

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уральский государственный университет им. А.М. Горького»

Физический факультет

Кафедра общей и молекулярной физики

Термодинамика нелинейных биологических процессов. Переход к хаосу

ГЛОССАРИЙ

Екатеринбург

2008

Большинство терминов и понятий, применяемых в учебном пособии с использованием синергетической парадигмы (теории самоорганизации) даётся в тексте учебного пособия. В то же время, попытки внедрения новой терминологии, несомненно, будут способствовать как развитию теории хаоса, так и развитию новой синергетической парадигмы, расширению ее прикладного применения к биологическим системам.

Аттрактор (Attractor) – Первоначально, это явление обнаружено метеорологом Лоренцом (странный аттрактор или бабочка Лоренца) в упрощенной компьютерной модели поведения погодной системы. Это тип хаотического поведения системы, предсказуемость которого возможна только на коротком временном отрезке. Но у этого типа поведения есть некоторый, один и тот же, глобальный паттерн. Существуют внешние границы поведения системы, за пределы которых она крайне редко выходит. Но если выходит, то сразу же возвращается, то есть аттрактируется на ту траекторию, к тому типу поведения который заложен в глобальном паттерне. Аттракторы расположены на границах систем, между равновесным и неравновесным состоянием или их подвидами. В настоящее время обнаружено множество странных аттракторов. Образный пример аттрактора приводит Г.Г. Малиновский, где аттрактор уподобляется озеру, область его притяжения - бассейну озера, а особенности рельефа бассейна являются законами движения капли воды на дно озера.

Адиабатический процесс, адиабата - процесс без обмена энергией и веществом с окружающей средой.

Бифуркация (Bifucation) – этап (точка, зона, область, период, последовательность) в развитии диссипативной системы, то есть системы, обменивающейся с окружающей средой веществом, энергией и информацией. Это состояние системы, находящейся в состоянии, как правило, сильного неравно-

весия, когда управляющие параметры (параметры порядка) достигают уникального состояния, критической или бифуркационной точки. Бифуркация – в переводе с английского – это раздвоение. В этой точке возможен переход, скажем, с траектории А, ставшей хаотичной (A^1), на параллельную траекторию В, которая становится стабильной, или на траекторию B^1 – которая на определенном временном отрезке также хаотична, но после его прохождения стабилизируется (B^2). Если, по каким то причинам избрана траектория A^1 , то есть прежнее движение продолжается, то система все дальше отклоняется от положения равновесия, управляющие параметры становятся еще более хаотичными и бифуркации происходят в еще большем режиме обострения в точке В. Далее все происходит таким же образом, как в точке А. Безусловно это пример простейшей бифуркационной диаграммы. По мнению Г.Г. Малинецкого, устойчивые ветви, это тип исторического пути, при котором некоторые возмущения существенно не меняют траекторию. Неустойчивые траектории, это теоретическая модель, «вещь в себе», движение по которым невозможно без жесткого управления. Бифуркации, в зависимости от глобальности того или иного параметра порядка, бывают различного типа.

Биологическое развитие и эволюция. Иногда весьма беспорядочные системы способны спонтанно "кристаллизоваться", приобретая высокую степень упорядоченности. Предполагается, что этот процесс играет важную роль в биологическом развитии и эволюции. Было замечено, что на границе между регулярным движением и хаосом ("кромка хаоса") могут происходить процессы, подобные эволюции или обработки информации. Возможно, что эволюция отчасти отражает спонтанную упорядоченность, на фоне которой действует механизм естественного отбора. В этом случае могут быть реализованы не все комбинации, а только некоторое избранное множество "аттракторов". Такой механизм резко уменьшает необходимое число итераций для появления того или иного биологического вида.

Диссипация -1) диссипация - а) производство энтропии в единице объема в единицу времени б) произведение потока на силу, его вызывающую. 2)Диссипативная система - механическая система, полная механическая энергия которой при движении убывает, переходя в другие формы, например, в тепловую. 3)Диссипативная энергия - переход части энергии упорядоченного процесса в энергию неупорядоченного и, наконец, в теплоту. 4)Диссипативные структуры. - Новые динамические состояния материи, отражающие взаимосвязи данной системы со средой, которые могут возникать в открытых системах далеких от равновесия. Эти новые структуры и есть диссипативные структуры. Эти упорядоченные самоорганизующиеся образования устойчивы относительно малых возмущений.

