

- слительной математики и математической физики. Т. 40, 2000. №2. С.238.
6. Культура древней Индии. М., Наука, 1975. С.99.
 7. Рильке Р.М. Лирика. М., Художественная литература, 1965. С.164.
 8. Упанишады. М., 1967. С.59.
 9. Курдюмов С.П. Собственные функции горения нелинейной Среды и конструктивные законы построения её организации// Современные проблемы математической физики и вычислительной математики. М., Наука, 1982. С.217; Ахромеева Т.С., Курдюмов С.П., Малинецкий Г.Г., Самарский А.А. Нестационарные диссипативные структуры и диффузионный хаос. М., Наука, 1992; Achromeeva T.S., Kurdyumov S.P., Malinetskiy G.G., Samarskii A.A. Nonstationary Dissipative Structures and Diffusion-Induced Chaos in Nonlinear Media// *Physical Reports*. 1989. Vol. 176. P.189; Samarskii A.A., Galaktionov V.A., Kurdyumov S.P. and Mikhailov A.P. Blow-up in Problems for Quasilinear Parabolic Equations. Berlin, N.Y., Walter de Gruyter, 1995.
 10. Kauffman S. At Home in the Universe. The Search for Laws of Self-organization and Complexity. London, Viking, 1995. P.29.

Эволюция и самоорганизация

С.В. Чудов,

научный редактор издательства «Мир», Москва

Термин «эволюция», или «развитие», означает в гуманитарных науках и в биологии вовсе не то, что в физике. Для физики всякое изменение состояния рассматриваемой системы – это развитие. Но в биологии и философии, например, под эволюцией понимается реализация, воплощение, выявление скрытых потенциалов системы – их «развёртывание», подобно тому, как из семени вырастает дерево, из бутона – цветок. Другими словами, эволюция – это возрастание сложности и разнообразия, становление новых, прежде не существовавших структур, которые в каком-то смысле были запрограммированы в начальном, более простом и однородном состоянии. В самом понятии развития уже подразумевается качественное усложнение, некий антиэнтропийный процесс.

Поэтому сама возможность прогрессивной эволюции несколько неожиданна, так как противоречит расхожему представлению о времени как о разрушителе любых материальных структур. В мире сложного время не только разрушает, но и создаёт. Как это вообще возможно? Почему некоторые структуры оказываются столь устойчивы, что способны существовать и регулярно воспроизводиться в течение сотен миллионов лет? Ясно, что общие ответы на эти вопросы следует искать в теории информации и в теории устойчивости. Ведь всякую линию исторического развития системы можно рассматривать как канал передачи структурной информации из прошлого в будущее и применять к такому каналу шенноновскую теорию информации. Кроме того, устойчивость структур подчиняется общим законам теории устойчивости, и без анализа этой устойчивости, её причин и порождающих её механизмов никакой эволюционный прогноз невозможен. Но теория информации и теория устойчивости – это самые важные разделы кибернетики, и поэтому мы видим, что ключом к пониманию эволюции является кибернетический подход. Он должен стать интегрирующим, поднимающим эволюционное мышление на новую ступень.

Однако в действительности история развития биокибернетики сложилась иначе. Возникло не-

сколько направлений биокибернетических исследований, которые постепенно обособлялись и в конце концов оформились в самостоятельные дисциплины, мало связанные друг с другом: общая теория систем (Богданов, Анохин, Берталанфи), нейрокибернетика (Эшби, Турчин, Кауфманн), математическая генетика (Свирижев), математическая экология, теория стабилизирующего отбора (Шмальгаузен) и проч. В них используются разные математические модели с совершенно разными свойствами, и представители этих научных школ говорят на разных языках, почти не понимая друг друга. Возможен ли формализм, объединяющий достижения этих разных школ и дающий надежду на построение единой теории развития сложных систем, не только биологических, но и предбиологических, и постбиологических (т. е. социокультурных)? Я полагаю, что он возможен, если основные понятия выбирать достаточно абстрактными, чтобы можно было игнорировать специфику конкретных предметных областей, но в то же время достаточно содержательными, чтобы о таких моделях можно было не только философствовать, но и анализировать их математически – хотя бы качественно. Такой уровень абстракции действительно существует, и ключевыми в нём служат следующие термины: репликаторы (мемы), популяция репликаторов, диверсификация репликаторов, принцип конкурентного исключения, экологическая ниша, ценоз, сукцессия, климакс, метасистемный переход. Вот краткие определения этих понятий.

