составления корректной картины протекания того или иного заболевания или нескольких сопутствующих друг другу, что всегда усложняет процесс лечения и подбора методов и медикаментов для этого. И здесь очень важным является учет действия факторов окружающей среды на функционирование подсистем организма и его ответные реакции на это влияние. В формуле (4.1) функцию диссипации σ_e массоэнергоинформационного обмена организма с внешней средой можно представить в виде сумм функций диссипации массообмена σ_{eM} , энергообмена σ_{eq} и информационного обмена σ_{eI} :

$$\sigma_e = \sigma_{eM} + \sigma_{eq} + \sigma_{eI}. \quad (4.1)$$

Данная формула (4.1) получена при условии, что рассматриваемые процессы равномерно распределены по объёму и поверхности организма.

Однако следует помнить, что биологически активные зоны более интенсивно поглощают и передают информационные потоки [119]. Поэтому рассмотрение таких энерго-материальных потоков должно учитывать ряд общих синергетических закономерностей генезиса открытых систем. А значит, процесс роста и развития организма противопоставлен уравнивающему давлению окружающей среды и направлен на его самоорганизацию.

Актуальными теоретическими задачами современной науки являются обоснование общей синергетической модели самоорганизации и эволюции сложных систем и адаптация к соответствующей области познания, в интересующем нас случае – экологии человека и медицинской диагностике.

Синергетический методологический подход в обосновании медицины крайне важен, поскольку позволяет комплексно, в единстве противоположных тенденций и случайных отклонений осмыслить самые фундаментальные категории – здоровье и болезнь, обосновывающие всю теоретическую и практическую медицинскую деятельность. В европейской науке еще со времен Ньютона практически безраздельно господствовал механистический принцип детерминизма. При использовании данного принципа предполагалось, что любая причина порождает только одно вполне определенное следствие, а человеческий организм представляет собой хотя и достаточно сложный, но однозначно детерминированный в своей деятельности механизм, который рано или поздно будет познан медициной во всех своих деталях. В подобном подходе к познанию человека не было места учету случайности и неопределенности. Однако оказалось, что человек устроен по-другому. Случайность и неопределенность предстали как принципиальные и неотъемлемые свойства организации его жизнедеятельности, которые и обуславливают человеческую способность к саморазвитию и самоорганизации.

Информационно-динамическая модель гомеостаза организма как многоуровневой системы способной к саморегуляции была нами представлена с помощью графа состояний (рис. 4. 1). Данная модель имеет конечное число возможных состояний, которые связаны с факторами воздействия на нее изменяющихся параметров внешней среды, а процессы, протекающие в подсистемах данной модели, являются дискретными случайными процессами.

На рис. 4.1 стрелками обозначена направленность информационных потоков, обеспечивающих субординацию и координацию программирующих и регуляторных механизмов системы управления функциями организма. Каждая из подсистемы регуляции обеспечивает анализ и обмен информацией, выявление в её потоках индивидуально значимой информации для обеспечения как жизнедеятельности клеток, так и здоровья в целом.

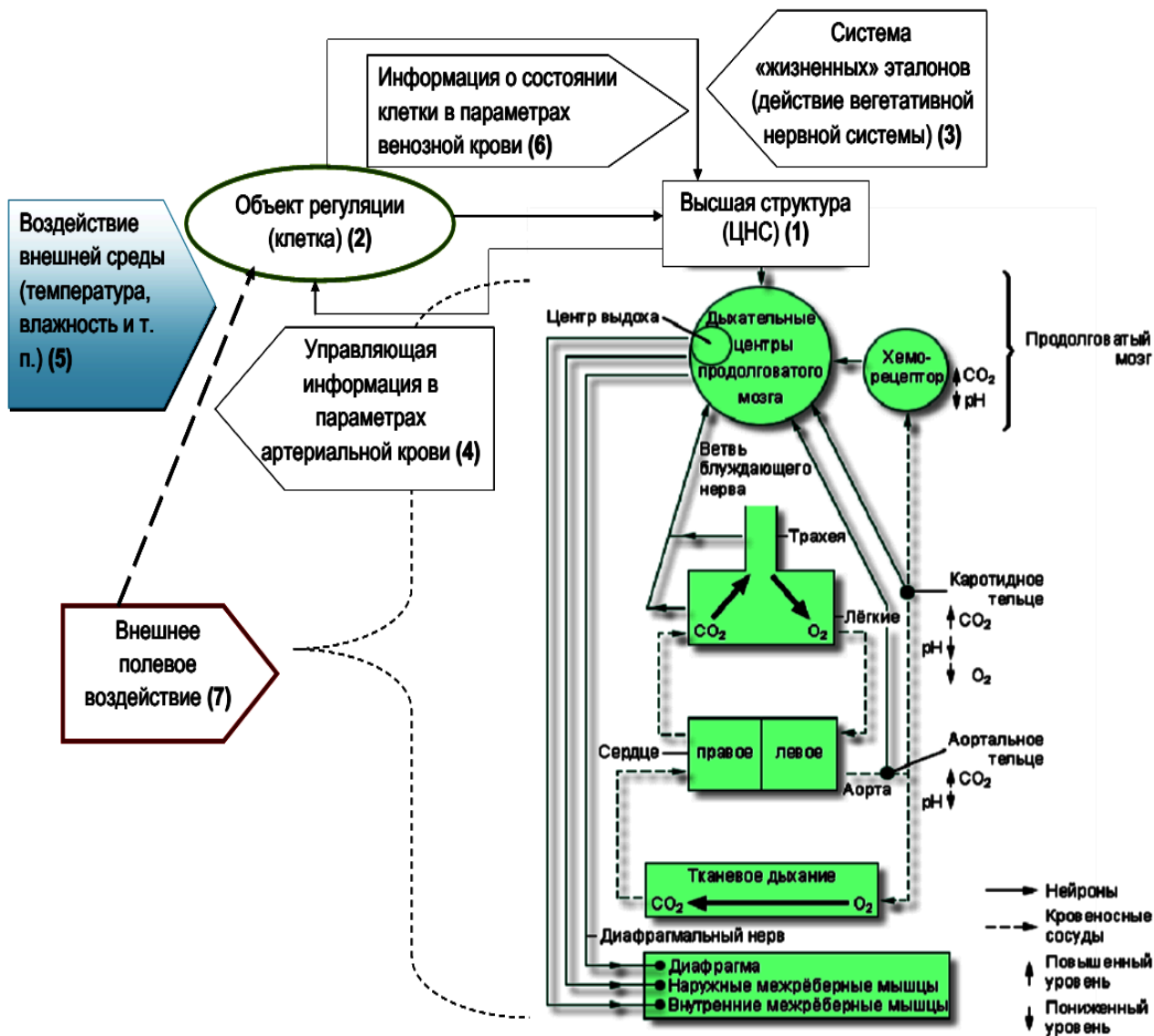


Рисунок 4.1 – Информационно-динамическая модель гомеостаза организма

Саморегулирование процессом осуществляется от центральной нервной системы, обозначенной на рисунке 4.1 цифрой 1, а объект регулирования – 2. Цифрой 3 обозначен некоторый «эталонный» сигнал, относительно которого осуществляется настройка гомеостатической системы. Назначение данного сигнала – задать вполне определенные (оптимальные) условия стабилизации жизненных параметров. Это необходимо, так как условия жизни могут меняться как в сторону усиления действия каких-либо факторов, определяющих условия жизни, так и в сторону их ослабления. Сигнал 4 в данном случае является сигналом обратной (отрицательной) связи, благодаря которому осуществляется компенсация внешнего воздействия (сигнал 5). В

качестве носителя этого сигнала в сложном организме может быть кровь, оттекающая от центральной нервной системы.

Сигнал 6 передает итоговое значение суммы всех сигналов с учетом действия компенсационного влияния сигнала отрицательной обратной связи 4. В качестве носителя этой информации в сложном организме выступает венозная кровь, несущая сведения к центральной нервной системе.

Часть информации на значительное расстояние передается через лимфу, оттекающую от органа, но в дальнейшем ток лимфы объединяется с венозной кровью уже близко от сердца, что, по-видимому, предохраняет информацию от разрушения или искажения при подаче ее в головной мозг.

Модель гомеостаза организма как системы саморегулирования воссозданная на основе информационных потоков имеет два различных процесса, накладывающихся друг на друга: стабилизация параметров и динамика передачи информации.

На рисунке 4.1, описывающем информационно-динамическую модель гомеостаза, также мы показали сигнал (7). Это воздействие внешних полевых структур, посторонних для данного объекта регулирования. По существу это тот уровень внешнего воздействия на клетку или систему органов, которое при его незначительном изменении вызывает такое влияние, которое уже никак не может быть скомпенсировано внутренними механизмами саморегуляции организма. Как результат происходит развитие заболевания, гибель клетки как структурной единицы живого объекта.

Рассмотрим некоторую систему с дискретными состояниями: x_1, x_2, \dots, x_n , переходящей из одного состояния в другое под влиянием простейших потоков событий с плотностью λ_{ij} вероятностей перехода информационных потоков, обеспечивающих процессы субординации и координации программирующих и регуляторных механизмов системы управления функциями организма.

Вероятность P_{ij} перехода из x_i в x_j за малый промежуток времени Δt равна

$$P_{ij} = \lambda_{ij} \cdot \Delta t, \quad (4.2)$$

где P_{ij} – называется переходной вероятностью, тогда

$$\lambda_{ij} = \frac{P_{ij}}{\Delta t}. \quad (4.3)$$

Предположим, что нам известны плотности вероятностей перехода λ_{ij} , а можно определить вероятность состояний $P_1(t), P_2(t), \dots, P_n(t)$ – как функции времени.

Для определения $P_1(t), P_2(t), \dots, P_n(t)$ составим систему дифференциальных уравнений Колмогорова. Пусть дан размеченный граф состояний (рис. 4.2). Найдем $P_1(t)$ – вероятность того, что система будет находиться в состоянии x_1 . Придадим величине t приращение Δt и найдем вероятность того, что в момент времени $t + \Delta t$ система будет в состоянии x_1 .

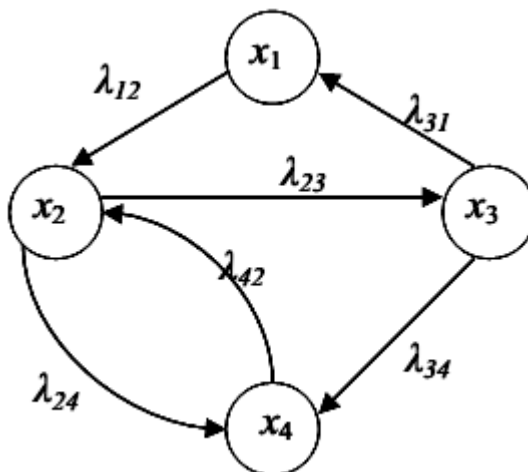


Рисунок 4.2 – Размеченный граф состояний (Г. П. Крачун, 2011) [122]

Согласно графу состояний событие x_1 может произойти двумя способами:

- 1) в момент t система уже была в x_1 и за время Δt не вышла из нее;
- 2) в момент t система была в x_3 и пришла за время Δt в x_1 .

В первом случае вероятность того, что в момент $t + \Delta t$ система будет находиться в x_1 , равна

$$P_1(t)(1 - P_{12}) = P_1(t)(1 - \lambda_{12}\Delta t). \quad (4.4)$$

Во втором случае

$$P_3(t) \cdot P_{31} = P_3(t) \cdot \lambda_{31} \cdot \Delta t. \quad (4.5)$$

Следовательно,

$$P_3(t + \Delta t) = P_1(t)(1 - \lambda_{12} \cdot \Delta t.) + P_3(t) \cdot \lambda_{31} \cdot \Delta t = P_1(t) - P_1(t)\lambda_{12}\Delta t + P_3(t)\lambda_{31}\Delta t \text{ или}$$

$$P_3(t + \Delta t) - P_1(t) = -P_1(t)\lambda_{12}\Delta t + P_3(t)\lambda_{31}\Delta t.$$

$$\frac{P_3(t + \Delta t) - P_1(t)}{\Delta t} = -\lambda_{12}P_1(t) + \lambda_{31}P_3(t).$$

При $\Delta t \rightarrow 0$ получим

$$\frac{dP_1(t)}{dt} = -\lambda_{12}P_1(t) + \lambda_{31}P_3(t). \quad (4.6)$$

Аналогичным образом для $P_2(t)$, $P_3(t)$, $P_4(t)$ получили [122]

$$\frac{dP_2(t)}{dt} = -\lambda_{23}P_2(t) + \lambda_{24}P_2(t) + \lambda_{12}P_1(t) + \lambda_{42}P_4(t); \quad (4.7)$$

$$\frac{dP_3(t)}{dt} = -(\lambda_{31} + \lambda_{34})P_3(t) + \lambda_{23}P_2(t); \quad (4.8)$$

$$\frac{dP_4(t)}{dt} = -\lambda_{42}P_4(t) + \lambda_{24}P_2(t) + \lambda_{34}P_3(t); \quad (4.9)$$

$$\sum_{i=1}^n P_i(t) = 1. \quad (4.10)$$

Уравнения (4.6–4.10) называются уравнениями Колмогорова.

Пусть при $t = 0$, например, система была в x_1 , тогда $P_1(0) = 1$, $P_2(0) = P_3(0) = P_4(0) = 0$. Интегрируя данную систему уравнений, можем найти $P_1(t)$, $P_2(t)$, ..., $P_n(t)$.

Таким образом, система дифференциальных уравнений Колмогорова имеет следующий общий вид:

$$\frac{dP_m(t)}{dt} = -\lambda_{1m}P_1(t) + \lambda_{2m}P_2(t) + \dots + \lambda_{nm}P_n(t) - \lambda_{m1}P_m(t) - \dots - \lambda_{mn}P_n(t). \quad (4.11)$$

Сформулируем следующее правило для построения системы уравнений Колмогорова. В левой части каждого уравнения находится производная вероятности состояния, а правая часть содержит столько членов, сколько дуг

связано с данным состоянием (вершиной). При этом если дуга выходит из состояния, то член имеет знак «-», а если входит, то «+». Каждый член правой части уравнения (4.11) равен произведению плотности соответствующей данной дуге λ_{ij} , умноженной на вероятность P_{ij} того состояния, из которого выходит дуга. С помощью данного правила легко составить систему дифференциальных уравнений Колмогорова для любого размеченного графа.

В информационно-интегративной концепции патологических процессов главным является приоритет нарушения связей между элементами программной системы над повреждением самих элементов. Это связано с признанием существования патологии дизрегуляции или, по классической терминологии, – «безлокальных болезней». Достоинством данного подхода всегда было стремление избежать механистической трактовки болезни как простого локального полома или дефекта исполнительных механизмов организма. Как раз этот «нелокальный» аспект повреждения делает несостоятельным представление о болезнях отдельных тканей, органов, клеток [123]. Нет болезней молекул или каких-либо отдельных элементов и подуровней организма. Болезнь – понятие из сферы клинической медицины, и оно относится к целостному организму. Наличие неустойчивого равновесия и постоянного балансирования дает организму возможность приспособиться к новым явлениям. В этом основа жизни, основа болезни и выздоровления.

4.3 Моделирование самоорганизации нейронной сети мозга

Мозг животных и человека состоит из нервной ткани: нервных клеток (нейронов) и глиальных клеток (нейроны мозга, окруженные соединительными глиальными клетками, с возрастом гибнут, а клетки глии, наоборот, размножаются). Взаимодействие между нервными клетками осуществляется благодаря двум механизмам [124, 125]:

1 Электрический заряд нервной клетки создает вокруг нее электрическое поле, колебания которого вызывают изменения электрических полей лежащих рядом нейронов, что приводит к изменениям их возбудимости, лабильности и проводимости. Происходит распространение электрических полей нервных клеток на очень небольшие территории мозга. Электрическое поле нейрона имеет сравнительно небольшую протяженность (около 100 мк), оно быстро затухает по мере удаления от клетки и может оказывать воздействие лишь на соседние нейроны.

2 Передачи нервных импульсов. Обеспечивает не только ближайшие взаимодействия, но и передачу нервных влияний на большие расстояния. Именно с помощью нервных импульсов происходит объединение отдаленных и изолированных участков мозга в общую, синхронно работающую систему, что необходимо для протекания сложных форм деятельности организма.

Нервный импульс является основным средством связи между нейронами. Высокая скорость распространения импульсов и локальное их воздействие на избранную точку мозга способствуют быстрой и точной передаче информации в нервной системе. В межнейронных взаимодействиях используется частотный код, т. е. изменения функционального состояния и характера ответных реакций одной нервной клетки кодируются изменением частоты импульсов (потенциалов действия), которые она посылает к другой нервной клетке. Общее количество импульсов, отправляемых нервной клеткой в единицу времени, или ее суммарная импульсная активность – важный физиологический показатель деятельности нейрона.

Моделирование внутринейронных биохимических процессов и связь их с взаимодействием электромагнитных полей и нервной ткани головного мозга позволит определить истинную причину таких заболеваний, как: эпилепсия, шизофрения, болезнь Альцгеймера, и отработать методики лечения данных заболеваний. Также актуальными являются модельные задачи по изучению влияния внешних полей на внутримозговые процессы.

4.3.1 Модели нейронной системы мозга

Первая модель. Сеть *нейронов*, соединенных случайным образом при помощи *синапсов* (*состоящих из глиальных клеток*). Когда нейрон «загорается», раздражение передается через синапсы к смежным нейронам. «Зажигание» в смежных нейронах может произойти после синаптического *запаздывания*.

Нейронная популяция может быть разделена на *возбуждающие* нейроны, которые во время «горения» испускают положительный раздражитель, и *тормозящие* нейроны, испускающие отрицательный раздражитель.

Нейрон зажжется тогда, когда сумма полученных раздражений превысит некоторое *пороговое* значение, после загорания он находится в неактивном состоянии в течение некоторого периода *невосприимчивости*, даже если сумма полученных раздражений превысит пороговое значение.

Вторая модель. Для построения моделей *высших* функций мозга и центральной нервной системы изучают поведение не дискретной системы

случайно соединенных нейронов, а *континуум* нейронных популяций, в которых случайность «смазывается» и возникает детерминистическое поведение. Это точный аналог континуальных теорий поля в механике твердого тела и механике жидкости.

Данный континуальный детерминистический подход подтверждается при исследованиях мозга методом *локальной избыточности* нейронов в малых объемах корковой ткани.

В 1972 г. Уилсон и Коуэн выдвинули постулат, согласно которому функция каждого модуля определяется взаимодействием возбуждающих и тормозных нейронов, активированных общим входом афферентных волокон [126]. В настоящее время данный принцип признан основополагающим в динамической организации нейронной сети. Для пространственно распределенных популяций получена система нелинейных дифференциальных уравнений, которые исследуются численными методами и методом фазовой плоскости. Обнаружено, что *складки* в стационарных решениях вызывают явление многократного гистерезиса; в то же время наблюдаются предельные циклы (моделирующие ритмы мозга), в которых частота колебаний является монотонной функцией интенсивности раздражителя.

Рассмотрение **модели Уилсона и Коуэна**: доля возбуждающих клеток, загорающихся за единицу времени $E(t)_i$, и доля тормозящих клеток, загорающихся за единицу времени $I(t)$. Обе величины являются скоростями загорания нейронов, для исключения кратковременных эффектов необходимо усреднить эти величины по некоторому короткому промежутку времени. Предполагается, что E и I в момент времени $t+\tau$ после *запаздывания* τ будут равны доле клеток, которые являются *чувствительными* и которые, кроме того, получают, по крайней мере, *пороговое* возбуждение [124].

Нечувствительными клетками являются те, которые загорелись недавно и не могут загореться опять в течение периода *невосприимчивости*.

Если период абсолютной невосприимчивости равен r , то долю чувствительных возбуждающих клеток можно выразить в виде

$$E_s = 1 - r_s \cdot E. \quad (4.12)$$

Для I_s получается аналогичное выражение.

r_e – период невосприимчивости для возбуждающих клеток, может отличаться от периода невосприимчивости для тормозящих клеток r_i .

Ожидаемые доли подпопуляций, получающих за единицу времени пороговое возбуждение, будут функциями E и I . Доля популяции для возбуждающих клеток записывается в форме [124]:

$$N_e(x) = N_e [c_e \cdot E - g_e \cdot I + P(t)], \quad (4.13)$$

для тормозящих клеток

$$N_t(x) = N_t [c_t \cdot E - g_t \cdot I + Q(t)]. \quad (4.14)$$

Коэффициенты здесь постоянные, представляющие среднее число синапсов, приходящихся на одну клетку, $P(t)$ и $Q(t)$ – внешние возбуждения (управляющие параметры).

Можно получить систему дифференциальных уравнений и решать ее: определять, как изменяются популяции загорающихся нейтронов в зависимости от величины и формы внешних возбуждений.

Например, при определенных условиях оказывается, что величина загорающихся нейтронов имеет вид складки и гистерезис (рис. 4.3).

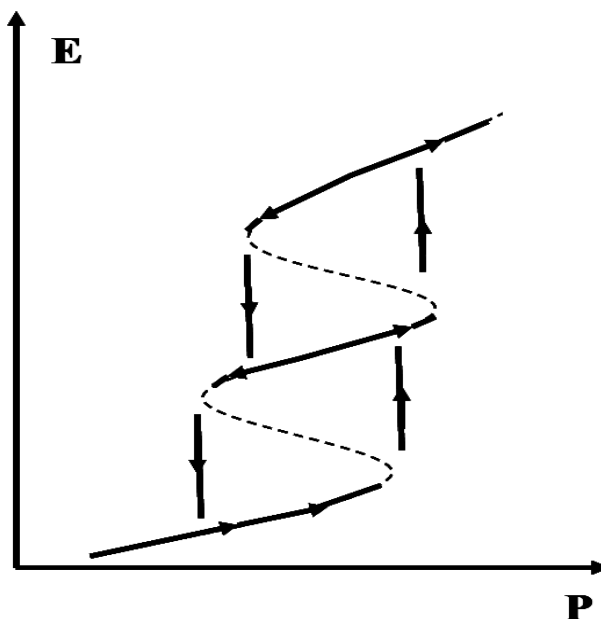


Рисунок 4.3 – Типичные множественные складки и гистерезис в состоянии стационарного загорания со скоростью E как функция от управляющего параметра P (внешнего возбуждения) при $Q = 0$

Гистерезис предполагается как физиологическая основа кратковременной памяти: то есть имеется экспериментальное подтверждение гистерезиса в центральной нервной системе. Рассмотренная модель может

обнаруживать *затухающие* колебания в ответ на *импульсное* внешнее воздействие. Более того, при Q , равном нулю, и P , равном некоторому постоянному значению, модель может при соответствующем выборе коэффициентов обнаружить устойчивый *предельный* цикл, как показано на рисунке в двумерном фазовом пространстве.

Предельный цикл представляет устойчивые колебания двух скоростей загорания (рис. 4.4), т.е. имеется физиологическая основа для изучения ритмов на электроэнцефалограмме, таких, как имеющие большое значение альфа-ритмы.

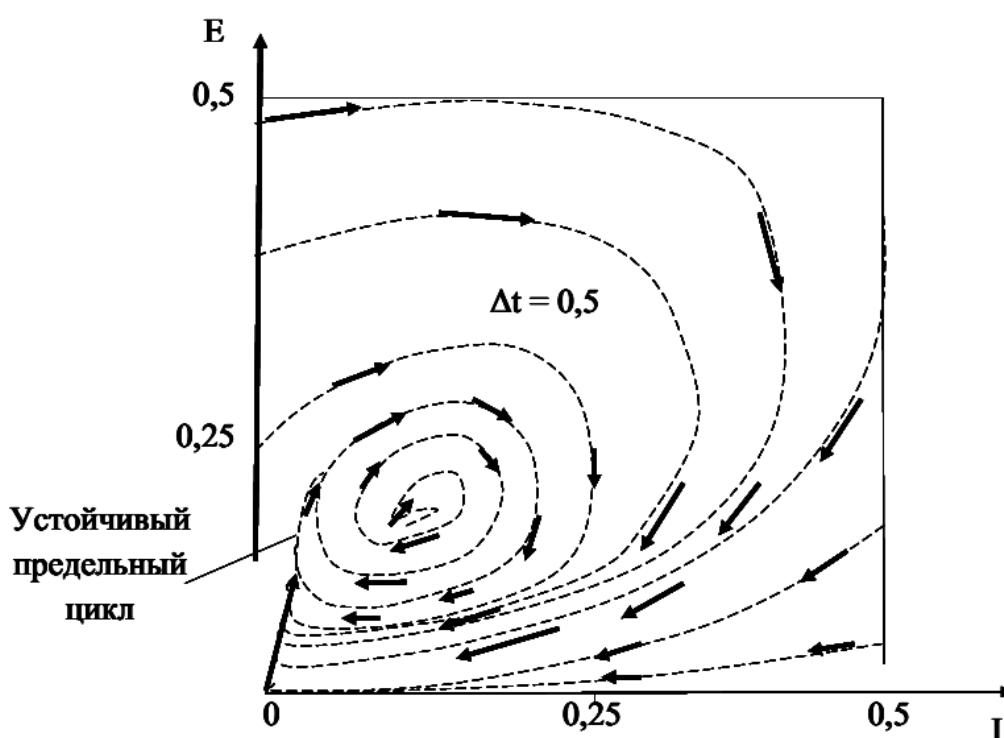


Рисунок 4.4 – Устойчивый предельный цикл в фазовом пространстве. (E – скорость загорания возбуждающих нейронов; I – скорость загорания тормозящих нейронов.) Значения коэффициентов указаны в таблице. Предельный цикл представляет устойчивые колебания двух скоростей загорания

Модель развивается в направлении изучения нервной ткани, т. е. в исследовании поведения модели с учётом *распределение* нейронов в пространстве (*нейронном поле*). Уравнения поля позволяют исследовать пространственные взаимодействия внутри слоев нервной ткани, которые характерны для коры головного мозга; важные детали все еще продолжают исследоваться, к ним относятся геометрия, размеры и краевые условия для нейронных полей.

Исследованы многие особенности *структурообразования* в группах и полях нейронов. Расположенные в пространстве предельные циклы получил Уилсон, а появление катастрофы сборки обсуждается Амари.

4.3.2 Моделирование внутринейронных процессов при воздействии электромагнитных полей

Понятие ядерного магнитного резонанса было применено в медицине Лаутербуром, который использовал резонанс относительно протонов. Изучена локализация этим методом протонов в теле. Основная идея сводится к следующему. На тело воздействуют не зависящим от времени, но пространственно переменным магнитным полем (рис. 4.5) [125].

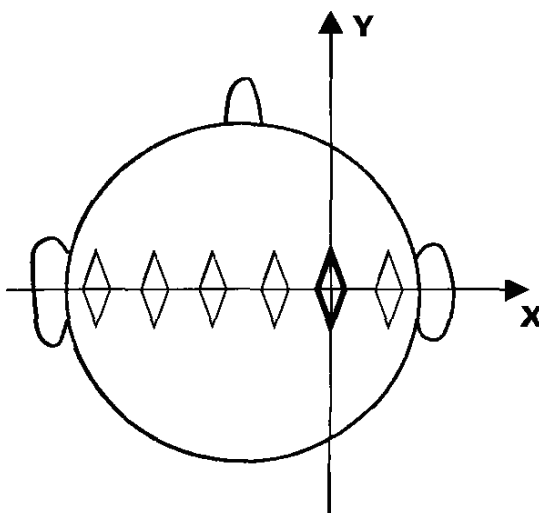


Рисунок 4.5 – Вид головы испытуемого сверху. Постоянное магнитное поле B_0 направлено вдоль оси X и возрастает вдоль оси Y. Величина перехода (разность энергий уровней), или, соответственно, частота отдельных спинов изменяется вдоль оси X

Условие резонанса при этом становится пространственно зависимым. Прикладывая к образцу зависящее от времени магнитное поле, можно установить пространственную зависимость распределения энергии отдельных спинов $E = \hbar \cdot \omega$.

Поле будет действовать только на те протоны (спины), которые удовлетворяют условию резонанса. Так как положения таких протонов в образце известны, по неоднородному магнитному полю можно измерить их локальные концентрации. Примеры представлены на рис. 4.6 и 4.7.

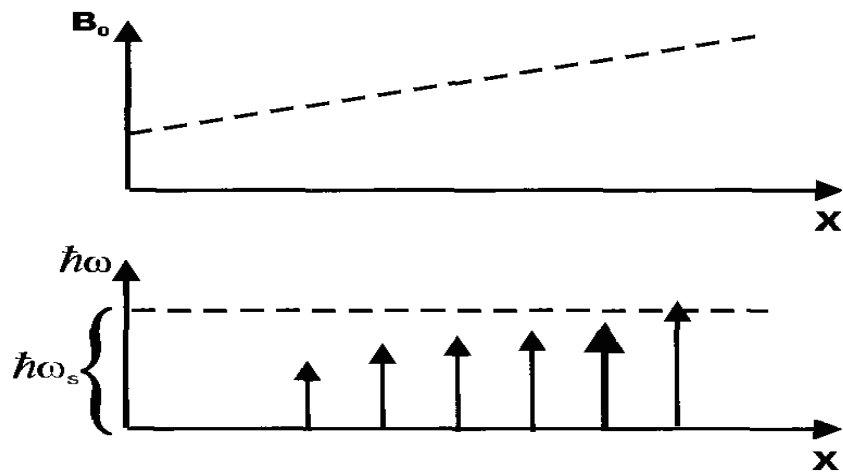


Рисунок 4.6 – Верхняя часть: вариации магнитного поля B_0 вдоль оси X. Нижняя часть: величина перехода (разность энергий уровней) $h \cdot \omega$ отдельных спинов как функция их положения X; $h \cdot \omega_s$ – частота приложенного переменного магнитного поля

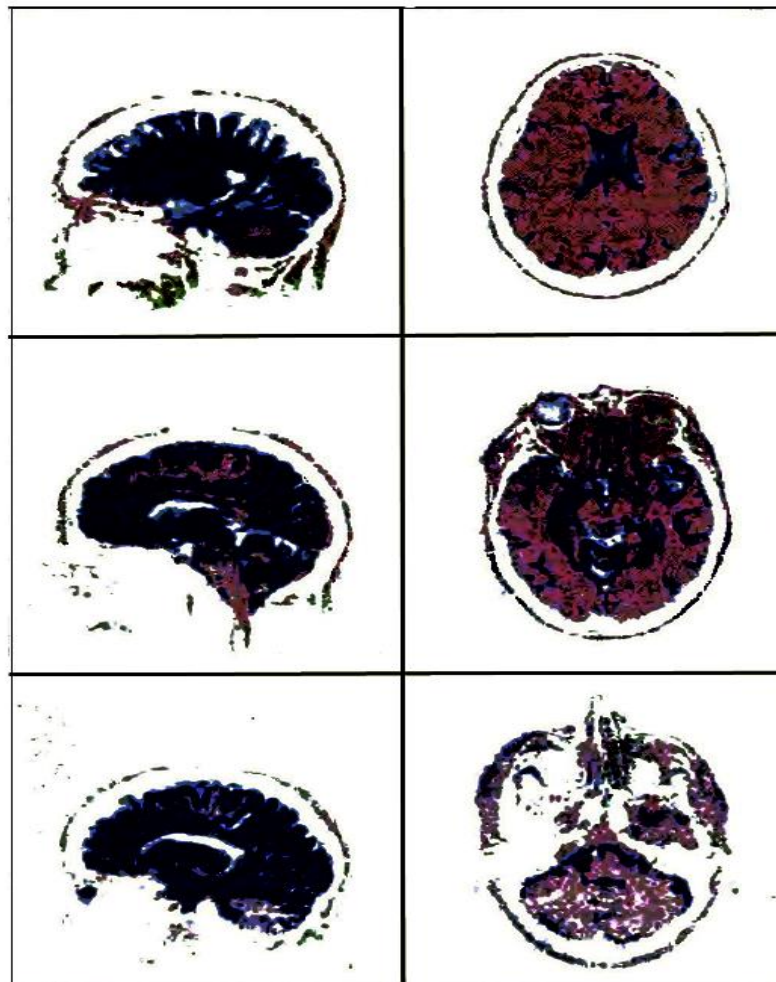


Рисунок 4.7 – Последовательность изображения ЯМР вдоль вертикальных и горизонтальных разрезов: в левом столбце продольные разрезы, в правом – поперечные разрезы (Г. Хакен, 2001) [125]

Ядерный магнитный резонанс позволяет измерять не только ядра водорода, но и кислорода. Активность мозга увеличивает потребление кислорода. А поскольку активность мозга требует дополнительного притока крови в малых венах, по которым кровь отводится от нейронов, то обнаруживается повышенная концентрация кислорода. Кислород переносится гемоглобином. Уже в 1935 году Полинг показал, что магнитные свойства гемоглобина изменяются соответственно количеству переносимого кислорода.

Термодинамика мозга

Мозг в целом можно считать реакционной термодинамической системой, находящейся в стационарном состоянии. Приток энергии и сброс избыточного тепла мозгом сбалансированы в узком диапазоне температур от ~ 37 (центр мозга) до ~ 36 °C (кора мозга). Этот градиент температуры, будучи обусловлен более низкой температурой внешней среды, может играть существенную роль в ориентировании тепловых потоков внутри мозга. Аналогичный градиент температуры наблюдается и для тела, она имеет максимум в прямой кишке, а минимум – в поверхностном слое клетчатки и мужских яичках. Диапазон оптимальной температуры метаболизма находится в пределах значений температур, для которых изобарная теплоемкость чистой воды имеет минимум. Особенности термодинамики фазовых переходов водных растворов в процессе филогенеза легли в основу механизма адаптации живых систем, которая, по сути, представляет собой изоэнергетические переходы или переходы с энергией активации порядка $k\Delta T$ (при $\Delta T \sim 0,1 - 1$ К) между состояниями разной степени упорядоченности белковых молекул или однородных молекулярно-клеточных ансамблей. Снижение энтропийной составляющей внутренней энергии живой системы сопряжено с резонансным поглощением ею кванта внешней ЭМ, или нейтринной энергии, который она преобразует в активный метаболический квазифотон. Жидкостная среда обеспечивает отвод кванта тепловой энергии (энтропии) за границы системы, а действием квазифотона реализуется функция той или иной структуры мозга, включающей в себя упорядоченную подсистему. Энергия, выделяемая или поглощаемая при таких переходах, может оказаться намного порядков меньше kT . В неравновесных условиях колебания отдельных макромолекул могут синхронизироваться, в частности, посредством электромагнитного поля [127].

Таким образом, термодинамика мозга сочетает равновесно-стационарную термодинамику метаболизма и неравновесную термодинамику нейросети, «рабочим телом» которой является бозе-газ квазифотонов. Соответственно внутренняя энергия U мозга как функция его состояния будет зависеть в общем

случае от температуры (или энтропии S), от тензора деформаций G , зависящего от внутричерепного давления, от магнитного момента M отдельных метаболитов и макроструктур, от суммарного момента количества движения ядер и атомов L и от поляризация среды P . Следовательно, полный дифференциал внутренней энергии $U = U(S, G, M, L, P)$ будет иметь вид [127]:

$$dU = TdS - \Pi dG + BdM + FdJ, \quad (4.15)$$

где T – абсолютная температура системы; Π – тензор давлений; F – вектор ориентационной поляризации системы спинов или моментов импульса. В выражении (4.5) член FdJ характеризует работу, связанную с ориентационной поляризацией системы ядерных спинов или моментов импульса атомов и молекул (подобно тому, как члены DdP и BdM определяют работу, связанную с поляризацией и намагничиванием системы).

Ориентационные и поляризационные эффекты существенную роль играют в инициации фазовых переходов в однородных газовых и жидкостных системах мозга и организма. Высокую чувствительность данных систем к параметрам, входящим в (4.15), обеспечивают хиральность метаболитов (в основном сахаров) и физико-химические особенности молекулярной и жидкой воды. Такие системы формируются в следующих структурах и средах организма и мозга:

- желудке, матке, трахее, черепно-лицевых пазухах, полости эпифиза;
- оболочке и желудочке мозга, венозных синусах, глазном яблоке;
- кровеносной и лимфатической системах;
- паренхиме органов (легкие, печень, селезенка, яички, женская грудь);
- подкожной клетчатке, соединительной и костной ткани.

Процесс самоорганизации системы, инициированный конденсацией на ее элементах нейтринных энергоформ, в общем случае ведет к увеличению порядка в системе или к снижению ее энтропии. О повышении уровня надмолекулярного порядка системы можно судить по снижению ее температуры или по числу излученных ею тепловых фотонов. При малых величинах снижения температуры $|\Delta T| \ll T$ негэнтропия будет равна (на 1 моль) [127]:

$$\Delta S = C_p \ln[(T - |\Delta T|)/T] = C_p \ln[1 - |\Delta T|/T] \approx -C_p (|\Delta T|/T). \quad (4.16)$$

При переходе системы в новое состояние меняются параметры ее энергоинформационного обмена с внешней средой. Примерами таких актов самоорганизации может служить скачкообразное повышение температуры воды Байкала зимой на некоторых глубинах и снижение температуры мозга человека ночью во сне.

Все перечисленные системы в норме функционируют в двух режимах – стационарном (квазиравновесном) и неравновесном. Первый характерен для бодрствующего состояния организма и мозга, не занятого мыслительной работой, а второй режим соответствует состоянию сна или творческой работе. В первом режиме обмен энергией со средой происходит непрерывно, а во втором – квантуется. Механизм акцепции кванта внешней энергии в фазовом переходе кооперативной системы иллюстрируют процессы конденсации паров воды в точке росы и квантовой бозе-конденсации.

Акцептированию квантов энергии МКВ-диапазона или нейтринной энергии в указанных средах способствуют снижение температуры организма во сне на $\sim 1\text{K}$, а также пониженные температуры стекловидного тела глаз, периферийной (депонированной) крови и яичек. В акцепции хиральных квантов нейтринной энергии большую роль играют сахара, содержание которых в крови возрастает в утренние часы до восхода солнца. В это время нейтринная составляющая солнечного излучения отфильтровывается от ЭМ-излучения поверхностным сегментом коры земного шара. Важную роль в акцепции энергии стекловидным глазом играет полисахарид – гиалуроновая кислота. Почти половина всей гиалуроновой кислоты организма человека сосредоточено в его коже, где она располагается в соединительной ткани дермы между волокнами коллагена и эластина, а также в клетках рогового слоя корнеоцитах. В дерме содержится 70 % воды, что составляет $\sim 20\%$ всей воды организма. Поглощаемая организмом энергия, конденсируясь на метаболитах в составе жидких сред (кровь, спинномозговая жидкость), передается в мозг по нейрогуморальным и воздушным каналам (из легких).

