

СТАДИИ ЭВОЛЮЦИИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Г. Ю. Ризниченко

Базовые понятия науки и обыденное сознание

В современном мире ни у кого не вызывает сомнения тот факт, что роль науки в жизни человека чрезвычайно велика. Мы все ездим на автомобилях, летаем на самолетах, смотрим телевизор и пользуемся стиральной машиной, компьютером, мобильным телефоном, не особенно задумываясь, на каких именно научных открытиях основаны эти технические устройства. Однако мы отдаем себе отчет, да и в школе учили, что законы механики и электричества были известны не всегда, а были кем-то открыты, а затем тщательно и широко исследованы, прежде чем воплотились столь удобным образом в привычные для нас вещи.

В основу всех этих технических достижений положено научное знание. Чем оно отличается от обыденного? Ведь мы обладаем большим объемом знаний, очевидно не научных. Например, знаем, что человек должен построить дом, посадить дерево и родить сына — без всяких научных оснований, просто в силу инстинкта продолжения рода и врожденного чувства единства с окружающей природой.

Научное знание отличается тем, что оно доказывается с помощью логических процедур (математическое или философское знание) или экспериментальной проверки (естественно-научное знание). Научное знание рождается в головах избранных, требует особых способностей и определенного образования. Для того чтобы «insight», «озарение», родившееся в голове гения, стало достоянием человечества, родившееся знание должно быть выражено на языке, понятном значительной группе людей. Надо, чтобы не только творец, но и другие люди уверовали в истинность этого знания, развили и продвинули его, наконец, воплотили в технические устройства. Лучше всего для этой цели приспособлен язык математики, будучи логически стройным и универсальным. Именно поэтому бытует выражение, что представления о явлениях становятся законами природы, когда они выражены на языке математики. Поэтому же исследователи любых предметных областей стремятся построить математические и компьютерные модели изучаемых ими явлений.

История научных идей и открытий представляет увлекательнейшие психологические детективные истории, но особенно интересны те идеи, которые оказали влияние не только на развитие материальной культуры, на технический прогресс, но и на саму систему обыденных представлений и моральных ценностей человечества.

Наука выработала огромный специальный словарь, позволяющий обсуждать научные понятия и представления. Этот словарь экспоненциально быстро разрастается и специализируется по отдельным отраслям науки и техники. Возникло множество специализированных словарей, причем зачастую ученые разных специальностей так же мало понимают друг друга, как мало понимают ученых неспециалисты.

Однако среди десятков и сотен тысяч специальных терминов время от времени в науке возникают такие, которые распространяются гораздо шире, чем в узкой области знания, в которой они возникли. Такие термины находят применение и становятся популярными не только в разных областях научного знания, но и в обыденном сознании и повседневной речи. По-видимому, выражаемые этими терминами научные идеи являются, говоря словами Юнга, «архетипическими». Кажется, что такие идеи и представления существовали «всегда», на протяжении всей известной нам истории цивилизации, в виде мифов, интуитивных представлений, моральных установок. Использование их наукой в качестве логически или экспериментально обоснованных положений научных теорий придает таким понятиям «за-

конность». Часто такие понятия приходят из обыденной речи, становятся научными терминами, а затем возвращаются из научного знания в обыденное сознание уже в новом статусе. Классический пример дает лежащая в основе современной физики теория Ньютона, который ввел в научный язык понятия времени, пространства, массы, гравитации (притяжения). Историк науки Д. Глейк, автор популярной книги «Хаос», пишет, что «все мы — ньютонианцы, когда рассуждаем о времени и движении, действии и противодействии, говорим, что спортивная команда, или политический лидер обладает моментом силы, или сетуем на инерцию бюрократической машины» (Gleick, 2003).

Двадцатый век дал нам два букета таких терминов. Один из них возник в начале века в связи с рождением теории относительности и квантовой механики. Это понятия относительности, вероятности, неопределенности, дополнительности, которые давно вошли не только в обиход науки, но и в школьные программы. Вторая группа терминов возникла в связи с развитием нелинейной науки, теории сложных систем, синергетики. Понятия порядка и хаоса, катастрофы, колебаний и циклов, бифуркации, фрактала широко используются в естественнонаучном и гуманитарном знании, стали частью обыденной речи, графические символы странных аттракторов и фракталов используются на рекламных щитах и обложках модных журналов. Хотя в научном словаре эти термины имеют строго определенный смысл, их широкое значение существенно размыто. Как и любые другие слова обыденного языка, они становятся многозначными, в то же время сохраняя свое научное «смысловое ядро», которое навсегда стало достоянием культуры.