Репликатор, или *мем*, – любой структурный мотив или элемент, для которого существует способ скопировать, размножить и использовать в качестве «кирпичика» для построения более сложной системы. Примерами служат гены, буквы алфавита, слова, биологические организмы, структурные модели (морфологические и синтаксические) любого языка или знаковой системы. (Термин «мем» ввёл в оборот английский генетик Ричард Докинз по аналогии с понятием «ген».)

Популяция – это совокупность одинаковых (на данном уровне детализации описания) репликаторов.

Диверсификация – это изменение мемов, например в результате ошибок копирования, приобретение некоторыми из них новых свойств, отличных от свойств оригиналов – предковых мемов.

Принцип конкурентного исключения сформулирован Г. Ф. Гаузе применительно к биологическим видам: два вида не могут неограниченно долго сосуществовать в одной местности, если их экологические потребности одинаковы. Это следует из анализа устойчивости решений уравнений конкуренции Лотки-Вольтерры, основанных на логистической кривой роста популяций: размножение особей каждого вида ограничено доступными ресурсами, и, если популяция некоего вида становится слишком многочисленной, её дальнейший рост замедляется. Нетрудно видеть, что эти уравнения применимы не только к видам, но и к репликаторам произвольной природы, а значит, и сам этот принцип работает также для любых мемов, копирование которых ограничено доступными ресурсами.

Отсюда вытекает понятие *экологической ниши* как совокупности независимых от плотности условий и расходовемых при размножении ресурсов среды, которые необходимы для завершения цикла воспроизводства данного вида (мема). Это даёт ещё одну формулировку принципа Гаузе: один вид – одна ниша. Кроме фундаментальной ниши, определяемой наследственными свойствами вида (его экологическими потребностями), вводится также понятие реализованной ниши, то есть подмножества фундаментальной ниши, которое реально доступно в данной среде. Фундаментальные ниши разных видов могут перекрываться; реализованные в равновесном состоянии никогда не перекрываются, так как их пересечение – область неустойчивого равновесия. Ясно, что эти понятия синэкологии (экологии сообществ) непосредственно обобщаются на мемы любой природы: так, например, если в языке два слова близки по смыслу (а смысл слова – это область его употребления, его фундаментальная ниша), то в каждом конкретном подмножестве языка (региональном, профессиональном, функциональном) в одном и том же смысле употребляется только одно из них, то есть полной синонимии не бывает.

Ценозом называется система взаимодействующих репликаторов, населяющих одно и то же экологическое пространство: местность, область применения и так далее. Например, терминология каждой отрасли знаний является ценозом. Язык в целом – это тоже ценоз. Ценозом является также экономика каждого относительно замкнутого региона – страны, группы стран, всего мира, или любая культура, обладающая достаточной системной целостностью, чтобы её можно было считать самообусловленной, – материальная или духовная. Самые известные и хорошо изученные ценозы – это биоценозы, или экологические системы.

Сукцессия (лат. *successio* – преемственность, наследование) – последовательность смены во времени одних ценозов другими на данном участке земной поверхности, если речь идёт о биоценозах. Для ценозов общего вида – это последовательность закономерно сменяющих друг друга сообществ репликаторов, населяющих обобщённое экологическое пространство, например, развитие языка на данной территории или терминологии данной области знания, смена общественно-эко-

номических формаций в локальном или глобальном масштабе либо смена мод и стилей (в одежде или архитектуре), изменение способа производства (в техническом или социальном аспекте). Как видим, такое обобщённое понятие сукцессии претендует на то, чтобы описывать развитие чего угодно, как общий способ феноменологического описания процессов исторического развития вообще. В биоэкологии сукцессии подразделяют на первичные, происходящие на не затронутых почвообразованием субстратах – скальных породах, новообразованных вулканических островах или водоёмах, аллювиальных наносах, и вторичные – на местах, где биота разрушена пожарами, засухами, вырубками, но почва сохранилась. Этому важному различию можно найти аналоги и в обобщённой экологии – экологии культуры.