Анализ квантовых корреляций

Иерархию физических состояний структурно-функциональных блоков мозга смоделируем многоуровневым фракталом из локальных динамических систем квазифотонов. Базовой единицей данного фрактала, начиная от уровня нейросети, кончая полушариями мозга, будет LC-структура, изоморфная колебательному контуру (рис. 4.8) [127]. Геометрические и электрофизические параметры LC-структур будут определять тип и энергию динамических квазифотонов, а их действие формально должно удовлетворять фрактально-резонансному принципу. Из цепочек LC-контуров состоят

самовозбуждающиеся (реверберирующие по принципу обратной связи) замкнутые цепи в нейросетях, которые могут соответствовать образам восприятия или образам оперативной памяти. Данные возбуждения можно смоделировать затухающими колебаниями, связав их цикличность и частоту с добротностью и резонансными частотами LC-контуров, а также с длиной и степенью разветвленности петли нейросети. Для моделирования кооперативных свойств систем одноптичных квазифотонов помимо электродинамики можно, в принципе, привлечь квантовую механику (бозе-конденсация, спутанность состояний), физику волновых и нелинейных процессов (интерференция, голография, когеренция).

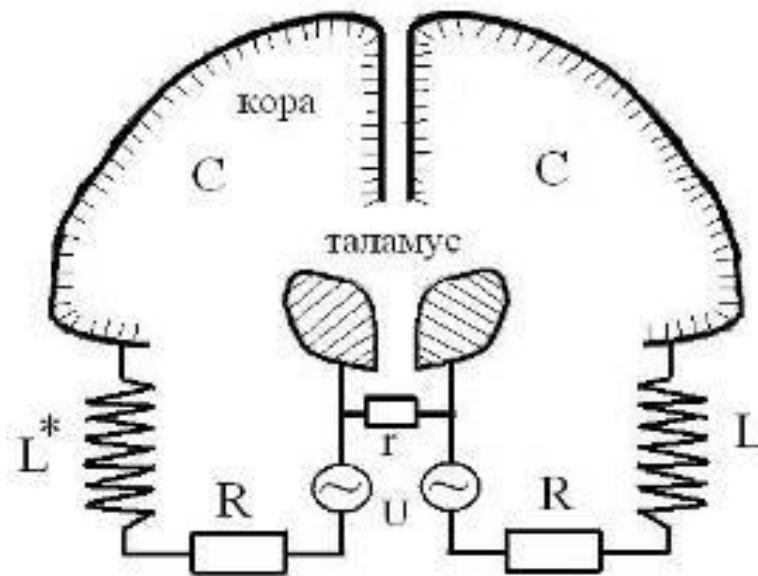


Рисунок 4.8 – Эквивалентные колебательные контуры, моделирующие альфа-ритмы мозга: L , L^* , R – индуктивные и омические модели лучистости таламуса; знак «*» означает зеркальную инверсию хиральных структур правого полушария); r – межталамическое сращение; C и U – емкость и разность потенциалов между таламусом и корой (А. С. Холманский, 2006) [127]

Предельное время психической реакции или мыслительного акта имеет порядок ~ 100 мс. За это время в мозгу задействуются десятки тысяч синаптических связей и активизируются десятки зон коры и структур подкорки. Даже при условии параллельности операций в нейросети и высокой скорости ассоциативных и рефлексивных связей между зонами коры и блоками памяти для обеспечения целенаправленности функциональной активности мозга в нем должен работать квантовый механизм поиска и отбора информации, кинетика которого не должна ограничиваться скоростями переноса вещества и энергии. Морфологической основой данного механизма является односвязность водной среды мозга и фрактальность его ЭМ-структуры. К примеру, каждый слой

базового блока памяти, состоящий из пары – древовидная клетка Пуркинье и лиановидный нейрон (Коуэн У., 1984), можно считать изоморфным всему фракталу нервных связей неокортекса и позвоночника вместе с блуждающим нервом (вагус). Изоморфизм нервная клетка – макроструктура обеспечивает высокую оперативность базового блока памяти кодов-реперов при предельно большом значении его удельной емкости.

Взаимосвязь квантовых систем может быть двух типов. Первый предполагает наличие перекрывания волновых функций электронов двух пространственно разделенных структур нервной системы мозга. В энергоинформационном обмене при этом участвуют как квазифотоны различного типа (солитоны, фононы, ЭМ-кванты), так и электрон или протон (туннельные переходы). Такая связь, по сути, аналогична механизму сальтаторной проводимости и эффективна для химически связанных систем. Второй тип связи – нелокальных квантовых корреляций [128] – предполагает информационный обмен между изоморфными структурами мозга по механизму фрактально-резонансной связи [127]. Данный механизм можно распространить и на обмен информацией между мозгом и внешней средой. Действует он и на молекулярном уровне при репликации ДНК, и на социально-биологическом уровне между матерью и детьми (особенно с дочерью).

В общем случае для реализации механизма нелокальных корреляций системы должны удовлетворять двум требованиям. Первое состоит в том, что в зародышевом состоянии они должны образовывать односвязную систему, находящуюся в квантовом состоянии, определяемом тем или иным типом взаимодействия (ядерное, электромагнитное, слабое, гравитационное, биологическое, социальное). Примеры: позитроний, радиоактивное ядро, протозвезда, молекула ДНК, нервная трубка, эмбрион и организм матери. Второе требование называется несепарабельностью, или запутанностью, состояний химически не связанных систем и заключается в наличии механизма квантовой корреляции физических характеристик состояний. Для перечисленных выше систем их дочерними коррелирующими подсистемами соответственно будут: два фотона, продукты радиоактивного распада, двойные звезды или звездно-планетарные системы, расщепленная ДНК, мозжечок и неокортекс, мать и дитя.

Механизм квантовой запутанности подразумевает сохранение информационной связи между дочерними подсистемами на уровне взаимодействий, определяющих собственную целостность подсистем. Универсализм квантовой запутанности генетически обусловлен подчинением процесса образования дискретных форм материи, а затем и элементарных

частиц механизму бутстрапа [127]. На уровне элементарных частиц и ядер, на котором нелокальные корреляции экспериментально наблюдаются [128], природа информационных взаимодействий еще не установлена, можно только предполагать, что их кинетика лимитирована скоростью передачи импульса в физическом вакууме (эфире) $\sim 10^{22}$ см/с [127]. С такой же скоростью, очевидно, осуществляется обмен информацией на уровне социальных и космических подсистем.

За основу механизма запутанности структурно-функциональных подсистем мозга можно принять односвязность его водной основы, благодаря которой между системами квазифотонов возможен обмен информации со скоростью $V = C/n$ (4.17). Подчинение данного обмена фрактально-резонансному принципу действия сводит вероятностный его характер к целенаправленному отбору между изоморфными структурами пары, для которой уровень запутанности состояний квазифотонов максимален.

Применение понятия «синергетические системы» при рассмотрении диссипативных субструктур в квантовой механике дает возможность обосновать существование бозе-эйнштейновского конденсата нейтринно-антинейтринных пар (эфирной среды). Изменение структуры эфирной среды в точке бифуркации происходит с переходом системы в новое качественное состояние, которое может быть как устойчивым, так и неустойчивым. Это состояние, его параметры зависят от граничных условий, которые задаются свойствами частиц, проходящих через возбужденную эфирную среду, при соударении которых возникает спектр масс нестабильных частиц. А также микроскопическими свойствами составляющих эфирной среды – псионов. Тогда при возникновении флуктуации с определенным аттрактором эфирная среда приобретает волновую конфигурацию. Тогда возможен переход системы в состояние, когда длина волны эфирной среды становится меньше размеров псиона с прекращением электромагнитного излучения. Из этого следует, что при внешнем воздействии на псионы происходит коррекция информационного потока, проходящего через систему (эфирную среду), которая через ряд новых состояний будет стремиться к возврату исходного суммарного импульса системы, что сопровождается флуктуационным проявлением ее электромагнитных свойств [129].

Синергетическую концепцию мозга подтверждают данные о множественности форм нейротрансмиттеров с контактным и дистантным (объемным) действием, о независимой природе каждого синапса и хэббовской ассоциации при переводе «молчащих» синапсов в функционирующие. Принцип формирования и поддержания жизни на основе синхронизации-когерентности в равной мере приложим к синергетическим системам всех уровней – от

простейших неорганических до сложных биологических структур. Эволюция «обнаружила» этот принцип и закрепила его в виде синхронизирующих аппаратов мозга [130].

Самоорганизация нейронных модулей лишь частично отвечает рефлекторной теории, на основе которой до недавнего времени объясняли все элементарные функции нервных клеток. Спонтанная активность в виде беспорядочных всплесков возбуждения осуществляет стыковку тормозных и возбуждающих синапсов, оптимизируя самоорганизацию нейронной сети. Этот процесс поддерживают щелевые электротонические контакты, особенно многочисленные среди развивающихся нейронов. При определенных условиях они могут выступать в качестве пейсмекеров или резонаторов, отвечающих за формирование осцилляторных цепей с когерентной ритмичной активностью. Эти особенности детерминированы генетически и практически не зависят от эпигенетических воздействий в период позднего созревания мозга и его модификации под действием факторов окружающей среды. Однако детерминированность, о которой идет речь, не носит абсолютного характера. Спонтанная активность может индуцировать образование только «случайных» связей, а конкуренция нейронов в процессе развития неизбежно порождает элементы хаоса – вариабельности их контактов на одних и тех же постсинаптических мишенях. Поэтому для целенаправленной реализации функций нервного центра требуется генерация определенного паттерна активности в ответ на специфическую афферентную информацию. Проблема взаимодействия внутримодульных и внешних факторов нервной активности при ближайшем рассмотрении оказывается чрезвычайно многогранной и емкой. Осуществляя внутреннюю обработку информации, каждый модуль функционирует как относительно автономная система, однако активность локальной сети модифицируется при взаимодействии с афферентными волокнами и другими модульными ансамблями. Следовательно, система в целом обладает свойствами, отличными от тех, которые можно обнаружить у простого набора модулей, что дает основание говорить об эмерджентности форм функциональных взаимосвязей в пределах локального участка мозга. Каждая область мозга является одной из надсистем в ЦНС, и для интерпретации основных принципов ее организации требуется выяснение различных петель прямых и обратных связей по уровням взаимодействия от локальных цепей до крупномасштабных сетей [131].

Таким образом, самоорганизация систем нейронов, как и проявление хаоса в их морфологии, является необходимой детерминантой для реализации процесса адаптации мозга к непрерывно изменяющимся условиям окружающей среды, что обусловлено природным электромагнитным полем, но также и техногенезом. Внедрение новых технологий построено на том или ином использовании электрофизических полей с постоянно действующим

электромагнитным излучением разной частоты и облучением организма человека на протяжении всей жизни.

ГЛАВА 5 СИНЕРГЕТИКА НА ЭКОСИСТЕМНОМ УРОВНЕ

5.1 Саморегуляция в экосистеме

Экологическая система – главный объект экологии, и ее изучение как синергетической системы имеет большое будущее. Основные характеристики синергетической системы, применимые на экосистемах разного уровня организации, мы показали в виде блок-схемы на рис. 5.1 [132].

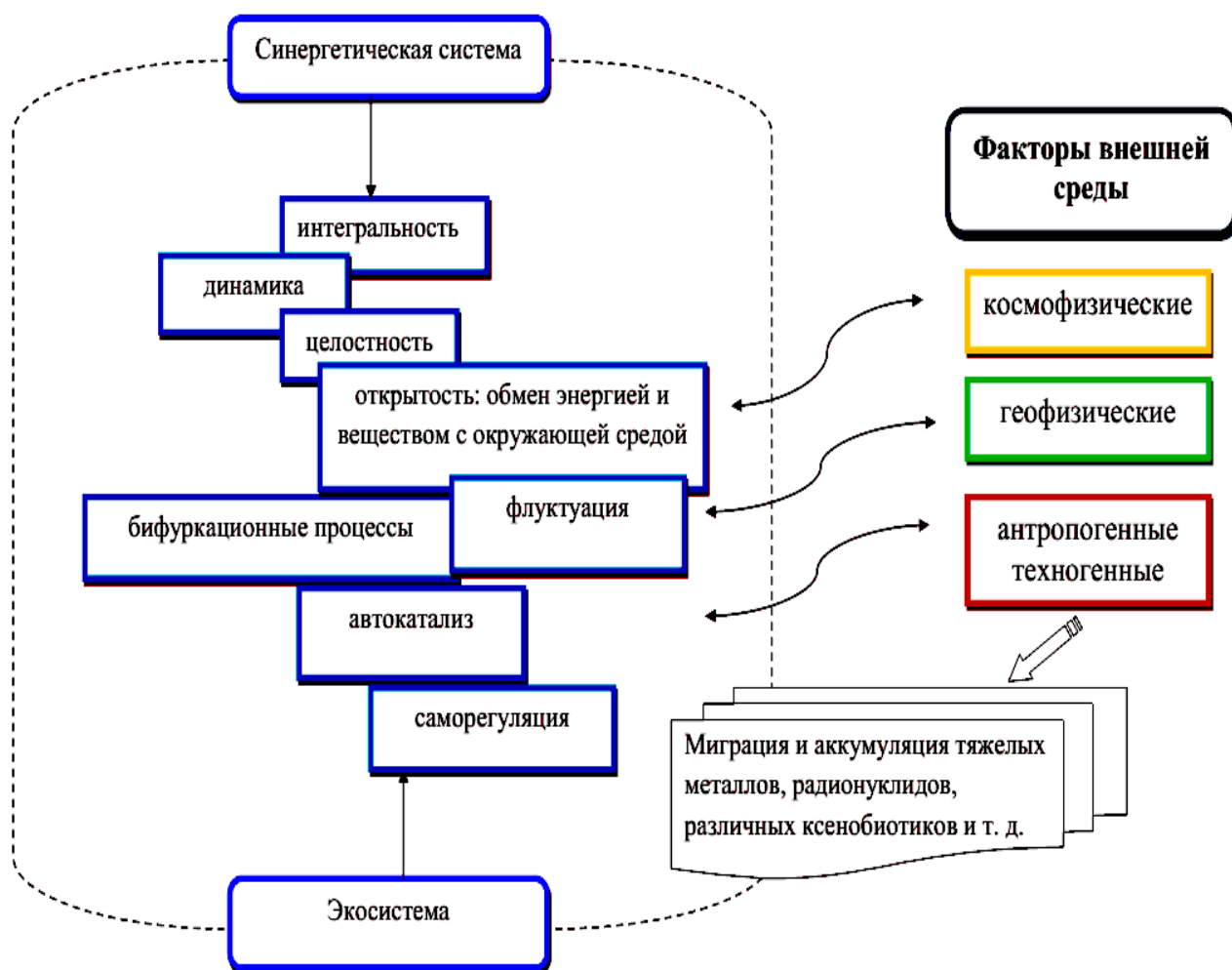


Рисунок 5.1 – Совмещение характеристик синергетической и экологической систем при влиянии факторов окружающей среды (Л. Д. Пляцук, Е. Ю. Черныш, 2014) [132]

В таких системах наблюдается согласованное поведение подсистем, в результате чего возрастает степень её упорядоченности, т. е. уменьшается энтропия и происходит так называемая самоорганизация.

Биосферные процессы непрерывно поддаются влиянию сопредельных сред, которые можно обозначить факторами внешней среды. Синергетические свойства экосистемы предполагают активное взаимодействие ее с окружающей средой, что приводит к возникновению флуктуаций и в точке бифуркации перехода системы на иной уровень ее развития. Эмерджентные свойства экосистемы проявляют себя именно при взаимодействии с факторами внешней среды. Антропогенный фактор все более нарастающей функциональной нагрузкой приводит к динамическим изменениям свойств экосистемы. При потере своей устойчивости экосистема переходит на один из возможных уровней существования, что связано с преобразованием природной системы в природо-техногенную, техногенную или редуцированную, для которой характерным является экосистемный и эволюционный кризисы и, следовательно, процесс самоуничтожения при невозможности поддержания гомеостаза.

Пространственно-временная изменчивость является фундаментальным свойством экосистемы, следствием ее движения и развития.

Одновременно всякое изменение постоянно связано и не может существовать без своей противоположности – относительной устойчивости или сохранности равновесия материи, которая выработалась в процессе эволюции живой природы в условиях флуктуаций окружающей среды.

Стабильность и устойчивость не являются неизменными. При определенных внешних условиях характер коллективного взаимодействия элементов изменяется радикально. Доминирующую роль начинают играть положительные обратные связи, которые не подавляют, а, наоборот, усиливают индивидуальные движения составляющих. Флуктуации, малые движения, незначительные прежде процессы выходят на макроуровень. Это означает, кроме прочего, возникновение новой структуры, нового порядка, новой организации в исходной системе.

Момент, когда исходная система теряет структурную устойчивость и качественно перерождается, определяется системными законами, оперирующими такими системными величинами, как энергия, энтропия.

Длительность существования каждой экосистемы поддерживается прежде всего за счет общего круговорота веществ, осуществляемого продуцентами, консументами и редуцентами, и постоянного притока солнечной энергии (рис. 5.2) [32]. Именно эти два глобальных явления обеспечивают ей высокую способность противостоять воздействию постоянно меняющихся условий внешней среды.

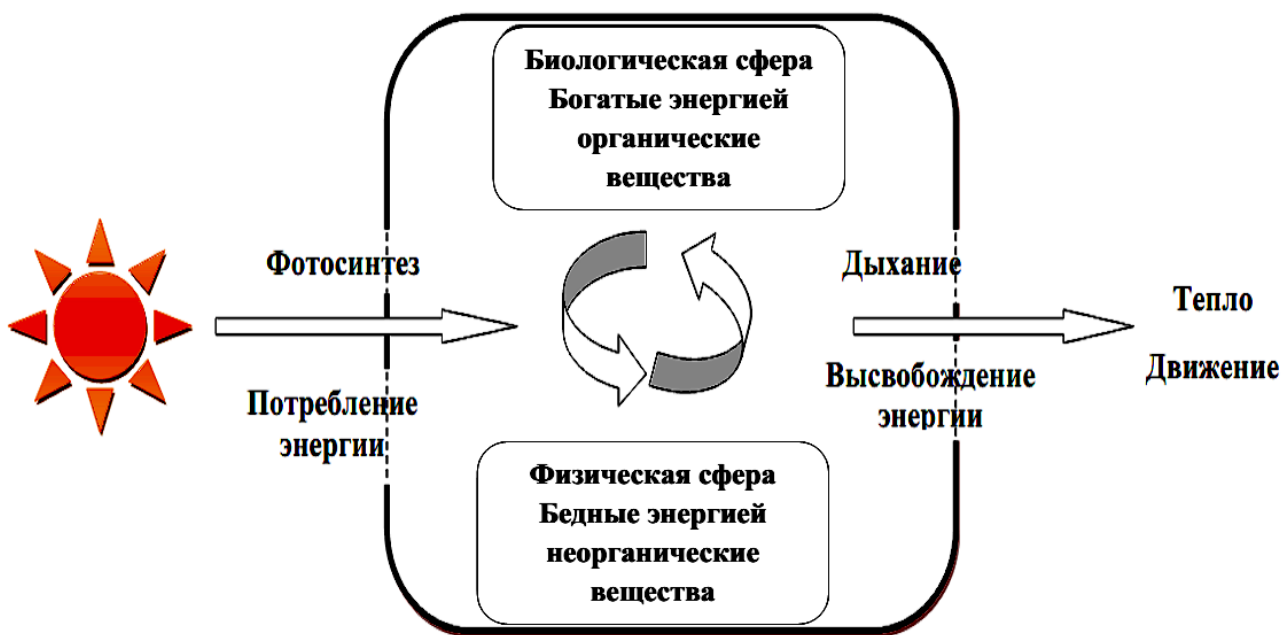


Рисунок 5.2 – Схематическое изображение взаимосвязей в экосистеме

Устойчивость экосистемы обеспечивается также биологическим разнообразием и сложностью трофических связей организмов, входящих в ее состав.

В богатых видами экосистемах у консументов есть возможность избирать разные виды пищевых объектов и в первую очередь – наиболее массовые. Если потребляемый пищевой объект становится редким, то консумент переключается на питание другим видом, а первый, освобожденный от пресса выедания, постепенно будет восстанавливать свою численность. Благодаря такому переключению поддерживается динамическое равновесие между пищевыми ресурсами и их потребителями и обеспечивается возможность их длительного сосуществования [32, 82, 86,94].

Компоненты и процессы, обеспечивающие функционирование экосистемы, показаны на рисунке 5.3. Упрощенная блоковая модель схематично представляет взаимодействие трех основных компонентов, а именно: сообщества, потока энергии и круговорота веществ.

Поток энергии направлен в одну сторону; часть поступающей солнечной энергии преобразуется сообществом и переходит на качественно более высокую ступень, трансформируясь в органическое вещество, представляющее собой более концентрированную форму энергии, чем солнечный свет, но большая часть энергии деградирует, проходит через систему и покидает ее в виде низкокачественной тепловой энергии (тепловой сток) [96].

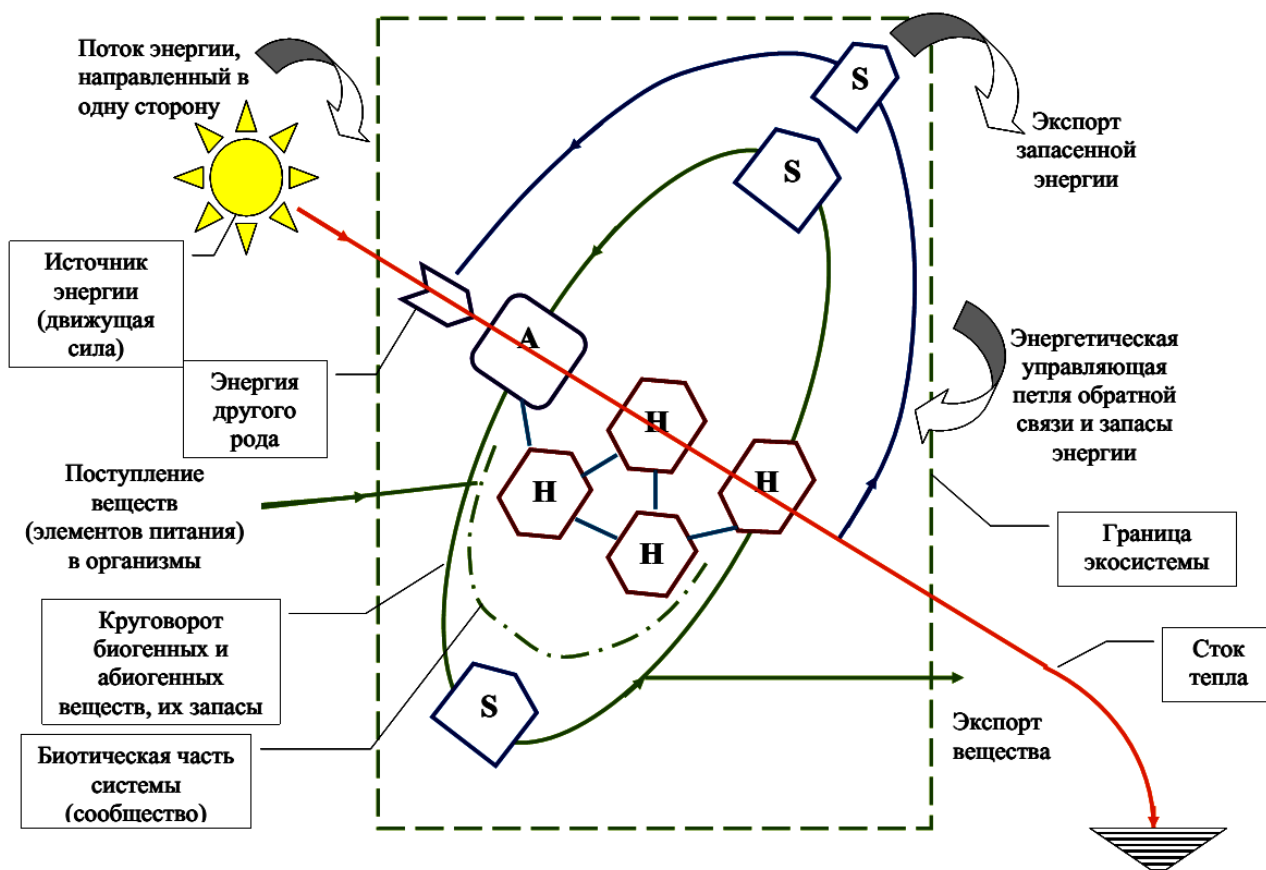


Рисунок 5.3 – Блоковая модель взаимодействия основных компонентов экосистемы (по Ю. Одуму, 1986, с изменениями)

Энергия может накапливаться, затем снова высвобождаться или экспортироваться, как показано на схеме, но ее нельзя использовать вторично. В отличие от энергии элементы питания, в том числе биогенные элементы, необходимые для жизни (углерод, азот, фосфор и т. д.), и вода могут использоваться многократно [89]. Эффективность повторного использования и размеры импорта и экспорта элементов питания сильно варьируют в зависимости от типа экосистемы [133].

На рисунке 5.3 в схеме блоковой модели каждому блоку диаграммы соответствует определенное обозначение, которое указывают на ее общую функцию. Из надписи на схеме видно, что символом солнца обозначает источник энергии. Сообщество представлено в виде пищевой сети, состоящей из автотрофов (А) (зеленые растения, способные переводить солнечную энергию в органические вещества) и гетеротрофов (Н) (организмы, нуждающиеся в готовой пище), запасы питательных веществ обозначены буквой S.

Важным фактором стабилизации экосистемы является генетическое разнообразие особей популяций. Изменение условий внешней среды может

вызвать гибель большинства особей популяции, адаптированных к прежним условиям существования. Поэтому чем более генетически разнородной является та или иная популяция экосистемы, тем больший шанс у нее иметь организмы с аллелями, ответственными за появление признаков и свойств, позволяющих выжить и размножиться в новых условиях и восстановить прежнюю численность популяции. Время, необходимое для восстановления популяции, будет зависеть от скорости размножения особей, так как изменение признаков происходит только путем отбора в каждом поколении.

Стабильность экосистемы зависит также от степени колебаний условий внешней среды. В тропиках и субтропиках стабильны и оптимальны для многих видов температурные условия, влажность, освещенность. Поэтому тропические экосистемы с высоким биологическим разнообразием входящих в них организмов отличаются высокой устойчивостью. И напротив, тундровые экосистемы менее устойчивы. Им свойственны резкие колебания численности популяций разных видов.

Находясь под действием самых разнообразных экологических факторов, хорошо сбалансированный по составу биоценоз тем не менее саморегулируется и поддерживает внутреннее постоянство – гомеостаз.

Гомеостаз (от греч. *homoios* подобный, одинаковый + греч. *stasis* стояние, неподвижность): 1) способность организма поддерживать функционально значимые переменные в пределах, обеспечивающих его оптимальную жизнедеятельность; 2) способность экосистемы к саморегуляции и поддержанию динамического равновесия.

Гомеостаз экосистемы выражается в способности сохранять постоянство видового состава и численности особей, поддерживать относительную стабильность и целостность генетической структуры в меняющихся условиях внешней среды. Нарушение природных цепей питания под воздействием антропогенного фактора, непродуманное вмешательство человека в экосистемы могут привести к неконтролируемому росту или снижению численности особей определенных популяций и к нарушению природных экосистем [96].

Таким образом, в состоянии гомеостаза экосистемы организмы нормально размножаются, поэтому: численность различных популяций в сообществе поддерживается на определенных уровнях, хотя и в колебательном режиме; биоценоз сохраняет устойчивость и самовоспроизводится даже при колебаниях климатических условий.

Рассмотрим подробнее эти закономерности.

Элементарная саморегуляция осуществляется на уровне отдельных популяций конкретных видов животных, растений, грибов, бактерий.

Численность популяции зависит от противодействия двух начал: репродуктивного потенциала популяции и сопротивления среды, между которыми устанавливаются прямая и обратная связи (рис. 5.4).



Рисунок 5.4 – Саморегуляция численности особей в популяции (А. П. Анисимов, 2000) [83]

Поясним это конкретным примером. Когда европейцы завезли в Австралию кроликов, последние, не встретив хищников, быстро расселялись по богатым растительностью территориям, и их численность быстро возрастала. Этому способствовал высокий репродуктивный потенциал (плодовитость) кроликов. Но вскоре пищи стало не хватать, возник голод, распространились болезни – численность кроликов пошла на убыль. Сработал фактор сопротивления среды, который и выступил в качестве обратной отрицательной связи. Пока популяция кроликов пребывала в угнетенном состоянии, среда (растительность) восстановилась, и процесс пошел на новую волну. Через несколько циклов амплитуда колебаний численности кроликов сократилась, и установилась некоторая средняя плотность популяции. Этот показатель обозначают в экологии как поддерживающая емкость среды [83].

На самом деле в биоценозе все сложнее, так как он состоит из нескольких взаимодействующих сообществ (зооценозы, фитоценозы, микроценозы), а сообщества включают разные популяции конкретных видов. Все это взаимодействует на основе многочисленных прямых и обратных связей. Прежде всего важны трофические (пищевые) связи, которые можно определить

и как энергетические, поскольку с пищей между организмами переносится энергия. По положению в пищевых отношениях все организмы делятся на три большие группы: продуценты, консументы и редуценты. Оптимальная численность (поддерживающая емкость среды) устанавливается на протяжении многих лет и зависит от двух противодействующих начал: репродуктивного потенциала популяции и сопротивления среды [83, 87, 98].

На рис. 5.5 приведен пример саморегулирующегося биоценоза из 4 трофических уровней [83].

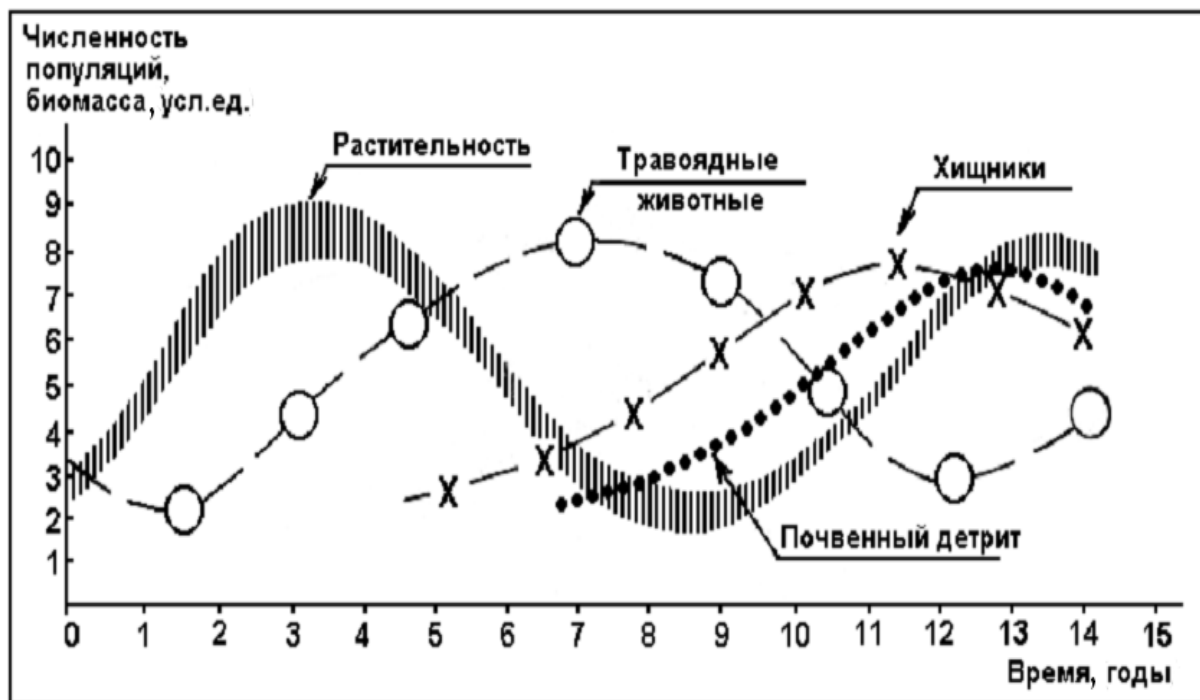


Рисунок 5.5 – Саморегуляция биоценоза на основе пищевых связей (А. П. Анисимов, 2000) [83]

Пищевая пирамида экосистемы как отражение ее структуры сохраняет саморегуляцию и устойчивое развитие. Характерная пропорция разных обитателей биоценоза устанавливается сама по себе, в результате процессов саморегуляции и отражает в целом поддерживающую емкость среды [77]. Приведенные цифры являются средними, но реально во всех популяциях происходит колебание численности особей, причем колебания на низшем уровне неизменно ведут к таким же колебаниям на следующем уровне, а в целом система поддерживает равновесное состояние.

Проследим, как проявляются прямые и обратные связи в динамике численности организмов разных трофических уровней. В зависимости от

колебаний погодно-климатических условий (солнечная активность, количество осадков и др.) год от года варьирует урожай кормовых растений – продуцентов.

Вслед за ростом зеленой биомассы увеличивается численность травоядных животных – консументов первого порядка (прямая положительная связь), но уже на следующий год это отрицательно скажется на урожае растений, так как большинство из них не успеет дать семян, поскольку будет съедено (обратная отрицательная связь). В свою очередь, увеличение числа травоядных создаст условия для хорошего питания и размножения хищников – консументов второго порядка, их численность начнет возрастать (прямая положительная связь). Но следом пойдет на убыль численность травоядных (обратная отрицательная связь). К этому времени в почве успеет разложиться до минеральных веществ травяной опад от первой волны урожая и экскременты травоядных животных и, в меньшей степени, хищников, что создаст благоприятные условия для роста растений. Начнется вторая волна урожая, и цикл повторится. Год от года численность особей разных трофических уровней будет варьировать, но в среднем на протяжении многих лет биоценоз будет сохранять устойчивое состояние. Это и есть гомеостаз.

Как было отмечено в начале, биоценоз должен не просто саморегулироваться (судя по приведенной схеме, это не так уж и сложно), но он должен иметь устойчивость к изменениям внешних (абиотических, погодно-климатических) факторов, так сказать – запас прочности на случай неблагоприятных условий среды. Поддержанию высокой устойчивости биоценоза будет способствовать ряд условий: высокий, но сбалансированный репродуктивный потенциал отдельных популяций – на случай массовой гибели особей; адаптации (приспособления) отдельных видов к переживанию неблагоприятных условий; разнообразие сообществ и разветвленные пищевые сети – исчезнувший объект должен заменяться другим, в норме второстепенным [91, 94].

Таким образом, устойчивость экосистемы, ее саморегуляция, или гомеостаз, проявляется в ее самовоспроизведении, саморегуляции численности и устойчивости к экстремальным факторам среды.

Но устойчивость экосистемы относительна, не беспредельна. Она нарушается в основном в двух случаях: при сильных изменениях внешней среды – пожары, наводнения, продолжительные засухи, оледенения и другие природные катаклизмы; при резких изменениях состава сообществ – обычно человеком, например, в результате массового отстрела хищников, заселения новых видов, как было с кроликами в Австралии, вырубки лесов, распахивания степей и т. д.

При этом происходит смена экосистем, их переход в новое качество, что означает новый цикл развития в направлении повышения устойчивости. Идет восстановление биоценоза, но уже с новыми сообществами организмов, с новыми прямыми и обратными связями [91–94]. Этот процесс смены экосистемы и ее развития к новому состоянию устойчивости происходит поэтапно и очень медленно и обозначается понятием сукцессия. Подчеркнем, что сукцессия представляет уже не саморегуляцию, а ее противоположность – самоорганизацию, развитие, так как при перестройке системы преобладают обратные положительные связи вместо обратных отрицательных и изменяются ее количественные и качественные характеристики.

Таким образом, процесс саморегуляции экосистемы проявляется в том, что все разнообразие ее населения существует совместно, не уничтожая полностью друг друга, а лишь ограничивая численность особей каждого вида определенного уровня. Например, в лесу листьями древесных растений питаются несколько сотен видов насекомых, но в оптимальных условиях каждый вид представлен незначительным количеством особей, поэтому их общая деятельность не наносит существенного вреда лесным деревьям. Однако насекомые отличаются большой плодовитостью, и если бы отсутствовали ограничивающие факторы (неблагоприятные погодные условия, уничтожение хищными и паразитическими насекомыми, птицами, болезнетворными микроорганизмами и т. п.), то численность любого вида насекомых возросла бы очень быстро и привела бы к разрушению экосистемы. Следовательно, взаимоотношения типа хищник-жертва, паразит-хозяин взаимно сглаживают всплеск численности и стабилизируют экосистему [83, 86, 89, 98].

Для теоретического исследования явлений самоорганизации в экосистеме применяются идеи и методы, используемые при исследовании диссипативных структур. Экосистема с ее структурными единицами (подсистемами) рассматривается как открытая термодинамическая система, в которой постоянно происходит перекачка энергии и вещества с внешней среды. При подаче энергии в экосистему часть ее рассеивается, а другая часть преобразуется в тепло. Рассматриваемая система отвечает требованиям, предъявляемым к самоорганизующимся системам [10, 17, 79]:

- незамкнутость (уже упоминавшийся обмен с окружающей средой энергией и веществом);
- неустойчивость (система находится в далеком от равновесия состоянии и поддерживается в этом состоянии за счет потоков вещества и энергии. Последнее приводит к появлению некой общей структуры, несмотря на непрекращающийся поток и изменение компонентов);

- нелинейность (вдали от равновесия потоковые процессы в системе взаимосвязаны через многочисленные петли обратной связи, а соответствующие математические уравнения нелинейны);
- динамическая иерархичность (основной принцип прохождения системой точек бифуркации – возникновение нового качества системы за счет перестройки на нижележащем структурном уровне).

5.1.1 Синергетическая концепция экологических систем

На рис. 5.6 нами представлены основные процессы, протекающие в экологической нелинейной системе. При этом свойства экосистемы, ее синергетические характеристики проявляются при взаимодействии с факторами внешней среды [132].