Войдя в обыденную речь и в школьные программы, связанные с этими понятиями представления приобретают свойства «безусловных рефлексов» — очевидных истин. Реализуется поговорка: «Ясно, как дважды два — четыре». А почему, собственно, это утверждение так ясно? Да просто потому, что мы с детства это знаем и за всю жизнь ни разу не столкнулись с опровержением этой истины. Особенно легко усваиваются при этом те научные представления, которые уже существовали на интуитивном уровне или на уровне культурных стереотипов, пусть эти стереотипы и не из нашей культуры. Поэтому нам так радостно находить аналогии понятий синергетики в классических восточных религиозных представлениях о цикличности жизни или в греческих мифах о животворящей роли хаоса (Князева, Курдюмов, 2002).

Значительное продвижение в понимании смысла базовых моделей нелинейной науки, несомненно, стало возможным благодаря доступности компьютерных исследований. В классической науке, как правило, прибегали к линеаризации системы с целью приведения ее к виду, доступному для аналитического исследования. Компьютеры позволили при исследовании поведения системы во времени обходиться без этой сильной идеализации, что привело, в частности, к открытию хаоса в детерминированных нелинейных системах. Компьютеры также позволяют исследовать пространственно-временное поведение систем и влияние на это поведение стохастических составляющих. Расширение базовых моделей в пространство — осознание на уровне базовой модели важности факта пространственной гетерогенности — оказалось чрезвычайно важным и для понимания сути временного поведения сложных систем. Например, оказалось, что благодаря особенностям пространственно-временного поведения локальные временные изменения существенно затягиваются. К затягиванию процессов и возможностям «перескока» между различными квазистационарными режимами ведет и учет стохастической составляющей. Если речь идет о моделях популяционной динамики, переходные процессы в таких системах идут на протяжении тысяч поколений. Это означает, что на практике мы имеем дело только с переходными процессами, что определенным образом лишает смысла изучение стационарных режимов. Примеры конкретных систем и их обсуждение можно, например, найти в книге (Ризниченко, Рубин, 2004).

По-видимому, изучение базовых ситуаций в дискретных и непрерывных пространственно-распределенных системах с учетом стохастической составляющей может пролить

некоторый свет на понимание нами процессов эволюции сложных систем. Для отдельных стадий эволюции в настоящее время существуют достаточно убедительные базовые модели — модели отбора Д. С. Чернавского (Романовский и др., 1975), гиперциклы Эйгена (Эйген, Шустер, 1982). Однако закономерности перехода между этими стадиями мы представляем себе только на описательном уровне.

Между тем именно эти закономерности представляют наибольший интерес для современной науки. Если классическая физика — царица науки XIX–XX века — занималась, в основном, изучением механических и электрических систем и конструированием на базе открытых законов физики новых технических устройств, то в центре внимания науки XXI века находится человек во всех его аспектах: физиологическом, психологическом, социальном. То есть мы хотим изучить и понять законы поведения системы, частью которой мы сами являемся. Из внешнего наблюдателя исследователь превращается в действующее лицо системы, и задача существенно усложняется. Встает вопрос: как «изнутри» понять, в какой стадии развития находится система. Может ли мы, опять же «изнутри», управлять ее поведением, например, предотвращать кризисы? Возможно ли, и если возможно, то как, определить критерий оптимального поведения, и каким образом следовать выбранному критерию оптимальности?

Стадии эволюции

Здесь мы обсудим понятия «порядка» и «беспорядка» применительно к проблемам, связанным с научным и обыденным пониманием характера развития сложных систем во времени.

Итак, Вы — сложная система. Встречающий Вас человек задает самый ходовой вопрос: «Как дела?». — «Все в порядке», — на секунду задумавшись, отвечаете Вы с удовлетворением. Давайте посмотрим, что означает такой ответ. Во-первых, он означает «Все хорошо». И что же мы считаем «хорошим»? Если Вы — научный работник, это означает, что Ваша научная тема развивается, Вы публикуете все больше статей, защищаете диссертации, получаете гранты. Если Вы — бизнесмен, Ваш бизнес расширяется и приносит доход. Ваши дети растут и учатся. Если Вы — государство, растет Ваш внутренний валовой продукт, растут доходы ваших граждан, увеличивается продолжительность их жизни. Примеры можно продолжить.