Диссипативная структура (Dissipative structure). Сложное состояние упорядоченного типа поведения, которое требует непрерывной энергетической подпитки для сохранения своего статус-кво. Следовательно, такой тип поведения нестабилен и труден для сохранения. Такая система неустойчива по Ляпунову на бесконечном интервале времени. Это требует постоянного внимания, времени и ресурсов для их поддержания.

Детерменизм - строгая предопределенность.

Закономерности самоорганизации. Знание закономерностей самоорганизации дает возможность в самом прямом смысле вмешиваться в деятельность существующих биосистем и управлять их динамикой, например при помощи лечебных физических факторов. Пока в этом направлении предпринимаются лишь самые первые шаги, наиболее примечательные из них связаны с разработкой принципиально новых методов стабилизации некоторых нарушений сердечного ритма.

Нарушение симметрии (Symmetry breaking). Период хаотического поведения части компонентов системы, результатом которого является разрушение существующего типа поведения, состояния, структуры. Для систем различной природы это может означать состояние беспорядка.

Неравновесность (non-equilibrium state). Состояние системы, далекое от равновесия). Неравновесное состояние системы, поведение которой легко меняется на качественно отличное от предыдущего, на основе маловероятных причин. Это влечет неустойчивость, хаотическое, фрактальное (рекурсивное) поведение.

Размерность (масштаб) (Scale). Это относится к последствиям изменения параметров в нелинейном механизме обратной связи, а также параметров порядка. Используется при исследовании разноуровневых типов диссипативных структур в различных временных и пространственных границах. Это относится, прежде всего, к типам поведения систем, порожденных на основе свойств самоподобия аттракторов.

Равновесие (Equilibrium). Состояние, при котором отсутствует тенденция изменения имеющейся модели, типа поведения. С точки зрения неравновесной термодинамики при равновесии все термодинамические силы и потоки равны нулю. Это может быть стабильное или нестабильное состояние, но оно всегда упорядочено, в том смысле, что данная модель поведения сохраняется в течение какого то времени. В равновесии поведение системы повторяемо и предсказуемо, по крайней мере, на некотором уровне. Равновесие - это одно из возможных состояний системы. Оно принимает стабильную форму, когда система регулярно воспроизводит прошлое состояние и когда воспроизвод-

ство этого типа поведения очень трудно изменить. Требуются значительные трансформации, для того чтобы вытолкнуть систему из состояния устойчивого, стабильного равновесия.

Самоорганизация (Self – organisation). Процесс, в котором компоненты системы спонтанно взаимодействуя между собой, четко кооперируются в скоординированном и согласованном совместном поведении и переходят к новой точке равновесия, изменив свою структуру. В процессе самоорганизации происходит непрерывное разрушение старых и возникновение новых структур, новых форм организации материи, обладающих новыми свойствами. Причём это качественно не те же самые образования, отличающиеся только геометрическими размерами, формой или другими физическими особенностями. Во Вселенной возникают уникальные образования, непрерывно возникают новые перестройки (бифуркации), в результате которых рождаются качественно новые структуры, не имевшие до сих пор аналогов. Они обладают новыми неповторимыми свойствами. А как эти свойства связаны со свойствами исходных элементов, из которых составлены системы? Это очень глубокий вопрос, который имеет как философское, так и практическое значение.

Самоподобие (Self - similarity). Свойство хаотического типа поведения системы, заключающегося в том, что собственно случайная последовательность паттернов поведения всегда подобна, схожа, но никогда точно не та же сама, и регулярно иррегулярна. Она измеряется константой степени изменчивости (разновидности типа), или константой величины фрактала.