Климаксом, или *терминальным сообществом*, называется последний член сукцессионного ряда: это устойчивое сообщество, способное воспроизводить само себя неограниченно долго, как бы финал, итог развития. Климакс тоже понемногу меняется, но без качественного изменения структуры сообщества и лишь в результате изменения внешних условий, отслеживая эти изменения в квазиравновесном режиме. В обществоведении такие состояния сообщества называют застоём, в палеонтологии – стазисом.

И, наконец, последнее понятие, необходимое для формулировки общего подхода к эволюции сложных систем, – это понятие *метасистемного перехода*, сформулированное кибернетиком В. Ф. Турчиным. Это возникновение нового уровня управления, интегрирующего совокупность (в наших терминах – популяцию) однородных подсистем предыдущего уровня, то есть переход от системы к метасистеме. Хотя основная область интересов Турчина – нейрокибернетика и логика, но понятие метасистемного перехода удивительно удачно вписывается в изложенную выше систему понятий обобщённой экологии и служит её естественным продолжением. Но в системе понятий обобщённой экологии трактовка метасистемного перехода несколько иная: если у Турчина новый уровень управления возникает «по Дарвину» – методом проб и ошибок, то в нашей системе становление этого уровня – закономерный результат ценотической самоорганизации, переход ценоза в наиболее устойчивое терминальное сообщество.

Так мы подошли ко второй основной теме доклада – к понятию самоорганизации. На наш взгляд, это исключительно самостоятельный процесс естественного отбора, играющий важнейшую роль в эволюции и по существу альтернативный самому естественному отбору. Самоорганизация ценозов определяет как раз те особенности развития и прогрессивного усложнения сложных систем, которые невозможно без натяжек объяснить действием отбора.

Одно из главных возражений против ведущей роли естественного отбора в эволюции сложных систем – чрезвычайная неэффективность и медленнее система этого процесса. Чем сложнее и совершеннее система, тем сложнее улучшить её случайной, ненаправленной модификацией. Почти всякое случайное изменение окажется вредным, а вероятность вслепую натолкнуться на нужное изменение при любых реалистических подсчётах этой вероятности оказывается пренебрежимо малой. Ещё труд-

нее представить себе, как возможно случайное появление целой серии необходимых модификаций, в совокупности дающих селективное преимущество, но по отдельности бесполезных. Вероятность их одновременного появления совершенно ничтожна; она, как для всяких независимых случайных событий, равна произведению вероятностей каждого из них. Поэтому, если необходима цепочка скоординированных изменений достаточно длинна, то мы получаем совершенно нереалистичные оценки времени и размеров популяции, при которых вероятность реализации такой цепочки событий заметно отлична от нуля. Бытует такая фраза: скорее вихрь, пронесшийся над мусорной свалкой, соберёт из этих обломков современный «Боинг», чем случайное мутирование превратит бессмысленный набор нуклеотидов в работоспособный ген.

За многие десятилетия развития математической генетики так и не была построена хотя бы минимально правдоподобная математическая модель созидательной роли естественного отбора. Гораздо лучше справляется с охранительной функцией – отбраковкой накопившихся вредных мутаций, и к этому, по-видимому, и сводится его функция в управлении развитием сложных систем. В то же время самоорганизация ценозов – процесс быстрый, экспериментально воспроизводимый и легко наблюдаемый; каждый дачник может увидеть его на собственном садовом участке, если землю распашать и забросить на несколько лет. Во многих случаях уже через восемь-десять лет восстанавливается тот травяной покров, что был перед распахом. Для естественного самовосстановления вырубок также часто хватает нескольких десятилетий.