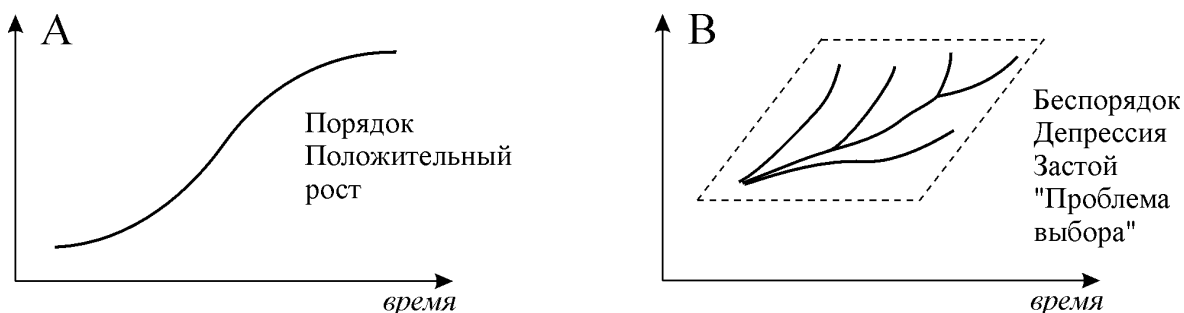


Рис. 1. Иллюстрация к понятиям «порядка» (А) и «беспорядка» (В)

Для сложной развивающейся системы «порядок» — это устойчивый рост некоторых показателей, соответствующий столь широко распространенному в современной политике термину «устойчивое развитие» (Рис. 1 А). Заметим, что для классической теории динамических систем этот термин довольно странный. «Устойчивость» обычно рассматривают применительно к стационарным режимам системы. К ним относятся точки покоя (стационар-

ные состояния) и устойчивые циклы — колебания с неизменными амплитудой и фазой. В реальности же стационарные состояния практически не наблюдаются. Мы уже отмечали, что одна из причин этого связана с пространственными и стохастическими свойствами системы, от которых при изучении эволюции сложной системы ни в коем случае не следует абстрагироваться.

Интересно, что в биологии в качестве «нормального», «стабильного» состояния рассматривается именно устойчивый рост, для такого состояния системы разработана доминирующая до последнего времени «нейтральная теория эволюции». На последних достижениях молекулярной генетики, проливающих свет на роль стресса в эволюционном процессе, мы остановимся ниже.

Ни один устойчивый рост не может продолжаться вечно. Простейшее логистическое уравнение описывает ограничение роста, связанное с исчерпанием ресурса, как выход на стационар. На практике замедление роста в дальнейшем сопровождается депрессией, стагнацией, уменьшением характеристических показателей. В этой стадии система встает перед проблемой выбора другой стратегии жизни (другого ресурса) (рис. 1 В). Если новый ресурс (новая жизненная стратегия) выбран правильно и действительно может обеспечить дальнейший активный рост, начинается новая стадия «устойчивого роста» типа А.

Обе стадии, А и В (рис. 1), являются «естественными» стадиями в развитии систем. Выдающийся русский биолог А. Н. Северцов называл эти стадии биологического прогресса стадиями ароморфоза (А) и идиоадаптации (В). Его понимание этих процессов представлено на рис. 2.

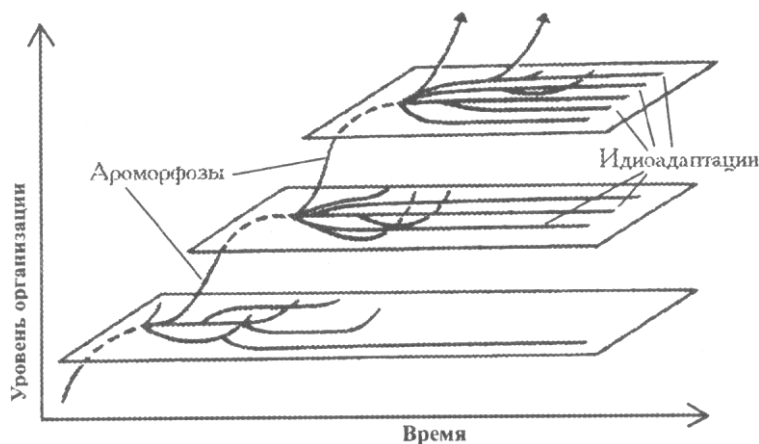


Рис. 2. Развитие уровня организации биологических систем. Ароморфоз и идиоадаптация. Из книги: Н. Н. Воронцов. Развитие эволюционных идей в биологии. 1999; рис. 221, с. 435

Отметим, что с точки зрения нашей интерпретации рисунок не вполне правильный. Новый период ароморфоза должен начинаться не с конца предыдущего, а с существенно новой идиоадаптационной линии.