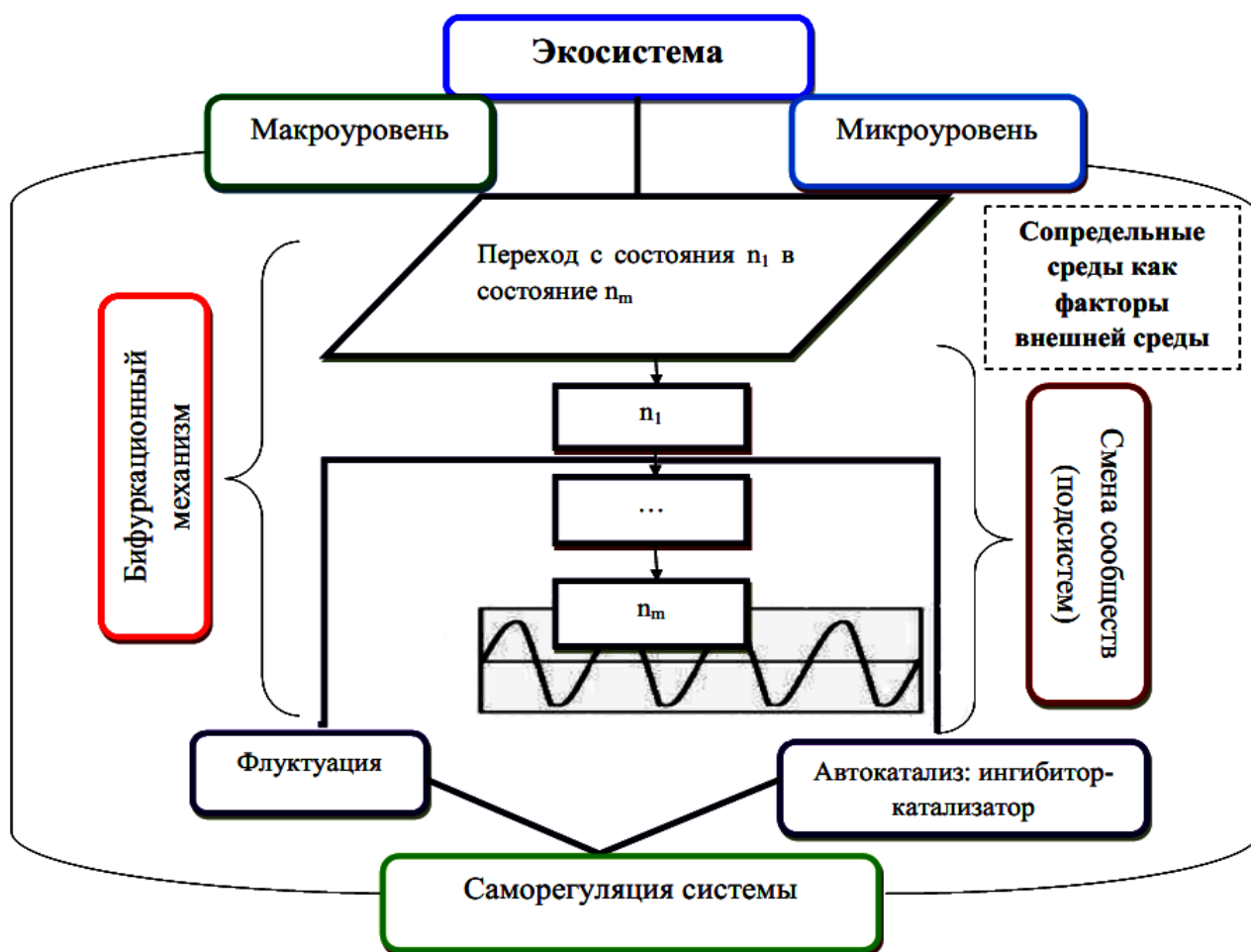


Рисунок 5.6 – Характеристика экосистемы как нелинейной системы (Л. Д. Пляцук, Е. Ю. Черныш, 2014) [132]

Для открытых систем с диссипативным образованием структур потоки должны превосходить некоторое критическое значение, для того чтобы в системе могло начаться образование структуры. Например, одним из способов активизации процессов самоорганизации в микроэкосистеме является введение

закваски специфичных групп микроорганизмов, например, чистой культуры метаногенов, для активации процесса выделения метана в системе.

Для определения факторов внешней среды введем понятие *сопредельных сред* – сред различной природы, которые косвенно и прямо воздействуют на экосистему на разных уровнях ее организации. Внешняя среда является интегральной совокупностью сопредельных сред с обретением ею качественно новых свойств. В этом аспекте внешняя среда является синергетической структурой нового уровня организации.

На рис. 5.7 мы рассматриваем некоторые характеристики внешней среды.



Рисунок 5.7 – Организация внешней среды (Л. Д. Пляцук, Е. Ю. Черныш, 2014) [132]

Следует отметить, что невозможно провести границу между сопредельными средами и экосистемой (биосферой). Так, техносреда как часть техносферы является, по существу, и частью трансформированной инженерно-технической деятельностью человека биосферы. Зачастую антропогенный фактор выделяется как фактор внешнего воздействия, но на современном этапе

развития социума он приобрел внутриэкосистемные функции, однако, к сожалению, деструктивного характера (уровень деградиционных процессов экосистемы, рис. 5.7) [109].

В промышленности задействованы разные уровни организации экосистемы, при этом, используя их для производства новых энергетических и вещественных потоков (в том числе ксенобиотиков), производятся отходы.

В классическом варианте классификация экосистемы сводится к трем уровням [133]: микроэкосистема (маленький водоем, домашний аквариум и капля воды, пока в них присутствуют живые организмы), мезоэкосистема (лес, пруд, река и т.п.) и макроэкосистема (биосфера).

Однако стоит отметить, что ранжирование экосистем не дает представления о процессах, протекающих в них. Экологические системы в процессе эволюции имеют дело с такими уровнями самоорганизации вещества: атомно-молекулярным, биохимическим и физико-химическим. Введем их как параметры развития экосистем на принципах автоэволюции.

Структуру состояний экосистем разного уровня организации мы описали в виде блок-схемы на рис. 5.8 [132].

Состояние экосистемы мы рассмотрим на разных уровнях ее организации (рис. 5.8) с точки зрения функционирования (положительное развитие или деградация), состояния самоорганизации (включая автокатализ и саморегуляцию), физического состояния (описание био-физико-химических параметров развития процессов становления и разрушения) и самих деградиционных процессов (их механизм как сочетание воздействующих факторов и свойств экосистем, и кинетика как последовательность событий (стадий) развития процесса).

На организационных уровнях выделены классы состояний. Каждый класс описывает непрерывную динамику экосистемных состояний. Переходы между классами описывают дискретную составляющую, которая отражает скачкообразный переход состояния из одного класса в другой через точку бифуркации, когда кардинально могут изменяться как значения параметров состояния экосистемы, так и их множество [132].



Рисунок 5.8 – Классы состояний экосистемы и ее элементов (Л. Д. Пляцук, Е. Ю. Черныш, 2014) [132]

Мы можем выделить центральную идею структурной самоорганизации, которая заключается в потенциальной вариации возможностей построения вещества с самозаданной надатомной (надмолекулярной) архитектурой, что связано с переходом на новый уровень организации экосистемы, с ее биохимическими и физико-химическими параметрами состояния (рис. 5.8). Тогда рассмотрение уровней самоорганизации экосистемы начинается с проблемы построения теории вещества, которая заключается в установлении связи наблюдаемых эмерджентных свойств вещества с его структурными элементами.

5.1.2 Атомно-молекулярная самоорганизация структур

Методология исследований вещества в целом достаточно очевидна и сводится к изучению свойств веществ в зависимости от составляющих данное вещество микрочастиц, а также в зависимости от внешних условий и способов воздействия на вещество различными физическими полями (тепловыми, механическими, электромагнитными). Количественным выражением свойства выступает обобщенная восприимчивость χ [134, 135].

При заданных условиях эксперимента свойства вещества являются функцией их компонентного состава, т. е. $\chi = \chi(x_i, x_j, x_k, \dots)$, где x_i, x_j, x_k – концентрация соответствующего i -го, j -го, k -го компонентов микрочастиц, образующих вещество. В предельном случае простых веществ, образованных из одного типа x микрочастиц $\chi = \chi(x)$. В этом простейшем случае макроскопические свойства вещества однозначно определяются свойствами отдельных микрочастиц, так что в общем случае имеем $\chi = \alpha N$, где N – плотность микрочастиц; α – свойство отдельной микрочастицы, именуемой обобщенной поляризованностью. Это соотношение справедливо в предельном случае невзаимодействующих микрочастиц.

В общем случае вещество представляет сложную систему вложенных структур, из общего числа которых следует выделить надмолекулярный, молекулярный, атомный и внутриатомный (электронный) уровни. Относительную независимость каждого из иерархических уровней обеспечивает структурная устойчивость микрочастиц, представляющих данный уровень. С другой стороны, все уровни вещества причинно обусловлены электронным строением атомов, поэтому искомую величину χ можно представить последовательностью зацепляющихся функций [135]:

$$\begin{aligned} \chi = f(N_K, S_{HM}, U_{MK}) \rightarrow S_{HM} = f(N_M, S_M, U_{MM}) \rightarrow S_M = f(N_a, S_a, U_{Ma}) \rightarrow \\ \rightarrow S_a = f(N_e, S_e, \epsilon_{ne}). \end{aligned} \quad (5.1)$$

Здесь $f(N_K, S_{HM}, U_{MK})$ – функция, представляющая зависимость свойства f вещества от числа N_K составляющих его молекулярных комплексов (ассоциатов), которые формируют надмолекулярную структуру S_{HM} и устойчивость которых характеризуется энергией взаимодействия U_{MK} между ними. В свою очередь, надмолекулярная структура S_{HM} является функцией числа N_K и структуры S_M молекул, устойчивость и стабильность которых определяется энергией межмолекулярных взаимодействий U_{MM} . Молекулярная структура S_M зависит от числа N_a составляющих ее атомов и их структуры S_a , связанных между собой совокупностью межатомных (ковалентных) связей U_{Ma} .

Наконец, атомная структура S_a является функцией числа электронов N_e и внутриатомной структуры S_a , устойчивость которой характеризуется энергией связи ε_{ne} электронов, где S_e – строение атомов.

Отметим, что данные виды энергии имеют флуктуирующую составляющую, что дает возможность говорить об переходе системы в устойчивое состояние через некоторую точку бифуркации.

Генетическая информация о механизме структурообразования вещества (т. е. о самосборке) «записана» в электронной структуре атомов и реализуется путем их самоорганизации с помощью межчастичных электростатических взаимодействий.

Обобщенная восприимчивость χ является выходным параметром теории. Она является количественной мерой соответствующего свойства. С другой стороны, обобщенная восприимчивость χ непосредственно связана с энергией межчастичных взаимодействий U , которая однозначно характеризует состояние вещества, поэтому

$$\chi = \eta \frac{\partial^2 U}{\partial X^2}, \quad (5.2)$$

где X – параметр физического воздействия из числа известных физических полей – механического (акустического), электрического, магнитного, электромагнитного (оптического), теплового; η – коэффициент.

Как было показано выше, природа активности атомов связана с наличием у атомов эффективного заряда, локальных дипольных моментов и свойством атомов поляризоваться во внешних электрических полях, которые являются изначальной причиной образования физических и химических связей. Конечная цель создаваемой атомно-молекулярной конструкции заключается в получении определенных функций f , заданных в процессе автоэволюции системы. При этом любая функция складывается из совокупности свойств χ данной конструкции.

Движущей силой несамопроизвольных процессов цикла обмена вещества прежде всего является Солнце. С точки зрения «темновых» самопроизвольных процессов движущей силой самосборки и эволюции биоструктур всех иерархических уровней являются «термодинамические силы».

Следует отметить, что функция Гиббса образования молекул, супрамолекулярных структур как сложных систем в условиях Земли часто совпадает с функцией Гиббса образования соответствующих простых систем.

Устойчивость экосистем не может быть сохранена и обеспечена, если будет нарушен закон внутреннего динамического равновесия. Под угрозой будет не только качество природной среды, но и существование всего комплекса природных компонентов в необозримом будущем. Закон внутреннего динамического равновесия действует как регулятор нагрузок на окружающую среду при условии, что не нарушены «баланс компонентный» и «баланс крупных территорий».

Именно эти «балансы» являются нормами рационального природопользования, это они должны лежать в основе разработки мероприятий по охране окружающей среды.

Суть этого закона состоит в том, что природная система обладает внутренней энергией, веществом, информацией и динамическим качеством, связанными между собой настолько, что любое изменение одного из этих показателей вызывает в других или в том же, но в другом месте или в другое время, сопутствующие функционально-количественные перемены, сохраняющие сумму вещественно-энергетических, информационных и динамических показателей всей природной системы. Это и обеспечивает системе такие свойства как сохранение равновесия, замыкание цикла в системе и ее «самовосстановление», «самоочищение».

5.2 Бифуркционный механизм

Моменты качественного изменения исходной системы называются *бифуркациями состояния* и описываются соответствующими разделами математики – теорией катастроф, нелинейными дифференциальными уравнениями и т. д. Круг систем, подверженных такого рода явлениям, оказался настолько широк, что позволил говорить о катастрофах и бифуркациях как об универсальных свойствах материи [7, 18, 136–138].

Таким образом, движение материи вообще можно рассматривать как чередование этапов адапционного развития и этапов катастрофического поведения. Адапционное развитие подразумевает изменение параметров системы при сохранении неизменного порядка ее организации. При изменении внешних условий параметрическая адаптация позволяет системе приспособиться к новым ограничениям, накладываемым средой.

Бифуркционный механизм позволяет объяснить диалектическое противоречие эволюции, когда вместе с усложнением, дифференциацией, возникновением качественно новых структур в природе и обществе возможны деградация, необратимый распад и исчезновение системы.

Изменение характера начального действия означает не изменение его интенсивности, а изменение пространственной конфигурации, топологии этого действия. При этом в среде появляются различные структуры. Итак, в одной и той же среде без изменения ее параметров могут возникать разные структуры, разные пути эволюции.

Однако в этом мире без неустойчивости нет развития. Например, нелинейная положительная обратная связь – важнейший элемент в моделях автокаталитических процессов, детально исследованных Вавилиным для биологических процессов и группой его сотрудников. В таких процессах присутствие определенных групп микроорганизмов является катализирующим агентом для протекания биохимических реакций самой в микросистеме.

Школе под руководством С. П. Курдюмова удалось построить еще один тип моделей, поведение которых определяется нелинейными положительными обратными связями. Это так называемые решения с обострением, режимы сверхбыстрого нарастания процессов в открытых нелинейных средах, при которых характерные величины неограниченно возрастают за конечное значение [15]. Методология решения задач «на обострение» может дать новые подходы к решению проблем коллапса – быстрого сжатия веществ, химической кинетики, метеорологии (катастрофические явления в атмосфере Земли), экологии (рост и вымирание популяций), нейрофизиологии (моделирование распространения сигналов), нейроэпидемиологии (вспышки инфекционных заболеваний), экономики (феномены бурного экономического роста или финансового обвала).

Несомненным успехом синергетики стало раскрытие механизмов развития, перехода систем в состояние с новой организацией в новое качество. Таким образом, сформулированный как философское обобщение диалектический закон перехода количественных изменений в качественные нашел не только еще одно подтверждение, но и в отношении частных наук получил возможность конкретизироваться в математической форме для исследования экологических систем.

5.2.1 Закон перехода количественных изменений в качественные. Теория катастроф

Закон перехода количественных изменений в качественные на уровне неживой природы долгое время иллюстрировался равновесными фазовыми переходами, в частности изменением агрегатного состояния вещества, механизм которого был хорошо изучен еще в XIX веке. Несомненным научным прорывом синергетики стало математическое описание неравновесных

процессов, приводящих к появлению новых структур на всех уровнях организации материи.

Однако успехи в математическом описании явлений самоорганизации привели часть ученых к философским выводам: *только системы, далекие от равновесия, системы в состоянии неустойчивости, нестабильности способны спонтанно организовывать себя и развиваться* [5, 137]. Но если бы неустойчивость была главным свойством всех систем мира, тогда все было бы хаотичным, распадающимся, не было бы возможности ни контролировать, ни предвидеть будущее состояние. Очевидно, что это далеко не так. Не все в мире неустойчиво, а есть определенные классы неустойчивых систем. Неустойчивыми системами являются такие системы, для которых существуют принципиальные границы прогнозов и контроля. Поскольку для таких систем возможно вовсе не любое состояние, а лишь состояние, попадающее в ограниченную, детерминированную область фазового пространства. *Неустойчивость означает случайные движения внутри вполне определенной области параметров.*

Таким образом, имеет место не отсутствие детерминизма, а другая, более сложная закономерность, фактически иной тип детерминизма, представляющая диалектическое единство определенного и случайного.

Следует отметить, что существует лишь определенная стадия развития процессов, на которой нестационарные диссипативные структуры становятся неустойчивыми. Это согласуется со всей наблюдаемой привычной картиной мира: мы видим, что макроструктуры природы, биологические формы, человеческое тело и мозг относительно устойчивые, долгое время не разрушаются. Это квазистационарное состояние может существовать достаточно долго, пока система не перейдет в режим обострения, при котором начнется сверхбыстрая смена [89, 96, 138].

В мире стадии устойчивости и неустойчивости, развивающиеся оформления структур и их разрушение сменяют друг друга.

Случайность, флуктуации, малые возмущения могут играть существенную, определяющую роль для системы вблизи точек бифуркации.

Управление начинает основываться на соединении вмешательства человека с существующими внутренними тенденциями развивающихся систем. Поэтому появляется в определенном смысле высший тип детерминизма – детерминизм с пониманием неоднозначности будущего и с возможностью выхода на желаемое будущее, детерминизм, который усиливает роль человека.

Нелинейность же означает возможность спонтанных направлений изменений системы, поскольку развитие совершается через случайность выбора пути в момент бифуркации.

В точке бифуркации происходит переход от линейного к нелинейному состоянию системы. Она входит в бифуркационное состояние, когда ее поведение становится неоднозначным. Именно это состояние анализируется в теории катастроф. В рамках этой теории рассматриваются скачкообразные изменения, которые могут возникнуть в системе в ответ на эволюционные трансформации внешней среды. К примеру, при наличии на склоне горы большой массы снега любая сломанная веточка может привести к критической ситуации, которая вызовет снежную лавину [139].

Теория катастроф является основой для анализа социоприродных систем в их критическом состоянии. Так, высокую степень опасности представляют собой локальные военные конфликты и социальное неравенство людей и государств; не обеспечивают необходимой безопасности для человека и среды его обитания, существующие формы технологии – атомная энергетика, транспорт, химические, нефтеперерабатывающие, металлургические и другие виды промышленности, современное интенсивное сельскохозяйственное производство и т. д. [34, 138, 140].

Любая из упомянутых возможностей может реализоваться в точке бифуркации, вызываемой флуктуациями, в которой система испытывает неустойчивость. Точка бифуркации представляет собой переломный, критический момент в развитии системы, в котором она осуществляет выбор пути; иначе говоря, это точка ветвления вариантов развития, точка, в которой происходит катастрофа.

Термином *«катастрофа»* в концепциях самоорганизации называют качественные, скачкообразные изменения, возникающие в виде внезапного ответа на плавное изменение внешних условий.

Поведение всех самоорганизующихся систем в точках бифуркации имеет общие закономерности, многие из которых уже раскрыты концепциями самоорганизации.

Точки бифуркации часто провоцируются изменением управляющего параметра или управляющей подсистемы, приводящей систему в новое состояние.

Потенциальных траекторий развития системы много, и точно предсказать, в какое состояние перейдет система после прохождения точки бифуркации, невозможно, что связано с тем, что влияние среды имеет случайный характер.

Открытость, незамкнутость самоорганизующейся системы как целостности особенно ярко проявляется в критических точках, т. е. при тех значениях параметра, когда возникают бифуркации. *Ситуации возникновения бифуркаций связаны с неустойчивым состоянием системы, когда дальнейший путь ее эволюции не определен однозначно: в точке бифуркации решения уравнений раздваиваются.*

Неоднозначность возможностей, принципиальная роль случайности делает поведение становящейся целостности необратимым: движение в нелинейных диссипативных системах невоспроизводимо по начальным условиям. Однако для того чтобы необратимость в поведении самоорганизующейся целостности выступала в качестве момента развития, она не должна сводиться к невоспроизводимости этого поведения при воспроизведении начальных условий [10]. При этом, подойдя вновь к критическому значению параметра, система в точке бифуркации в силу высокой вероятности флуктуации иного рода может выбрать иной путь [140]. А если система проходит ряд последовательных бифуркаций, ее судьба оказывается тем более неповторимой. При этом движение системы может усложниться в смысле роста упорядоченности, о чем свидетельствуют расчеты,— энтропия уменьшится, хотя на первый взгляд это усложненное движение будет восприниматься как *хаос*: движение потока жидкости, например [8, 24, 25], приобретает все более сложный турбулентный характер, крупные вихри как самоорганизованные целостности дробятся; частота колебаний в радиотехнической или химической системе может последовательно удваиваться или стохастически меняться и т. д. При этом, однако, новизна самоорганизующихся целостностей будет преходящей и, так сказать, непринципиальной, поскольку здесь нет еще возможности сохранения приставляющего его воспроизведения, т. е. перехода от процесса становления целостности к его результату.

В реальных условиях при углублении неравновесности в открытой системе возникает определенная последовательность бифуркаций, сопровождающаяся сменой структур. Состояние системы в момент бифуркации является неустойчивым и бесконечно малое воздействие может привести к выбору дальнейшего пути. Финальным состоянием эволюционирующих физических систем является состояние динамического хаоса [4].

Иллюстрацией перехода к нему является логистическое уравнение [89]:

$$X_{n+1} = C \cdot X_n \cdot (1 - X_n). \quad (5.3)$$

Определение: изолированно живет популяция особей нормированной численности X_n . Через год появляется потомство численностью X_{n+1} . Рост популяции описывается первым членом правой части уравнения $-C \cdot X_n$, где коэффициент C определяет скорость роста и является определяющим параметром. Убыль (за счет перенаселенности, недостатка пищи и т. п.) определяется вторым, нелинейным членом $-C \cdot X_n^2$.

Зависимость численности популяции от параметра C приведена на рис. 5.9 [83].

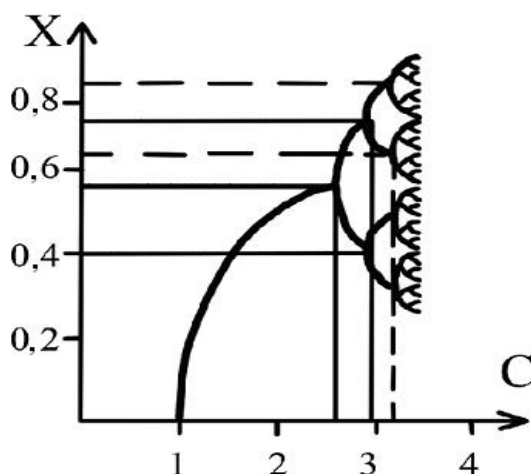


Рисунок 5.9 – Зависимость численности популяции от параметра C

Линии показывают значения X_n при больших n . При $C < 1$ популяция с ростом n вымирает. В области $1 < C < 3$ численность популяции приближается к постоянному значению $X_0 = 1 - C^{-1}$. Это область стационарных решений. Затем в диапазоне $3 < C < 3,57$ появляются бифуркации, то есть разветвление кривых на две.

Численность популяции колеблется между двумя значениями, лежащими на этих ветвях. Сначала популяция резко возрастает, на следующий год возникает перенаселенность, и через год численность снова становится низкой. Далее происходит перекрывание областей различных решений, и поведение системы становится хаотическим.

Динамические переменные X_n принимают значения, сильно зависящие от начальных.

При расчетах на компьютере для близких начальных значений C решения могут резко отличаться, так как начинают зависеть от случайных процессов в самом компьютере.

Управление самоорганизующейся системой может рассматриваться как способствование собственным тенденциям её развития с учетом присущих ей элементов саморегуляции. Однако это не означает, что самоорганизующейся

системе можно навязать путь развития, т. к. самоорганизация в сложных системах свидетельствует о невозможности установления полного контроля за системой (закон невозможности установления жёсткого контроля за системой) [76].

Выбор пути развития в точке бифуркации может быть связан с жизненностью и устойчивым типом поведения системы. Согласно принципу устойчивости среди возможных форм развития системы реализуются лишь устойчивые; неустойчивые, если и возникают, то быстро разрушаются.

Повышение размерности и сложности системы вызывает увеличение количества состояний, при которых может происходить скачок (катастрофа), и числа возможных путей развития, то есть чем более разнородны элементы системы и сложны ее связи, тем более она неустойчива [57]. Эта закономерность известна как «закон Легасова»: чем выше уровень системы, тем более она неустойчива, тем больше расходов требуется на ее поддержание [140].

Одни и те же ветви или типы ветвей могут реализовываться неоднократно. Выбор той или иной ветви развития системы в соответствии с принципом диссипации, являющимся одним из основных законов развития, заключается в следующем: *из совокупности допустимых состояний системы реализуется то, которому отвечает минимальное рассеяние энергии, или, что то же самое, минимальный рост (максимальное уменьшение) энтропии.*

В процессе своего развития система проходит две стадии: эволюционную (иначе – адаптационную) и революционную (скачок, катастрофа). Во время развертывания эволюционного процесса происходит медленное накопление количественных и качественных изменений параметров системы и ее компонентов, в соответствии с которыми в точке бифуркации система выберет один из возможных для нее новых путей развития.

В результате этого произойдет качественный скачок, и система сформирует новую диссипативную структуру, соответствующую выбранному пути, что происходит в процессе адаптации к изменившимся условиям внешней среды.

Эволюционный этап развития характеризуется наличием механизмов, которые подавляют сильные флуктуации системы, ее компонентов или среды и возвращают ее в устойчивое состояние, свойственное ей на этом этапе. Постепенно в системе возрастает энтропия, поскольку из-за накопившихся в системе, а также в ее компонентах и внешней среде изменений способность системы к адаптации падает, и нарастает неустойчивость [56]. Возникает острое противоречие между старым и новым в системе, а при достижении

параметрами системы и среды бифуркационных значений неустойчивость становится максимальной, и даже малые флуктуации приводят систему к катастрофе – скачку [140].

Поскольку неустойчивость вызывается не только внутренними флуктуациями, силу и направленность которых можно прогнозировать, проанализировав историю развития и современное состояние системы, но и внешними, что крайне усложняет, а то и делает невозможным прогноз.

Иногда вывод о будущем состоянии и поведении системы можно сделать, исходя из «закона маятника» – скачок может способствовать выбору пути, «противоположному» прошлому [141]. После формирования новой диссипативной структуры система снова вступает на путь плавных изменений, и цикл повторяется.

Варианты развития системы можно предвидеть, но какой именно из них будет выбран предсказать невозможно.

В связи с этим возникает проблема повышения степени безопасности принимаемых управленческих решений. Они должны обеспечить надежное прогнозирование и предотвращение потенциальных опасностей для развития социоприродной системы – техногенных аварий, экологических катастроф, социальных конфликтов и т. д.

В теории катастроф имеется представление о «высокой надежности» принятия решений, обеспечивающих «предельную безопасность» социоприродных систем, т. е. их функционирование будет сравнительно безопасным для человека и биосферы. Для реализации этих возможностей должна быть проделана необходимая предварительная работа – приняты соответствующие опережающие меры, например, установка реактора атомной электростанции под специальной надежной защитой или изготовление корпусов танкеров для перевозки нефти с двойными стенками.

5.2.2 Бифуркация удвоения периода

Изменение численности какого-либо вида животных в определенном районе обычно описывают при помощи коэффициента прироста, т. е. отношения ежегодного прироста численности популяции к ее общей численности. Если эта величина остается постоянной в течение всего периода времени, то говорят, что закон роста является линейным, а сам рост называют экспоненциальным. Например [142], при коэффициенте прироста в 5 % популяция удваивает свою численность каждые 14 лет. Законы такого типа, однако, применимы только на ограниченных промежутках времени, так как численность популяции, заполняющей данную экологическую нишу, не может

быть больше некоторого максимального значения. Одним из первых обратил на это внимание П. Ф. Ферхюльст [20], сформулировавший закон, содержащий ограничение на рост. Таким образом, коэффициент прироста должен быть переменным, а сам процесс становится нелинейным. Для описания динамики популяции часто используется следующее уравнение [77]:

$$x_{n+1} = x_n(1 + \lambda x_n), \quad (5.4)$$

где x_n – численность животных в n -й год ($n = 1$ соответствует первому году).

Рассмотрим как будет изменяться численность вида по прошествии достаточно долгого времени. В модели достаточно выяснить поведение последовательности $\{x_n\}$ при $n \rightarrow \infty$ для различных значений λ .

При малых λ ничего особенного не происходит: численность популяции просто регулируется так, чтобы достичь оптимального значения. Однако при $\lambda > 2$ достижение оптимальной численности становится невозможным [77]. Когда популяция мала, энергичный рост неизменно приводит к превышению оптимального размера, что вызывает ответную реакцию, и популяция уменьшается до размеров, значительно меньших оптимального. Появляются устойчивые колебания между двумя размерами: большим и меньшим [143]. Рассмотренный переход носит название **бифуркации удвоения** периода. Когда $\lambda > 2,45$, происходит дальнейшее усложнение поведения. Колебания происходят сначала между 4, затем – 8, затем – 16 различными величинами численности популяции и так далее до тех пор, пока для параметра $\lambda > 2,57$ не возникает хаос.

При точном анализе точек бифуркации в процессе Ферхюльста обнаруживается закономерность, имеющая исключительное значение в мире нелинейных явлений. Если λ_n – значение параметра, соответствующее n -й бифуркации (т. е. моменту, когда колебания периода 2^n теряют устойчивость, и устойчивыми становятся колебания периода 2^{n+1}), то оказывается, что отношение длин двух следующих друг за другом интервалов [77]:

$$\delta = \frac{\lambda_n - \lambda_{n-1}}{\lambda_{n+1} - \lambda_n} \quad (5.5)$$

сходится к значению $\delta = 4,669201660910\dots$, когда $n \rightarrow \infty$.

Это число, первые десятичные знаки которого были впервые опубликованы Гроссманном и Томэ в 1977 году, появляется снова и снова во многих других процессах. Оно является такой же характеристикой для сценариев с удвоением периодов, как число π для отношения длины окружности к ее диаметру. Это число называют теперь «числом Фейгенбаума».

А теперь вернемся к исследованию динамических систем и попытаемся выяснить качественные особенности поведения динамических систем в фазовых пространствах с размерностью выше трех. В основе совершенно новых типов поведения лежит та свобода, которая привносится дополнительными размерностями. При этом все особенности двумерных систем, в частности, аттракторы типа неподвижных точек и предельных циклов, сохраняются.

Рассмотрим плоскость S , пересекающую фазовые траектории, и изучим последовательность точек P_n пересечения ее с траекториями [78]. С течением времени эти точки начнут сгущаться, и по тому, где это произойдет, мы сможем получить представление о трехмерном аттракторе, поскольку, по существу, в нашем распоряжении будет сечение такого аттрактора. Плоскость S называется секущей поверхностью Пуанкаре, а характер расположения точек P_n соответствует так называемому отображению Пуанкаре. Заметим, что в таком представлении динамика системы выглядит как некое рекуррентное соотношение с дискретным временем. Вводя на плоскости соответствующую систему координат, это соотношение можно записать в виде

$$x_{n+1} = f(x_n, y_n), \quad y_{n+1} = g(x_n, y_n). \quad (5.6)$$

5.3 Автоколебательный режим экосистемы

5.3.1 Понятие об автоволновых процессах в живых системах

Автоволны возникают в самых различных средах физического, химического и биологического происхождения. Их примерами могут служить концентрационные волны в реакции Белоусова-Жаботинского, волны химической сигнализации в колониях некоторых микроорганизмов, волны в межзвездном газе, приводящие к образованию спиральных галактик. Важный пример активных сред представляют многие биологические ткани. Так, автоволновую природу имеют распространение нервного импульса и возбуждения в сердечной мышце. Автоволны, таким образом, играют важную роль в функционировании живых систем [26, 83].

Возникновение волн и структур, вызванное потерей устойчивости однородного равновесного состояния, называют *автоволновыми процессами* (по аналогии с автоколебаниями) [144, 145].

Если колебания в системе имеют постоянные период и амплитуду, устанавливаются независимо от начальных условий и поддерживаются благодаря свойствам самой системы, а не вследствие воздействия периодической силы, система называется *автоколебательной* [14].

На первый план здесь выступает волновой характер образования структур: независимость их характерных пространственных и временных размеров от начальных условий (выход на промежуточную асимптотику), а в некоторых случаях – от краевых условий и геометрических размеров системы.

Способностью к многократному проведению автоволн обладают так называемые *активные среды*, для которых характерно наличие распределенных внешних источников энергии [29].

С термодинамической точки зрения активные среды – это открытые системы далекие от равновесия. Экосистемы также можно отнести к активным средам в точке бифуркации.

После прохождения автоволнового импульса такая среда должна восстановить свои свойства за счет поступающей извне энергии и подготовиться к проведению следующего импульса. Необходимое для этого восстановления время называется *рефрактерным периодом*. В течение рефрактерного периода среда не способна к проведению следующего импульса [122].

Специфика автоволн выражается в том, что они описываются существенно нелинейными уравнениями. Скорость, форма профиля и амплитуда автоволны не зависят от начальных условий, приведших к ее возникновению, и однозначно определяются свойствами среды. В отличие от волн в линейных средах автоволна локализована в пространстве – до и после ее прохождения элементы среды остаются в покое.

В качестве примера самоорганизации упомянем еще тепловые локальные нестационарные структуры, возникающие в плазме. Они описываются уравнением нелинейной теплопроводности с источником [144]. В отличие от линейной теплопроводности, которая приводила к выравниванию температур, нелинейная теплопроводность приводит к формированию структур [146]. Здесь, как и в других случаях самоорганизации, структуры возникают на основе развития флуктуаций (случайных отклонений от средних значений), если эти флуктуации оказываются поддержанными внешним воздействием или внутренними процессами. На примере [145] образования тепловых структур в

«режиме с обострением» можно проиллюстрировать действие принципа подчинения, одного из наиболее фундаментальных в синергетике. Флуктуация, развивающаяся быстрее других, как бы «подчиняет» себе остальные процессы, и в результате все элементы системы оказываются вовлечены в крупномасштабное движение. (Кстати, благодаря этому феномену подчинения биение нашего сердца подчиняется одному, наиболее быстрому ритму из тех, которые могут быть заданы группами синусовых клеток, а если в результате болезни этого согласования не происходит, наступает фибрилляция сердечной мышцы [144, 145]).

Именно наличие такого подчинения в процессах самоорганизации и позволяет переходить от бесконечного числа уравнений для элементов сложной многокомпонентной системы к одному или немногим уравнениям для описания медленно затухающих крупномасштабных флуктуаций параметра порядка. Вблизи порога самоорганизации, как и вблизи критической точки фазового перехода второго рода, когерентное (согласованное, кооперативное) поведение элементов системы проявляется на расстояниях, превосходящих масштабы межэлементных взаимодействий в системе.

Причиной возникновения упорядоченных структур в открытых неравновесных системах является неустойчивость системы. Флуктуации, которые обычно гасятся, при определенных граничных условиях могут стабилизироваться. Дальний надмолекулярный порядок возникает и поддерживается, поскольку диссипация энергии компенсируется за счет притока энергии извне.

Новая термодинамика является обобщением классической [10, 37]: локальное уменьшение энтропии при образовании диссипативных структур компенсируется повышением энтропии в среде за счет передачи ей энтропии, произведенной в системе. Описываемые термодинамикой Пригожина неравновесные процессы в открытых системах при своей необратимости характеризуются увеличением упорядоченности, а не ее убыванием, что характерно для необратимых процессов в системах, описываемых классической термодинамикой.

Необратимость при самоорганизации связана с тем, что в критической области неустойчивость среды приводит к появлению так называемых бифуркаций [138]. В принципе, бифуркации есть не что иное, как возникновение при некотором критическом значении параметра нового решения уравнений. Любое описание системы, претерпевающей бифуркации, включает и детерминистский, и вероятностный элементы [142, 147]. Между двумя точками бифуркации в системе выполняются детерминистические

законы, например, законы химической кинетики, но в окрестностях точек бифуркации существенную роль играют флуктуации, и именно они «выбирают» ветвь, которой будет следовать система. Учитывая то обстоятельство, что система по мере удаления от равновесия проходит ряд бифуркаций, всякий раз «случайным» образом реализуя одну из веера возможностей.

Космофизические, геофизические и биологические ритмы сопоставлены на рис. 5.10.