Системы с обратной связью (Feed-back systems). В общем смысле, система - это организованный набор подсистем (субъектов, вещей, взаимоотношений), связывающих части в единое целое. Обратная связь проявляется в кру-

говом взаимодействии с помощью петли обратной связи, соединяющей одно действие (или информационный блок) с другим, который в свою очередь соединен с первым. Паттерны поведения систем при наличии обратной связи взаимозависимы, каждая воздействует друг на друга и реагирует на поведение другой, что, в итоге, влечет за собой взаимозависимость. Обратная связь может быть позитивной и негативной (положительной и отрицательной). Если она положительна, то в таком случае система А усиливает поведение системы Б. Такая обратная связь имеет усиливающий характер и ведет к так называемым порочным или добродетельным кругам в поведении системы. Неустойчивое равновесие – пример системы с положительной обратной связью. Отрицательная обратная связь подавляет, демпфирует поведение системы. Она также характеризуется самоусиливающимся эффектом в сторону нарастания подавления, снижая и противодействуя тенденциям выталкивания системы из данного состояния. Системы с отрицательной обратной связью развиваются строго в направлении устойчивого равновесия. Системы обратной связи могут быть линейными, когда ответ пропорционален причине вызвавшей отклик и поддерживают движение системы с постоянной скоростью. Системы обратной связи могут быть нелинейными, когда ответ системы неравноценен причине, вызвавшей отклик. В этом случае ответ преувеличен или приуменьшен, заставляя систему развиваться быстрее или медленнее. В системах с обратной связью очень сложно определить, что является причиной, а что следствием, особенно в случае нелинейных систем.

Случайность (Randomness). Случайными являются события, независимые во времени и в пространстве. Для случайных событий энтропия Колмогорова стремится к бесконечности. Блуждающее и бессистемное поведение системы. Последовательность протекания событий, в течение которого, ни одно событие не происходит там и так же, где и как оно происходило ранее. Решая научные и практические задачи, врачу постоянно приходится сталкиваться как с упорядоченными (детерминированными), так и со случайными

(хаотическими) процессами. Когда говорят о детерминированности некоего явления, имеют в виду, что, зная начальные условия и закон его изменения, можно точно предсказать его будущее в любой точке развития. Хаос же, напротив, подразумевает беспорядочный процесс, когда ход событий нельзя ни спрогнозировать, ни воспроизвести. Другими словами, хаос - это ограниченный порядок, а порядок - система хаоса.

Хаос (Chaos). Термин используется для обозначения явления, имеющего имманентно случайный (random) тип поведения, но порождаемого при фиксированных начальных условиях и детерминированных правилах (отношениях). Эти правила имеют форму нелинейной обратной связи. Хотя порожденное таким образом специфическое поведение системы случайно и, следовательно, непредсказуемо в долгосрочном плане, оно всегда имеет некоторую основу, некий скрытый образец, глобальную модель или ритм. Чем отличается хаотическое состояние от случайного? При наличии хаоса каждое последующее значение зависит в большей или меньшей степени от предыдущего значения. Случайные события не зависят друг от друга ни во времени, ни в пространстве. Для хаотических процессов энтропия Колмогорова больше нуля.

Хаос в биологических системах. Предполагается, что хаос является нормой динамического поведения не только нелинейных физических, но и биологических систем. Наиболее очевидная особенность живых организмов заключается в том, что они способны к самоорганизации, то есть спонтанному образованию и развитию сложных упорядоченных структур. Любой биологический объект представляет собой иерархию достаточно автономных подсистем, в которой исходящие от верхнего уровня сигналы управления не имеют характера жестких команд. Такой принцип устройства позволяет избежать неустойчивостей и нежелательной динамики, которые неизбежно возникают в сложных системах с жестким централизованным управлением.

Доказано, что среди огромного количества факторов, определяющих процессы регуляции сердечного ритма, большое влияние оказывает соотношение хаоса и порядка, которое может быть выражено показателем относительной энтропии.

Хаотическая динамика, состояние хаоса (Chaotic dynamics). Это пространственно-временная модель, или система, которая в своем развитии проявляет характеристики хаоса.

Управление хаосом. На первый взгляд природа хаоса исключает возможность управлять им. В действительности все наоборот: неустойчивость траекторий хаотических систем делает их чрезвычайно чувствительными к управлению. Пусть, например, требуется перевести систему из одного состояния в другое (переместить траекторию из одной точки фазового пространства в другую). Требуемый результат может быть получен в течение некоторого времени путем одного или серии малозаметных, незначительных возмущений параметров системы. Каждое из них лишь слегка изменит траекторию, но через некоторое время накопление и экспоненциальное усиление малых возмущений приведут к существенной коррекции движения. При этом траектория останется на том же хаотическом аттракторе. Комбинация управляемости и пластичности, по мнению многих исследователей, является причиной того, что хаотическая динамика является характерным типом поведения для многих жизненно важных подсистем живых организмов. Например, хаотический характер ритма сердца позволяет ему гибко реагировать на изменение физических и эмоциональных нагрузок, подстраиваясь под них. Известно, что регуляризация сердечного ритма приводит через некоторое время к летальному исходу. Упорядочение работы сердца служит индикатором снижения хаотичности и в других, связанных с ним системах. Регулярность свидетельствует об уменьшении сопротивляемости организма случайным

воздействиям внешней среды, когда он уже не способен адекватно отследить изменения и достаточно гибко на них отреагировать.