Катастрофы

Кроме регулярных стадий А и В в развитии любой системы возможны «прерывы постепенности» — неожиданные события, которые мы называем катастрофами. На привычном пути от дома на работу человека может неожиданно сбить автомобиль. Или, к примеру, на Землю может обрушиться огромный метеорит. Рассматривать катастрофы можно по-

разному. Катастрофа может рассматриваться как событие, происходящее в соответствии с внутренними свойствами системы при изменении одного или нескольких параметров. При этом возможны резкие переходы системы из одного в другое стационарное состояние (рис. 3 C_1). Примером такого перехода является фазовый переход вещества, например, замерзание воды при понижении температуры или разрушение металла при накоплении в нем напряжений. Примером является также переключение метаболизма человека, страдающего стенокардией, на метаболизм по образцу сахарного диабета. Для описания такого типа явлений разработан формализм «теории катастроф» Рэне Тома, который завоевал широкую популярность в гуманитарных областях знания, таких как психология, социология, философия. Например, крупнейший французский философ-постмодернист Жиль Делез назвал свою работу «Складка» по названию одного из типов катастроф (Делез, 1998).

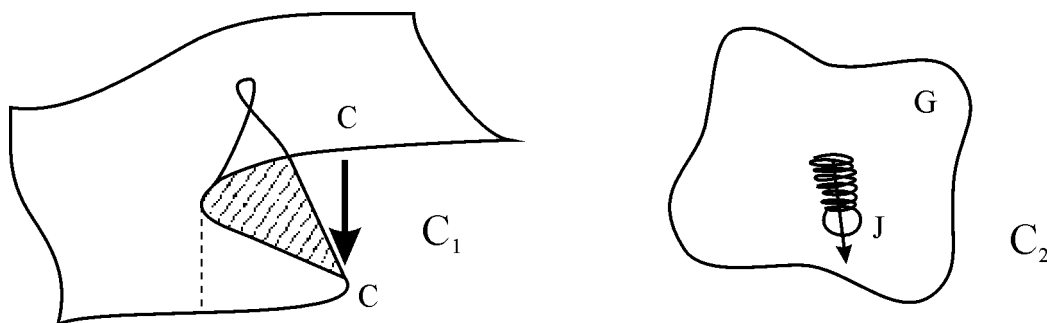


Рис. 3. Разные способы представления катастроф. C_1 — катастрофа типа «складка». C_2 — (J)-область Джокера, G — область регулярных движений

При другом подходе «катастрофа» полагается истинно случайной и возникает, когда система попадает в определенную область фазового пространства, называемую областью «джокера», который с определенной вероятностью «выбрасывает» систему в другое состояние, далекое от первоначального (Малинецкий, Потапов, 2000). Область «джокеров» (J на рис. 3 C_2) занимает относительно небольшую часть фазового пространства системы. Основная часть «жизни» системы проходит в «русле» регулярного поведения в области G. В «джокерной» терминологии стадии устойчивого роста типа «А» совершенно очевидно являются руслами. Сложнее обстоит дело со стадией «В».

Очевидно, что одно и то же критическое явление (катастрофу) можно рассматривать или как случайное, или как произошедшее в соответствии с внутренними законами системы. Например, автомобильная катастрофа может быть случайной, если рассматриваемая система ограничивается нашей личной жизнью, и становится вполне закономерным событием, если в систему входят все машины, движущиеся по улицам нашего города. То же самое можно сказать и по поводу примера с метеоритом. В систему Солнце–Земля–планеты следует добавить тела астероидного пояса, кометы, другие небесные тела, и тогда столкновение Земли с метеоритом можно описывать, не прибегая к джокеру. Систему всегда можно расширить настолько, что происходящие в ней события окажутся обусловленными ее внутренними свойствами. Однако и в случае с автомобилем, и в случае с метеоритом мы вынуждены рассматривать сложную систему многих тел. Для таких систем В. Арнольдом показана возможность типов поведения, когда перемещение одного из тел (метеорита) становится неустойчивым, квазислучайным, «диффузионным», похожим на броуновское движение.