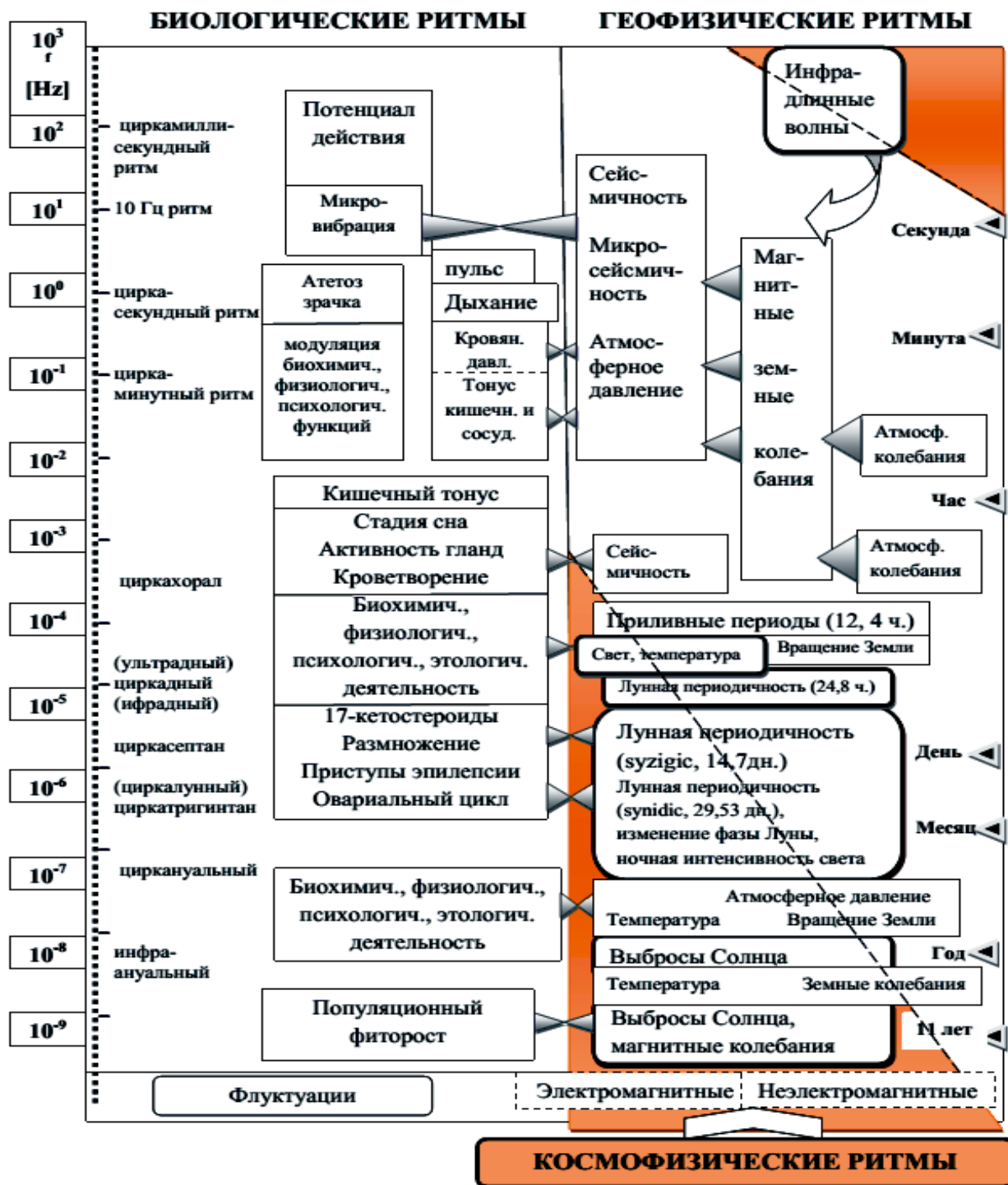


Рисунок 5.10 – Космофизические, геофизические и биологические ритмы. Справа – шкала периодов, слева – шкала частот

Возникновение нового качества системы происходит на основании усиления малых случайных движений элементов – флуктуаций [5, 10, 143]. Это, в частности, объясняет тот факт, что в момент бифуркации состояния системы возможно не одно, а множество вариантов структурного преобразования и дальнейшего развития объекта [145]. Для биологических систем характерно периодическое изменение различных характеристик. Период этих колебаний может быть связан с периодическими изменениями условий жизни на Земле – смена времен года, смена дня и ночи [148]. Существуют и другие космогеофизические ритмы – солнечные, лунные, связанные с периодами атмосферных явлений. Появление возмущений в магнитосфере Земли напрямую связано с 11-летним циклом Солнца, в течение которого его полюса меняются местами. Следует отметить, что геофизические ритмы настолько связаны с космофизическими, что не стоит проводить четкое разделение между ними. Они обусловлены едиными космогеофизическими явлениями. Поэтому мы преднамеренно не выделяли их отдельным блоком на рис. 5.10. Например, приливы и отливы (подъемы и спады) в акваториях на Земле обусловлены гравитационным притяжением Луны и Солнца, действующим на вращающуюся Землю.

Электромагнитные поля являются универсальным носителем информации в биосфере. По сравнению с звуковой, световой или химической информацией они распространяются при любой погоде и на любые расстояния, на них реагируют любые биосистемы. Наблюдается синхронизация биоритмов факторами окружающей среды.

Но многие периодические процессы имеют частоту изменения, не связанную очевидным образом с внешними геокосмическими циклами. Это так называемые «биологические часы» различной природы, начиная от колебаний биомакромолекул, биохимических колебаний, вплоть до популяционных волн [145].

Внутриклеточные колебания задают эндогенные биологические ритмы, которые свойственны всем живым системам. Именно они определяют периодичность деления клеток, отмеряют время рождения и смерти живых организмов. Модели колебательных систем используются в ферментативном катализе, теории иммунитета, в теории трансмембранного ионного переноса, микробиологии и биотехнологии [26, 31, 146, 149].

«Биологические часы» имеют свойство, отличающее их от другого рода колебаний (флуктуаций), – *неизменность во времени периода и амплитуды* таких колебаний, означающую *устойчивость колебательного режима* [145].

5.3.2 Математическое описание активных сред

Математическую модель активной среды можно строить на основе свойств отдельных элементов среды, составляя ее из определенным образом связанных клеточных автоматов. Каждый из них имеет конечное множество состояний и совершает переходы между ними по определенным правилам, характерным для элемента среды данного типа. Такие модели называются аксиоматическими.

С их помощью был получен ряд качественных результатов, особенно касающихся возбудимых сред, например, наблюдалось образование спиральной волны из плоского фронта со свободным концом. Однако наблюдать более тонкие эффекты, а тем более добиться количественного соответствия с экспериментальными данными на таких моделях не удается [150]. Понаблюдать явления в среде Винера-Розенблюта можно при помощи программы VR [151, 152].

Более детальное описание активной среды можно получить, основываясь на дифференциальных уравнениях с частными производными типа реакция-диффузия (РД-системы) [150]. При этом связи между элементами – точками среды – описываются диффузионными членами уравнений, а динамика отдельного элемента – реакционными. Количество независимых пространственных переменных в РД-системе определяет размерность среды и может меняться от одной до трех. Известные функции описывают динамику величин (компонент), характеризующих среду. Это концентрации веществ в химической системе; концентрации ионов, трансмембранные токи и напряжения при описании нервной или мышечной ткани [152]. В реальной системе таких переменных может быть сколь угодно много, но основные закономерности поведения активных сред наблюдаются уже в моделях с двумя компонентами. Для того чтобы реакционный член адекватно описывал достаточно сложное локальное поведение активного элемента, он должен быть нелинейным.

Общая двухкомпонентная РД-система имеет вид [150]:

$$\partial_t u = D_{11} \Delta u + D_{12} \Delta v + F(u, v); \quad (5.7)$$

$$\partial_t v = D_{21} \Delta u + D_{22} \Delta v + G(u, v). \quad (5.8)$$

Здесь t – время; $u(r, t)$ и $v(t, r)$ – неизвестные функции; Δ – оператор Лапласа по пространственным переменным (радиус вектора r); $\hat{D} = \{D_{ij}\}$ – тензор диффузии; $F(u, v)$, $G(u, v)$ – реакционные члены. Система ОДУ (5.7–5.8) с нулевым тензором диффузии называется точечной системой и описывает динамику отдельного элемента среды.

В зависимости от вида реакционных членов активная среда может оказаться бистабильной, автоколебательной или возбудимой.

Бистабильный элемент обладает двумя устойчивыми стационарными состояниями, переходы между которыми происходят при внешнем воздействии, превышающем некоторый порог [150]. В средах из таких элементов возникают волны переключения из одного состояния в другое. К ним относятся, например, волны горения.

Возбудимый элемент имеет только одно устойчивое стационарное состояние. Внешнее воздействие, превышающее пороговый уровень, способно вывести элемент из устойчивого состояния и заставить его совершить некоторую эволюцию, прежде чем он вновь вернется в это состояние. Во время переходов активный элемент способен повлиять на связанные с ним элементы и, в свою очередь, вывести их из стационарного состояния [151]. В результате в такой среде распространяется волна возбуждения. Это наиболее распространенный вид автоволн в биологических средах, таких как нервная ткань или сердечная мышца.

Автоколебательный элемент не имеет стационарных состояний и постоянно совершает устойчивые автоколебания определенной формы, амплитуды и частоты [150]. Внешнее воздействие способно возмутить эти колебания. По прошествии некоторого времени релаксации все их характеристики, кроме фазы, вернуться к своему устойчивому значению, но фаза может измениться [149]. В итоге в среде из таких элементов распространяются фазовые волны. Это, например, волны в электрогирлянде и некоторых химических средах.

5.3.3 Предельный цикл – основной признак автоколебательной системы

Существование предельного цикла на фазовой плоскости есть основной признак автоколебательной системы [153]. Очевидно, что при автоколебательном процессе фаза колебаний может быть любой.

Предельный цикл представляет стационарный режим с определенной амплитудой, не зависящий от начальных условий, а определяющийся только организацией системы [154].

Остановимся на общих характеристиках автоколебательных систем. Рассмотрим систему уравнений общего вида:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dx}{dt} = P(x, y), \\ \frac{dy}{dt} = Q(x, y). \end{array} \right. \quad (5.9)$$

$$\frac{dy}{dt} = Q(x, y). \quad (5.10)$$

Если T ($T > 0$) – наименьшее число, для которого при всяком t

$$x(t+T) = x(t), \quad (5.11)$$

$$y(t+T) = y(t), \quad (5.12)$$

то изменение переменных $x = x(t)$, $y = y(t)$ называется периодическим изменением с периодом T [155].

Периодическому изменению соответствует замкнутая траектория на фазовой плоскости, и соответственно: всякой замкнутой траектории соответствует бесконечное множество периодических изменений, отличающихся друг от друга выбором начала отсчета времени.

Если периодическому изменению на фазовой плоскости соответствует изолированная замкнутая кривая, к которой с внешней и внутренней сторон приближаются (при возрастании t) соседние траектории по спиралям, эта изолированная замкнутая траектория есть предельный цикл [156].

Простые примеры позволяют убедиться, что система общего вида (5.9, 5.10) допускает в качестве траекторий предельные циклы.

Например, для системы [155]

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dx}{dt} = y + x[1 - (x^2 + y^2)], \\ \frac{dy}{dt} = -x + y[1 - (x^2 + y^2)] \end{array} \right. \quad (5.13)$$

$$\quad \quad \quad (5.14)$$

траектория $x^2 + y^2 = 1$ является предельным циклом. Его параметрические уравнения будут такими:

$$x = \cos(t - t_1), \quad (5.15)$$

$$y = \sin(t - t_1), \quad (5.16)$$

а уравнения всех других фазовых траекторий запишутся в виде [155]:

$$x = \frac{\cos(t - t_0)}{\sqrt{1 + Ce^{-2(t-t_0)}}}, \quad (5.17)$$

$$y = \frac{\sin(t - t_0)}{\sqrt{1 + Ce^{-2(t-t_0)}}}. \quad (5.18)$$

Значениям постоянной интегрирования $C > 0$ соответствуют фазовые траектории, накручивающиеся на предельный цикл изнутри (при $t \rightarrow \infty$), а значениям $-1 < C < 0$ траектории, накручивающиеся снаружи.

Предельные циклы бывают трех типов [154]:

- *устойчивые* — близкие траектории «навиваются» на него при $t \rightarrow +\infty$, в автоколебательных системах такой тип предельного цикла соответствует аттрактору (притягивающее множество);

- *неустойчивые* — близкие траектории уходят от него при $t \rightarrow +\infty$;

- *полуустойчивые* — траектории, лежащие по одну сторону от цикла, «навиваются» на него при $t \rightarrow +\infty$, а лежащие по другую сторону — «отходят» от цикла.

На рис. 5.11 изображены устойчивый предельный цикл (а) и неустойчивые (б) и (в).

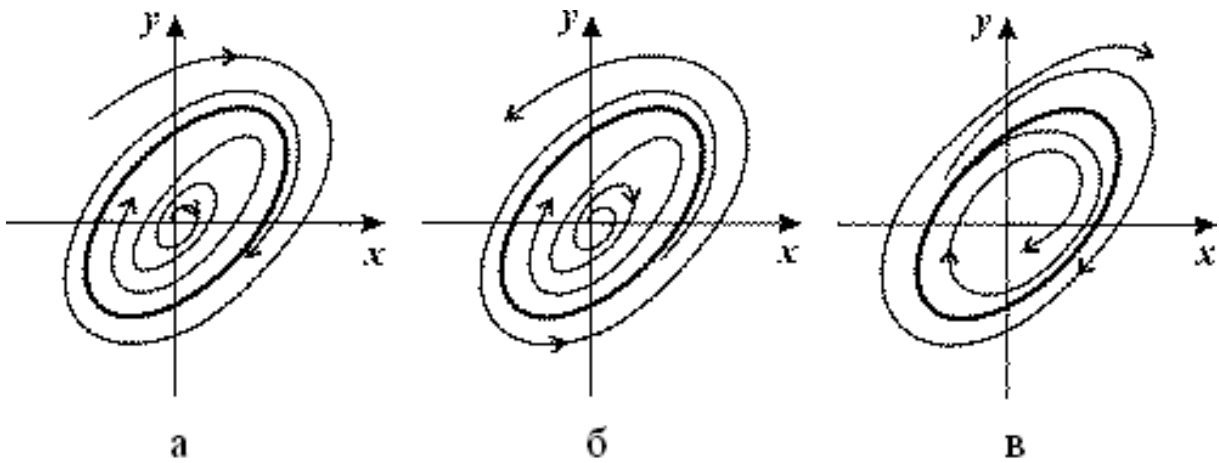


Рисунок 5.11 – Устойчивый (а) и неустойчивые (б, в) предельные циклы в фазовой плоскости

Существование предельных циклов возможно лишь в системе типа (5.9–5.10), правые части которой представлены нелинейными функциями.

В нелинейной системе, где возникает неустойчивый фокус, при этом возможно рождение предельного цикла. Такой переход легко проследить в «модельной» системе [155]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dr}{dt} = r(c - r^2), \\ \frac{d\varphi}{dt} = 2\pi. \end{array} \right. \quad (5.19)$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = 2\pi. \quad (5.20)$$

Схематически возникновение предельного цикла в системе (5.19–5.20) изображено на фазопараметрической диаграмме на рис. 5.12.

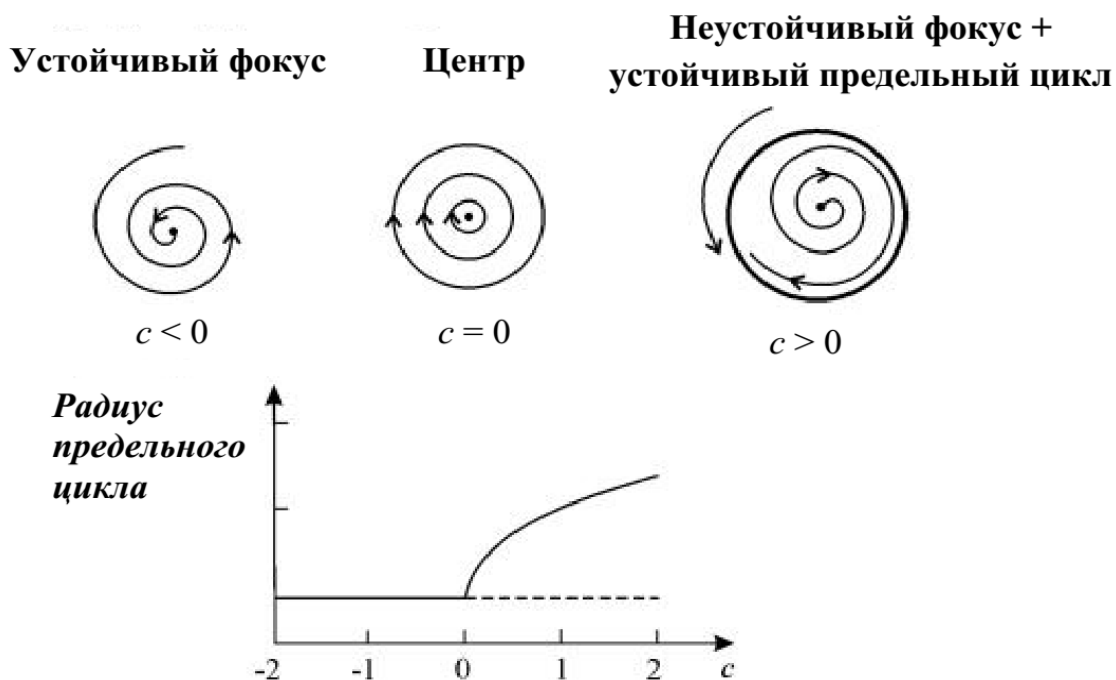


Рисунок 5.12 – Закритическая (суперкритическая) бифуркация Андронова-Хопфа. Мягкое возбуждение. При $c > 0$ возникают автоколебания, амплитуда которых растет с увеличением c

Существуют два типа бифуркации Андронова–Хопфа. В данном примере [156] была рассмотрена **суперкритическая бифуркация** (мягкое возбуждение автоколебаний). Возможна также **субкритическая бифуркация** (жесткое возбуждение автоколебаний). В этом случае при бифуркационном значении параметра устойчивый фокус теряет устойчивость из-за «влипания» в него неустойчивого предельного цикла [154, 156]. Фокус становится неустойчивым, а аттрактором при этом может стать предельный цикл большой амплитуды.

5.4 Теория биосферного моделирования

В настоящее время отсутствует единая общепринятая модель биосферы, поэтому моделируются отдельные компоненты экосистем. При таком подходе исследования направлены на определение динамики компонентов биосферы во времени (рис. 5.13) [157].

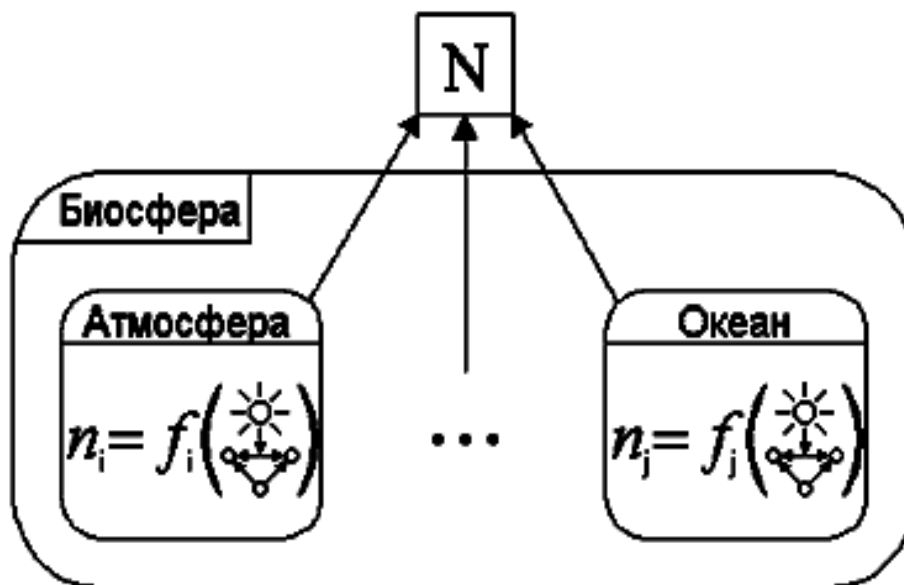


Рисунок 5.13 – Направленность современных исследований (П. В. Зимницкий, 2003) [157]

Динамика процесса определяется через функцию от множества параметров системы. При этом учитываются лишь основные параметры, такие как температура, а влияние на результат большей части множества взаимодействующих между собой компонентов системы не учитывается [157]. Данный подход можно назвать функциональным (направленным на определение функций). Добавление в модель нового параметра ведет к необходимости заново определять функцию, при этом линейный рост числа учитываемых параметров ведет к экспоненциальному росту вычислительной сложности системы.

Приведенный пример показывает невозможность правильного определения параметров без моделирования всей системы в целом.

Важным является изучение геофизических процессов и потоков вещества и энергии, изменяемых под воздействием биосферы. В верхних слоях литосферы в процессе минерализации происходит образование чередующихся слоев известняков, доломитов, гранитов, песчаников, глин, суглинков, сланцев, торфа и др. Природные циклы многих элементов и соединений благодаря биосфере существенно изменяются. Циклы воды, углекислого газа, азота, фосфора, серы, железа, микроэлементов могут быть нарушены при уничтожении биоты [158, 159]. Растительность выступает в качестве барьера на пути стихий, защищает поверхность земли от эрозии, пыльных бурь, катастрофических паводков и др. [94].

Используемые в настоящее время в науке методы, в большинстве своем, базируются на приближенном представлении структур геометрическими объектами с целыми размерностями (точками, линиями, поверхностями) [21]. Основным недостатком такого рода методов является то, что они характеризуют структуру на одном либо нескольких масштабных уровнях, не позволяя получить масштабно-инвариантного описания природных структур [160, 137]. Таким образом, все эти методы не учитывают одного из важнейших качеств системы – целостности, выражающейся в принципиальной несводимости свойств системы к сумме свойств составляющих ее элементов и невыводимости из последних свойств системы [41]. Биосферу важно рассмотреть как место, причину и следствие формирования, протекания эволюционных, инволюционных и бифуркационных процессов, организации живой материи [158]. Названные процессы важно рассматривать как неотъемлемую часть геофизических процессов. Необходимо рассматривать биосферу как активного организатора пространств, среды и поверхности, меняющего вектора, и мощность геофизических процессов, в свою очередь, меняющих саму биосферу. В этом направлении интересным является проект международной программы «Динамическая модель биосферы» (Барский В. Г, 2002) [158], в котором рассматривается подход к созданию единой концепции моделирования биосферных процессов.

Связь между уровнем разнообразия и организацией пространственной структуры сообществ дает классификация, предложенная Уиттекером [161]:

– альфа-разнообразие (разнообразие внутри сообщества, разнообразие «в узком смысле») – видовое богатство, измеряемое числом видов на единицу площади или объема, и соотношение количественных показателей участия видов в сложении сообщества, измеряемое выравниванностью видов (англ. evenness or equitability);

– бета-разнообразие (разнообразие между сообществами) – показатель степени дифференцированности распределения видов или скорости изменения видового состава, видовой структуры вдоль градиентов среды; бета-разнообразие может быть измерено числом синтаксонов одного ранга (субассоциации, ассоциации и пр.) или величиной полусмены (англ. halfchange, НС) – отрезка градиента среды, вдоль которого меняется половина видового состава сообщества; таким образом, полная смена видового состава соответствует 2НС);

– гамма-разнообразие (разнообразие ландшафтов, разнообразие «в широком смысле») – объединение альфа- и бета-разнообразия; простейшим

показателем гамма-разнообразия будет конкретная флора, список видов в пределах ландшафта.

Возможность биосферного гомеостаза вполне очевидна исходя из необходимости обеспечения «коридора» допустимых условий для существования живых организмов, аналогично тому, как организменный гомеостаз обеспечивает выживание клеток и поддержание эффективных режимов биохимических процессов в организме [77]. Эта внутренняя системная целостность биосферы в совокупности с механизмами стабилизирующей обратной связи позволяет не только констатировать неразрывную взаимосвязь и взаимозависимость всего живого на планете, но и конструктивно подойти к конструированию всеобъемлющей теории, которая непротиворечива и с математической точностью позволяет описать биосферу, составляющие ее экосистемы и входящие в них организмы как единый, согласованный, синергичный процесс [162].

Следующим важным фактором является организация сложных природных систем в виде сетей элементов и связей между ними. Важнейшей особенностью сетевых структур, с количественной точки зрения, является возможность получения чрезвычайно богатого и гибко (адаптивно) перестраиваемого спектра реакций на изменение ситуаций и внешние воздействия [79]. Это позволяет эффективно компенсировать деструктивные воздействия на биосферу и ее экосистемы. С ростом размеров и сложности сети увеличивается число стационарных состояний, которые могут быть в ней сформированы в ответ на соответствующие ситуации [162].

Следует отметить, что моделирование биосферных процессов должно исходить из понимания биосферы как неравновесной термодинамической системы.

Фундаментальными работами И. Р. Пригожина установлено, что вся термодинамика делится на три большие области: равновесную, в которой производство энтропии, потоки и силы равны нулю, слабо неравновесную, в которой термодинамические силы «слабы» и энергетические потоки линейно зависят от сил, и сильно неравновесную, или нелинейную, где энергетические потоки нелинейны, а все термодинамические процессы имеют необратимый характер. Основная задача неравновесной термодинамики – количественное изучение неравновесных процессов, в частности определение их скоростей в зависимости от внешних условий. В неравновесной термодинамике системы, в которой протекают неравновесные процессы, рассматриваются как непрерывные среды, а их параметры состояния – как полевые переменные, то есть непрерывные функции координат и времени [163].

Следует отметить, что в слабо неравновесной области практически действуют законы равновесной термодинамики, система ни к чему не стремится и ее поведение в большинстве случаев вполне предсказуемо. Сильно неравновесная термодинамика рассматривает процессы, происходящие в системах, состояние которых далеко от равновесия, и здесь в полной мере применима теория хаоса с ее математическим аппаратом [5].

Таким образом, эволюционирование биосферы происходит через процесс самоорганизации, тесно связанный с теорией неравновесных систем.

5.4.1 Фрактальные свойства биосферы

Математический аппарат, построенный на основе представлений о фракталах и фрактальных множествах, позволяет объяснить или даже предсказать экспериментально наблюдаемые факты и явления в различных областях [164]. Действительно, экосистемы представляют собой открытые неравновесные системы, строение и эволюция которых определяются приходящим из окружающей среды потоком энергетических ресурсов. Потоки энергии и вещества, приходящие через открытые системы, обеспечивают возникновение в них эффектов самоорганизации – образование макроскопических диссипативных структур. Эти структуры обладают имманентной структурной универсальностью [163].

В первую очередь, необходимо напомнить, что к *фракталам* относят геометрические объекты, имеющие сильно изрезанную форму и демонстрирующие некоторую повторяемость в широком диапазоне масштабов. Если повторяемость полная – говорят о регулярных фракталах.

Все природные объекты создаются по капризу природы, в этом процессе всегда есть случайность (стохастические фракталы).

Теперь, переходя к обсуждению фрактальной размерности, напомним, что физическое содержание самого понятия размерности геометрического объекта, в том числе и фрактального, определяется изменением массы объекта (или числа составляющих его элементов) $M(L)$ с ростом его линейных размеров L [19, 20]. Если рассмотрим малую часть объекта с размерами λL ($\lambda < 1$), то для массы фрагмента получим [19]:

$$M(\lambda L) = \lambda^d \cdot M(L). \quad (5.21)$$

Решение функционального уравнения имеет простой вид [19]:

$$M(L) = \text{const} \cdot L^d. \quad (5.22)$$

Так, масса длинного провода меняется линейно с λ , т. е. $d = 1$. Для тонкой пластины мы найдем, что $d = 2$, а для бруска $d = 3$.

Такое «физическое» определение размерности, естественно, соотносится с интуитивно понятной возможностью деления объекта на части. Действительно, в соответствии с этим классическим подходом объект имеет n измерений, если его можно разбить на части гиперплоскостями, которые сами являются $(n-1)$ -мерными объектами. Так получаем рекуррентное определение размерности, которое предполагает, что объемы – части пространства, поверхности – границы объемов, линии – границы поверхностей, а точки – границы линий.

Будем считать объект, который можно воспроизвести путем увеличения какой-либо его части, самоподобным или инвариантным при преобразовании подобия, т. е. фракталом. Возвращаясь к функциональному уравнению (5.21), можно утверждать, что фрактальным, или самоподобным, объектам отвечают решения (5.22) с нецелым $d = d_f$. Таким образом, плотность $\rho(L)$ фрактальных структур уменьшается по степенному закону с ростом их линейных размеров L :

$$\rho(\lambda L) = \frac{M(L)}{(\lambda L)^d} = \lambda^{d_f-d} \cdot \frac{M(L)}{L^d} = \lambda^{d_f-d} \cdot \rho(L). \quad (5.23)$$

Последнее соотношение дает нам интуитивно понятное определение фрактального объекта: фракталом является структура с дырками на всех масштабах. Чем больше линейные размеры фрактала, тем больших размеров дырки мы в нем можем найти. Отсюда и следует падение плотности фрактала с ростом его линейных масштабов.

Хаотические режимы в сетях возникают при нарушении синхронизации, которая может восстанавливаться благодаря адаптивным процессам. Фрактальные свойства сетей организмов позволяют создавать тонко организованные, согласованные структуры живого при адаптивной самоорганизации сетей организмов [165].

5.4.2 Бифуркация в биосфере

Несомненным историческим фактом является и то, что появление живого вещества и эволюция живых организмов во все времена способствовала и эволюции биосферы.

Дарвиновская эволюция предполагает плавное, почти предсказуемое развитие процесса. Новый взгляд на эволюцию в костном, живом и социальном мирах отличается от дарвиновского учётом стохастичности, неопределённости и бифуркационных механизмов [163]. Существует даже гипотеза [162], что основной причиной смены видов, описанных в эволюционной теории Ч. Дарвина, было именно эволюционное изменение свойств биосферы через бифуркации, обусловленное самой эволюцией жизни на Земле.

Согласно законам синергетики, если противодействие при определенных условиях превысит некоторое критическое значение, может возникнуть бифуркация, т. е. реализуется состояние, не вытекающее однозначно из начальных условий [158].

Разработанная нами модель, описывающая синергетические механизмы эволюционных процессов, представленная на рис. 5.14, включает проявление в области бифуркаций наследственной изменчивости через автокатализ процесса мутаций на разных уровнях организации живых объектов.

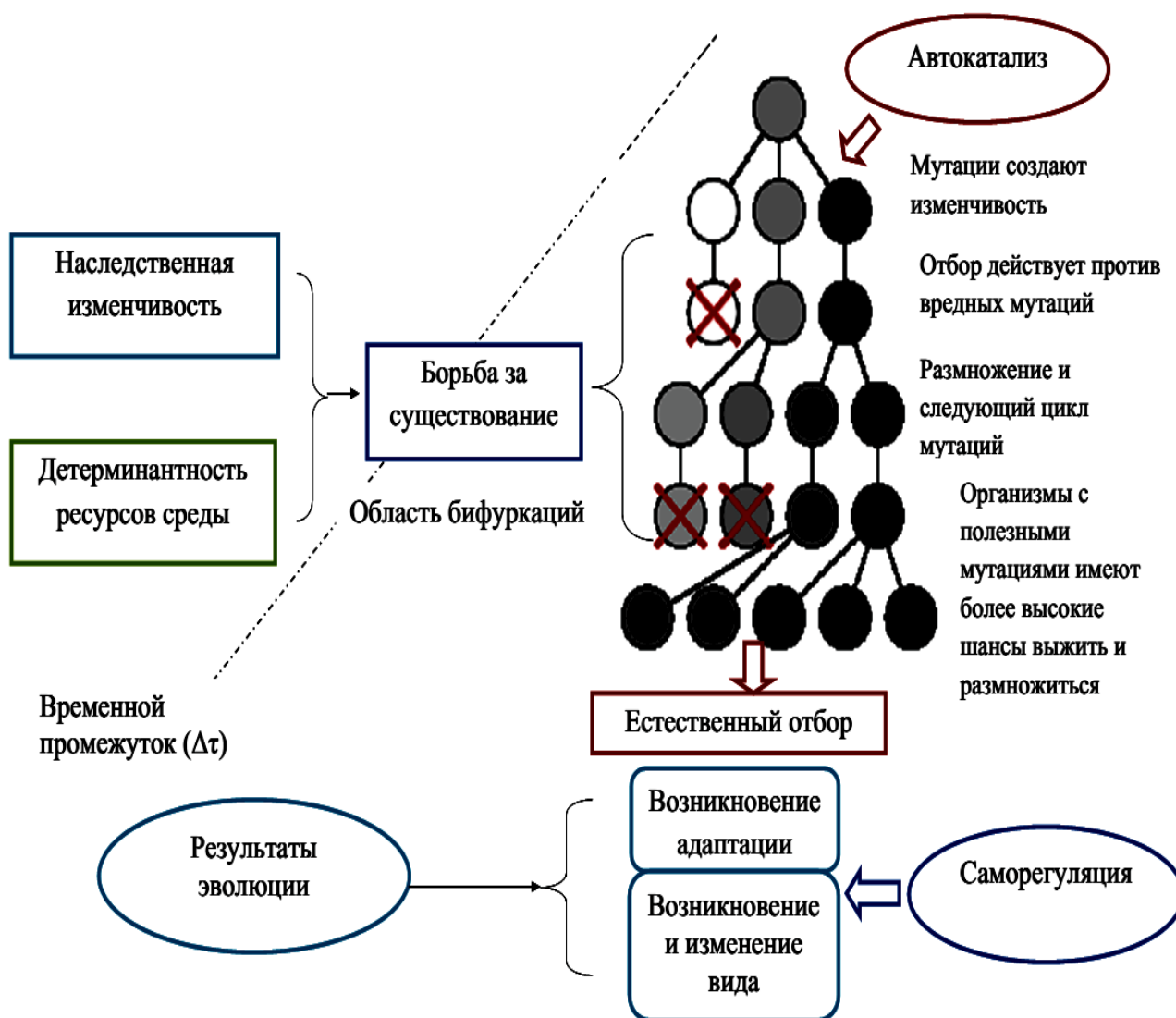


Рисунок 5.14 – Модель синергетических закономерностей эволюции видов в контексте традиционного континуального представления

При этом вследствие естественного отбора по средствам саморегуляторных функций вида происходит его адаптация к изменчивым условиям внешней среды с возможностью возникновения новых видов.

Последствия бифуркации могут оказаться не только непредсказуемыми, но и приведут к гибели популяции человека как вида в целом, как уже случалось раньше по тем или иным причинам с другими популяциями или видами живых организмов. Но вместе с тем нельзя забывать, что эволюция биосферы – это естественный процесс, и даже полный отказ от всех техногенных достижений человечества не сможет остановить эту эволюцию (а следовательно, и изменение физико-химических характеристик биосферы). Этот процесс будет продолжаться всегда (возможно, с иной скоростью), причем даже в том случае, если человечество как популяция вообще исчезнет с лица Земли, и антропогенное воздействие на окружающую среду прекратится [162].

Защита биосферы от «чрезмерной опасности» обеспечивается системой отрицательных обратных связей, действующих в рамках объективно существующих законов природы (II закона термодинамики, биогеохимических циклов, информационного многообразия и т. п.), которые были рассмотрены в главе 2, п. 2.1.

При анализе антропогенного влияния на биосферные процессы необходимо также учитывать те природные механизмы, которые заложены в организации и эволюции экосистемы на глобальном уровне. Поддающиеся современному математическому моделированию крупномасштабные (катастрофические по своим последствиям) воздействия человека на биосферу не исчерпывают всех реальных угроз повреждения или даже разрушения механизмов ее самоподдержания. Реакция на такие, казалось бы, слабые изменения среды (появление поллютанта, интродукции и т. д.) характерна в первую очередь для «живого вещества» биосферы – особей, видов, биоценозов [36]. Если изменения затрагивают те или иные граничные условия, обеспечивающие поддержание гомеостаза экосистемы, то со временем возможны существенные перестройки ее структуры и функции, вплоть до разрушения самой экосистемы.

Работа над моделированием биосферных процессов включает в себя как математические модели, так и экспериментальные исследования на реальных экосистемах и искусственных, и не только на микробном уровне, например, экспериментальные комплексы «Биосфера» (США) и БИОС (СССР, РФ).

5.4.3 Концепция адаптивной самоорганизации

Построение теории, способной предложить такие методы моделирования столь сложных объектов, как биосфера и ее экосистемы, возможно на основе творческого синтеза, который выполнен в Концепции адаптивной самоорганизации сложных природных систем (КАС), описанной в работах Ланкина Ю. П. и др. [165–168]. В КАС установлено, что вид аттрактивного ландшафта системы определяется связями (и другими коэффициентами) иерархической сети ее элементов. Они играют роль управляющих параметров в процессах самоорганизации системы.

Синергетика декларирует наличие аттракторов и аттрактивных ландшафтов, определяющих законы нелинейной динамики природных систем. Однако не обсуждаются причины появления аттракторов и способы их формирования. Для решения этой фундаментальной проблемы в КАС введено понятие самоорганизации управляющих параметров. Динамическую самоорганизацию аттрактивного ландшафта предложено осуществлять алгоритмами адаптивной самоорганизации (самостоятельной адаптации), разрабатываемыми в рамках КАС. Разработку и апробацию таких алгоритмов удобно вести на базе методологии нейронных сетей. Парадоксально, но рост сложности и точности упрощает анализ поведения моделей, поскольку самоорганизация «сжимает» сложность до небольшого числа степеней свободы. Другие соответствия с экосистемами проявляются в росте устойчивости модели с ростом ее сложности и в идентичности процессов самоорганизации на всех уровнях иерархии экосистем. Появляется возможность выхода за так называемый «горизонт прогноза», постулированный теорией «русел и джокеров», обусловленный, вероятно, простотой используемых моделей.

Аттрактивный ландшафт представляет собой взаимосвязанное сообщество таких инвариантных многообразий и индивидуален для конкретной экосистемы, а также для биосферы в целом (и их моделей в КАС).

Он отражает инвариантные свойства экосистемы при различных изменениях (трансформациях) внешних условий, то есть является ее индивидуальным портретом на фоне предлагаемой общности подхода к описанию экосистем так же, как представитель определенного вида обладает присущими лишь ему индивидуальными особенностями поведения. При необходимости реакции на новые условия он изменяется, но в целом сохраняет свои свойства. Например, на сплошных вырубках аттрактивный ландшафт

формируется на основе формирования связей (взаимозависимостей) между видами в процессе формирования древостоя и устойчив для зрелого леса.

С ростом сложности моделей КАС (числа уравнений и связей – аналог биоразнообразия) растут богатство возможностей и устойчивость (усложняется аттрактивный ландшафт), что отличает их от классических редуccionистских моделей и роднит с реальными экосистемами. Это прямое следствие использования в моделях фундаментальных принципов организации биосферы и ее экосистем.

Особенностью моделей КАС является присутствие в них методов адаптивной самоорганизации, отражающих соответствующие фундаментальные свойства экосистем. Их использование настолько облегчает формирование моделей, что появляется возможность моделировать рост конкретного леса с точностью до дерева, если имеются соответствующие данные.

Методы (алгоритмы) адаптивной самоорганизации разработаны для настройки нейронных сетей на основе алгебраических уравнений, функционирующих в дискретном времени. Но их можно изменить для моделирования непрерывного времени, что необходимо для решения систем дифференциальных уравнений. Напомним, что в данном случае модель представлена адаптивной сетью, например, состоящей из видов деревьев в экосистеме. Способность генерации сетью любой непрерывной функции предоставляет возможность формирования нелинейных аттрактивных ландшафтов путем неявного автоматического их формирования в процессе адаптивной самоорганизации модели экосистемы. Кроме того, возникает возможность построения пространственно-временных моделей экосистем и биосферы в целом, создаваемых по реальным наземным и спутниковым данным, а также значительно облегчается сопряжение этих данных.