При всём разнообразии основанных на репликаторах ценологических систем самые удивительные и интересные из них – это биологические виды. А наиболее удивительное их свойство – устойчивость, способность даже в меняющейся среде миллионы, а иногда и десятки, сотни миллионов лет сохранять по крайней мере свой внешний облик, о чём свидетельствуют окаменелости. Поэтому, прежде чем понять, как возможно прогрессивное развитие, мы должны сначала представить, как возможно простое сохранение достигнутого уровня сложности, то есть как в таком канале передачи информации по цепочке поколений происходит столь надёжное отфильтровывание сигнала от шума, что миллионная копия с копии оказывается не менее чёткой, чем первая. В эпоху цифровых технологий ответ на этот вопрос очевиден: нам нужны дискретные коды, исправляющие ошибки, и многократное дублирование каналов связи. Каждый индивидуальный носитель структурной информации не вечен, и, будучи физической системой, он подвержен энтропийным процессам и через какое-то время распадается, но до своего распада успевает передать структурную информацию, переписываемую на новый носитель. Именно так, благодаря многократному копированию, до нас доходят тексты, написанные тысячелетия назад.

Достаточно ли описанный выше механизм для прогрессивного усложнения организации носителей текстов и усложнения структуры самих текстов? Это самый трудный вопрос теории биологической эволюции, и для ответа на него нужно строить математические модели таких процессов и изучать их

свойства. Модели могут быть разными – дискретными и непрерывными, детерминированными и стохастическими, линейными и нелинейными. В математической экологии для описания популяционной динамики используются нелинейные уравнения Лотки–Вольтерры. Применение к репликаторам сформулированного для таких уравнений «правила Гаузе» приводит к выводу, что всякий сбалансированный полиморфизм является следствием разделения ниш между конкурирующими вариантами: условия, необходимые для завершения цикла воспроизведения, для разных вариантов должны быть различны. Но в синтетической теории эволюции используется иной, мальтузианский подход к популяционной динамике: это линейное уравнение Мальтуса, описывающее экспоненциальный рост популяций. Относительный успех размножения оценивается в таких моделях сравнением коэффициентов размножения разных вариантов. Вариант, размножающийся быстрее, должен вытеснить тот, что размножается медленнее.

Итак, эволюционный прогноз для мальтузианских моделей оказывается принципиально отличным от прогноза для синэкологических моделей: в первом случае сосуществование разных вариантов всегда неустойчиво, и полиморфизм является лишь временным, переходным явлением, во втором существует самообусловленное равновесие между численностями разных вариантов репликаторов, и это предельное стационарное состояние глобально асимптотически устойчиво. На практике лишь синэкологические модели дают реалистичные предсказания. Как показал С.С. Четвериков на основании генетического анализа природных популяций дрозофил, внешнее единообразие фенотипов этих популяций неизменно скрывает широкий генетический полиморфизм. Поэтому он ввёл понятие «генотипической среды», на фоне которой проявляется эффект присутствия в генотипе тех или иных генов: этот эффект зависит от того, в каком генетическом окружении находится изучаемый ген.

Именно такое неоднозначное, сложное соответствие генотипов и фенотипов не позволяет приписывать отдельным аллелям (разным вариантам одного и того же гена) адаптивную ценность: аллель, полезный на одном генотипическом фоне, может быть нейтральным или вредным (с точки зрения точности воспроизводства «дикого типа») на другом генотипическом фоне. Многочисленность способов генетического кодирования одного и того же фенотипа делает морфологическую норму устойчивой к мутациям, а также к исторически сложившимся колебаниям параметров среды. Например, в более засушливый год носители одних аллелей могут подвергнуться массовому вымиранию, но зато уцелеют носители других аллелей, обеспечивающих устойчивость к засухе, но, возможно, неустойчивые к иным природным аномалиям, типичным для данной местности. Тем самым генетический полиморфизм увеличивает экологическую устойчивость популяции в целом и позволяет виду варьированием частот разных вариантов приспосабливаться к разным местообитаниям, расширяя свой ареал.