В этом случае долговременное предсказание траектории становится невозможным, и детерминистическое рассмотрение в некотором смысле становится эквивалентным вероятностному «джокерному».

Вернемся, однако, к регулярным стадиям А и В. Почему система столь уверенно движется вдоль русла А, и каким образом система «ищет выход» из ситуации В? Эксперименты показывают, что разнообразие индивидуальных свойств компонентов системы на стадиях «устойчивого роста» (А) и «поиска выхода» (В) различны.

Стадии «порядка» и «беспорядка» в процессе роста популяции одноклеточных водорослей

Рассмотрим результаты экспериментов, полученных при регистрации кривых индукции флуоресценции, зарегистрированных на отдельных клетках одноклеточных микроводорослей *Scenedesmus quadricalia*. Флуоресценция представляет собой «паразитное» излучение фотосинтезирующей клеткой энергии, не использованной в процессе «полезного фотосинтеза», в ходе которого осуществляется биосинтез глюкозы из углекислого газа и воды и накопление энергии в виде макроэргических связей молекул АТФ. Поэтому низкий уровень и простая экспоненциальная кинетика спада уровня интенсивности флуоресценции соответствуют активному типу фотосинтеза, а высокий уровень и сложная кинетика спада — неактивному типу фотосинтеза. Возможные типы кинетических кривых представлены на рис. 4.

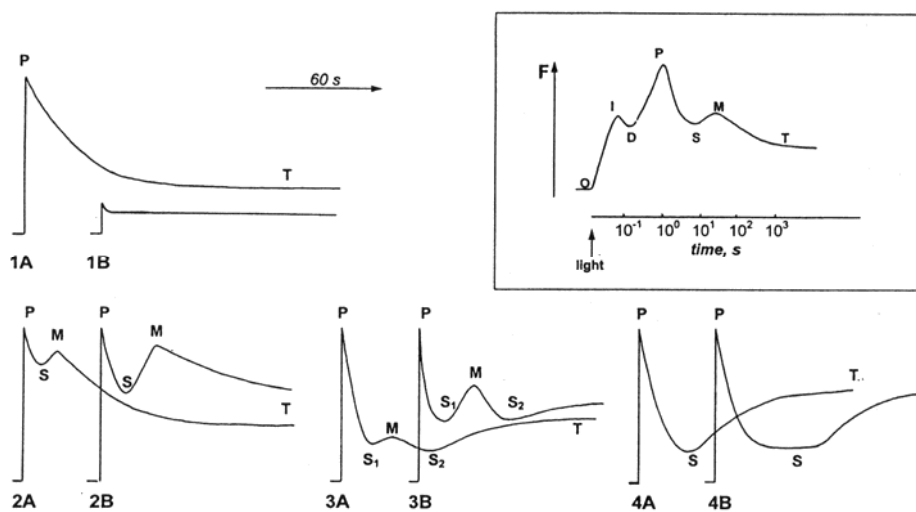


Рис. 4. Возможные типы кривых индукции флуоресценции отдельных клеток микроводоросли *Scenedesmus quadricalia*. В рамке дано схематическое изображение кривой индукции флуоресценции. Буквами указаны стандартные обозначения соответствующих фаз этой кривой. Типы кривых 1А, 1В соответствуют активному фотосинтезу. Типы 2–4 (А, В) — неактивному фотосинтезу (Riznichenko et al., 1996)