В экспериментах с рассматриваемыми сетевыми моделями наблюдались также сценарии перехода от порядка к хаосу, возникающие при нарушении условий стационарности модели экосистемы. В результате возникающей при этом самоорганизации или адаптивной самоорганизации возникают сценарии перехода от хаоса к порядку, если это позволяют условия моделирования. Это еще один важный аспект для изучения границ устойчивости биосферы и ее экосистем. Однако полученные результаты требуют более глубоких исследований, включающих изучение возникающих фрактальных свойств.

С математической точки зрения, нелинейные уравнения, описывающие эволюцию структур в открытых нелинейных средах, обладают инвариантно-групповыми решениями. Инвариантные решения в этом случае осуществляют

связь пространства и времени. Это обстоятельство, в свою очередь, создает возможность находить элементы прошлого и будущего в реальных структурах нелинейного мира. По определению инвариантные решения сохраняются в процессе эволюции. Следовательно, они содержат в себе информацию обо всех стадиях эволюции структур, а значит, если понять, как от инвариантных решений перейти к реальным переменным, то можно развернуть собранные в инварианты пространство, время и архитектуру структуры. В этом случае все стадии эволюции оказываются связанными определенными пространственно-временными преобразованиями. С этих позиций пренебрегать математическим моделированием не стоит.

Важно лишь понимать, что моделирование позволяет прогнозировать наиболее вероятные, возможные пути эволюции, но не обязательно реализованные или реализуемые в будущем. Значение экологического прогноза, особенно в природопользовании, трудно переоценить. Главной целью прогноза является оценка предполагаемой реакции окружающей природной среды на прямое или опосредованное воздействие человека, а также решение задач будущего рационального природопользования.

При планировании использования тех или иных источников энергии необходимо учитывать не только суммарное экологическое воздействие техногенных факторов на окружающую среду, но и рассматривать обратные связи, разрушение которых может привести к потере устойчивости состояния биосферы и, как следствие, к очередной бифуркации.

5.5 Антропогенный фактор и динамическое равновесие в экосистеме

Антропогенный фактор – результат непосредственного воздействия человека на окружающую природную среду, приводящее к нарушению естественных экосистем.

При антропогенном воздействии природное течение процессов нарушается, наносится вред *автоэволюции* планеты. В целом эти воздействия в планетарном масштабе можно разделить на три направления:

- 1) уничтожение геологических тел и их взаимосвязей;
- 2) деформация геологических тел и их взаимосвязей;
- 3) создание антропогенных систем и их взаимосвязей.

Автоэволюция (от греч. autos – сам) – это эволюция, которая протекает не по исходным природным законам, а направляется самим объектом эволюции [17]. Озоновый слой создавался и существовал в рамках природных процессов, представленных на рис. 5.15. Этот слой был органической частью

функционирования общей геолого-геофизической системы газоплазменного состава.

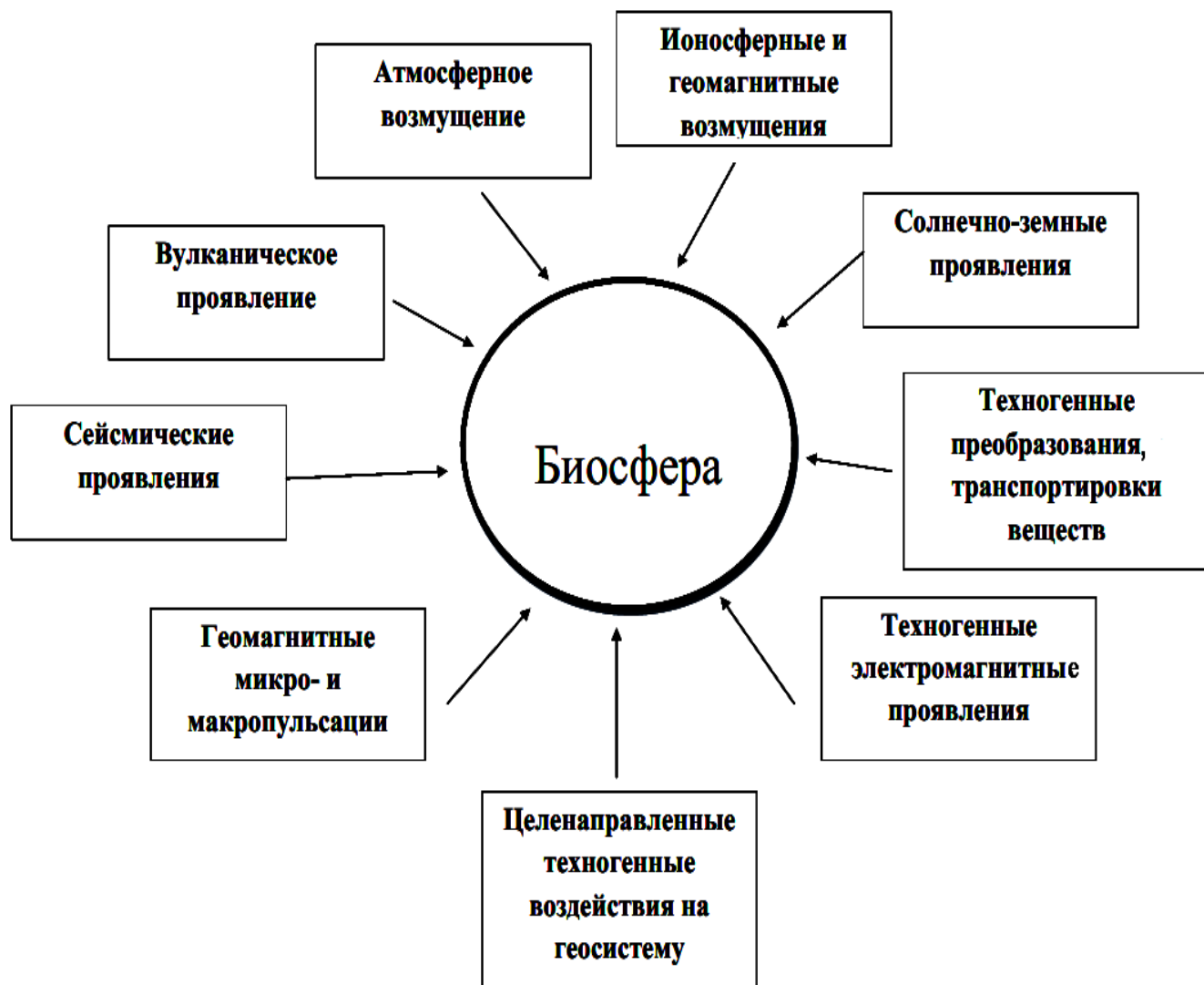


Рисунок 5.15 – Антропогенный фактор в геофизическом масштабе взаимосвязи с биосферными процессами

С появлением конкурирующих техногенных процессов (рис. 5.16) гомеостаз природных систем начал трансформироваться в новую модификацию. Ископаемая энергия планеты вовлекалась в современные экосистемные процессы путем антропогенной деятельности. Общая энергоёмкость, скорость преобразования веществ и его масштабы стремительно нарастают в пределах геолого-геофизического набора процессов.

На рисунке 5.16 представлена разработанная нами блок-схема влияния антропогенного фактора на процессы в экосистеме [132]. При этом антропогенный фактор рассматривается как сопредельная среда, являющаяся частью непрерывной внешней среды с флуктуационными процессами,

протекающими в ней. В данном контексте антропогенный фактор становится геологической силой и применяется нами как форма техногенного фактора, так как практически все области деятельности человека носят все более индустриальный характер.

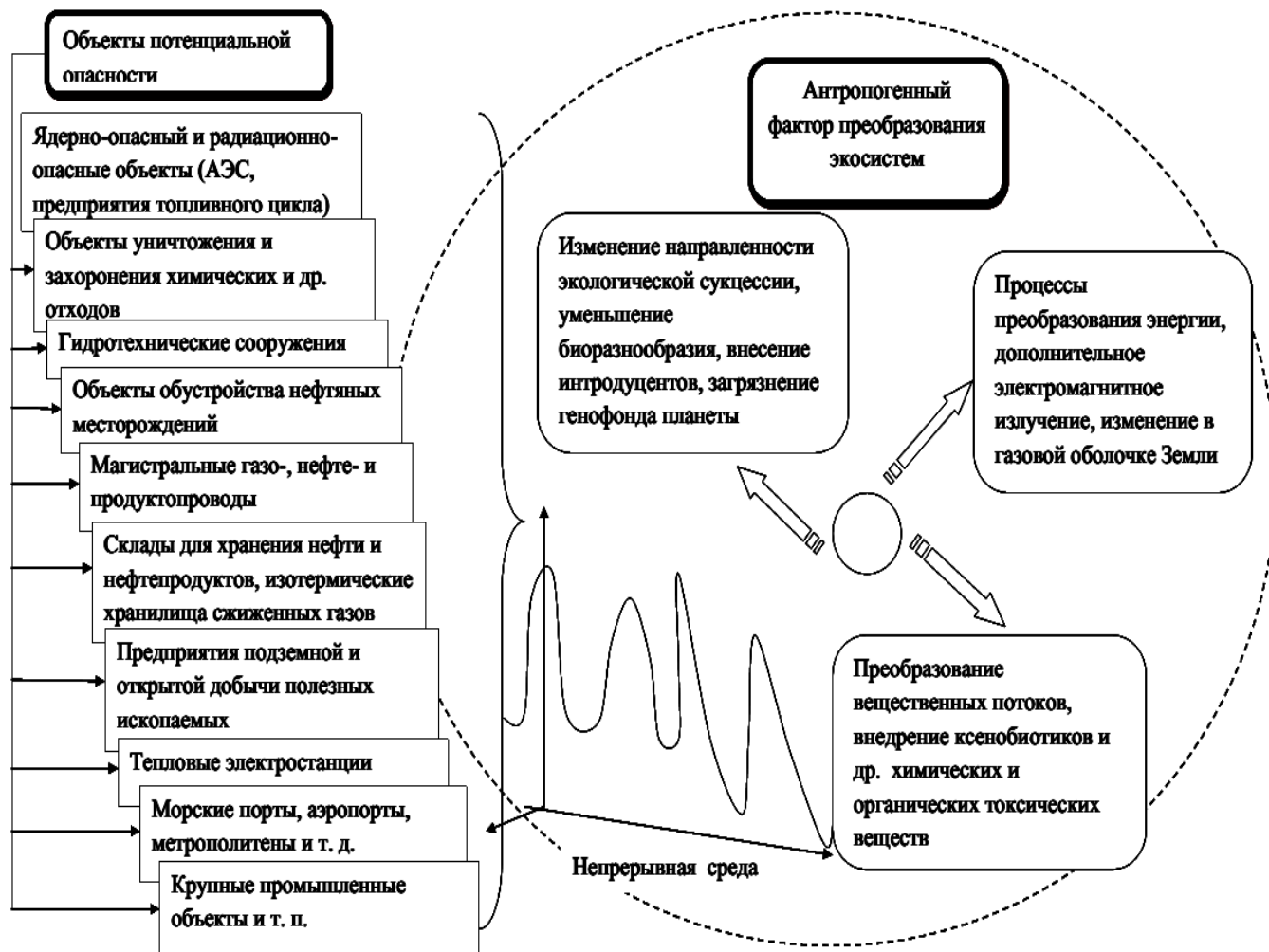


Рисунок 5.16 – Антропогенный фактор в формировании направленности процессов в экосистеме (Л. Д. Пляцук, Е. Ю. Черныш, 2014) [132]

Естественные геолого-физические и биосферные процессы вытесняются технологическими процессами. Формирующиеся техногенные связи деформируют вещественные, энергетические и информационные потоки в биосфере и в земных оболочках. Такое положение дел на Земле ощущается не только микромиром биосферы, но и микропроцессами стратосферы, а именно состоянием озонового слоя, среагировавшего на измененную химическую среду. Именно нарушение солнечно-земных взаимосвязей антропогенной деятельностью выявляет наиболее тонкие звенья этой взаимосвязи – генерацию и распределение озона. Биосферный реактор Земли вовлечен во все эти

процессы, изменяясь при этом приходя в новое состояние. Тогда воспользовавшись принципом Ле Шателье – Брауна о возникновении в системе противодействия техногенному давлению, при его нелинейности, система может перейти в новое состояние через бифуркацию, т. е. реализуется состояние, не вытекающее однозначно из начальных условий, и соответственно которое нельзя предсказать однозначно.

Человек, преобразуя окружающий мир, изменяет в нем порядок. Земля же, как и любая незамкнутая система, обладает собственным критическим уровнем организации, значение которого зависит от ее степени открытости по отношению к космосу. Согласно приведенным выше закономерностям, если биосфера организована ниже критического уровня, то в ней должны преобладать процессы самоорганизации, если выше – процессы дезорганизации. В первом случае человечество, преобразуя окружающий мир, в целом больше увеличивает в нем порядок, чем беспорядок. Это будет продолжаться до тех пор, пока, создавая, оно не превысит критический уровень организации планеты [45]. В этом случае процессы дезорганизации окажутся преобладающими, вероятность разрушительных событий повысится, и излишек, который человечество построило, выйдя за критический уровень, будет уничтожен (или будет скомпенсирован разрушениями в окружающей среде).

Положение о критическом уровне организации приводит к следствию: при превышении этого уровня (точнее при переходе через него) в системе могут возникнуть энтропийные колебания, представляющие собой чередование периодов преобладающего разрушения и преобладающего упорядочения. Причина возникновения энтропийных колебаний связана с фундаментальным положением о том, что скорость любого взаимодействия конечна [17, 18]. Здесь по [45] предполагается следующее: действия процессов самоорганизации и дезорганизации уравнивают друг друга только на критическом уровне организации системы. Если последняя организована ниже или выше него, то она будет стремиться к этому уровню, т. е. в ней соответственно будут преобладать процессы самоорганизации или дезорганизации. При достижении критического уровня преобладание процессов того или иного вида не сможет прекратиться мгновенно. Поэтому если скорость указанных процессов не близка к нулю, то система по инерции перейдет за критический уровень своей организации и окажется в области преобладания процессов другого вида. Эти процессы будут возвращать систему опять к критическому уровню, но теперь уже в обратном направлении и т. д. Если по какой-либо причине скорость указанных процессов уменьшается с течением времени, то уменьшается и амплитуда энтропийных колебаний. В результате через некоторое время система придет к критическому уровню своей организации и станет стабильной. Наоборот, если скорость процессов увеличивается с

течением времени, то растет и амплитуда энтропийных колебаний, что может закончиться разрушением системы.

ГЛАВА 6

СИНЕРГЕТИКА ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

6.1 Синергия проектирования: моделирование взаимодействия загрязнения с окружающей средой

Термин «*проектирование*» имеет разные формулировки в зависимости от характера применения [169–171]:

– деятельность по осмысливанию будущего преобразования действительности с учетом природных и социальных законов на основе выбора и принятия решений, направленных на удовлетворение каких-либо человеческих потребностей;

– процесс, в ходе которого создается прототип, прообраз необходимого объекта, то есть проект;

– это уточнение результатов анализа, направленное на оптимизацию с учетом ограничений, накладываемых нефункциональными требованиями, средой реализации и т. д.

Экологическое проектирование – это комплекс проектных разработок, необходимых при решении задач в сфере охраны окружающей среды и природопользования [172].

Технологическое проектирование предназначено для разработки оптимальных технологических решений и параметров работы технологических систем в различных отраслях промышленности. В экологической трактовке проектируемые технологические решения и разработки должны отвечать принципам экологической безопасности и безотходности (малоотходности), а также энергоэффективности.

Изучение «беспорядка», хаоса – одно из направлений проективной синергетики. Другое направление – учет малых колебаний – означает, что из флуктуаций возникают новые макроструктуры, и, наоборот флуктуации могут разрушить большие организованные структуры. Для контекста синергетики проектирования имеет значения следующий *синергийный эффект*: микроскопические изменения могут влиять на громадные организации. В этом эффекте проявляется то, что обратимость присуща лишь замкнутым системам, необратимость – всей остальной части Вселенной [23].

Синергия проектирования в прикладном аспекте направлена на разработку различных решений (технических, технологических, информационных, организационных и т. д.), которые основаны на синергетических законах функционирования сложных систем.

Предположим, что имеется точечный источник загрязнения, окруженный некоторой однородной окружающей средой. В начальный момент времени происходит выброс загрязнения в окружающую среду концентрации u_0 . Через фиксированный промежуток времени T концентрация загрязнения уменьшится, так как происходит естественная диссипация загрязнения и, кроме того, окружающая среда абсорбирует и поглощает загрязнение. Таким образом, рекуррентное уравнение имеет вид [28]:

$$u_1 = f(u_0, T), u_1 < u_0, \quad (6.1)$$

или для произвольного момента времени [28]:

$$u_{t+1} = f(u_t, T). \quad (6.2)$$

Данная функциональная зависимость получена экологами экспериментально, и имеет вид, представленный на рис. 6.1. Называют эту зависимость *кривой деструкции*. Вид кривой деструкции обусловлен тем, что до некоторого значения концентрации загрязнения u^* окружающая среда активно вступает в реакцию с загрязнением, затем происходит насыщение, имеет место пороговый эффект. Величина ε обозначает постоянный фон загрязнения, который всегда существует.

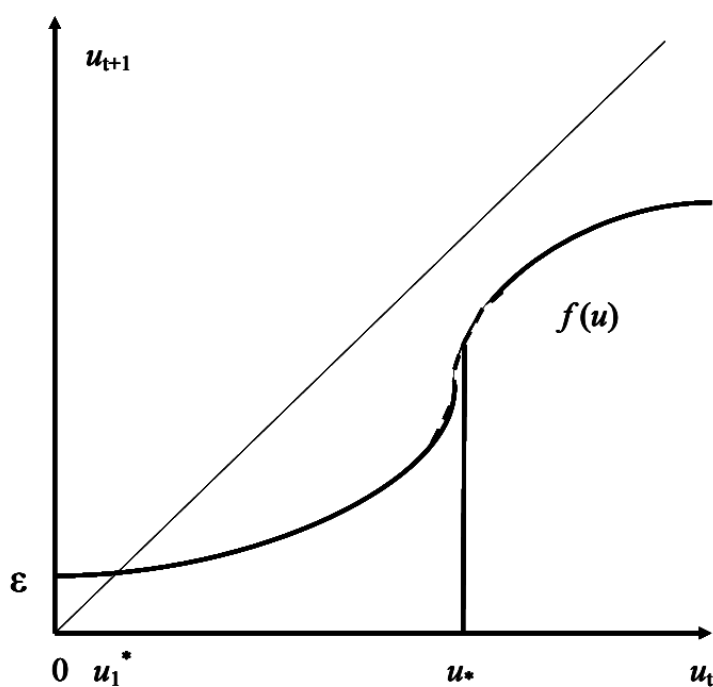


Рисунок 6.1 – Кривая деструкции

Необходимо отметить, что вид кривой деструкции сильно зависит от выбранного промежутка времени между измерениями концентраций T . Если взять T очень маленьким, то кривая деструкции будет просто биссектрисой первого координатного угла (сколько выбросили – столько осталось), если взять T достаточно значительным, то как бы не была велика начальная концентрация загрязнения, оно после T единиц времени будет мало – кривая деструкции будет стремиться к оси абсцисс. Поэтому величина T выбирается из соображений наглядности, так, чтобы отразить основные качественные черты кривой деструкции. Далее не будет указываться явно то, что отображение зависит от T .

Прежде чем переходить к математическому анализу модели взаимодействия загрязнения с окружающей средой, сделаем несколько замечаний. Во-первых, кривая деструкции в общем виде может быть получена экспериментально, например, при чрезвычайно значительных выбросах загрязнения (это может быть, например, ядерный взрыв). Во-вторых, понятно, что наблюдения не ложатся в точности на изображенную на рис. 6.1 кривую, образуя некоторое облако значений, окружающее кривую деструкции, которая получается только как аппроксимация измеренных величин. В-третьих, термины «загрязнение» и «окружающая среда» могут быть конкретизированы в каждом конкретном случае по-своему. Например, под загрязнением можно понимать выбросы промышленного предприятия, заболачивание, вырубку лесов и многое другое. Основное требование к «окружающей среде» состоит в том, что она должна быть достаточно однородной во времени, чтобы рассматриваемая модель оказалась применимой. Приведенные замечания необходимы для проверки вопроса применимости предложенной модели (кривой деструкции) к различным экологическим системам.

Кривая деструкции является одномерной дискретной динамической системой, которая имеет единственную устойчивую неподвижную точку u_1^* , так как из вида кривой следует, что $0 < f'(u_1^*) < 1$. Точнее, u_1^* – глобальный аттрактор рассматриваемой динамической системы, так как любая орбита будет сходиться к этому положению равновесия [66].

Пусть теперь выбросы загрязнения происходят через равные промежутки времени. Имеет место следующий итеративный процесс. Пусть $f_i(u)$ обозначает зависимость между выброшенной и оставшейся концентрацией загрязнения на i -м шаге. Тогда получаем последовательность функций

$$\begin{aligned}
f_1(u) &= f(u) \\
f_1(u) &= f(u + f_1(u)) \\
&\dots \\
f_n(u) &= f(u + f_{n-1}(u)) \\
&\dots
\end{aligned}
\tag{6.3}$$

Утверждение. Пусть кривая деструкции $f(u)$ обладает свойствами:

- 1) $f(u + du) > f(u)$;
- 2) $f'(u) > 0$;
- 3) $f''(u) > 0, u > u_*, f''(u) < 0, u < u_*$;
- 4) $f''(u)$ монотонна на промежутке (u_1, u_*) ,

где u_1 определено ниже. Тогда $g(u) = f(u + f(u))$ обладает теми же свойствами для некоторых новых точек \tilde{u}_* и \tilde{u}_1 .

Доказательство. $g(u + du) = g(u)$ из 1°.

$g'(u) = f'(u + f(u))(1 + f'(u)) > 0$ из 2°. Рассмотрим

$$g''(u) = f''(u + f(u))(1 + f'(u))^2 + f''(u)f'(u + f(u)). \tag{6.4}$$

Отсюда $g''(u_*) < 0$ (напомним, что u_* – точка перегиба функции $f(u)$).

Пусть u_1 – решение уравнения $u + f(u) = u_*$ (в силу 1° такая точка всегда существует, причем $u_1 < u_*$).

Покажем, что $g''(u)$ монотонна на (u_1, u_*) . Рассмотрим

$$g''(u + du) = f''(u + f(u) + O(du))(1 + f'(u))^2 + f''(u + O(du))f'(u + f(u) + \varphi(u) + O(du^2)), \tag{6.5}$$

где $\varphi(u) < 0$ при $u \in (u_1, u_*)$. Символом $O(du)$ обозначена величина одного порядка малости с du . Сравнивая полученное выражение с $g''(u)$, можно увидеть, что $g''(u + du) < g''(u)$, то есть монотонна. Кроме того, $g''(u_1) > 0$. Следовательно, на отрезке (u_1, u_*) $g''(u)$ имеет ровно один корень, функция $g''(u)$ имеет единственную точку перегиба $\tilde{u}_* < u_*$.

Приведенное утверждение показывает, что при многократном выбросе зависимость между выброшенной и оставшейся концентрацией загрязнения на i -м шаге качественно эквивалентна кривой деструкции в том смысле, что она имеет единственную точку перегиба.

6.2 Оптимизация работы природно-технической системы на примере агропромышленного комплекса

6.2.1 Эксергетический подход к эффективности функционирования агроэкосистемы

В основе синергетической методологии разработки энергосберегающих экологически безопасных технологий взят принцип эксергии. Эксергия представляет собой важный универсальный показатель эффективности энергоресурсов и производимой продукции, а эксергетическая методология может привести к переходу от индустриального общества к технологическому на основе синергетических законов развития сложных систем (см. главу 2, п. 2.3).

Как пример рассмотрим применение принципов эксергии для экологизации аграрно-промышленного комплекса (АПК).

Специализация агроэкосистемы способствует нарушению природного равновесия. Если в природной экосистеме все виды приспособлены друг к другу с точки зрения трофических, хорологических и иных связей так, что в целом они обеспечивают замкнутость циклов круговорота веществ, то в агроэкосистеме эти связи нарушены. Отсюда возникает необходимость подпитки агроэкосистемы значительными добавками элементов питания.

Обеднение агроэкосистемы биологическими видами в любой момент времени может привести к разбалансировке многих экологических процессов, что заставляет компенсировать эту «экологическую бедность» введением севооборотов, т. е. обеспечивать вместо одновременного сосуществования на одном поле многих видов их «развертку» во времени и в пространстве [173]. Таким образом, в отличие от природных биоценозов, существование агротехноценозов естественным образом предполагает целенаправленную антропогенную деятельность.

Агротехноценоз – система, объединяющая природные и техногенные компоненты, часть из которых (посевы, насаждения, почвенно-климатические факторы) рассматриваются как самоорганизующиеся объекты [107].

Агротехноценозы – сложные открытые диссипативные системы, непрерывно изменяющиеся по законам самоорганизации, ограниченные в пространстве и времени, функционирующие в единстве с самоорганизующейся внешней средой – климатическими и почвенными условиями конкретного региона. В данном случае этот термин применяется как аналог агроэкосистемы.

Агроэкосистемы специфичны не только с точки зрения круговорота веществ. Энергетический цикл в них также складывается иначе, чем в природе.

Если естественные энергетические процессы происходят в двух поясах – «зеленом» и «коричневом» – и обусловлены притоком солнечной энергии, то для агроэкосистем характерно значительное внешнее энергетическое воздействие со стороны обрабатывающих машин и агрегатов [173].

Их использование в рамках технологии возделывания культуры по существу обеспечивает специализацию агроэкосистемы и рост ее продуктивности.

По анализу Ю. Одума [88], увеличение энергозатрат на гектар пашни от 0,7 до 7,5 кВт приводит к увеличению урожаев от 2 до 9 т/га. Из сказанного следует, что для исследования продукционного процесса агроэкосистем необходимо развитие синергетического подхода.

Главным процессом аграрного производства является биоэнергетический процесс преобразования энергии организмами: солнечного излучения – растениями энергии кормов – животными. На основе принципа подчинения синергетики в ГНУ ВИЭСХ [107, 108, 174] разработано *энергетическую модель АПК и приборное определение эксергии солнечного излучения в отношении фотосинтеза растений*. В этой динамической модели в качестве переменной порядка принята свободная энергия Гиббса, которая тождественна величине эксергии солнечного излучения в отношении фотосинтеза растений. Все иные переменные и параметры при дальнейшем анализе рассматривают как параметры управления. Каждый из них учитывают по мере приближения его значения к относительному минимуму. Так, например, из общего количества энергий, участвующих в получении продукции растениеводства, 97–98 % приходится на солнечную энергию и только 2–3 % – на техногенную. В связи с этим последнюю можно рассматривать как энергию управления.

Из схемы (рис. 6.2) видно, что свободная энергия при различном преобразовании ее оценивается как на входе в преобразователь, так и на выходе из него.

Теоретически «предельное» значение эксергии солнечного суммарного излучения (прямое + рассеянное) составляет 20 % от энергии излучения, поступающей на поверхность земли [174].

Только при такой оценке можно установить биоэнергетический КПД преобразователей по формуле [107]:

$$\eta = 1 - \left(\sum_{i=1}^N \mathcal{E}_i^{\text{II}} / \sum_{i=1}^M \mathcal{E}_i^{\text{бвх}} \right), \quad (6.6)$$

где суммарная величина потерь эксергии равна разности входящих \mathcal{E}_i^{ex} и выходящих \mathcal{E}_i^{ex} эксергий [107]:

$$\mathcal{E}^{\Pi} = \sum_{i=1}^N \mathcal{E}_i^{ex} - \sum_{i=1}^M \mathcal{E}_i^{ex}. \quad (6.7)$$

На основе этой модели впервые осуществлено количественное (аналитическое) взаимно согласованное определение ключевых агроэкологических величин [108, 174]: агроклиматического (биоклиматического) и мелиоративных потенциалов земельных угодий, их плодородия, а также продуктивности растений в заданных экологических условиях. Все эти величины выражены в одинаковых единицах свободной энергии – эксергии солнечной энергии для растениеводства.

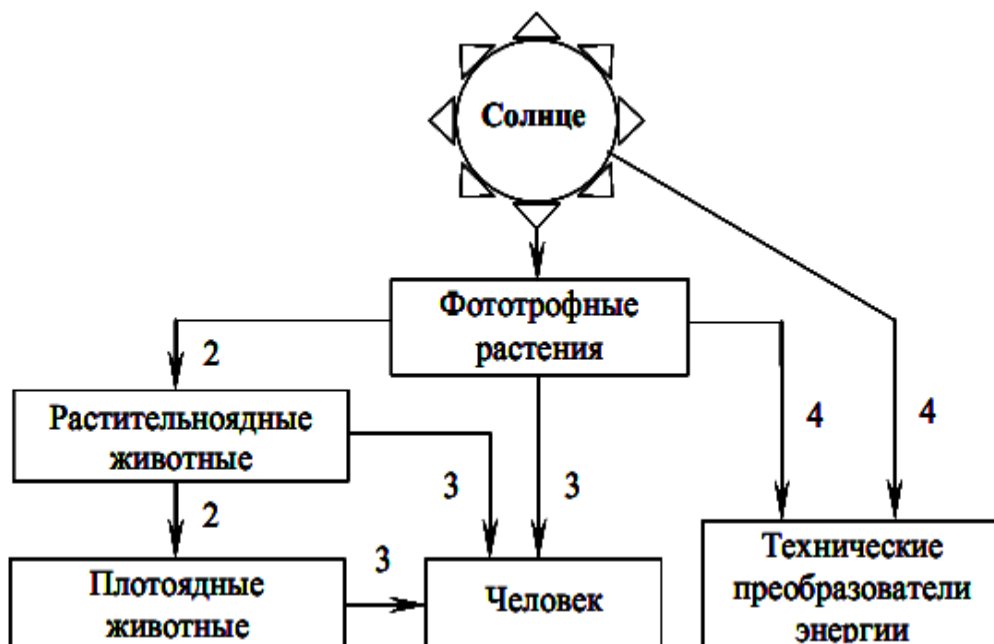


Рисунок 6.2 – Схема количественной оценки качества (превратимости) энергии на входе в биологические и технические преобразователи энергии: 1 - эксергия энергии солнечного излучения в отношении фотосинтеза растений (энергия излучения); 2 – эксергия кормов; 3 – эксергия (калорийность) пищи; 4 – эксергия первичных источников энергии, используемых техническими преобразователями (М. В. Соколов, 1982) [175].

Такое определение агроэкологических величин обеспечило возможность разработки компьютерной системы экологосовместимой, энергоресурсосберегающей оптимизации производства продукции растениеводства.

6.2.2 Приборное оформление процесса управления агротехноценозами в различных экологических условиях

Принципиальная последовательность управления агротехноценозами основывается на принципе энергетической экстремальности самоорганизации и состоит в следующем.

В ходе автоматического управления продукционным процессом растений в многофакторной системе «растение – окружающая среда» из большого числа переменных выбирают одну, наиболее быстро изменяющуюся и наиболее сильно влияющую на процессы в системе (переменную порядка). Для агротехноценозов, как ранее было обосновано, – это суммарная эксергия оптического излучения в отношении фотосинтеза растений. Все иные параметры и переменные в дальнейшем рассматривают как параметры управления, с помощью некоторых из них возможно осуществить воздействия на продукционные процессы растений (температура, влажность воздуха, влажность почвы, концентрация минеральных элементов корневого питания). Измеряют значение переменной порядка. По тестовой базе фактических состояний определяют, какой из параметров управления находится в относительном минимуме, т. е. изменение какого из параметров управления приведет к наибольшей реализации переменной порядка.

Блок-схема устройства, реализующего указанный процесс управления, приведена на рис. 6.3 [108].

Устройство содержит датчик мощности эксергии оптического излучения 1, таймер 2, блок вычисления расчетной величины суммарной эксэргии 3, блок памяти 4, компаратор 5, управляющий логический коммутатор 6, датчик температуры окружающей среды 7, датчик температуры воздуха 8, датчик влажности почвы 9, управляющие ключи 10, 11, 12, 13, 14.

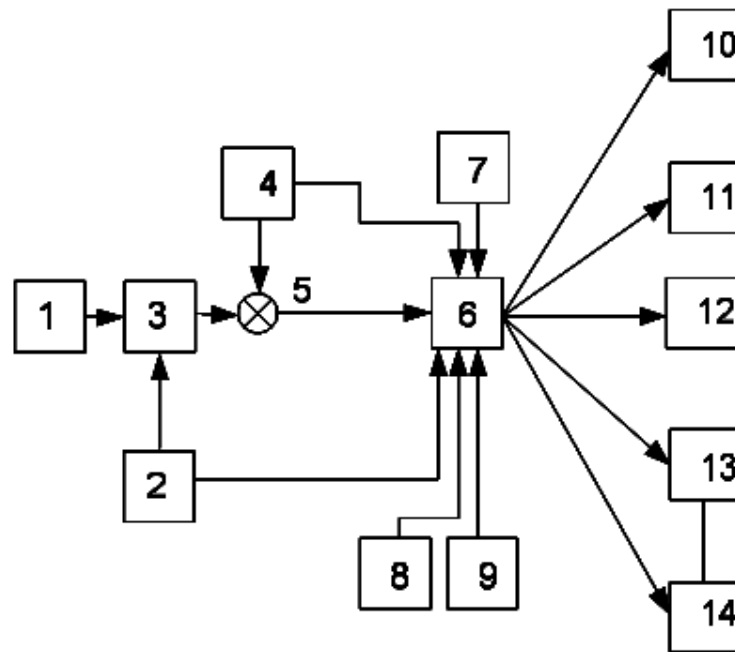


Рисунок 6.3 – Устройства управления агропроцессами с учетом потенциальной продуктивности растений (А. М. Башилов и др., 2013) [108]

При работе устройства через промежутки времени, устанавливаемые таймером, определяют значения параметров управления и переменной порядка. В банк данных устройства заложены ретроспективные значения переменной порядка и параметров управления, определяющие оптимальные значения параметров управления, а также тесты физиологического состояния растений. Указанная информация совместно с оперативными данными, получаемыми в ходе процесса, используют для определения тенденций изменения мощности эксергии в ходе реализации управления, а также для выбора параметра управления, находящегося в области относительного минимума, изменение которого наиболее актуально в данный момент времени. Уточнение значений параметров управления производится на каждом шаге мониторинга процесса.

Подобная система управления позволяет также устанавливать уровень эффективности (точности, оптимальности) агротехнологии с учетом экологических условий конкретных земельных угодий. Для этого:

- по результатам завершения полного цикла получения урожая по оцениваемой технологии устанавливают реальный урожай, выражаемый в эксергетических единицах ($e_{рпц}$);
- рассчитывают теоретическое значение потенциально возможного урожая в заданных экологических условиях в эксергетических единицах ($e_{тпв}$);

– проводят сопоставление реально полученного урожая (продуктивности) с расчетным (теоретически возможным) значением в тех же экологических условиях по выражению [161]:

$$E (\%) = e_{\text{рпц}} / e_{\text{тпв}}, \quad (6.8)$$

где E – показатель уровня эффективности – оптимальности агротехнологии; $e_{\text{рпц}}$ – реальный урожай в эксергетических единицах; $e_{\text{тпв}}$ – теоретическое значение потенциально возможного урожая в заданных экологических условиях в эксергетических единицах;

– отклонение от 100 % характеризует меру несоответствия оцениваемой агротехнологии в данных экологических условиях земельного угодья, значение этого отклонения характеризует уровень, возможности дальнейшего совершенствования агротехнологии в существующих экологических условиях земельного угодья.

До настоящего времени в управлении продукционным процессом организмов непосредственно не учитывают генетическую информацию организмов, очевидно, из-за отсутствия данных по идентификации генетических структур с эколого-физиологическими свойствами организмов. Возможность такой идентификации уже появилась и возникает необходимость непосредственного учета в управлении продукционным процессом генетической информации продуцентов. Безусловно, в структурах генетической информации содержатся элементы, отображающие свойства идеальной направленности прогрессивной эволюции.

Для общих систем оптимального управления в АПК и природопользовании рассмотренных целевых функций, очевидно, недостаточно. Целевые функции этих систем оптимального управления в АПК должны также отражать упомянутые выше идеальные свойства прогрессивной эволюции самоорганизующейся природы. Начальной составляющей теории оптимального управления АПК, исходя из вышерассмотренного, должна быть биотехноэнергетическая модель. Разработка такой модели возможна на основе принципа подчинения синергетики. Сущность этого принципа в том, что для удобства анализа сложной системы с многими параметрами и переменными в ней выбирают в качестве «переменной порядка» ту из переменных, которая наиболее быстро изменяется и наиболее сильно влияет на основной процесс изучаемой системы.

6.3 Биогазовая технология утилизации органических отходов

6.3.1 Моделирование процесса деструкции в анаэробном биореакторе: повышение эффективности метанообразования

Деструкция органики в биореакторе рассматривается как аналог процессов, происходящих в природной водной среде, хотя и с меньшей интенсивностью.

В случае сбалансированного превращения органического вещества в метан именно гидролиз лимитирует общую скорость трансформации. При этом образование метана соответствует реакции 1-го порядка, поскольку численность микроорганизмов гидролитиков и соответствующих гидролитических ферментов велика, а промежуточные продукты не накапливаются. Допуская, что превращение субстрата в метан сопровождается появлением лишь одного промежуточного продукта – летучих жирных кислот, В. А. Вавилиным [27] была предложена следующая система дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dW}{dt} = -kWf_b(S), \end{array} \right. \quad (6.9)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dS}{dt} = \chi kWf_b(S) - \rho_m f_m(S) \frac{SB}{K_S + S}, \end{array} \right. \quad (6.10)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dB}{dt} = Y \rho_m f_m(S) \frac{SB}{K_S + S} - k_d B, \end{array} \right. \quad (6.11)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP}{dt} = (1-Y) \rho_m f_m(S) \frac{SB}{K_S + S}, \end{array} \right. \quad (6.12)$$

где W , S , B – концентрации органического вещества, летучих жирных кислот и метаногенной биомассы соответственно; dP/dt – скорость продукции метана; t – время; k – константа скорости гидролиза; ρ_m – максимальная удельная скорость утилизации летучих жирных кислот; k_d – константа скорости распада метаногенной биомассы; χ – стехиометрический коэффициент; K_S – константа полунасыщения для утилизации летучих жирных кислот; Y – экономический коэффициент.