Если в мальтузианских моделях взаимоотношения между аллелями всегда антагонистичны, то в синэкологических моделях наряду с конкуренцией учитывается также кооперация – и меж-

ду аллелями одного локуса, и между разными локусами. **Кооперативные эффекты как раз и делают возможной самоорганизацию системы в целом.** Это позволяет ввести новое понятие *геноценоза* как сбалансированного генетического разнообразия данной популяции или вида в целом. Это понятие отражает системный характер изменчивости, то есть наличие иерархии уровней консерватизма разных генетических систем, а также иерархии управления этой изменчивостью. При этом оказывается, что более консервативные подсистемы определяют возможные направления развития менее консервативных, быстрее перестраивающихся подсистем, что следует из принципа подчинения, который сформулировал Г.Хакен (1980 г.): если систему нелинейных дифференциальных уравнений можно разбить на группы уравнений для переменных, скорости изменения которых резко различаются, то эволюция системы в целом определяется изменениями наиболее медленных переменных. Их значения можно считать параметрами в уравнениях для «быстрых» переменных, по которым равновесие достигается быстрее. Тогда дифференциальные уравнения для «быстрых» переменных можно заменить функциональными уравнениями изоклин (линий равного наклона), подставить эти уравнения в правые части уравнений для медленных переменных и снизить этим размерность задачи. В отечественной литературе этот метод называется адиабатической аппроксимацией.

Именно этим методом самоорганизующиеся системы оптимизируют свою устойчивость. Быстро изменяющиеся переменные подстраиваются под текущие значения более медленных, и размерность пространства поиска при отыскании стационарного решения постоянно уменьшается, что делает процесс установления сходящимся. Хотя для систем общего вида он может закончиться странным аттрактором, для более узкого класса центотических систем, в частности, для экосистем и генофондов природных популяций, поиск обычно приводит к устойчивому равновесию. Применимость к ним принципа подчинения обеспечивается наличи-

ем иерархии характерных масштабов времени релаксации, то есть выхода различных подсистем на стационарные режимы.

Синергетические подходы обычно применяются к физическим системам, гораздо более простым, чем те, что изучаются генетиками и экологами. Однако биологические системы также допускают применение к ним синергетических методов, если найти такой способ описания их эволюции, который позволил бы применить математический аппарат нелинейных динамических систем. Этот способ давно известен и широко применяется в популяционной экологии, и обобщение до такого описания принципа подчинения Хакена естественно и несложно. Нужно лишь заменить уравнения для амплитуд флуктуаций (для разных мод неустойчивости), которыми пользовался Хакен, уравнениями для численностей популяций разных видов или разных аллелей. Если в модели Хакена линейные части нелинейных уравнений имели отрицательные коэффициенты (затухание флуктуаций), то в нашей модели эти коэффициенты положительны, так как они описывают скорости размножения видов или аллелей. Но поскольку в нелинейной динамике Ферхюльста значение каждой переменной (при фиксированных значениях остальных переменных) стремится к стационарному пределу, то адиабатическая аппроксимация вполне возможна, и принцип подчинения работает.

Этим и определяется возможность нахождения центотическими системами устойчивых стационарных состояний: иерархия временных масштабов переходных процессов позволяет последовательно снижать размерность пространства поиска. Поэтому переходные процессы в разных подсистемах происходят независимо, и глобальная самонастройка осуществляется в квазистационарном режиме, не разрушая достигнутого равновесия внутри подсистем. Автономия подсистем делает сложность управляемой и обозримой – не только для исследователя, но и для самой системы. Ведь только системы, которые можно отлаживать по частям, способны к прогрессивному усложнению: иные просто не могли бы возникнуть эволюционно.

Синергетика как парадигма эволюции Вселенной

Е.Д.Ушаковская,

кандидат технических наук; директор НТФ «Теплофизприбор», Санкт-Петербург

Человечество всегда интересовало тайны мироздания. В конце прошлого века одна за другой появляются парадигмы создания и эволюции Вселенной. Заметную роль среди этих теорий занимает синергетика. До её появления в мире господствовал второй закон термодинамики, смысл которого состоит в том, что термодинамические процессы в изолированных системах идут с увеличением энтропии. Напомню, что энтропия – это мера хаоса. И действительно, многие процессы, которые мы наблюдаем, идут в сторону выравнивания потенциалов

(температуры, давления, электрических потенциалов и др.). И распространяя эти наблюдения на всю Вселенную, У.Томсон (Кельвин) и Р.Клаузиус пришли к выводу о «тепловой» смерти Вселенной.

Большая заслуга синергетики в том, что она вывела человечество из уныния от перспективы этой «тепловой смерти».

1. В двух словах о сути синергетики

В основе синергетики лежали наблюдения над некоторыми физическими и химическими процес-