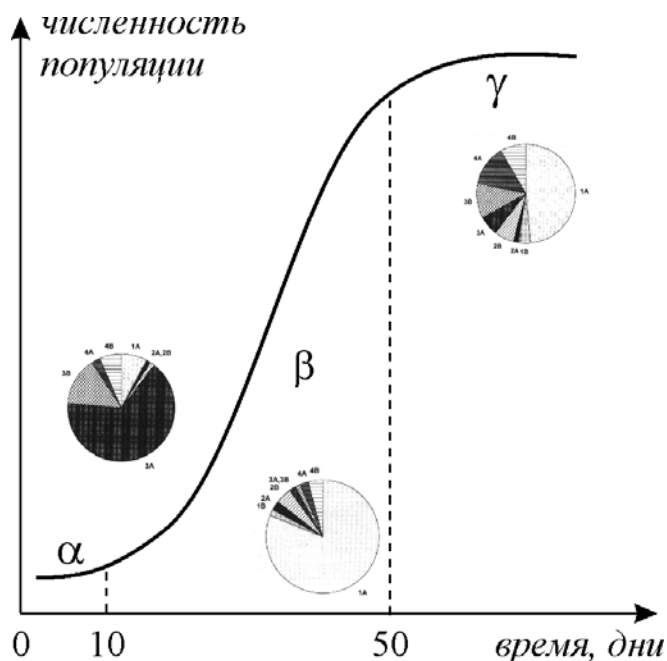


Рис. 5. Кривая роста культуры клеток микроводорослей и круговые диаграммы распределения клеток по типу индукционной кривой флуоресценции на разных стадиях роста культуры. Данные из статьи (Riznichenko et al., 1996), см. подпись к рис. 4

На рис. 5 представлена кривая роста популяции культуры клеток *Scenedesmus quadricalia*, высаженной в культуральную среду. На первом этапе роста (α) культура растет очень медленно — это так называемая лаг-фаза. Далее следует стадия быстрого устойчивого роста (β), которая по истечении нескольких десятков суток сменяется фазой насыщения (γ) и дальнейшего вымирания культуры. На рисунке также представлены круговые диаграммы распределения типа активности фотосинтеза отдельных клеток, определенного по типу индукционных кривых флуоресценции. Видно, что на стадии α типы клеток весьма разнообразны, причем преобладает неактивный тип фотосинтеза (черная область). На стадии устойчивого роста β практически все клетки обладают активным типом фотосинтеза (светлая область). На стадии γ опять начинают преобладать неактивные клетки.

В данных экспериментах моделируется лишь один этап процесса араморфоза между двумя стадиями идиоадаптации по Северцеву (см. рис. 2). В реальной жизненной ситуации, когда рост прекращается, популяция будет «искать выход», увеличивая свое разнообразие. Возможно, одна из многих предложенных жизненных стратегий окажется успешной и приведет к новому этапу устойчивого роста. При этом в условии стресса, вызванного истощением ресурса, самоотравлением или другими обстоятельствами, поиск должен производиться достаточно быстро.

Роль стресса в процессе эволюции

В конце прошлого века было показано, что в неблагоприятных условиях (на стадии беспорядка В) у микроорганизмов резко повышается скорость мутационного процесса (Cairns et al., 1988). В работе (Rhuterford, Linqvist, 1998) на дрозофилах было показано, что при стрессе (на стадии беспорядка — В) у эукариот происходит скачкообразная реализация ранее накопленной, но скрытой генетической изменчивости. В последующие годы появилось множество работ, посвященных изучению молекулярных механизмов ускорения процессов мутации в состоянии стресса (см. обзор: Вельков, 2002). Вот эти механизмы.

1. **ГИПЕРМУТАЦИИ В СУБПОПУЛЯЦИЯХ.** В условиях стресса микробные клетки прекращают рост и деление. Большинство клеток претерпевают физиологические преобразования и впадают в период «стазиса», когда они приобретают общую устойчивость к разного рода стрессам: голодному, тепловому, холодовому, кислотному и проч. Однако в меньшей части клеток (в 1/10000 или даже 1/1000000 общего числа клеток) включается механизм, генерирующий множественные мутации. Либо одна из мутаций приводит к началу роста, либо вредные мутации накапливаются и делают клетки нежизнеспособными — они погибают. Скорость такого адаптивного мутагенеза в субпопуляциях в 100–200 раз выше, чем обычного мутагенеза, проявляющегося на стадиях нормального роста (А).

2. **СТРЕСС СТИМУЛИРУЕТ ГЕНЕТИЧЕСКИЙ ПЕРЕНОС.** У микроорганизмов существуют особые плазмиды, которые живут внутри клеток, питаются внутриклеточными веществами и могут переходить из одной клетки (донорной) в другую (рецепиентную). Плазмиды переносят генетический материал не только вертикально (из поколения в поколение при делении клеток обе дочерние получают плазмиды), но и горизонтально — к другим микробным клеткам. В обычных условиях большинство микробов имеют систему, защищающую от проникновения чужеродных генов. Однако в условиях стресса эта система подавляется. При этом также срабатывает механизм, снимающий межвидовые генетические барьеры. Клетки становятся открытыми для чужеродной генетической информации: таким образом стимулируется межвидовой генетический перенос, который повышает вероятность найти выход из безнадежной стрессовой ситуации, вырваться из стадии В в новую стадию А.