В этой системе утилизация летучих жирных кислот описана традиционной функцией Моно, а гидролиз органического вещества – функцией

1-го порядка по субстрату. Безразмерные функции $f_h(S)$ и $f_m(S)$ описывают ингибирование метаногенеза и гидролиза высокой концентрацией летучих жирных кислот соответственно.

Таким образом, в биореакторе (ферментере) происходит два встречных процесса гидролиза: окисление под воздействием гидролизных бактерий с образованием ЛЖК и процесс переработки жирных кислот метанообразующими бактериями с выделением метана и углекислого газа.

Биореактор является основным устройством при разработке аппаратного оформления биотехнологического производства. Пример технологической схемы такого производства представлен на рис. 6.4 [176].

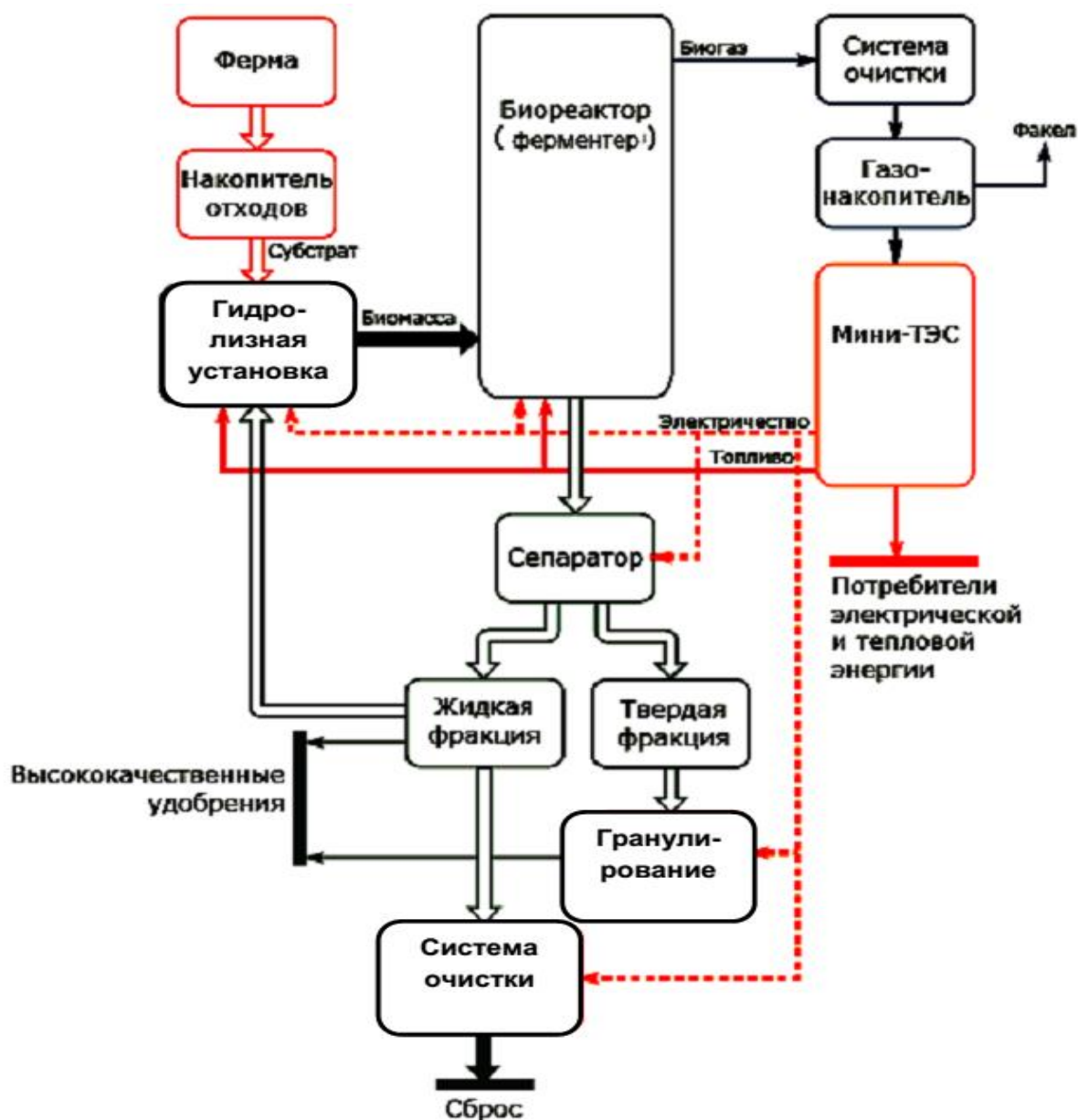


Рисунок 6.4 – Принципиальная схема биотехнологического производства [176]

Гидролитические микроорганизмы представляют собой весьма стойкие колонии, которые очень быстро размножаются в питательной среде. Нормальным является удвоение их числа в течение нескольких часов. Метанообразующие бактерии размножаются гораздо медленнее. При этом в системе может возникнуть ситуация высокого выхода ЛЖК, которые не успевают переработать вторичные анаэробы. Это приводит к падению показателя рН среды в биореакторе и в критической ситуации к прекращению метанообразования. Чтобы этого не происходило, процесс гидролиза можно регулировать автоматикой при автоматизации подачи питательных веществ в отдельный отсек биореактора.

Для увеличения количества вторичных анаэробных бактерий и нейтрализации кислотности в ёмкости предварительной подготовки используются отработанные жидкие биоудобрения (щелочная среда).

6.3.2 Центры инициации метаногенеза и влияние интенсивности перемешивания на них

Традиционно в литературе подчеркивалась необходимость адекватного перемешивания в анаэробном биореакторе для равномерного распределения гидролитических ферментов. Однако в ряде работ экспериментально показано, что уменьшение интенсивности перемешивания улучшало стабильность и эффективность работы реактора. Для описания такого эффекта перемешивания дополнительно были введены в модель (6.9) – (6.12) процессы диффузии летучих жирных кислот и метаногенной биомассы. Оказалось, что изначальное разделение зон активного метаногенеза и гидролиза/кислотогенеза усиливает образование метана, а интенсивное перемешивание блокирует его. Для эффективной трансформации органического вещества необходимо достаточное количество метаногенной биомассы в центрах инициации (затравки). Если процесс сбалансирован, т. е. промежуточная концентрация летучих жирных кислот не достигает ингибирующих величин, накопление метана соответствует кривой 1-го порядка и перемешивание не влияет на образование метана (рис. 6.5, 6.6).

Если процесс несбалансирован, перемешивание, усредняя концентрации реагентов, ликвидирует центры инициации метаногенеза, и метан не образуется.

Интенсивность перемешивания не влияет на образование метана, которое формально соответствует простой реакции 1-го порядка. В системе не образуется высокая концентрация жирных кислот.

Если перемешивание слабое, жирные кислоты усваиваются в центрах инициации метаногенеза (рис. 6.7). Интенсивное перемешивание разрушает эти центры, что приводит к аккумуляции жирных кислот с последующим прекращением образования метана.

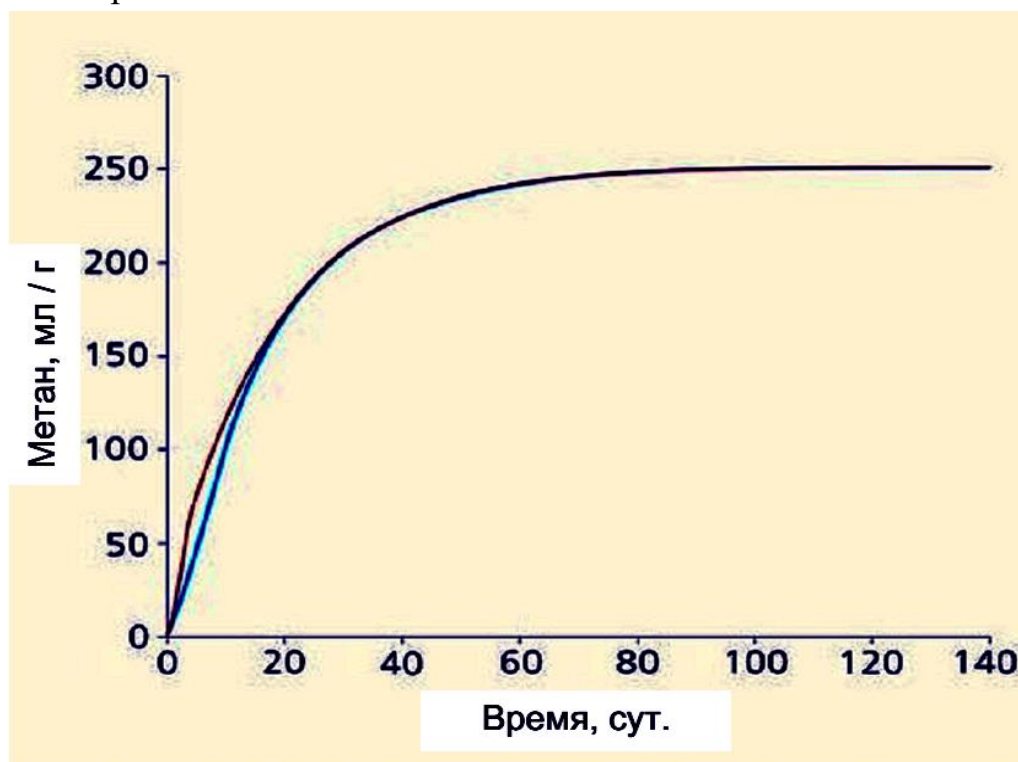


Рисунок 6.5 – Зависимость метанообразования от перемешивания в процессе разложения отходов свиноводческого хозяйства. Кривые – решение одномерной распределенной модели (красная – при сильном перемешивании, синяя – при слабом) (В. А. Вавилин, 2008) [27]

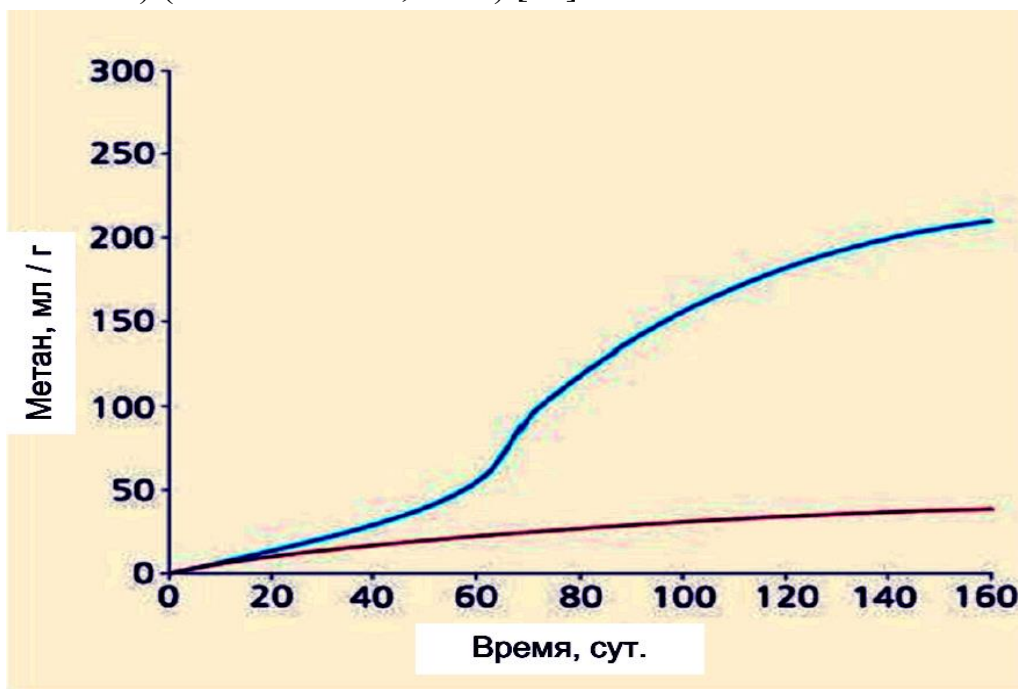


Рисунок 6.6 – Влияние перемешивания в процессе разложения отходов животноводческого хозяйства. Кривые – решение одномерной распределенной модели с шестью пиками начальных концентраций метаногенной биомассы в пространстве (В. А. Вавилин, 2008) [27]

Колонии *Methanosarcina sp.* служат центрами инициации, которые разрушаются при интенсивном перемешивании. Оценка константы полунасыщения субстратом многоклеточной колонии с помощью соответствующей диффузионной модели показала, что величина K_S пропорциональна квадрату радиуса колонии. Следовательно, внутри колонии *Methanosarcina sp.* концентрация промежуточных продуктов (летучих жирных кислот, аммония и др.) не влияет на образование метана, даже если вне колонии концентрация органического вещества высокая.

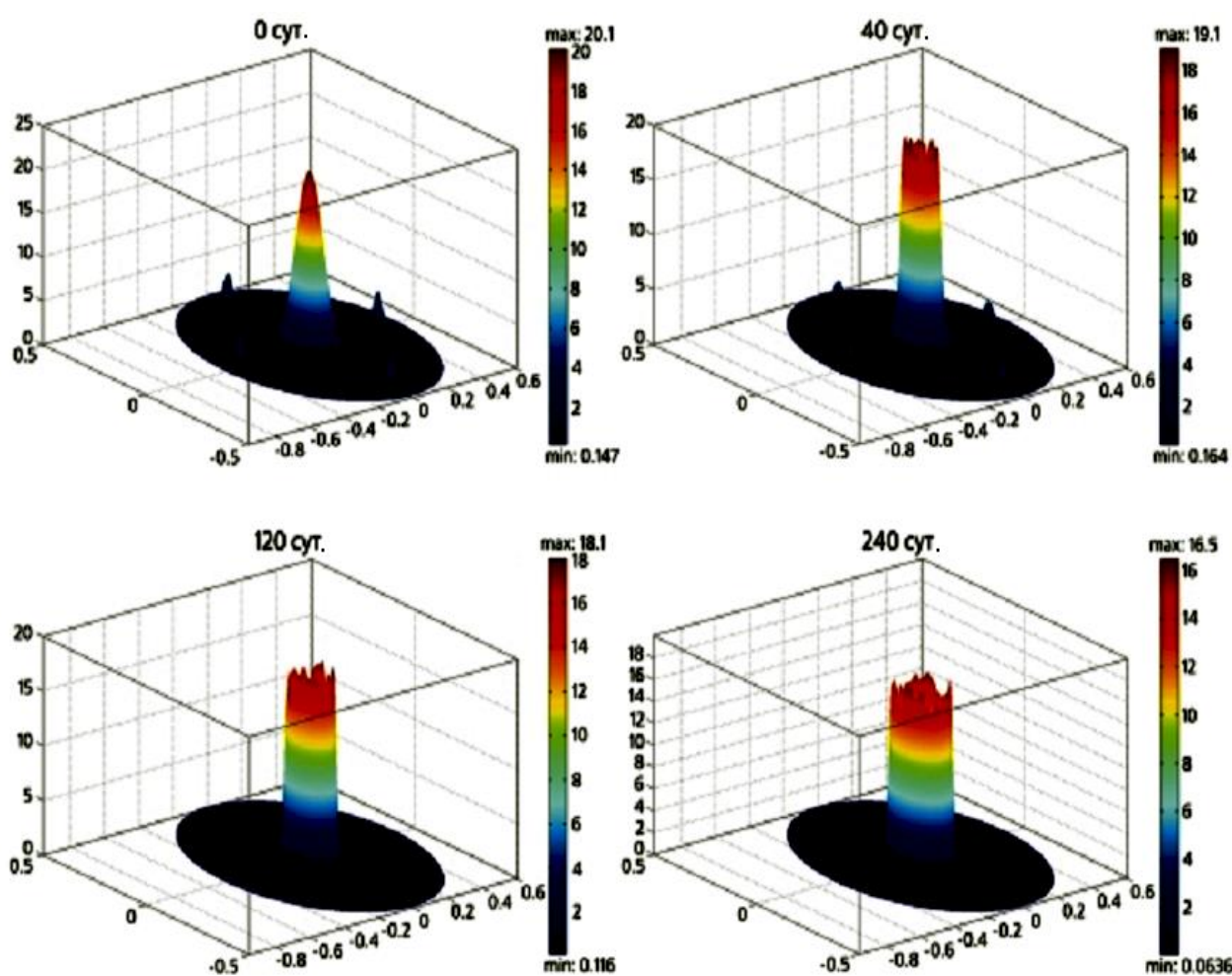


Рисунок 6.7 – Рост метаногенной популяции при разложении органических отходов согласно двухмерной модели для круга при пятипиковом начальном распределении биомассы (В. А. Вавилин, 2005) [26]

Современные молекулярные методы позволяют количественно определять доминирующие популяции микроорганизмов и понять, почему при термофильном распаде органического вещества скорость метанообразования уменьшается. Дело в том, что при высоких температурах метан образуется без участия ацетотрофных метаногенных микроорганизмов *Methanosarcina sp.* и *Methanosaeta sp.* вследствие синтрофного окисления ацетата до водорода и углекислого газа и далее с последующим превращением их в метан водородотрофными микроорганизмами типа *Methanoculleus sp.* [27].

Рассмотрим структурные плотности популяции бактерий на плоскости (рис. 6.7) с точки зрения синергетики. Как видно, автомодельные («самоподобные») решения описывают сходящиеся к центру волны как аттракторы развития метаногенной популяции (ее структуры). Причем развитие процессов происходит самоподобно, и решение в момент времени t_j получается преобразованием подобия того же решения, взятого в момент t_i . Это свойство позволяет не рассматривать все значения $\tau > 0$, а выбрать одно произвольное, и найти ему соответствующий спектр функций.

Стадия 1. Сначала происходит начальное возмущение с постепенным ростом амплитуды по периферии фазовой плоскости. В дальнейшем распределение биомассы популяции локализуется в некоторой области. При этом, чем меньше амплитуда начального распределения, тем шире область растекания. Это стадия медленного развития, здесь преобладают диффузионные и центробежные процессы.

Стадия 2. Это стадия быстрого роста. Здесь происходит выход решения в автомодельный режим, для которого характерны стабилизация роста амплитуды в центре распределения и увеличение полуширины. На этой стадии преобладают кумулятивные и центростремительные процессы, периферия все больше «отстает» от центра инициации метаногенеза. На фоне активного роста происходит накопления ошибок, что ведет к усилению неустойчивости. Так, развивается лишь центральный относительно большой пик биомассы, при этом дефицит органического вещества и отмирание микроорганизмов со временем вызывают снижение их концентраций в центре. Диффузия жирных кислот, ингибирующих рост метаногенов, быстро приводит к исчезновению периферийных пиков. Увеличение возмущений приводит к разрушению сложной структуры и формированию новых центров инициации.

6.4 Управление отходами на примере осадков сточных вод

6.4.1 Трансформации осадков сточных вод в экосистеме: эколого-синергетический подход

С изменением одного элемента или функционального действия компонента связано возникновение определенного экологического эффекта, который может привести к изменению направленности процессов в системе в целом. Это приведет систему на новый уровень развития, который может иметь деструктивный характер (деградация экосистемы) или конструктивный (восстановление экосистемы). Для понимания развития и механизмов функционирования системы необходимо знание движущей силы в данной системе, а также определение вещественных, энергетических и информационных потоков.

Даже незначительные изменения энергоэлементного состояния окружающей среды (за счет энергетической составляющей) способны изменять внутреннее энергоэлементное состояние системы на основе водовода и элементов 2-го, 3-го периодов IV–VII групп, т. е. таких как С, О, Р, Si и т. д. [177].

Рассмотрим экологический эффект от антропогенного воздействия на примере влияния процесса накопления осадков сточных вод (ОСВ) на объекты гидросферы, литосферы и атмосферы, выше изложенное утверждение также применимо.

В настоящее время основная масса осадков складывается на переполненных иловых картах очистных сооружений городских станций аэрации. Условия складирования и хранения осадков, как правило, не исключают загрязнения ими поверхностных и подземных вод, почв, растительности. Нарушение норм безопасности на станциях аэрации может привести к чрезвычайным экологическим последствиям для многих городов и к нарушению естественных гидрологических экосистем. Спецификой является то обстоятельство, что со сточными водами по системе общесплавной канализации на городские очистные сооружения ежедневно поступают сточные воды от промышленных объектов, в которых присутствуют различные токсические вещества, в первую очередь ионы тяжелых металлов (ТМ) – Cd, Ni, Cr, Zn, Cu, Fe и др. Известно, что ОСВ являются источником наиболее опасных

форм ТМ в почвах – металлоорганических соединений. Поэтому подготовка ОСВ к внесению в почву также влияет на накопление в ней металлов. Металлоорганические соединения ТМ легче включаются в пищевые цепи, чем их неорганические соединения, поэтому являются наиболее опасными формами ТМ. Образование растворимых органических комплексных соединений ТМ ведет к снижению их адсорбции в почвах. Даже при концентрациях металлов в ОСВ ниже установленных ПДК необходимо учитывать процесс биоаккумуляции микроэлементов [113].

В тоже время влияние ТМ на компоненты биогеоценозов обусловлено в значительной степени и их влиянием на энергетические потоки в системе, на изменение свободной энергии (ΔG), энтальпии (ΔH) и энтропии (ΔS) в протекающих реакциях метаболизма, ионного обмена, комплексообразования. Так, свинец образует довольно стабильные хелаты с органическими лигандами, содержащими донорные атомы S, N, O, стабильные комплексы с гуминовыми и фульвокислотами. Это определяет более вероятное образование в процессах конкурирующего комплексообразования в почвах и растениях, а именно изменение ΔG , ΔH , ΔS в протекающих реакциях, учитывая взаимозаменяемость биологической активности у большинства металлов [177].

Таким образом, распределение ТМ по почвенному профилю является функцией двух процессов – вымывания (инфильтрации, просачивания с водами через профили почв) и биоаккумуляции (связывания ионов ТМ в почвенно-поглощающем комплексе, поглощения растениями и микробиотой). Поэтому в процессе накопления ОСВ на иловых картах происходит накопление ТМ в верхних почвенных горизонтах.

Концентрируясь в осадках и в активном иле, они делают их экологически небезопасными и возможность использования их в сельском хозяйстве затрудняется. Подобная ситуация имеет место в большинстве городов Украины, включая Киев, Харьков, Днепропетровск, Донецк, Макеевку и другие. Вследствие такой ситуации иловые площадки превратились в илонакопители. В результате отсутствия дальнейшей обработки из года в год отмечается рост объемов ОСВ. Ежегодно на территории Украины образуется около 40 млн тонн ОСВ, что представляет реальную угрозу вторичного загрязнения окружающей среды.

В тоже время ОСВ содержат значительное количество элементов минерального питания растений и по своему составу близки к навозу. В пересчете на сухое вещество они имеют примерно одинаковое количество органического углерода и общего азота, заметно больше фосфора и в десять раз меньше калия. ОСВ, как и навоз, содержат биофильные микроэлементы,

необходимые для роста и развития растений. По эффективности многие виды ОСВ не уступают традиционным органическим удобрениям.

В целом при использовании ОСВ как почвоулучшающей добавки целесообразно проведение их обеззараживания и обезвреживания для снижения техногенной нагрузки на окружающую среду. Применение ОСВ как органоминерального удобрения в сельском хозяйстве возможно только при их предварительной обработке для предупреждения процесса биоаккумуляции ТМ в агроценозах.

Процессы биохимической трансформации ОСВ в окружающей среде ведут к изменениям в подсистемах экосистемы, которые могут иметь как точечный характер, так и системный. На рисунке 6.8 представлены основные закономерности трансформации компонентов ОСВ в экосистеме с точки зрения синергетики [178].

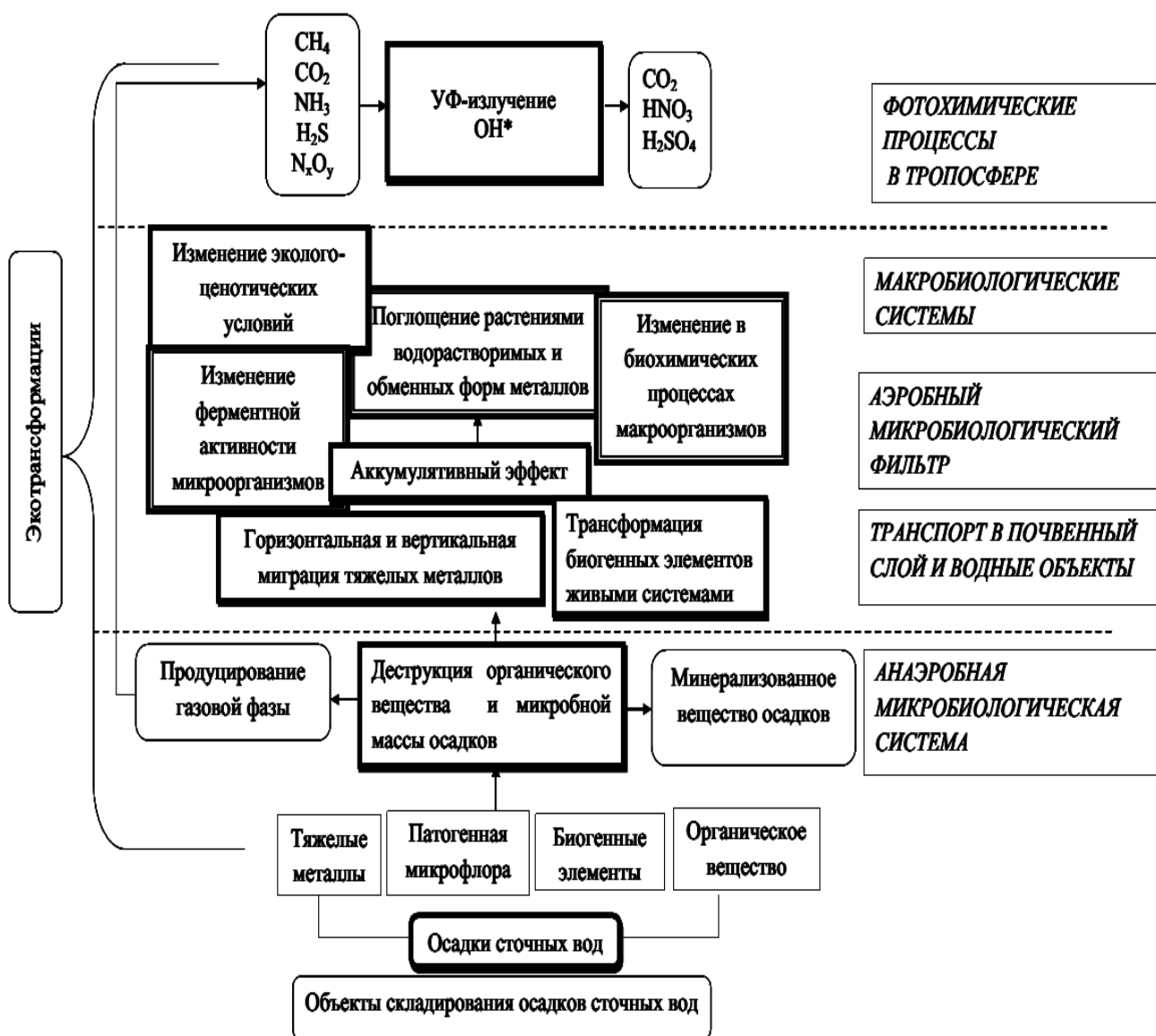


Рисунок 6.8 – Биохимический цикл трансформации компонентов осадков сточных вод в экосистеме (Л. Д. Пляцук, Е. Ю. Черныш, 2015) [113]

Характер воздействия ОСВ на различные экосистемные уровни зависит от качественных и количественных характеристик ОСВ (их состава и свойств), а также от ряда других параметров, характеризующих состояние природных объектов (экологических элементов), на которые влияют ОСВ и которые будут рассмотрены ниже.

В нижних уплотненных слоях ОСВ на иловых картах происходит поглощение кислорода аэробной микрофлорой, и начинается деятельность анаэробных микроорганизмов, активно участвующих в процессе образования органического вещества из CO_2 за счет энергии, получаемой при окислении неорганических соединений, в частности, водорода (хемосинтез). Восстановленный в результате этого метан выделяется в газовой форме. Образованные биогенным путем газы диффундируют в верхние слои ОСВ, в область, где присутствует O_2 , и становятся доступными для окисления аэробами. В верхнем слое ОСВ происходит активный газообмен с атмосферным воздухом в результате суточных и сезонных колебаний температуры, изменения атмосферного давления, диффузии газов, потребления и выделения газов микроорганизмами и корневой системой растений.

При дальнейшей трансформации биогенных газов совместно с другими газообразными веществами наблюдается эффект суммации, что делает определенный вклад в баланс углерода, азота, кислорода и серы в тропосфере.

Водорастворимые формы ТМ испаряются из почв и поступают в воздушную среду с транспирацией из растений. Их концентрация в продуктах испарения и транспирации составляет порядка 10^{-8} – 10^{-9} моль/дм³, увеличиваясь с ростом загрязнения почв ТМ.

Как продуценты, потребители и транспортирующие агенты в ОСВ микроорганизмы оказываются включенными в потоки энергии и круговорот химических элементов. Патогенная микробная составляющая ОСВ предварительно обеззараженных путем аэробных и/или анаэробных процессов или выдержки на иловых картах не имеет существенного влияния на ухудшение функционирования почвенной биоты. Отметим, что хранение осадка менее года недостаточно для его обеззараживания, поскольку сальмонелла, например, сохраняется в осадке, а яйца гельминтов не теряют способность к заражению более двух лет. Изменение равновесного состояния рассматриваемой подсистемы изменяется состоянием всей экологической системы, которая с точки зрения физико-биохимических процессов, в ней протекающих, является энергоэлементной системой.

6.4.2 Моделирование анаэробной микробиологической деструкции в условиях сульфидогенеза на основе процесса автокатализа

Рассмотрим пример автоуправления анаэробным биореактором (метантенком) для проведения процесса биодegradации и детоксикации осадков сточных вод совместно с фосфогипсом с образованием биогаза.

На рис. 6.9 представлена блок-схема изменения функции Гиббса – свободной энергии образования структуры биохимической системы с биологическим агентом – доминантным видом микроорганизмов или эколого-трофической группой непосредственно задействованной в процессе анаэробной микробиологической деструкции отходов. Как указывалось ранее, движущей силой несамопроизвольных процессов является цикл обмена веществ и энергией.

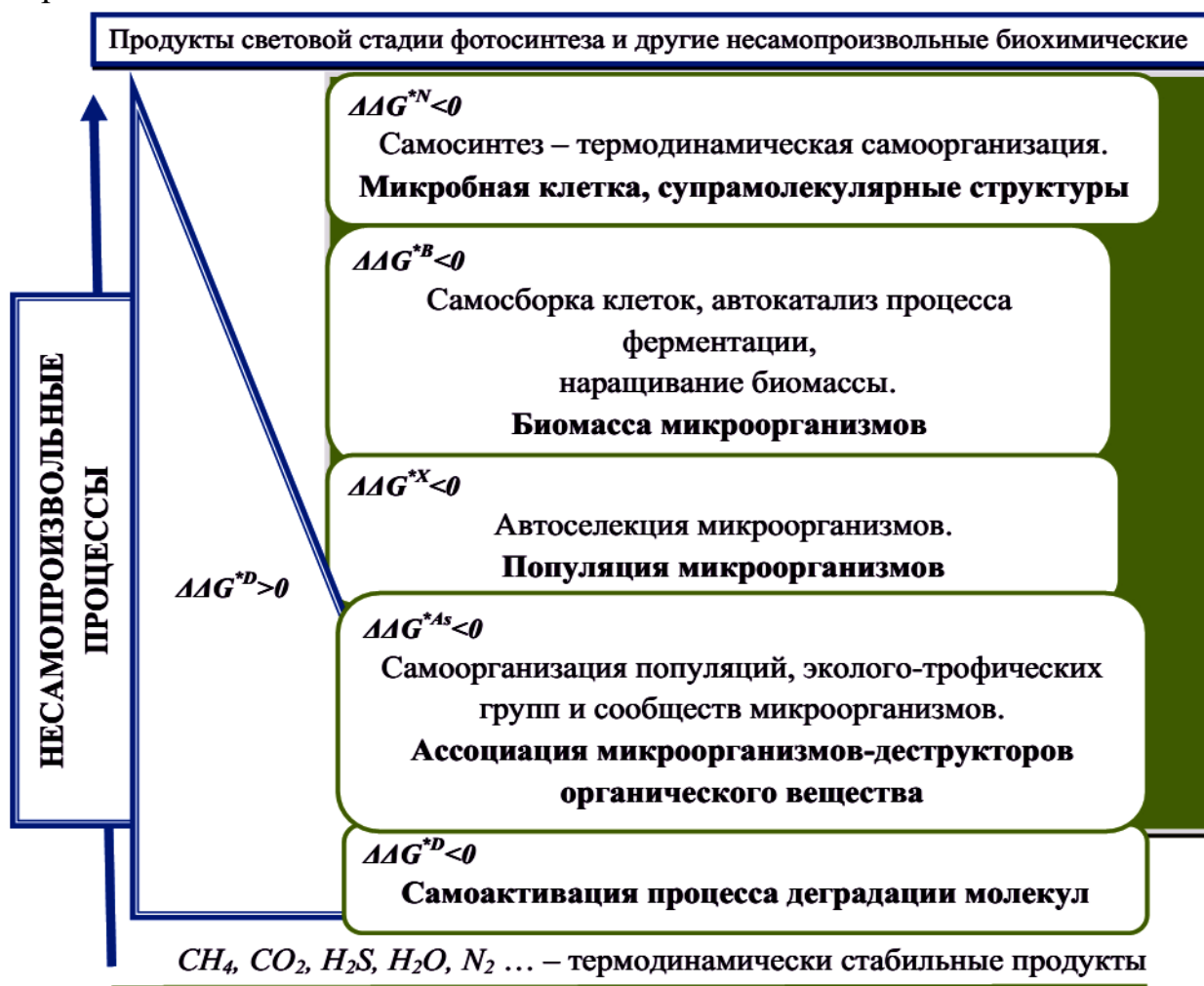


Рисунок 6.9 – Схема изменения функции Гиббса образования сложных микрoэкоcистем (ассоциаций микроорганизмов), ΔG^* при возникновении и биодegradации химических связей в сложных органических соединениях (D),

клетках (N) и биомассе (B) популяциях микроорганизмов (X), ассоциациях (As) (Пляцук Л. Д., Черныш Е. Ю., 2015) [179]

Основные информационно-вещественные потоки представлены в виде блок-схемы на рис. 6.10 [113]. Они характеризуют динамику развития сульфидогенного сообщества в пространстве биореактора, учитывая процесс возврата части сброженного субстрата в технологическую систему и протекания процессов агрегирования микробной биомассы с органическим субстратом избыточного активного ила и других ОСВ.

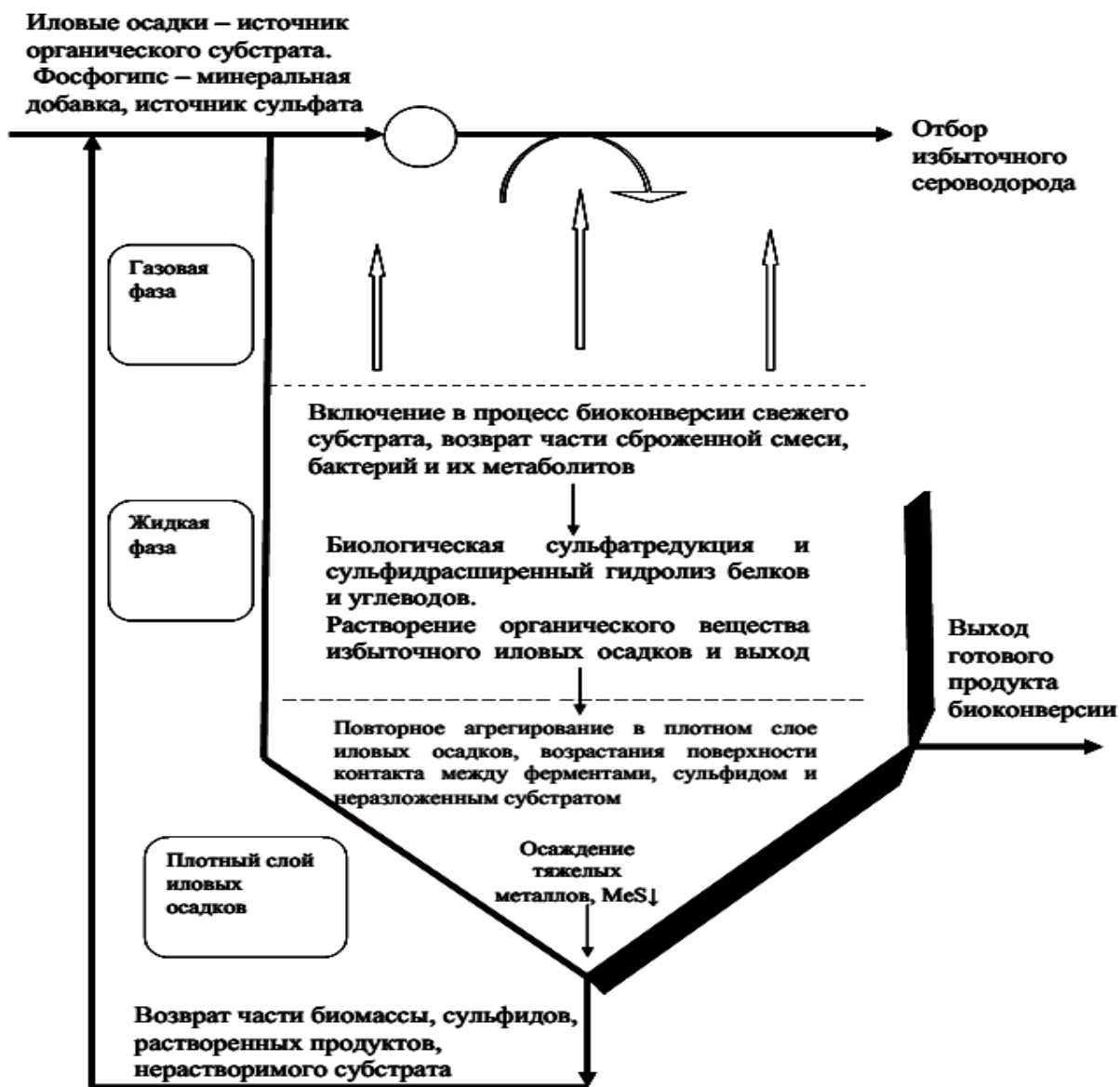


Рисунок 6.10 – Блок-схема пространственного распределения в биореакторе в процессе анаэробной микробиологической деструкции ОСВ в биосульфидогенных условиях (Л. Д. Пляцук, Е. Ю. Черныш, 2015) [113]

На рисунке 6.11 видно формирующиеся и распадающиеся агрегаты микроорганизмов анаэробного илового осадка.