Три основных типа перехода от регулярной динамики к хаотической: 1) путём появления субгармонических колебаний; 2) через последовательные удвоения периода (бифуркации); 3) вследствие присутствия двух одновременных периодических колебаний.

Фрактал (Fractal) – геометрический объект с дробной размерностью Безиковича-Хаусдорфа. Одним из таких фракталей является странный аттрактор Лоренца. Размерность в значительной степени определяется положением наблюдателем, или более точно, зависит от конкретной связи субъекта и объекта и избранной системой измерения. Фракталы могут быть использованы для описания как физических объектов, таких как, кристаллы, облака, снежинки, предсказанию погоды и др.

Фрактальность. Свойство системы порождать себе подобные образцы поведения. Фрактальность измеряется переменными, выражающими постоянство (константу) нерегулярности в хаотическом типе поведения.

Флуктуации - случайные отклонения от наиболее вероятного состояния. Все системы и их подсистемы непрерывно флуктуируют. В живых организмах ширина флуктуационного разброса модулируется параметрами солнечной активности, гравитационного поля, температуры, уровнем гуморальной и нервной активности и т.д.

Динамика состояния здоровья. A.L. Goldberger (1986) высказал предположение о том, что нормальная динамика у здоровых индивидуумов имеет "хаотическую" природу, а болезнь связана с периодическим поведением. Известно, что вариабельность продолжительности сердечного цикла снижается при ожогах, сепсисе, кровопотере, лихорадке, сахарном диабете, неглубокой гипертензии, инфаркте миокарда, сердечной недостаточности, ишемической болезни сердца.

Чувствительность к первоначальным условиям (Sensitivity to initial conditions). Свойство усиления механизма нелинейной обратной связи, которое означает, что слабые изменения могут возрасти до глобального измененного долгосрочного типа поведения. Этот тип чувствительности настолько важен, что разница, например в одну миллионную долю какого либо параметра или переменной при начальных условиях может привести к изменению паттерна поведения всей системы. Малые изменения, которые возможно даже трудно оценить, зарегистрировать или измерить, могут привести к качественно отличному поведению системы.

Эвристический поиск, алгоритм (Euristic search). Набор пошаговых правил и процедур, в которых используют метод проб и ошибок, полагаясь на некий критерий удачи, для успешного решения проблемы.

Энтропия - По гречески слово $\epsilon\nu\tau\rho\omicron\pi\tau\iota$ означает "превращать, круговорот". Наиболее общее определение - "мера неупорядоченности системы".

Изотермический процесс, изотерма - процесс, проходящий при постоянной температуре. Аналогично изохора - постоянный объем, изобара - постоянное давление.

Морфогенез -- (morphé - форма, genesis - происхождение) процес, сопровождающийся многообразием возникающих форм, рост упорядоченности системы.

Онтогенез - (ontos - сущее, genesis - происхождение) процесс структурообразования, рост упорядоченности системы.

Паттерны (patterns, шаблоны) представляют из себя консистенцию некоего опыта, пригодную для повторного использования. Паттерны находят применение во всех областях деятельности, поскольку позволяют использовать сработавшие ранее решения.

Парадигма - общепринятая система научных взглядов.

Система – определение, данное выдающимся русским физиологом П.К.Анохиным: "Системой можно назвать только такой комплекс избирательно вовлеченных компонентов, у которых взаимное действие и взаимоотношения принимают характер взаимодействия компонентов на получение фиксированного полезного результата". Здесь следует подчеркнуть два фундаментальных свойства эффективных систем любой природы это обмен с окружающей средой энергией, веществом и информацией (т.е. это открытые системы) и взаимодействие, т. е. когерентность поведения между компонентами.