3. **ПРОЯВЛЕНИЕ СКРЫТЫХ МУТАЦИЙ.** Одним из крупных открытий молекулярной генетики была идентификация стрессовых белков. Наиболее хорошо изучены белки теплового шока — шапероны, предохраняющие белки клетки от денатурации. В нормальных условиях стрессовые белки блокируют проявление неблагоприятного действия мутаций, шапероны «резервируют» мутации в морфогенетических генах. В работе (Rhuterford, Linqvist, 1998) и целой серии более поздних работ показано, что при стрессе этот блок снимается, и в популяции происходит массовое проявление ранее накопленных мутаций, приводящее к резкому изменению морфогенеза.

Изучение мутаций в дискретных стохастических системах показало, что для того, чтобы преимущество жизненной стратегии проявилось на уровне отбора, необходимо, чтобы оно было значительным и составляло как минимум десятки процентов (Эбелинг и др., 2001). При этом выживает не один конкретный наиболее успешный вид, а целая группа видов, обладающих близкими свойствами.

Легко найти аналогии этих механизмов в процессах, происходящих при социальных кризисах — общественных стрессах. Здесь также активизируются небольшие группы людей, выбирающих различные, часто далекие от традиционных, жизненные стратегии, в то время как основную часть населения охватывает социальная апатия и растерянность. Начинается активное взаимодействие между социальными слоями — передача идей и практического опыта не от поколения к поколению в рамках одной профессии или одного социального слоя, а горизонтально — между современниками разных социальных слоев. Также проявляются скрывавшиеся до времени тенденции развития, например, проявляются типы деятельности, ранее находившиеся в тени.

История России

Картинку, подобную лестнице эволюции Северцова (рис. 2), можно нарисовать для жизни каждого отдельного человека, коллектива, страны. На рис. 6 приведена такая картинка, иллюстрирующая эволюцию России в XX веке. Попытаемся охарактеризовать ее этапы в терминах стадий: А — порядок, устойчивый рост; В — беспорядок, выбор нового пути; С — катастрофа. Нам представляется, что Первая мировая война была «внешней» катастрофой (С₂), которая «опустила» Россию, уже после событий 1905 г. находившуюся на стадии В, в пучину Февральской, а затем Октябрьской революции и последовавшей вслед за ней

Гражданской войны. НЭП, а затем индустриализация, ценой огромных человеческих жертв вывели страну на стадию роста А, и Вторая мировая война была «внешней» катастрофой (C_2), которая снова опустила Россию, но в отличие от времени, последовавшего за Первой мировой, после окончания Великой Отечественной войны Россия продолжала успешно развиваться еще в течение двух десятилетий. Затем постепенно пришло «насыщение», и 80-е годы демонстрируют типичную стадию В — беспорядка и разложения. В начале 90-х наступила «внутренняя катастрофа» — переход к рыночной экономике, резкое падение всех показателей, причем до сих пор мы находимся в стадии В — беспорядка, низкого уровня роста и отсутствия объединяющих нацию идей. Сможет ли Президент реализовать поставленную цель удвоения производства за 10 лет? Если да — это будет новая стадия А.