Рисунок 6.11 – Формирование агрегатов бактерий в условиях сульфидогенеза. Световая микроскопия. Окраска по методу Грамма. Ув. x100 (Л. Д. Пляцук, Е. Ю. Черныш, 2015) [113]

Существенно большее количество мелких минеральных частиц в хлопьях ила из пилотного реактора по сравнению с контрольным образцом отразилось и на седиментационных свойствах ила, т. е. на свойстве биофлукуляции. Следует отметить, что на этапе дезинтеграции иловый индекс экспериментального активного ила составлял 70–90 мл/г, в то время как на контрольной линии он достигал 250 мл/г.

Механизмы биохимических трансформаций

В осадках из иловых карт фосфор (P) в виде анионов солей сорбируется гидроксидом железа, присутствующим в верхнем окисленном слое ОСВ, в соединениях типа $\text{Fe}_4(\text{PO}_4)_3(\text{OH})_3$, а также в гидратных комплексах, содержащих K, Al и Si. В избыточном активном иле этот механизм дополнен процессом накопления фосфора в биомассе гетеротрофных микроорганизмов.

Закономерности биохимических трансформаций фосфора в процессе анаэробной микробиологической деструкции сводятся к следующим положениям:

– гидроксид железа (III), который связал P, оказывается в лишенном доступа кислорода пространстве (в анаэробном биореакторе), и Fe (III) восстанавливается присутствующим в ОСВ органическим веществом в процессе микробной редукции. Поскольку соли Fe (II), в том числе $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2$, растворимы, ионы Fe^{2+} и P начинают диффундировать;

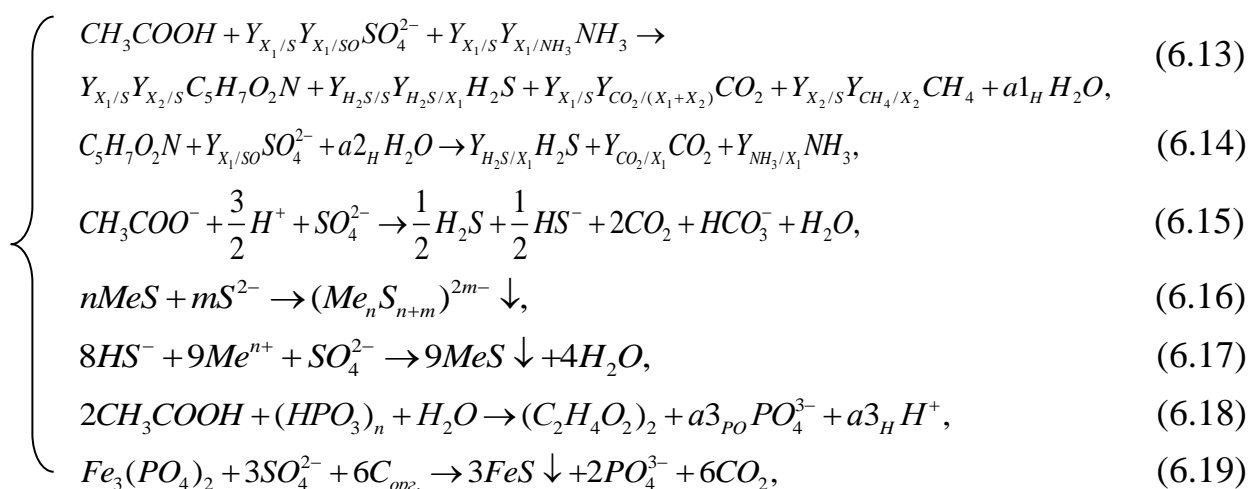
– в анаэробных условиях благодаря процессу ферментации органических веществ происходит образование ЛЖК и выделение полифосфатов $(HPO_3)_n$ из клеток ила в жидкую фазу;

– ионы Fe^{2+} реагируют с растворенным сульфидом, который находится в избытке в пространстве анаэробного биореактора с образованием персульфидов. В процессе изоморфизма образуется сложная сульфидная фракция, связывающая тяжелые металлы, что обосновано в предыдущих работах;

– фосфат-ионы, в свою очередь, частично вступают в реакцию с ионами кальция с образованием малорастворимых соединений, при этом значительная часть фосфат-ионов переходит в жидкую фазу и удаляется из биотехнологической системы.

Процессы сорбции и трансформации соединений фосфора осложняются биохимическими превращениями, которые осуществляются сульфидогенной ассоциацией микроорганизмов.

В целом анаэробный процесс обработки ОСВ в условиях сульфидогенеза с восстановлением соединений фосфора можно описать следующей системой биохимических реакций [180]:



где $Y_{X_1/S}, Y_{X_2/S}, Y_{X_1/SO}, Y_{X_1/NH_3}, Y_{H_2S/X_1}, Y_{CO_2/(X_1+X_2)}, Y_{CH_4/X_2}, Y_{CO_2/X_1}, Y_{NH_3/X_1}$ - экономические коэффициенты: выхода биомасс сульфатвосстанавливающих бактерий (СВБ) и метаногенов по органическому субстрату, выхода биомассы СВБ за сульфатами и аммиаком, выхода сероводорода по биомассе СВБ и углекислого газа по биомассе СВБ и метаногенов, выхода метана по биомассе метаногенов и углекислого газа по биомассе СВБ, выхода аммиака при разложении биомассы

СВБ соответственно; a_{1H} , a_{2H} , a_{3PO} , a_{3H} – стехиометрические коэффициенты; $C_{орг}$ - органический субстрат.

Процесс разложения ацетатов до сероводорода, метана и углекислого газа с синтезом микробной биомассы ($C_2H_7NO_2$) и распадом этой биомассы представлены в уравнениях (6.13) и (6.14) соответственно при условии доминирования СВБ в пространстве биореактора (конкурентное ингибирование процесса метаногенеза). Так как процесс анаэробного обезвреживания ведется в условиях стимулирования сульфидогенеза, то в уравнение (6.15) показано процесс диссимиляционного восстановления сульфатов при разложении ацетатов без учета метаногенеза. В уравнениях (6.16) и (6.17) представлены химические реакции осаждения ионов тяжелых металлов биогенным сероводородом. Кроме того, в процессе сульфидогенеза происходит выделение полифосфатов $(HPO_3)_n$ из клеток ила в жидкую фазу, что упрощенно описано в уравнении (6.18), при этом $(C_2H_4O_2)_2$ – резервное органическое вещество, присутствующее в жидкой фазе ОСВ. Биологическое восстановление фосфатов из соединений железа (III) представлено в уравнении (6.19).

Таким образом, механизм сорбции фосфатов в сырых ОСВ сводится к процессу связывания фосфат-ионов гидроксидом железа. Кроме того, фосфор включен в гидратные комплексы потассиумов, представленных в осадках. В избыточном активном иле этот механизм дополнен процессом аккумуляции фосфорсодержащих соединений в клетках микроорганизмов. В процессе биосульфидного обезвреживания ОСВ при соосаждении сероводорода и ионов тяжелых металлов происходит биологическое восстановление фосфатов. Значительная часть освободившихся фосфат-ионов химически связывается с кальцием в малорастворимые соединения, а также частично переходит в жидкую фазу ОСВ с удалением из биотехнологической системы. Определены закономерности трансформации фосфатов в анаэробных условиях в процессе биосульфидного обезвреживания ОСВ. Предлагаемый процесс потенциально может использоваться для биологического восстановления соединений фосфора из ОСВ с последующей их утилизацией.

Следует отметить, что для неорганических соединений соблюдается термодинамическая последовательность окислительно-восстановительных потенциалов как предпочитаемых акцепторов. Последовательность использования акцепторов электронов включает: 1) восстановление нитратов или денитрификацию; 2) восстановление соединений серы в сероводород, или сульфидогенез, что сопряжено с процессом выделения фосфора из клеток фосфораккумулирующих микроорганизмов ила; 3) восстановление углекислоты в метан или метаногенез. Следовательно, для наилучшего

прохождения процесса сульфидогенеза, необходимо предварительно проводить денитрификацию стоков и их осадков в отдельном блоке биоочистки.

Принципиальная схема установки для биологической очистки иловых осадков

Для построения принципиальной схемы процесса выделим несколько важных положений: 1) предварительная денитрификация иловых осадков с частью потока сточных вод улучшает анаэробный процесс в анаэробном биореакторе (резервуаре); 2) дефосфатирование интенсифицируется при подаче в анаэробный резервуар фосфогипса, который способствует началу процесса сульфатредукции на принципах автоселекции; 3) удаление фосфат-ионов из жидкой фазы целесообразно проводить в отдельном блоке очистки с помощью реагентного осаждения.

Принципиальная схема процесса представлена на рис. 6.12 [181].

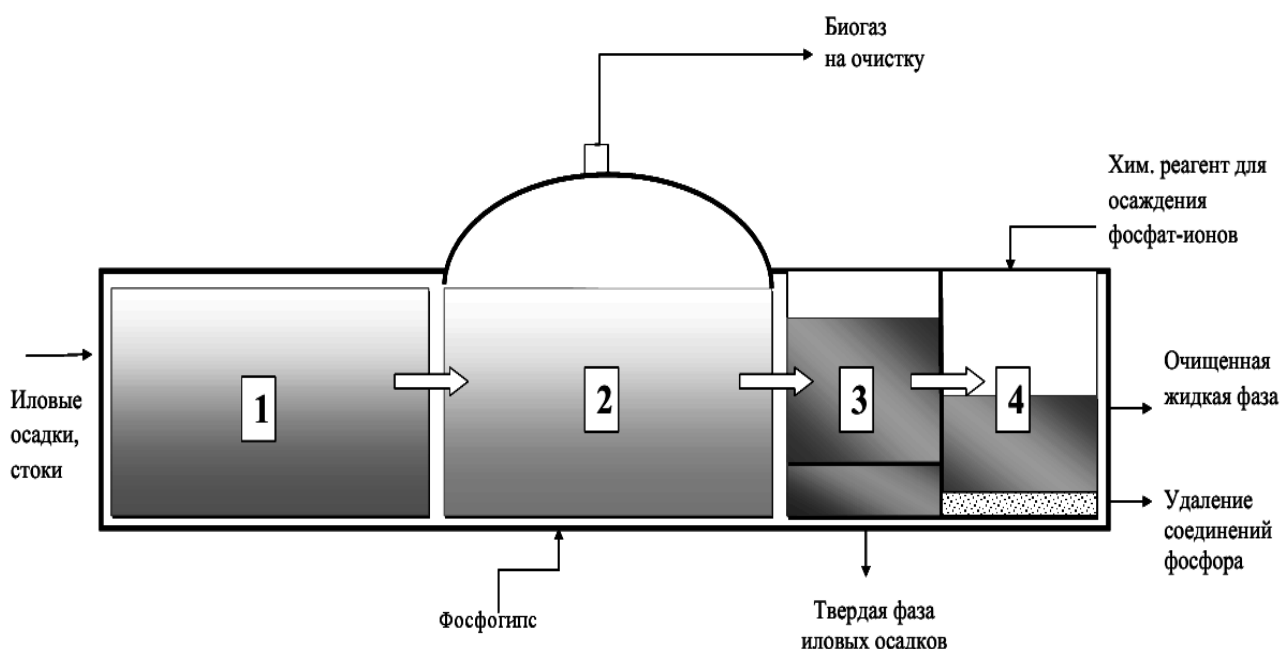


Рисунок 6.12 – Принципиальная схема процесса биоочистки иловых осадков: 1 – биоблок денитрификации; 2 – анаэробный резервуар, где происходит процесс АМД в условиях сульфидогенеза; 3 – отстойник; 4 - блок реагентного удаления фосфора (Черныш Е. Ю., 2015) [181]

Первая стадия процесса – денитрификация, протекает в биоблоке, в который поступают иловые осадки с частью потока сточных вод. Вторая стадия – анаэробная микробиологическая деструкция в условиях сульфидогенеза, происходящая после поступления иловых осадков из биоблока в анаэробной резервуар, в который осуществляется введение фосфогипса и предусмотрено выведение биогаза из системы с возможностью дальнейшей его очистки и

утилизации. Третья стадия – фазовое разделение в процессе отстаивания. Из отстойника твердая фаза выводится из системы, жидкая фаза направляется в блок удаления фосфора (четвертая стадия), где происходит осаждение растворенных соединений фосфора, например, гидроксидом кальция. Фосфат-ионы можно осадить из жидкой фазы иловых осадков различными реагентами с последующим использованием в качестве удобрения в сельском хозяйстве.

Как ранее отмечалось, биологические системы по своей природе являются синергетическими. Поэтому возможность воздействия на такие системы необходимо рассматривать, опираясь на законы синергетики. А использование биотехнологических процессов в системе управления экологической безопасностью должно основываться на анализе возможных путей развития синергетических систем для эффективного понижения уровня техногенной нагрузки на окружающую среду.

6.5 Синергетика нефтяных дисперсных систем: управление в нештатных ситуациях

6.5.1 Нефтяные дисперсные системы (НДС)

Потери нефти и нефтепродуктов при добыче, хранении, транспортировке, переработке и использовании приводят к загрязнению окружающей среды. Загрязнение земель нефтью и нефтепродуктами – одна из важнейших экологических проблем современности. Их ежегодные потери составляют 0,5–2 % годового оборота нефтепродуктов. За 30–40 лет объём просачивания нефтепродуктов в гидросферу измеряется сотнями тысяч и миллионами тонн [182].

Традиционно нефть и нефтяные системы рассматривались как жидкости, близкие по своим свойствам к идеальным, с определенными макроскопическими физико-химическими характеристиками.

Развитие в 70-е годы прошлого столетия академиком П. А. Ребиндером науки о коллоидах привело к переходу от концепции строения нефтяных систем как молекулярных растворов к новой концепции, основанной на коллоидно-химическом представлении о нефти. Согласно определению **коллоидные системы или коллоиды** (др.-греч. κόλλα – клей + εἶδος – вид; «клеевидные») – дисперсные системы, промежуточные между истинными растворами и грубодисперсными системами – взвесьями, в которых дискретные частицы, капли или пузырьки дисперсной фазы распределены в дисперсионной среде, обычно непрерывной, отличающейся от первой по составу или агрегатному состоянию.

Основателем учения о нефтяных дисперсных системах (НДС) считают профессора З. И. Сюняева [183], которым была активно развита идея регулирования свойств НДС внешними воздействиями различной природы. Закономерности поведения и физико-химические свойства нефтяной системы в молекулярном или дисперсном состоянии могут существенно различаться, что является причиной нелинейного отклика при изменении характера и величины внешнего воздействия. При этом происходят фазовые переходы, а свойства систем качественно меняются.

Возможности регулирования параметров микроструктуры при добыче, транспортировке, переработке нефти и нефтепродуктов становятся основой новых технологий. С другой стороны, возможности агрегатного изменения углеводородного сырья в условиях функционирования промышленных технологий являются причиной возникновения нештатных и аварийных ситуаций.

Синергетический анализ поведения нефтяных дисперсных систем осуществленный в [183, 184] дает возможность предсказать проявление негативных явлений, связанных с фазовыми переходами в технологических процессах нефтепереработки, разработки месторождений углеводородов, бурении скважин и других процессах нефтегазового производства.

Для понимания процессов фазовых переходов и формирования новых структур необходимы физико-химические исследования НДС. На основе существующих стандартизированных методик была создана база лабораторных исследований (рис. 6.13) основных процессов фазовых превращений в НДС [184].

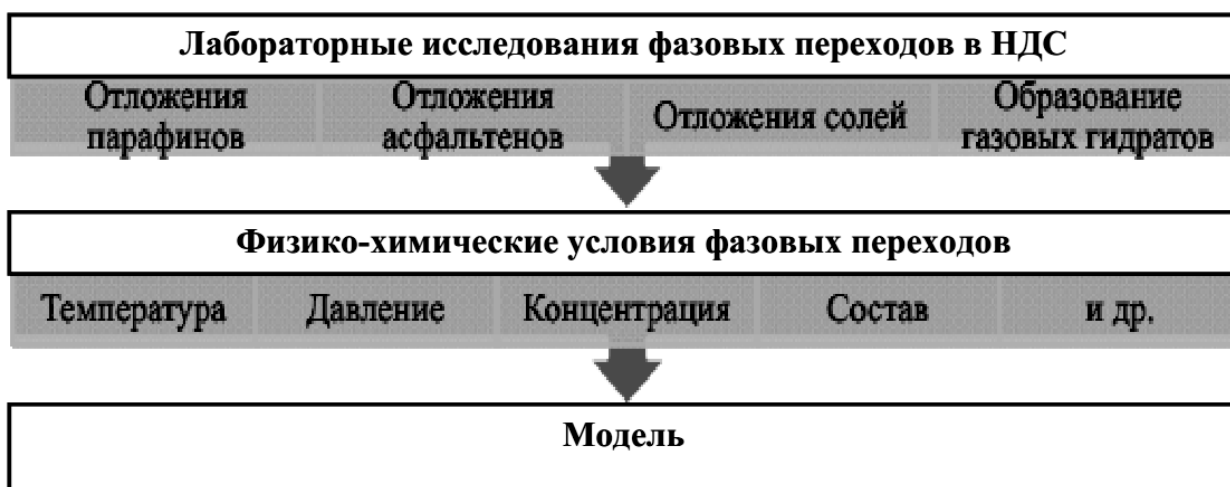


Рисунок 6.13 – Схема лабораторных исследований фазовых переходов в НДС (Л. И. Григорьев и др., 2014) [184]

В рассмотренных далее процессах основное внимание уделяется началу формирования нештатных ситуаций, что важно для прогнозирования дальнейшего развития нежелательных процессов и принятия соответствующих решений по управлению.

Отложения парафинов и асфальтенов

Отложения высокомолекулярных парафинов и асфальтенов во время добычи, транспортировки и обработки нефтяных флюидов, особенно в холодных климатических условиях, могут вызывать проблемы, связанные с уменьшением полезного сечения насосно-компрессорных труб, нефтепроводов, и, как следствие, значительные осложнения при перекачке нефти, увеличение расхода электроэнергии, повышение износа оборудования. Поэтому актуальными являются исследования формирования асфальто-смолисто-парафиновых отложений (АСПО) в зависимости от условий их образования с целью разработки эффективных способов предотвращения нефтяных отложений и удаления образовавшихся осадков.

Начало выпадения парафинов может определяться различными способами, такими как дифференциальная сканирующая калориметрия, микроскопия в поляризованном свете, инфракрасная спектроскопия, парафиновый контур.

Параметром, характеризующим процесс формирования парафиновых отложений, является температура появления парафинов (WAT – wax appearance temperature). Созданная база исследований предполагает использование парафинового контура.

Данный метод является менее точным, чем, например, дифференциальная сканирующая калориметрия или микроскопия в поляризованном свете, но позволяет изучать формирование парафиновых отложений в процессе прокачки образца через модельный трубопровод.

Асфальтены являются самым тяжелым и самым полярным компонентом нефти. Они растворимы в ароматических растворителях, таких как толуол, но нерастворимы в нормальных алканах. Предполагается, что в нефти асфальтены существуют как твердые коллоидные частицы или молекулы, которые стабилизированы смолами и другими полярными молекулами.

Сложное поведение асфальтенов в тяжелой нефти объясняется присутствием других соединений – парафинов, нафтенов, ароматических углеводородов и смол, которые влияют на растворимость асфальтенов. Экспериментальным путем было показано, что стабильность нефтей значительно зависит от содержания асфальтенов и вязкости.

Образование асфальтеновых отложений в связи с изменениями состава,

давления и температуры представляет собой проблему на всех этапах добычи и разработки месторождения. Осаждение асфальтенов может вызвать когматацию пор в пласте и/или изменить смачиваемость пород, что вызывает снижение проницаемости. Асфальтены также могут формировать отложения в оборудовании в процессах переработки нефти, что вызывает преждевременный износ и снижение производственных мощностей. Все это приводит к значительным затратам [183, 184]. Информация о том, когда начинается процесс выпадения асфальтенов и в каком количестве формируются осадения при добыче, транспортировке и переработке нефти, является важной.

Процесс выпадения асфальтенов характеризуется точкой onset (начала выпадения асфальтенов), одним из методов определения которой является титрование алканами модельного раствора асфальтенов.

Физически определение точки onset производится на основе измерения оптической плотности. В процессе титрования сначала происходит снижение оптической плотности, в связи с разбавлением раствора прозрачным растворителем. Затем при некотором значении количества (зависимом от температуры) добавленного осадителя оптическая плотность начинает возрастать в связи с началом процесса кристаллизации. Современное приборное обеспечение позволяет проводить процесс титрования автоматически.

На рисунке 6.14 показаны процессы, происходящие с нефтью при ее разливе в водной среде.

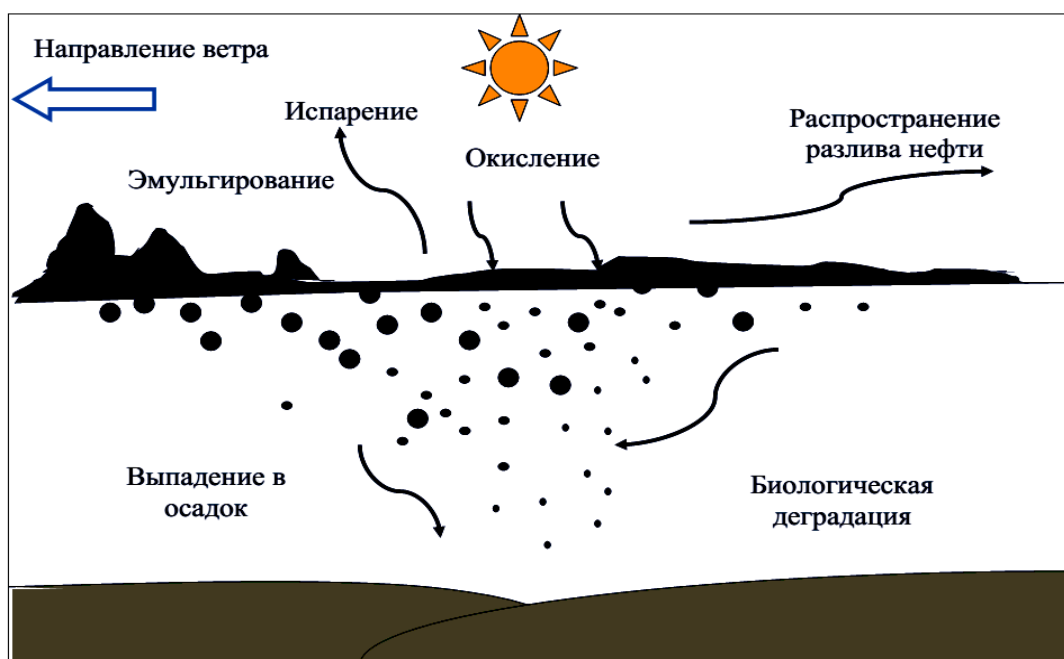


Рисунок 6.14 – Процессы, имеющие место при разливе нефти

Эмульгирование – физико-химический процесс, приводящий к образованию эмульсий, что существенно изменяет свойства и характеристики нефти. Это результат того, что полярные и асфальтеновые соединения ведут себя как поверхностно-активные вещества. В сырой нефти они стабилизированы применением ароматических растворителей, а по мере того, как эти растворители истощаются под влиянием атмосферных воздействий, асфальтены начинают выпадать в осадок, уменьшают поверхностное натяжение на поверхности вода–нефть и инициируют процесс эмульгирования.

Большая часть распределенной в воде нефти находится в виде эмульсии типа нефть в воде (прямая эмульсия). При разливах нефти образуется также эмульсия типа вода в нефти (обратная эмульсия). Несмотря на сходные условия образования, эти два типа имеют существенные различия. Образование прямой эмульсии может привести к исчезновению нефти с поверхности воды. Однако при прекращении действия факторов, способствующих эмульгированию (например, при уменьшении волнения моря), нефтяное пятно может восстанавливаться, нефть всплывет на поверхность воды. Образование прямой эмульсии связано с распределением мелких капель нефти (0,001–0,003 мм) в массе воды, что способствует биологическому разложению нефти [185].

6.5.2 Исследовательская схема управления нештатными ситуациями

Физико-химический анализ нефтяных дисперсных систем – это отправная точка в разработке системы поддержки принятия решений (СППР) в нештатных ситуациях. Исследовательская схема формирования правил и рекомендаций для управления в нештатных ситуациях включает следующие этапы: анализ поведения сложных молекулярных систем, применение фрактального подхода для исследования условий формирования новых структур, использование типовых для синергетики нелинейных моделей для описания динамического развития на «продолжительном времени» и др. [184]. Кроме того, с развитием геоинформационных технологий целесообразным является применение их для наиболее эффективного управления нештатными ситуациями при ликвидации разливов нефтепродуктов (рис. 6.15).

Исследование физико-химических явлений различной природы (в том числе и фазовых переходов) на сегодняшний день, помимо экспериментальных методов, подразумевает использование средств компьютерного моделирования.



Рисунок 6.15 – Исследовательская схема для формирования рекомендаций по управлению

На атомном и молекулярном уровне применяют различные модификации методов квантовой химии, молекулярной механики и динамики, в том числе и в комбинации с методом Монте-Карло. По сути, оформилась отдельная область исследований, занимающаяся разработкой и применением подобных методов и моделей – вычислительная химия [186].

На более высоком уровне исследований компьютерное моделирование также активно используется. Сюда можно, например, отнести различные модели в виде уравнений состояния для исследования жидкостей и газов, модели многофазного течения в трубопроводах и др.

Средства компьютерного моделирования как на молекулярном, так и на более высоком уровне широко распространены в нефтегазовой отрасли и используются для решения различных задач. Применение как специализированных, так и интегрирующих в себе различные модели программных продуктов стало практически неотъемлемой частью как научных исследований, так и производственной деятельности нефтегазовых компаний. К программному обеспечению для моделирования технологических процессов

нефтегазовой отрасли относятся и такие продукты, как VMGSim, Honeywell UniSim [183].

6.5.3 Нелинейные модели описания новых структур в критических точках

Для описания нештатных ситуаций с формированием новых структур предлагается использовать аппарат теории катастроф [137–139].

С помощью теории катастроф в работах [183, 184] анализируются особенности поведения системы при приближении к критической точке. Индикаторами или «флагами» катастроф считаются: существование нескольких устойчивых и/или неустойчивых состояний, необратимость процессов, подверженность флуктуациям, гистерезис и др. Интерес представляет момент перехода системы в минимум потенциальной энергии V , в котором состояние системы будет устойчивым.

Пусть динамическая система описывается уравнениями вида

$$\frac{\partial x_i}{\partial t} = f_i(x_i, s_\alpha), \quad (6.20)$$

где x_i – переменные состояния; s_α – управляющие параметры.

В теории катастроф предполагается, что существует потенциальная функция V и

$$f_i = \frac{\partial}{\partial x_i} V(x_i, s_\alpha), \quad (6.21)$$

и что если система находится в состоянии равновесия (устойчивого или неустойчивого), то $V = 0$. При этом тип равновесия определяется собственными значениями матрицы устойчивости (гессиана).

Если

$$\det V_{ij} \neq 0 \left(V_{ij} = \frac{\partial^2 V}{\partial x_i \partial x_j} \right), \quad (6.22)$$

то согласно теореме Морса существует гладкая замена переменных, при которой потенциальная функция V может быть представлена квадратичной формой.

$$V \cong \sum_{i=1}^n \lambda_i y_i^2, \quad (6.23)$$

где \cong означает «... равно после гладкой замены переменных...»; λ_i - собственные значения матрицы устойчивости V_{ij} , вычисленные для состояния равновесия; y_i – координаты новой системы.

Невырожденные критические точки дают качественную картину поведения потенциальной функции в многомерном случае. Множество точек S_α разбивает пространство управляющих параметров на области. При пересечении границ, разделяющих области, происходит катастрофа состояний системы.

Смысл подхода состоит в нахождении вырожденных критических точек (поверхностей), соответствующих качественному изменению в топографии семейств потенциальных функций и выполнению вблизи них линейного анализа устойчивости.

В окрестности вырожденных особых точек потенциальная функция может быть представлена с помощью подходящих преобразований координат в виде

$$V = cat(l, k) + \sum_{i=l+1}^n \lambda_i(s) y_i^2, \quad (6.24)$$

$$V = V(x; l), x \in R^n, l \in R^k. \quad (6.25)$$

Функцию $cat(l, k)$ называют функцией катастрофы, где l – размерность нулевого пространства V_{ij} в неморсовской критической точке, а k – число управляющих параметров.

Модели катастроф (складка, сборка, ласточкин хвост, омбилика и др.) хорошо описаны в литературе [137–142]. Математические модели катастроф указывают на некоторые общие черты разных физических явлений, которые проявляются в скачкообразном (качественном) изменении состояния системы в ответ на плавное изменение параметров порядка. Чаще всего параметры порядка представляют собой коэффициенты в нелинейных дифференциальных уравнениях. Первые примеры приложения теории катастроф относились к области термодинамики.

С начала появления теории катастроф отмечалось, что этот математический аппарат катастрофы не предотвращает, а среди недостатков указывалось, что модели катастроф: носят феноменологический характер и не

предоставляют количественные результаты; имеют отношение лишь к исследованию бифуркаций состояния равновесия и не пригодны при описании реальных, т. е. динамических систем. Для решения конкретных задач управления в нестандартных ситуациях недостаточно общих представлений об элементарных катастрофах, необходимо осуществить физико-химические исследования интересующего процесса, построить экспериментальные кривые и провести компьютерное моделирование [183, 184].

6.5.4 Параметры порядка и модель критерия подоби

Для одной или двух переменных и не более пяти управляющих параметров в теории имеется семь типов элементарных катастроф. Для каждого типа катастрофы существует поверхность, зависящая от числа переменных состояния и числа управляющих параметров в пространстве, размерность которого равна сумме указанных чисел.

Возникновение фазовых переходов в различных процессах, связанных с появлением катастрофических явлений, требует исследования критических точек. Для диссипативных систем эти критические точки также называют странные аттракторы. По определению странные аттракторы – это притягивающее множество неустойчивых траекторий сложной геометрии в фазовом пространстве диссипативной динамической системы с фрактальной структурой.

Критические точки на бифуркационной диаграмме характеризуются на оси абсцисс значениями параметров порядка. На примере ячеек Бенара, в котором демонстрируется переход от порядка к хаосу, управляющим параметром, играющим роль «ручки регулировки», служит критерий подоби (число) Рэлея (Ra). Это – безразмерное число, определяющее поведение жидкости под воздействием градиента температуры. Если число Рэлея больше некоторого критического значения, равновесие жидкости становится неустойчивым и возникают конвективные потоки. Имеет место бифуркация типа вилки, а критическое значение числа Рэлея является точкой бифуркации для динамики жидкости [184].

В теории критические значения чисел подоби разделяют качественно различные режимы. Однако в диссипативных, т. е. реальных системах имеется большое число различных факторов, значения которых могут влиять на критические значения, определяющих граничные условия. Причем часто это не резкая граница, а размытая зона, в которой имеют место смешанные режимы. Такие явления свойственны геологическим разрезам (например, литологический разрез), режимам течения (ламинарный и турбулентный),

течениям газа с небольшим содержанием жидкости в наклонных трубопроводах в межпромышленных коллекторах и др.

В последнем из приведенных выше примеров опыт эксплуатации газосборных сетей свидетельствует, что снижение скоростей движения газожидкостных смесей до 4–7 м/с приводит к накоплению жидкости вплоть до полного перекрытия сечения трубопроводов (исследование А. А. Ротова). При этом на газосборных пунктах регистрируются залповые выбросы жидкости в сепараторы, связанные с возникновением пробковых режимов течения газожидкостной смеси. Накопление жидкости на подъемных участках трубопроводов сопровождается ростом гидродинамических потерь. Анализ показал, что имеет место зона перехода из пробкового в кольцевой режим течения. При этом правильнее оценивать не критическое значение чисел подобия, а некоторую область, в которой возможны смешанные режимы. Для описания этого явления предлагается использовать аппарат нечетких множеств [187].

Пусть x_i – значения числа Рейнольдса (Re), $\mu_A(x)$ – функция принадлежности к зоне смешанного режима. На рисунке 6.16 [184] показан возможный вариант описания зоны смешанного режима.



Рисунок 6.16 – Нечеткая модель критического значения критерия подобия (Л. И. Григорьев и др., 2014) [184]

6.5.5 Передвижение лёгких нефтепродуктов в грунтовых водах

Наряду с загрязнениями почвенного покрова формируется область загрязнения природных вод. Практически всегда имеется горизонтальный поток грунтовых вод, увлекающий за собой нефтепродукты, которые уже во многих местах выводят из строя подземные водозаборы, выклиниваются в реки и водохранилища. Очистка таких загрязнённых зон является сложной инженерно-экологической задачей.

Для обоснования мероприятий по удалению нефтепродуктов используют теорию их совместного передвижения с водой в пористых средах. При этом две несмешивающиеся жидкости находятся не только под действием внешних давлений, но и между ними появляется давление на границе раздела, из-за разности сил поверхностного натяжения и разного смачивания твердой фазы.

Для описания процесса впитывания легкой фракции нефти (например, керосина) в почву можно использовать уравнения движения двух несмешивающихся жидкостей в пористой среде А. И. Голованова [188]:

– для воды

$$m \cdot C_{BH} \cdot \frac{\partial H_B}{\partial t} - m \cdot \frac{\rho_H}{\rho_B} \cdot C_{BH} \cdot \frac{\partial H_H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k_B \cdot f_B \cdot \frac{\partial H_B}{\partial x} \right], \quad (6.26)$$

– для нефтепродуктов

$$m \cdot \frac{\rho_H}{\rho_B} \cdot C_{BH} \cdot \frac{\partial H_H}{\partial t} - m \cdot (C_{BH} - C_B) \cdot \frac{\partial H_B}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k_H \cdot f_H \cdot \frac{\partial H_H}{\partial x} \right], \quad (6.27)$$

где m – пористость; ρ_H , ρ_B – емкостные коэффициенты; H_{HB} , H_B – напоры нефтепродуктов и воды; k_H , k_B – коэффициент фильтрации нефтепродуктов и воды; f_H , f_B – коэффициенты относительных фазовых проницаемостей; C_B и C_{BH} – ёмкостные коэффициенты, связывающие насыщенности и напоры:

при $0 < S_B + S_H < 1$

$$C_B = - \frac{\partial (S_B + S_H)}{\partial \psi_B}, \quad (6.28)$$

при $S_B^* < S_B < (1 - S_H^*)$

$$C_{BH} = - \frac{\partial S_B}{\partial \psi_{BH}}, \quad (6.29)$$

где S_B и S_H – насыщенность водой и нефтепродуктом, то есть отношение объёма жидкости к объёму пор; S_B^* и S_H^* – насыщенность гидравлически неподвижной водой и нефтепродуктом (для песка соответственно 0,10–0,15 и 0,07–0,10); ψ – гидростатическая или капиллярная составляющая напора: в зоне полного насыщения $\psi_B > 0$, а в капиллярной кайме $\psi_B < 0$.

Заключение

Сегодня человеку необходимо научиться жить в неустойчивом, нелинейном мире, мире бифуркаций и динамического хаоса, постигая его законы, законы самоорганизации. И в этом может помочь синергетическая теория познания мира.

Синергетический подход к экологическим исследованиям развивается на разных уровнях самоорганизации живого вещества. Достаточно обоснован математический аппарат синергетики для исследований в популяционной экологии, деструкции органического вещества, а также для гидродинамических процессов в экосистемах, например трансформации примесей в водной среде и т. д. Существует еще значительная вариация направлений в экосистемных исследованиях, включая прогнозирование влияния уровня антропогенной нагрузки на биосферу и в сфере развития технических систем, которые нуждаются в разработке синергетических моделей с учетом их специфики. В этой связи актуальным также является развитие синергетической теории управления сложными природно-техногенными системами.

В этой книге мы обосновали концептуальные основы синергетического анализа экосистемных процессов с учетом техногенного фактора. Нами было проанализировано понятие экосистемы на разных уровнях ее организации на основе теории об автоэволюции систем. При этом свойства экосистемы, ее синергетические характеристики проявляются при взаимодействии с факторами внешней среды, которая рассматривается как интегральная совокупность сопредельных сред. Антропогенный фактор (техносреда) рассматривается как одна из сопредельных сред с флуктуационными процессами, которые в ней протекают. Следует отметить, что невозможно провести границу между сопредельными средами и экосистемой (биосферой). Так, техносреда является неотъемлемой частью современной экосистемы. Следовательно, следующим этапом становления синергетики экологических процессов является формирование синергии проектирования экобезопасных технологических процессов.

Таким образом, синергетическая методология исследований является универсальной теорией познания мира. Однако ее применение на современном этапе развития науки ограничено. Развитие синергетики экологических процессов является важным этапом развития общей методологии познания физического мира и необходимым условием для сохранения и развития цивилизации.