Синергетика (от греч. — «совместное» и греч. — «действие») — междисциплинарное направление научных исследований, задачей которого является изучение природных явлений и процессов на основе принципов

самоорганизации систем (состоящих из *подсистем*). «...наука, занимающаяся изучением процессов самоорганизации и возникновения, поддержания, устойчивости и распада структур самой различной природы...». Синергетика изначально представлялась как междисциплинарный подход, так как принципы, управляющие процессами самоорганизации, одни и те же безотносительно природы систем. Основное понятие синергетики — определение структуры как *состояния*, возникающего в результате поведения многоэлементной или многофакторной среды, не демонстрирующей стремления к усреднению термодинамического типа. В отдельных случаях образование структур имеет волновой характер и Определение термина «синергетика», близкое к современному пониманию, ввёл Герман Хакен в 1977 году в своей книге «Синергетика».

1/f – шум. К 1/f-процессам относится широкий класс совершенно несходных явлений. Например: изменения скоростей химических и биохимических реакций, вариации разности потенциалов на нейромембранах и в перехватах Ранвье нервного волокна, осцилляции активности одиночных нейронов и альфа-волн головного мозга, запись ежегодных подъемов воды в реках, интенсивность землетрясений, гроз, пульсации поверхности Земли и Солнца, атмосферно-электрических и геомагнитных полей и т.д. [5].

Теория катастроф, наряду с другими современными теориями динамических систем, уже в значительной степени изменила привычные представления об устойчивости и инерционности мира. Благодаря ей мы сегодня (хочется надеяться) лучше понимаем свою ответственность за возможные нарушения гармонии и равновесия противоположных природных сил, к которым ведет неограниченный рост промышленного производства в обществе потребления. Сейчас раздается все больше голосов за то, чтобы провести переоценку ценностей в современном мире и вслед за мудрецами древности вновь начать ценить красоту и соразмерность выше материального изобилия. Ведь если этого не произойдет, то поистине пророческими могут стать слова

творца теории катастроф французского ученого Рене Тома: “Быть может, удастся доказать неизбежность некоторых катастроф, например болезней или смерти. Познание не обязательно будет обещанием успеха или выживания: оно может вести также к уверенности в нашем поражении, в нашем конце”.

Флаги катастроф – особенности поведения системы, по которым можно судить о приближении к вырожденным точкам. Перечислим некоторые из них, чаще всего встречающиеся вместе: наличие нескольких различных (устойчивых) состояний; существование неустойчивых состояний, из которых система выводится слабыми “толчками”; возможность быстрого изменения системы при малых изменениях внешних условий; необратимость системы (невозможность вернуться к прежним условиям); – гистерезис.

Теплород - в XVIII веке - гипотетическая жидкость, переносящая тепло.

Триада Дарвина - изменчивость, наследственность, отбор.

Область исследований синергетики до сих пор до конца не определена, так как предмет её интересов лежит среди различных дисциплин, а основные методы синергетики взяты из нелинейной неравновесной термодинамики. Существуют несколько школ, в рамках которых развивается синергетический подход:

1. Брюссельская школа Ильи Пригожина, в русле которой разрабатывалась теория диссипативных систем, раскрывались исторические предпосылки и мировоззренческие основания теории самоорганизации.
2. Школа Г. Хакена, профессора Института синергетики и теоретической физики в Штутгарте. Он объединил большую группу учёных вокруг шпрингеровской серии книг по синергетике, в рамках которой к настоящему времени увидели свет более 60 томов.

3. Математический аппарат теории катастроф для описания синергетических процессов разработан российским математиком В. И. Арнольдом и французским математиком Рене Тома.
 4. В рамках школы академика А. А. Самарского и члена-корреспондента РАН С. П. Курдюмова разработана теория самоорганизации на базе математических моделей и вычислительного эксперимента (включая теорию развития в режиме с обострением). В России вклад в развитие синергетики внесли академик Н. Н. Моисеев — идеи универсального эволюционизма и коэволюции человека и природ.
1. Синергетический подход в биофизике развивается в трудах членов-корреспондентов РАН М. В. Волькенштейна и Д. С. Чернавского.
 2. Синергетический подход в теоретической истории развивается в работах Д. С. Чернавского, Г.Г.Малинецкого, Л.И.Бородкина, С.П.Капицы, С.Ю.Малкова, А.В.Коротаева, П.В.Турчина, В.Г.Буданова, А.П.Назаретяна и др.