Схема истории России XX века

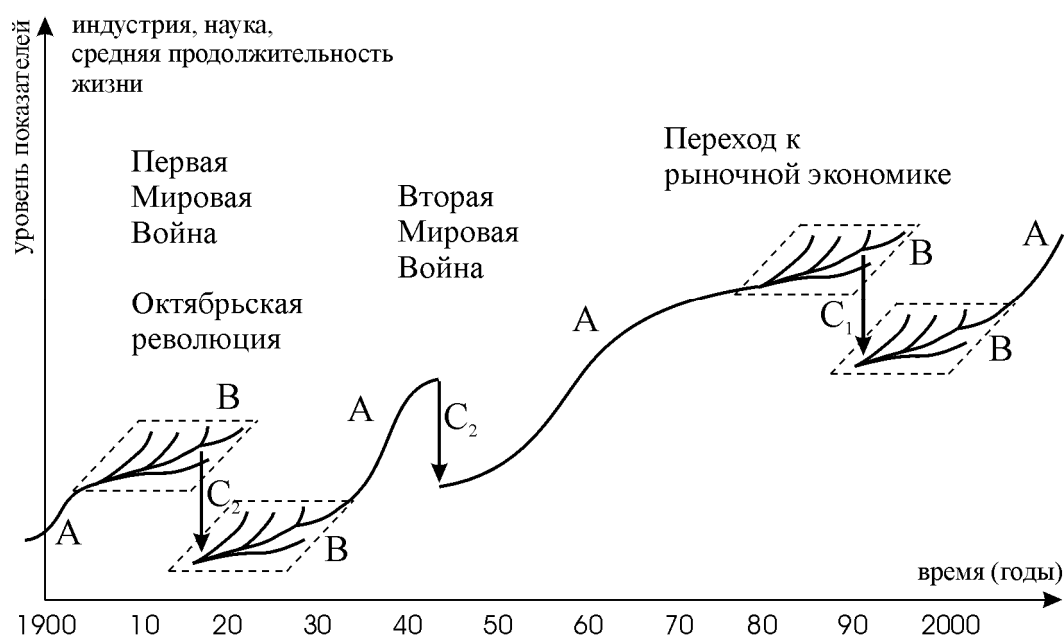


Рис. 6. Схема развития России в XX веке.

Заключительные замечания

Современная нелинейная наука существенно продвинулась в понимании процессов самоорганизации, рождения структур из первоначально гомогенных богатых энергией систем, процессов отбора. На простых базовых моделях удалось показать, что нелинейные системы могут иметь области непредсказуемого поведения. Мы в общих чертах представляем себе, как может проходить развитие структуры от простой к сложной. Понимаем, как могут реализовываться сценарии самоорганизованной критичности. Но все также находимся на уровне констатации фактов и описательных гипотез, когда речь идет о понимании процесса эволюции в целом. Мы далеки от понимания процессов рождения информации и связи процессов передачи и усвоения информации и механизмов, определяющих поведение как отдельной личности, так и социальных групп.

По-видимому, чтобы понять закономерности смены стадий эволюции, необходимо пытаться понять не только закономерности поведения простых базовых математических моделей, но и элементарные законы эволюции простых живых систем. Аналогия не является ис-

тинно научным методом, но именно аналогии чаще всего дают нам «чувство понимания» процессов и явлений.

Осознание того, насколько мало мы знаем о себе и окружающем мире, делают, как нам представляется, необоснованными опасения относительно «конца науки» (Хорган, 2001). Слишком самонадеянно считать, что построенная к настоящему времени наука принципиально все объяснила.

Гегель представлял историю человеческой мысли как самопознание высшего разума. История научных идей XX века, существенно расширивших горизонты нашего понимания законов природы, часть которой представляем мы сами, как нельзя лучше иллюстрирует великую гегелевскую метафору.

ЛИТЕРАТУРА

- Вельков В. В. Новые представления о молекулярных механизмах эволюции: стресс повышает генетическое разнообразие (обзор) // Молекулярная биология, 2002, т. 36, № 2, с. 1–9.
- Воронцов Н. Н. Развитие эволюционных идей в биологии. М.: Прогресс-Традиция. 1999, 640 с.
- Глейк Д. Хаос. Создание новой науки. СПб.: Амфора. 2001, 398 с.
- Делез Ж. Складка. Лейбниц и барокко. М.: Логос. 1998, 264 с.
- Ризниченко Г. Ю., Рубин А. Б. Биофизика продукционных процессов. Москва-Ижевск: ИКИ. 2004. В печати.
- Хорган Дж. Конец науки. Взгляд на ограниченность знания на закате века науки. СПб.: Амфора. 2001 480 с.
- Эбелинг В., Энгель А., Файстель Р. Физика процессов эволюции. М.: УРСС. 2001. 326 с.
- Cairns J, Overbough J., Muller S. The origin of mutants // Nature, 1998, v. 335, p. 142–145.
- Gleick J. Isaac Newton. Fourth Estate. L & NY. 2003. 290 p.
- Rhuterford S., Linquist S. Hsp90 as a capacitor for morphological evolution // Nature, 1998, v. 396, p. 336–342.
- Riznichenko G., Lebedeva G., Pogosian S., Sivchenko M., Rubin A. Fluorescence induction curves registered from individual microalgae cenobiums in the process of population growth // Photosynthesis Research, 1996, v. 49, p. 151–157.