Список литературы

1. Богданов А. А. Тектология. Всеобщая организационная наука / А. А. Богданов. – М. : Экономика, 1989. – Кн. 1.– 304 с.
2. Берталанфи фон Л. Общая теория систем – обзор проблем и результатов // Системные исследования: Ежегодник. – М. : Наука, 1969. – С. 30–54.
3. Винер Н. Кибернетика, или управление и связь в животном и машине / пер. с англ. И. В. Соловьева и Г. Н. Поварова ; под ред. Г. Н. Поварова. – 2-е изд. – М. : Наука ; Главная редакция изданий для зарубежных стран, 1983. – 344 с.
4. Бекман И. Н. Синергетика : курс лекций [Электронный ресурс] / И. Н. Бекман. – М., 2009. – Режим доступа : http://beckuniver.ucoz.ru/index/kurs_sinergetika/0-82.
5. Хакен Г. Синергетика. Иерархии неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах / Г. Хакен. – М. : Мир, 1985. – 424 с.
6. Дульнев Г. Н. Роль синергетики в формировании нового мышления [Электронный ресурс] / Г. Н. Дульнев // Новая эпоха. – 1997. – № 3 (14). – Режим доступа : <http://www.newepoch.ru/journals/14/dulnev.html>.
7. Хакена Г. Синергетика / Г. Хакен. – Мир, 1980. – 197 с.
8. Добронравова И. С. Синергетика: становление нелинейного мышления / И. С. Добронравова. – К. : Лыбидь, 1990. – 152 с.
9. Данилов Ю. А. Роль и место синергетики в современной науке [Электронный ресурс] / Ю. А. Данилов // Московский международной синергетический форум. – Режим доступа : <http://www.synergetic.ru/science/rol-i-mesto-sinergetiki-v-sovremennoy-nauke.html>.
10. Николос Г. Познание сложного : монография / Г. Николос, И. Пригожин. – М. : Издательство «Мир», 1990. – 345 с.
11. Быков В. И. Моделирование критических явлений в химической кинетике / В. И. Быков. – М. : Наука, 1988. – 328 с.
12. Быков В. И. Моделирование реакции на поверхности катализатора / В. И. Быков, С. Б. Цыбенова, М. Г. Слинько // ДАН. – 2003. – Т. 388. – № 6. – С. 769–773.
13. Фейнман Р. Фейнманские лекции по физике / Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс. – М. Мир, 1965. Вып. 4. – 260 с.
14. Жаботинский А. М. Концентрационные колебания / А. М. Жаботинский. – М. : Наука, 1974. – 176 с.
15. Курдюмов С. П. Собственные функции горения нелинейной среды и конструктивные законы построения ее организации / С. П. Курдюмов // Совр.

- проблемы математической физики и вычислительной математики. – Москва : Наука, 1982. – С. 217–243.
16. Lorenz E. N. Deterministic nonperiodic flow / E. N. Lorenz // J. Atmos. Sci. – 1963. – Vol. 20. – № 2. – P. 130–141.
17. Аршинов В. И. Синергетика на рубеже XX–XXI веков / В. И. Аршинов, В. Г. Буданов; под ред. А. И. Панченко. – М., 2006. – 217 с.
18. Бех И. А. Проблема устойчивости в лесоведении / И. А. Бех, А. М. Данченко // Весник Томского государственного университета. – 2007. – № 295. – С. 215–219.
19. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы / Б. Мандельброт. – Мн. : Книжный дом, 2001. – 656 с.
20. Фейгенбаум М. Универсальность в поведении нелинейных систем / М. Фейгенбаум // УФН. 1983. – Т. 141, № 2. – С. 343–374.
21. Колесников А. А. Синергетические методы управления сложными системами: теория системного синтеза / А. А. Колесников. – М. : Едиториал УРСС, 2005. – 228 с.
22. Колесников А. А. Синергетические методы управления сложными системами: энергетические системы / А. А. Колесников. – М. : Едиториал УРСС, 2005. – 224 с.
23. Синергетика и проблемы теории управления / под ред. А. А. Колесникова. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 504 с.
24. Долгоносов Б. М. Нелинейная динамика экологических и гидрологических процессов / Б. М. Долгоносов // Синергетика: от прошлого к будущему / отв. ред. М. Г. Хубларян; предисл. Г. Г. Малинецкого. – М. : Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. – 440 с.
25. Долгоносов Б. М. Проблемы обеспечения качества воды в природно-технологическом комплексе водоснабжения / Б. М. Долгоносов // Инженерная экология. – 2003. – № 5. – С. 2–14.
26. Вавилин В. А. Автокатализ и флуктуации в природе [Электронный ресурс] / В. А. Вавилин // Природа. – 2005. – № 6. – С. 52–59. – Режим доступа : <http://www.ibmh.msk.su/vivovoco>.
27. Вавилин В. А. Как эффективно получать биогаз? / В. А. Вавилин // Природа. – 2008. – № 11 (1119). – С. 14–19.
28. Братусь А. С. Дискретные динамические системы и математические модели в экологии: учебное пособие / А. С. Братусь, А. С. Новожилов, Е. В. Родина. – М. : МИИТ, 2005 – 139 с.

29. Ризниченко Г. Ю. Лекции по математическим моделям в биологии / Г. Ю. Ризниченко. – изд. 2-е изд., испр. и доп. – М. : Издательство РХД, 2011. – 560 с.
30. Фурсова П. В. Математические модели в биологии / П. В. Фурсова, Л. Д. Тёрлова, Г. Ю. Ризниченко. – М.; Ижевск : НИЦ: «Регулярная и хаотическая динамика», 2008. – 108 с.
31. Нелинейная динамика трансмембранного потенциала и рН в примембранной области клетки харовых водорослей / А. И. Лаврова, Т. Ю. Плюснина, А. В. Украинец и др. // Компьютерные исследования и моделирование. – 2009. – Т. 1., № 2. – С. 233–239.
32. Николайкин Н. И. Экология: учеб. пос. для вузов / Н. И. Николайкин, Н. Е. Николайкина, О. П. Мелехова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Дрофа, 2003. – 624 с.
33. Пригожин И. Порядок из хаоса: Новый диалог человека с природой / И. Пригожин, И. Стенгерс; пер. с англ.; общ. ред. В. И Аршинова, Ю. Л. Климонтовича, Ю. В. Сачкова. – М. : Прогресс, 1986. – 432 с.
34. Моисеев Н. Н. Асимптотические методы нелинейной механики : учеб. пособие для ун-тов / Н. Н. Моисеев. – 2-е изд., перераб. – М. : Наука, 1981. – 400 с.
35. Моисеев Н. Н. Математические задачи системного анализа : учеб. пособие для вузов по спец. «Прикл. математика» / Н. Н. Моисеев. – М. : Наука, 1981. – 487 с.
36. Моисеев Н. Н. Человек, природа и будущее цивилизации: «Ядерная зима» и проблема «запретной черты» : [Пер. с рус.] / Н. Н. Моисеев. – М. : Изд-во агентства печати «Новости», 1986. – 92 с.
37. Данилов Ю. А. Что такое синергетика / Ю. А. Данилов, Б. Б. Кадомцев // Нелинейные волны. Самоорганизация. – М. : Наука, 1983. – С. 96–107.
38. Моисеев Н. Н. Универсум. Информация. Общество / Н. Н. Моисеев. – М. : Устойчивый мир, 2001. – 200 с.
39. Диадох П. Комментарий к первой книге «Начал» Евклида / П. Диадох. – М. : Русский фонд содействия образованию и науке, 2013. – 368 с.
40. Чернышов В. Н. Теория систем и системный анализ : учебное пособие / В. Н. Чернышов, А. В. Чернышов. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008. – 96 с.
41. Малинецкий Г. Г. Математические основы синергетики : хаос, структуры, вычислительный эксперимент / Г. Г. Малинецкий. – 6-е изд. – М. : Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. – 312 с.
42. Анисимов І. О. Синергетика / І. О. Анисимов. – Київ, 2006. – 133 с.

43. Компьютерное моделирование биотехнологических процессов и систем : учеб. пособие / Д. С. Дворецкий, С. И. Дворецкий, Е. И. Муратова, А. А. Ермаков. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн., 2005. – 80 с.
44. Моделирование систем / А. Г. Схиртладзе, С. И. Дворецкий, Ю. Л. Муромцев, В. А. Погонин. – М. : АСАДЕМІА, 2009. – 320 с.
45. Прангишвили И. В. Энтропийные и другие системные закономерности: Вопросы управления сложными системами / И. В. Прангишвили. – М. : Российская академия наук, 2003. – 302 с.
46. Розенберг Г. С. Информационный индекс и разнообразие: Больцман, Котельников, Шеннон, Уивер... / Г. С. Розенберг // Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии. – 2010. – Т. 19, № 2. – С. 4–25.
47. Ильяшенко Ю. С. Аттракторы и их фрактальная размерность / Ю. С. Ильяшенко. – М. : МЦНМО, 2005. – 16 с.
48. Каток А. Б. Введение в современную теорию динамических систем / А. Б. Каток, Б. Хасселблат; пер. с англ. – М. : Факториал, 1999. – 768 с.
49. Крейдик Л. Г. Анализ «вывода преобразований Лоренца» в высшей школе / Л. Г. Крейдик // Журнал теоретической диалектики-физики-математики. – 2002. – № 1. – С. 180–246.
50. Пайтген Х. О. Красота фракталов / Х. О. Пайтген, П. Х. Рихтер. – М. : Мир, 1993. – 167 с.
51. Мондельброт Б. Б. Фракталы и хаос. Множество Мандельброта и другие чудеса / Б. Б. Мондельброт. – М. : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2009. – 392 с.
52. Фрактальные особенности популяционной экологии / Д. Б. Гелашвили, Д. И. Иудин, Г. С. Розенберг и др. // Биология. Наука о Земле : вестник Удмуртского университета. – 2009. – Вып. 1. – С. 15–22.
53. Фракталы и мультифракталы в биоэкологии : монография / Д. Б. Гелашвили, И. Д. Иудин, Г. С. Розенберг и др. – Нижний Новгород : Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2013. – 370 с.
54. Курдюмов С. П. Собственные функции горения нелинейной среды и конструктивные законы построения ее организации / С. П. Курдюмов // Совр. проблемы математической физики и вычислительной математики. – Москва : Наука, 1982. – С. 217–243.
55. Котельников Г. А. Теоретическая и прикладная синергетика / Г. А. Котельников. – Белгород : БелГТАСМ ; Крестьянское дело, 2000. – 162 с.
56. Чернавский Д. С. Синергетика и информация. Динамическая теория хаоса / Д. С. Чернавский. – М. : Наука, 2001. – 105 с.

57. Ляпунов А. А. О некоторых особенностях строения современного теоретического знания / А. А. Ляпунов // Вопросы философии. – 1966.– № 5.– С. 39–50.
58. Крымский С. Б. Интертеории и научные картины мира / С. Б. Крымский // Актуальные проблемы логики и методологии науки. – К. : Наукова думка, 1980. – С. 68–82.
59. Крымский С. Б. Научное знание и принципы его трансформации / С. Б. Крымский. – К. : Наукова думка, 1974.– 207 с.
60. Кондильяк Э. Б. Трактат о системах // Э. Б. Кондильяк. Соч. : в 3 т. – Т. 2. – М. : Мысль, 1982. – С. 5–188.
61. Астафьев Г. Б. Клеточные автоматы : учебно-методическое пособие / Г. Б. Астафьев, А. А. Короновский, А. Е. Храмов. – Саратов : Изд-во ГосУНЦ «Колледж», 2003. – 24 с.
62. Лобанов А. И. Модели клеточных автоматов / А. И. Лобанов // Компьютерные исследования и моделирование. – 2010. – Т. 2, № 3. – С. 273–293.
63. Кипятков В. Е. Практикум по математическому моделированию в популяционной экологии : учебное пособие / В. Е. Кипятков. – 2-е изд. – СПб., 2002. – 63 с.
64. Рау В. Г. Практический курс математики и общей теории статистики : учебное пособие / В. Г. Рау. – М. : Высш. шк., 2006. – 126 с.
65. Братусь А. С. Динамические системы и модели биологии / А. С. Братусь, А. С. Новожилов, А. П. Платонов. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 400 с.
66. Братусь А.С. Математические модели взаимодействия загрязнения с окружающей средой / А. С. Братусь, А. С. Мещерин, А. С. Новожилов // Вестник МГУ. Сер. Вычислительная математика и кибернетика. – 2001. – Т. 6. – С. 140.
67. Исаев С. А. Описание моделей с многозначными характеристиками / С. А. Исаев // Фундаментальные исследования. – 2007. – № 8. – С. 43–44.
68. Красносельский М. А. Системы с гистерезисом / М. А. Красносельский, А. В. Покровский. – М. : Наука, 1983. – 272 с.
69. Кудряшова Е. В. Нелинейный анализ цифровых систем фазовой автоподстройки частоты / Е. В. Кудряшова, О. А. Кузнецова, С. М. Селеджи // Материалы всероссийской научной конференции по проблемам информатики / СПГУ – Санкт-Петербург, 2013. – Режим доступа : spisok.math.spbu.ru/2013/txt/papers/s16_1.doc.

70. Леонов Г. А. Системы фазовой синхронизации в аналоговой и цифровой схемотехнике / Г. А. Леонов, С. М. Селеджи. – СПб. : Невский диалект, 2002. – 112 с.
71. Banerjee T. Chaos, intermittency and control of bifurcation in a ZC2-DPLL / T. Banerjee, B. C. Sarkar // *Int. J. Electron. Commun.* – 2009. – № 96 (7). – P. 717–732.
72. Письменко В. Т. Физическая химия. Практикум / В. Т. Письменко, Е. Н. Калюкова. – Ульяновск : УлГТУ, 2009. – 230 с.
73. Белоконь Н. И. Основные принципы термодинамики / Н. И. Белоконь. М. : Изд-во «Недра», 1968. – 110 с.
74. Ефремов Ю. С. Статистическая физика и термодинамика / Ю. С. Ефремов. – Барнаул : Изд-во БГПУ, 2005. – 208 с.
75. Зверев А. Т. Основные законы экологии / А. Т. Зверев. – М. : Издательский дом «Паганель», 2009. – 171 с.
76. Шаповалов В. И. Законы синергетики и глобальные тенденции / В. И. Шаповалов, Н. В. Казаков // *Общественные науки и современность.* – 2002. – № 3. – С.141–148.
77. Рубин А. Б. Термодинамика биологических процессов : учеб. пособие / А. Б. Рубан. – 2-е изд. – М. : Изд-во Московского университета, 1984. – 290 с.
78. Антонов В. Ф. Биофизика / В. Ф. Антонов. – М. : ВЛАДОС, 2006. – 287 с.
79. Фритеф К. Паутина жизни. Новое научное понимание живых систем / К. Фритеф ; пер. с англ. под ред. В. Г. Трилиса. – К. : София ; М. : ИД «София», 2003. – 336 с.
80. Ленинджер А. Основы биохимии : в 3 т. / А. Ленинджер. – М. : Мир, 1985. – 654 с.
81. Волькенштейн М. В. Энтропия и информация / М. В. Волькенштейн. – М. : Наука, 1986. – 192 с.
82. Блюменфельд Л. А. Информация, термодинамика и конструкция биологических систем / Л. А. Блюменфельд // *Соросовский образовательный журнал.* – 1996. – № 6. – С. 88–92.
83. Анисимов А. П. Концепции современного естествознания. Биология / А. П. Анисимов. – Владивосток : Изд-во ДВГУ, 2000. – 103 с.
84. Gladyshev G. P. On the Thermodynamics of Biological Evolution / G. P. Gladyshev // *J. Theoret. Biol.* – 1978. – V. 75. – P. 425–41.
85. Гладышев Г. П. Супрамолекулярная термодинамика - ключ к осознанию явления жизни. Что такое жизнь с точки зрения физика-химика / Г. П. Гладышев. – 2-е изд. – Москва ; Ижевск : Институт компьютерных исследований «Регулярная и хаотическая динамика», 2003. – 144 с.

86. Рамад Ф. Основы прикладной экологии / Ф. Рамад. – Л. : Гидрометеиздат, 1981. – 543 с.
87. Заварзин Г. А. Введение в природоведческую микробиологию / Г. А. Заварзин, Н. Н. Колотилова. – М. : Книжный дом «Университет», 2001. – 256 с.
88. Одум Г. Энергетический базис человека и природы / Г. Одум, Э. Одум. – М. : Изд-во «Прогресс», 1978. – 379 с.
89. Салтыков А. В. Биоэкология : учебное пособие / А. В. Салтыков. – Ульяновск : УлГТУ, 2000. – 88 с.
90. Коммонер Б. Замыкающийся круг / Б. Коммонер // Природа. Человек. Технология. – Л., 1974. – С. 32.
91. Комарова Т. А. Сукцессии и актуальные вопросы их изучения / Т. А. Комарова // Общество. Среда. Развитие. – 2011. – № 1. – С. 233–238.
92. Пономарева И. Н. Общая экология : учебное пособие / И. Н. Пономарева, В. П. Соломин, О. А. Корнилова; под ред. И. Н. Пономаревой. – Ростов н/Д : Феникс, 2009. – 538 с.
93. Сукачев В. Н. К вопросу о развитии растительности / В. Н. Сукачев // Бот. журнал. – 1952. – Т. 37, № 4. – С. 496–507.
94. Сукцессии и биологический круговорот / отв. ред. проф. В. М. Курачев. – Новосибирск : Наука, 1993. – 190 с.
95. Миркин Б. М. Современная наука о растительности: учебник / Б. М. Миркин, Л. Г. Наумова, А. И. Соломещ. – М. : Логос, 2001. – 264 с.
96. Одум Ю. Экология : в 2 т. / Ю. Одум. – М. : Мир, 1986. – 328 с.
97. Розенберг Г. С. Экология. Элементы теоретических конструкций современной экологии : учебное пособие / Г. С. Розенберг, Д. П. Мозговой, Д. Б. Гелашвили. – Самара : Самарский научный центр РАН, 1999. – 396 с.
98. Бигон М. Экология. Особи, популяции и сообщества / М. Бигон, Дж. Харпер, К. Таунсенд ; пер. с англ. В. В. Белова и А. Г. Пельмского. – М. : Мир, 1986. – 328 с.
99. Сукачев В. Н. Методические указания к изучению типов леса / В. Н. Сукачев, С. В. Зонн. – М. : Изд-во АН СССР, 1961. – С. 1–104.
100. Молчанов А. А. Методика изучения прироста древесных растений / А. А. Молчанов, В. В. Смирнов. – М. : Наука, 1967. – 95 с.
101. Уткин А. И. Изучение лесных биогеоценозов / А. И. Уткин // Программа и методика биогеоценологических исследований. – М. : Наука, 1974. – С. 281–317.
102. Радкевич В. А. Экология / В. А. Радкевич. – Минск : Вышэйшая школа, 1998. – 159 с.

103. Приходько В. И. Эксергия — путь энергосбережения [Электронный ресурс] / В. И. Приходько // Электронный журнал энергосервисной компании «Экологические системы». – 2010. – № 6. – Режим доступа : http://esco-ecosys.narod.ru/2010_6/art103.htm.
104. Лапунов А. Н. Мониторинг и экспертиза безопасности жизнедеятельности : учеб. пособие / А. Н. Лопанов, Е. В. Климанов. – Белгород : Изд-во БГТУ, 2009. – 201 с.
105. Критерий эффективности при эксергетической оптимизации функционирования энергопреобразования / П. А. Щинников, Г. В. Ноздренко, Ф. А. Серант и др. // Доклады ТУСУРа. – 2012, июнь. – № 1 (25), часть 1. – С. 208–211.
106. Накоряков В. Е. Исследования угольных ПГУ ТЭЦ с комбинированным производством электро-, теплоэнергии, синтез-газа и водорода / В. Е. Накоряков, Г. В. Ноздренко, А. Г. Кузьмин // Теплофизика и аэромеханика. – 2009. – Том 16, № 4. – С. 545–551.
107. Свентицкий И. И. Энергосбережение в АПК и энергетическая экстремальность самоорганизации / И. И. Свентицкий. – М. : ГНУ ВИЭСХ, 2007. – 468 с.
108. Башилов А. М. Универсальная модель агротехнологий / А. М. Башилов, И. И. Севицкий, В. А. Королев // Энергетика і автоматика. – 2013. – № 3. – С. 39–47.
109. Заварзин Г. А. Лекции по природоведческой микробиологии / Г. А. Заварзин ; отв. ред. Н. Н. Колотилова ; Ин-т микробиологии. - М. : Наука, 2003. – 348 с.
110. Экология микроорганизмов / А. И. Нетрусов, Е. А. Бонч-Осмоловская, В. М. Горленко [и др.] – М. : Академия, 2004. – 272 с.
111. Тейлор Д. Биология : в 3 т. / Д. Тейлор, Н. Грин, У. Стаут ; пер. с англ. ; под ред. Р. Сопера. – 3-е изд. – М. : Мир, 2004. – 454 с.
112. Вернадский В. И. Размышления натуралиста: Научная мысль как планетарное явление / В. И. Вернадский. – М. : Наука, 1977. – Кн. 2. – 191с.
113. Пляцук Л. Д. Эколого-синергетический подход к процессу накопления и утилизации иловых осадков / Л. Д. Пляцук, Е. Ю. Черныш // Екологічні науки : науково-практичний журнал – К. : ДЕА, 2015. – № 8. – С. 54–68.
114. Черныш Є. Ю. Проблематика створення ефективної біотехнологічної системи анаеробної переробки осадів промислових стоків / Є. Ю. Черныш, Л. Д. Пляцук // III Всеукраїнський з'їзд екологів з міжнародною участю. Збірник наукових статей. – Вінниця : ВНТУ, 2011. – Т. 2. – С. 49–51.

115. Кочемасова З. Н. Санитарная микробиология и вирусология / З. Н. Кочемасова, С. А. Ефремова, А. М. Рыбакова. – М. : Медицина, 1987. – 352 с.
116. Прогноз показателей качества воды на входе водопроводной станции / Б. М. Долгоносков, С. В. Храменков, Д. Ю. Власов и др. // Водоснабжение и сан. техника. – 2004. – № 11. – С. 15–20.
117. Пляцук Л. Д. Анализ производительности биореактора в процессе биосульфидной обработки осадков сточных вод / Л. Д. Пляцук, Е. Ю. Черныш // Наука и образование Южного Казахстана. – 2012. – № 3/4 (94/95). – С. 198–204.
118. Механизмы и кинетика деструкции органического вещества в водной среде: монографии / Б. М. Долгоносков, Т. Н. Губернаторова ; Рос. акад. наук, Ин-т востоковедения. – Москва : УРСС : КРАСАНД, 2011. – 205 с.
119. Дульнев Г. Н. От синергетики к информационной медицине / Г. Н. Дульнев, А. И. Крашенюк. – Санкт-Петербург : Институт биосенсорной психологии, 2010. – 168 с.
120. Алиев Н. И. Парадигма синергетического обоснования в медицинской диагностике / Н. И. Алиев, Р. Н. Алиев // Философия и общество. – 2012. – № 1 (65). – С. 138–143.
121. Лысенко О. В. Системно-синергетический подход в медицинских исследованиях / О. В. Лысенко, В. М. Лысенко // Актуальні питання теоретичної медицини. Актуальні питання клінічної медицини. Клінічні та патогенетичні аспекти мікроелементозів. Actual problems of fundamental and clinical medicine : матеріали науково-практичних конференцій студентів, молодих вчених, лікарів та викладачів, м. Суми, 20–22 квітня 2011. – Суми : СумДУ, 2011. – Ч. 1. – С. 89.
122. Крачун Г. П. Анализ и моделирование сложных биологических процессов самоорганизации в организме человека [Электронный ресурс] / Г. П. Крачун, Н. Г. Леонова // Вестник новых медицинских технологий. – 2011. – № 1. – Режим доступа: www.medtsu.tula.ru/VNMT/Bulletin/E2011-1/3605.pdf (Дата обращения 27.11.2014. – С. 1–7).
123. Чурилов Л. П. О системном подходе в общей патологии: необходимость и принципы патоинформатики / Л. П. Чурилов // Вестник Санкт-петербургского университета. – 2009. – Сер. 11., Вып. 3 – С. 5–23.
124. Никитенков Н. Н. Синергетика для инженеров / Н. Н. Никитенков, Н. А. Никитенкова. – Томск : Изд-во ТПУ, 2009. – 168 с.
125. Хакен Г. Принципы работы головного мозга: Синергетический подход к активности мозга, поведению и когнитивной деятельности / Г. Хакен. – М. : ПЕР СЭ, 2001. – 351 с.

126. Wilson H. R. Excitatory and inhibitory interaction in focalized populations of model neurons / H. R. Wilson, J. D. Cowan // *Biophys. J.* – 1972. – Vol. 12. – P. 1–24.
127. Холманский А. С. Моделирование физики мозга; Ресурс функциональной асимметрии мозга / А. С. Холманский // *Математическая морфология. Электронный математический и медико-биологический журнал.* – 2006. – Т. 5, Вып. 4. – URL : <http://www.smolensk.ru/user/sgma/MMORPH/N-12-html/holmansky/holmansky.htm>.
128. Менский М. Б. Концепция сознания в контексте квантовой механики / М. Б. Менский // *УФН.* – 2005. – Т. 175, № 4. – С. 413–435.
129. Черныш Е. Ю. Эколого-синергетический подход к изучению энергии элементарных частиц / Е. Ю. Черныш, Л. Д. Пляцук // *Сучасні технології в промисловому виробництві : матеріали III Всеукраїнської міжвузівської науково-технічної конференції.* – Суми : СумДУ, 2014. – Ч. 2. – С. 69.
130. Katz L. C. Synaptic activity and the construction of cortical circuits / L. C. Katz, C. J. Shatz // *Science.* – 1996. – Vol. 274. – P. 1133–1138.
131. Калиниченко С. Г. Самоорганизация нейронных систем и модульная архитектура головного мозга / С. Г. Калиниченко, Н. Ю. Матвеева // *Тихоокеанский медицинский журнал.* – 2010. – № 4. – С. 9–12.
132. Пляцук Л. Д. Синергетика: экосистемные процессы / Л. Д. Пляцук, Е. Ю. Черныш, Д. Л. Пляцук // *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського.* – 2014. – № 6 (89), ч. 1 – С. 137–142.
133. Пушкарь В. С. Экология : учебное пособие / В. С. Пушкарь, Н. С. Майоров. – Владивосток : ВГУЭС, 2003. – 188 с.
134. Потапов А. А. Деформационная поляризация: поиск оптимальных моделей / А. А. Потапов. – Новосибирск : Наука, 2004. – 511 с.
135. Потапов А. А. К вопросу построения программно управляемого атомно-молекулярного манипулятора / А. А. Потапов // *Нанотехнологии. Наука и производство.* – 2014. – № 1. – С. 39–58.
136. Марсден Дж. Бифуркация рождения цикла и ее приложения / Дж. Марсден, М. Мак-Кракен. – М. : Мир, 1980. – 336 с.
137. Арнольд В. И. Теория катастроф / В. И. Арнольд. – М. : Наука, 1990. – 127 с.
138. Басина Г. И. Синергетика. Основы методологии / Г. И. Басина, М. А. Басин. – СПб : Норма, 2006. – 56 с.
139. Постон Т. Теория катастроф и ее приложения / Т. Постон, И. Стюарт. – М. : Мир, 1980. – 608 с.

140. Ерохина Е. А. Теория экономического развития : системно-синергетический подход / Е. А. Ерохина. – Томск : Изд-во Томского ун-та, 1999. – 160 с.
141. Лоскутов А. Ю. Введение в синергетику / А. Ю. Лоскутов, А. С. Михайлов. – М. : Наука, 1990. – 272 с.
142. Анищенко В. С. Устойчивость, бифуркации, катастрофы / В. С. Анищенко // Соросовский образовательный журнал. – 2000. – Т. 6, № 6. – С. 10–19.
143. Перерюхова А. Ю. Переход к устойчивому хаотическому режиму в новой модели динамики популяции в результате единственной бифуркации / А. Ю. Перерюхова // Вестник Удмурского университета. – 2010. – Вып. 2. – С.117–126.
144. Ризниченко Г. Ю. Биофизическая динамика / Г. Ю. Ризниченко, А. Б. Рубин. – М. ; Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2004. – 464 с.
145. Ризниченко Г. Ю. Лекции по математическим моделям в биологии. Часть 1 / Г. Ю. Ризниченко. – Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2002. – 232 с.
146. Рубин А. Б. Кинетика биологических процессов / А. Б. Рубин // Соросовский образовательный журнал. – 1998. – № 10. – С. 118–123.
147. Базыкин А. Д. Математическая биофизика взаимодействующих популяций / А. Д. Базыкин. – М. : Наука, 1985. – 181с.
148. Мартынюк В. С. Космические и геофизические процессы и биотические ритмы [Электронный ресурс] / В. С. Мартынюк // Материалы IX Международной крымской конференции «Космос и биосфера». – 2011. – С. 41. – Режим доступа : www.biophys.ru/archive/crime2011/abstr-p41.pdf.
149. Мун Ф. Хаотические колебания: Вводный курс для научных работников и инженеров / Ф. Мун. – М. : Мир, 1990. – 312 с.
150. Елькин Ю. Е. Автоволновые процессы [Электронный ресурс] / Ю. Е. Елькин // Математическая биология и биоинформатика. – 2006. – Том 1, № 1. – С. 27–40. – Режим доступа : [http://www.matbio.org/downloads/Elkin2006\(1_27\).pdf](http://www.matbio.org/downloads/Elkin2006(1_27).pdf).
151. Аладьев В. З. Классические однородные структуры: Теория и приложения = Classical Cellular Automata: Theory and Applications : монография / В. З. Аладьев, В. К. Бойко, Е. А. Ровба. – Гродно : ГрГУ, 2008. – 486 с.
152. Винер Н. Проведение импульсов в сердечной мышце. Математическая формулировка проблемы проведения импульсов в сети связанных возбудимых

- элементов, в частности, в сердечной мышце / Н. Винер, А. Розенблют // Кибернетический сборник. – М.ИЛ, 1961. – Вып. 3. – С. 3–56.
153. Андронов А. А. Теория колебаний / А. А. Андронов, А. А. Витт, С. Э. Хайкин. – М. : Наука, 1959. – 915 с.
154. Каргу Л. И. Основы автоматического регулирования и управления / Л. И. Курга, А. П. Литвинов и др. ; под ред. В. М. Пономарева, А. П. Литвинова. – М. : Высшая школа, 1974. – 439 с.
155. Россовский Л. Е. Функционально-дифференциальные уравнения и их приложения к исследованию нейронных сетей и передачи информации нелинейными лазерными системами с обратной связью: учеб. пособие / Л. Е. Россовский, Е. М. Варфоломеев. – М. : РУДН, 2008. – 263 с.
156. Семенов В. В. Экспериментальное исследование стохастической бифуркации Андронова – Хопфа в автогенераторах с аддитивным и параметрическим шумом / В. В. Семёнов, К. В. Закорецкий, Т. Е. Вадивасова // Нелинейная динамика. – 2013. – Т. 9, № 3. – С. 421–434.
157. Зимницкий П. В. Единая модель природы – будущее современного моделирования [Электронный ресурс] / П. В. Зимницкий // Биосфера. – 2003. – № 1. – Режим доступа : <http://www.ihst.ru/~biosphere/03-1/>.
158. Барский В. Г. Проект международной программы «Динамическая модель биосферы» [Электронный ресурс] / В. Г. Барский // Биосфера. – 2002. – № 1. – Режим доступа : http://www.ihst.ru/~biosphere/Mag_1/model.htm.
159. Добровольский В. В. Основы биогеохимии / В. В. Добровольский. – М. : Изд-во «Академия», 2003. – 400 с.
160. Сидоренко Е. С. Фракталы в моделировании экологических систем / Е. С. Сидоренко, В. В. Халиль // Енергоефективність в будівництві та архітектурі. – 2013. – Вип. 5. – С. 125–129.
161. Whittaker R. H. Retrogression and coenocline distance / R. H. Whittaker, G. M. Woodwell // Handbook of vegetation science. The Hague. Pt. 5. Ordination and classification of vegetation. – 1973. – P. 55–80.
162. Гордиенко В. А. Моделирование биосферных процессов и прогнозирование в экологии с позиций синергетики / В. А. Гордиенко, М. В. Старкова // Физические проблемы экологии (экологическая физика). – М., 2011. – № 17. – С. 98–117.
163. Доброборский Б. С. Термодинамика биологических систем : учебное пособие [Электронный ресурс] / Б. С. Доброборский ; под ред. проф. Е. С. Мандрыко. – СПб., 2006. – 45 с. – Режим доступа : <http://www.interlibrary.narod.ru/GenCat/GenCat.Scient.Dep/GenCatBiology/201200038/20120003801/20120003801.htm>.

164. Федер И. Фракталы / И. Федер. – М. : Мир. 1991. – 262 с.
165. Ланкин Ю. П. Общий подход к моделированию разнообразия экосистем биосферы на основе фундаментальных свойств живых систем [Электронный ресурс] / Ю. П. Ланкин, Н. С. Иванова // Современные проблемы науки и образования. – 2011. – № 6. – Режим доступа : <http://www.science-education.ru/100-4883>.
166. Ланкин Ю. П. Основы теории моделирования разнообразия экосистем биосферы на основе фундаментальных свойств живых систем [Электронный ресурс] / Ю. П. Ланкин, Н. С. Иванова, Т. Ф. Басканова // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 1. – Режим доступа : <http://www.science-education.ru/101-5144>.
167. Ланкин Ю. П. Моделирование адаптивной самоорганизации экосистем [Электронный ресурс] / Ю. П. Ланкин, Т. Ф. Басканова, Н. С. Печуркин // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – №5. – Режим доступа : <http://www.science-education.ru/105-6735>.
168. Ланкин Ю. П. Самовозникновение моделей – от теории к реальности / Ю. П. Ланкин // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2013. – № 5. – С. 22–26.
169. Райзберг Б. А. Современный экономический словарь / Б. А. Райзберг, Л. Ш. Лозовский, Е. Б. Стародубцева. – 5-е изд., перераб. и доп. – М. : ИНФРА-М, 2007. – 495 с.
170. Норенков И. П. Автоматизированное проектирование / И. П. Норенков. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. – 188 с.
171. Петров В. Н. Информационные системы / В. Н. Петров. – СПб. : Питер, 2003. – 688 с.
172. Дьяконов К. Н. Экологическое проектирование и экспертиза : учебник для вузов / К. Н. Дьяконов, А. В. Дончева. – М. : Аспект Пресс, 2002. – 384 с.
173. Заславский Б. Г. Управление экологическими системами / Б. Г. Заславский, Р. А. Полуэктов. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-матлит., 1988. – 296 с.
174. Артюшин А. А. Аналитическое начало высокоэффективных («оптимальных») аграрных технологий / А. А. Артюшин, А. И. Паршин, И. И. Свентицкий // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве: труды 5-й Международной научно-технической конференции (16–17 мая 2006 года, г. Москва, ГНУ ВИЭСХ): в 5 ч. Часть 2. Энергосберегающие технологии в растениеводстве и мобильной энергетике. – М. : ГНУ ВИЭСХ, 2006. – С. 3–11.
175. Соколов М. В. Прикладная биофотометрия / М. В. Соколов. – М. Наука, 1982. – 132 с.

176. Новая биогазовая технология [Электронный ресурс] / Материалы с сайта компании «Гидроматик Петкер». – Режим доступа : <http://www.hydromatic.info/ru/>.
177. Бобух Л. В. Развитие теоретических основ процессов изменения энергоэлементного состояния физических и биологических систем / Л. В. Бобух, К. А. Бобух, Т. А. Бобух // Инженерная экология. – № 3. – 2004. – С. 56–60.
178. Пляцук Л. Д. Математическое моделирование процесса обезвреживания осадков сточных вод в биосульфидогенных условиях / Л. Д. Пляцук, Е. Ю. Черныш // Вісник НТУ «ХП». – Харків : НТУ «ХП», 2013. – № 37 (1010). – С. 148–160.
179. Пляцук Л. Д. Синергетичний підхід до екологічної проблеми накопичення мулових осадів / Л. Д. Пляцук, Є. Ю. Черниш // Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування. – 2015. – № 2 (12). – С. 94–100.
180. Черныш Е. Ю. Биологическое удаление фосфора из осадков сточных вод процессе биосульфидной обработки / Е. Ю. Черныш, Л. Д. Пляцук // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. – 2014. – № 4 (87). – С. 152–158.
181. Черныш Е. Ю. Экобиотехнология обработки иловых осадков: удаление соединений фосфора / Е. Ю. Черныш // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»/ Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». – 2014. – № 2 (13). – С. 60–66.
182. Коблова И. Б. объектный мониторинг подземных вод на нефтяных месторождениях / И. Б. Коблова // Известие Самарского научного центра Российской академии наук. – 2011. – Т. 13, № 1. – С. 211–215.
183. Физикохимия и методы анализа пластовых флюидов. Модуль: «Синергетика нефтяных дисперсных систем» : учебно-методический комплекс / под ред. Л. И. Григорьева, Р. З. Сафиевой. – М. : РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2012. – 56 с.
184. Григорьев Л. И. Системный и синергетический анализ управления непрерывными технологическими процессами в нештатных ситуациях / Л. И. Григорьев, И. Ф. Кузьмицкий, В. В. Санжаров // XII Всероссийское совещание по проблемам управления. – М : ВСПУ, 2014. – С. 4285–4296.
185. Маценко С. В. Ликвидация разливов нефти и нефтепродуктов на море и внутренних акваториях. Расчет достаточности сил и средств : методические рекомендации /С. В. Маценко, Г. Г. Волков, Т. А. Волкова. – Новороссийск : МГА им. адм. Ф. Ф. Ушакова, 2009. – 78 с.
186. Иванов В. Методы компьютерного моделирования для исследования полимеров и биополимеров / В. Иванов, А. Рабинович, А. Хохлов. – М. : Либроком, 2009. – 696 с.
187. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление / А. Пегат. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. – 798 с.

188. Основы природообустройства : учебное пособие / А. И. Голованов и др. ; под ред. А. И. Голованова. – М. : Колос, 2001. – 214 с.

Наукове видання

Пляцук Леонід Дмитрович,
Черниш Єлізавета Юріївна

**СИНЕРГЕТИКА:
НЕЛІНІЙНІ ПРОЦЕСИ В ЕКОЛОГІЇ**

Монографія

(Російською мовою)

Художнє оформлення обкладинки М. В. Карапузової
Редактори: Н. А. Гавриленко, Н. В. Лисогуб, С. М. Симоненко
Комп'ютерне верстання А. В. Маневської

Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 13,49. Обл.-вид. арк. 16,28. Тираж 300 пр. Зам. №

Видавець і виготовлювач
Сумський державний університет,
вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3062 від 17.12.2007.