Предмет синергетики распределился между различными направлениями:

- теория динамического хаоса исследует сверхсложную упорядоченность, напр. явление турбулентности;
- теория детерминированного хаоса исследует хаотические явления, возникающие в результате детерминированных процессов (в отсутствие случайных шумов);
- теория фракталов занимается изучением сложных самоподобных структур, часто возникающих в результате самоорганизации, процесс самоорганизации также может быть фрактальным;
- теория катастроф исследует поведение самоорганизующихся систем в терминах бифуркация, аттрактор, неустойчивость;

- лингвистическая синергетика и прогностика.

Синергетический подход в современном естествознании.

- Наука имеет дело с системами разных уровней организации, связь между ними осуществляется через хаос.
- Когда системы объединяются, целое не равно сумме частей. Появляется эффект эмерджентности.
- Общее для всех систем: спонтанное образование, изменения на макроскопическом уровне, возникновение новых качеств, этап самоорганизации. При переходе от неупорядоченного состояния к состоянию порядка все системы ведут себя одинаково.
- Неравновесность в системе является источником появления новой организации (порядка).
- Системы всегда открыты и обмениваются энергией с внешней средой.
- Процессы локальной упорядоченности совершаются за счет притока энергии извне.
- В сильно неравновесных условиях системы начинают воспринимать те факторы, которые они бы не восприняли в более равновесном состоянии
- В неравновесных условиях независимость элементов уступает место корпоративному поведению
- Вдали от равновесия согласованность поведения элементов возрастает. В равновесии молекула видит только своих соседей, вдали равновесия – видит всю систему целиком. Примеры: костная материя - коммуникация посредством сигналов, работа головного мозга.
- В условиях, далеких от равновесия, в системах действуют бифуркационные механизмы – наличие точек раздвоения продолжения развития. Варианты развития системы практически не предсказуемы.

Современная наука и синергетика объясняют процесс самоорганизации систем следующим образом.

1. Система должна быть открытой. Закрытая система в соответствии с законами термодинамики должна в конечном итоге прийти к состоянию с максимальной энтропией.
2. Открытая система должна быть достаточно далека от точки термодинамического равновесия. В точке равновесия система обладает максимальной энтропией и поэтому не способна к какой-либо организации: в этом состоянии достигается максимум ее самодезорганизации. В состоянии, близком к равновесию, система со временем приблизится к нему и придет в состояние полной дезорганизации.
3. Фундаментальным принципом самоорганизации служит возникновение и усиление порядка через флуктуации. Такие флуктуации, или случайные отклонения, системы от некоторого среднего положения, в самом начале подавляются и ликвидируются системой. Но в открытых системах благодаря усилению неравновесности эти отклонения со временем возрастают и в конце концов приводят к «расшатыванию» прежнего порядка и возникновению нового. Этот процесс обычно характеризуют как принцип образования порядка через флуктуации. Так как флуктуации носят случайный характер, то становится ясно, что появление нового в мире всегда связано с действием случайных факторов. Об этом говорили античные философы Эпикур (341-270 до н.э.) и Лукреций Кар (99-45 до н.э.)
4. Возникновение самоорганизации опирается на положительную обратную связь. Функционирование различных автоматических устройств основывается на принципе отрицательной обратной связи, т.е. на получении обратных сигналов от исполнительных органов относительно положения системы и последующей корректировки этого положения управляющими устройствами. В самоорганизующейся системе изменения, появляющиеся в системе, не устраняются, а накапливаются и усиливаются, что и приводит в конце концов к возникновению нового порядка и структуры.

5. Процессы самоорганизации, как и переходы от одних структур к другим, сопровождаются нарушением симметрии. Так, мы уже видели, что при описании необратимых процессов пришлось отказаться от симметрии времени, характерной для обратимых процессов в механике. Процессы самоорганизации, связанные с необратимыми изменениями, приводят к разрушению старых и возникновению новых структур.
6. Самоорганизация может начаться лишь в системах, обладающих достаточным количеством взаимодействующих между собой элементов, имеющих некоторые критические размеры. В противном случае эффекты от синергетического взаимодействия будут недостаточны для появления коллективного поведения элементов системы и тем самым возникновения самоорганизации