

## Лекция 20-ая «Порядок из хаоса или хаос хаосу рознь»

### Спецкурс "Информационная Биология"

Лектор к.б.н. В.А. Гусев

В процессе самовоспроизведения живой системы (будь то клетка микроорганизма или человек) ее молекулярная машина расставляет молекулы в строго определенной последовательности и в определенные места согласно заложенной в ней генетической программе. Например, вероятность допустимых ошибок при воспроизведении ДНК микроорганизмов не должна превышать  $10^{-6}$ . В противном случае через несколько актов самовоспроизведения произойдет полное рассогласование работы биохимического аппарата и живая клетка превратится в груду молекул, способных только деградировать.

Следовательно, для возникновения живой системы из неживой материи необходимо, чтобы определенные молекулы расположились в пространстве в строго определенной конфигурации. Давайте для начала решим несложную комбинаторную задачу. Химическую "формулу" клетки микроорганизма можно представить как  $(C_6H_{12}O_6)^*N$  где С атом углерода, О атом кислорода, Н атом водорода, N число таких молекул. На самом деле это чрезвычайно упрощенная формула, так как в состав живого вещества входят еще сера, фосфор, азот, а в общем случае большая часть элементов таблицы Менделеева. Однако, содержание последних в клетке во много раз, а то и на много порядков меньше, поэтому для решения поставленной задачи ими можно пренебречь.

Для примера, возраст Земли составляет около  $T_3 \approx 1.5 \times 10^{17}$  сек, а полное время жизни всей

Вселенной около  $T_B \approx 4.5 \times 10^{17}$  сек. Времена абсолютно не сопоставимы  $T \gg T_3 \approx T_B$ , поэтому можно утверждать, что даже такая примитивная живая структура как клетка микроорганизма не могла возникнуть в результате случайного перебора атомов. Оппоненты могут возразить, что у астрофизиков нет полного согласия и уверенности, что принятая модель Вселенной и ее возраст соответствуют реальности, что есть альтернативные модели, в которых Вселенная бесконечна и существует вечно и тогда любая самая невероятная комбинация молекул, например, в виде человека может быть реализована – времени хватит на все. Тем более, что второй закон термодинамики этого не запрещает.

Подсчитаем число независимых комбинаций Z, которые можно сделать из этих элементов:

$$Z = \frac{N!}{n_C! n_H! n_O!}$$
, здесь  $n_C, n_H, n_O$  число атомов углерода, водорода и кислорода соответственно. В среднем для микроорганизмов  $N \approx 10^9$ , тогда легко показать, что  $Z \approx 10^{4.3 \times 10^{10}}$

Оценим теперь время, необходимое для выбора из этого числа комбинаций одной единственной, которая соответствовала бы расположению атомов в живой клетке микроорганизма. В среднем при  $300^\circ\text{K}$  атомы колеблются в пространстве с частотой  $10^{13}$  сек $^{-1}$ . Допустим, что при каждом таком колебании происходит формирование нового пространственного расположения атомов, то есть осуществляется одно состояние из

$Z \approx 10^{4.3 \times 10^{10}}$  возможных. Тогда полное время перебора всех комбинаций для выбора одной уникальной, соответствующей живой клетке, составит  $T \approx 10^{(4.3 \times 10^{10} - 13)} \approx 10^{4.3 \times 10^{10}}$

Даже если бы это было так, то все равно время жизни звезд с их планетными системами ограничено и составляет величину порядка  $10^{17}$  сек – это строго доказано в результате наблюдения за эволюцией множества звезд. После истечения этого времени стационарная фаза состояния звезды сменяется либо коллапсом, либо взрывом, что несовместимо с условиями существования земной формы жизни. А этого времени катастрофически не хватает не только для биологической эволюции, в результате которой, как принято считать, появился человек. Но даже для того, чтобы сформировать живую клетку в процессе случайного перебора атомов. **Получается замкнутый круг – живые формы на Земле существуют, но появиться сами они не могли.** Остается только апеллировать к Богу, что для науки неприемлемо, так как тогда ничего объяснять и понимать не надо, достаточно произнести фразу: “Бог знает”.

Все предыдущие рассуждения были построены на модели термодинамического хаоса. Известно из термодинамики, что в замкнутой системе, в конце концов, устанавливается состояние, когда энтропия достигает максимума - прекращаются любые упорядоченные перемещения атомов и молекул, прекращается энергообмен как между отдельными частями системы, так и с окружающей средой - наступает **статистический или термодинамический хаос**. И как мы рассчитали, теоретически в этом типе хаоса молекулы никогда не смогут самоорганизоваться до состояния живой системы.

Попробуем приблизиться к решению проблемы возникновения живого из неживого на основе современных представлениях об эволюции неравновесных систем и о **детерминированном хаосе**. Прежде чем определить это понятие, рассмотрим примеры из классической механики. Запишем точное уравнение движение маятника в гравитационном поле Земли при наличии внешней силы, изменяющейся по гармоническому закону. В угловых координатах это выглядит так:

$$(1) \ddot{\theta} + \gamma \dot{\theta} + g \sin \theta = F \cos \omega t \quad \theta$$

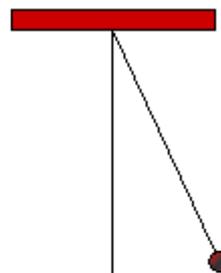
здесь  $\theta$  угол отклонения,  $t$  время,

$\omega$  угловая частота возбуждающей

силы  $F$ ,  $\gamma$  коэффициент трения,  $g$

ускорение свободного падения

(в угловых единицах).



При  $\theta \ll 1$ , что возможно если амплитуда возмущающей силы меньше некоторого критического значения  $F < F_c$ , это уравнение становится линейным и легко интегрируется  $\theta = \theta_0 \cos \omega t$ .

Как мы увидим на следующем рисунке, траектория такого маятника обыкновенная синусоида. А вот при условии  $F \geq F_c$  периодичность теряется и чем больше  $F$ , тем запутанней становится траектория движения маятника. При еще больших значениях  $F$  траектория полностью теряет черты регулярности и становится совершенно хаотичной. Последнее означает, что как бы точно мы ни задавали начальные данные, через некоторое время предсказать точное положение маятника уже невозможно.

Обратите внимание – уравнение (1) не содержит никаких случайных шумовых функций и, казалось бы, должно иметь точное аналитическое решение, то есть в любой момент времени должно точно предсказывать состояние маятника! В чем причина? При значениях  $F < F_c$

уравнение (1) допускает линеаризацию, когда  $\theta \ll 1$  можно записать  $\sin\theta \approx \theta$  тогда уравнение интегрируемо и его решение можно записать в аналитической форме. В общем же случае проинтегрировать его не удастся и решение можно получить лишь в результате численных расчетов на компьютере. “Ну и что”, скажет толковый студент, “аналитическую функцию синусоиду можно тоже представить в цифровом виде и в этом случае не будет никакого хаоса, точность предсказания будет зависеть лишь от величины дискретности шага и количества знаков после запятой”. И студент прав.

А теперь давайте рассмотрим еще один пример. Пусть дана дискретная функция вида:

$$(2) X^{n+1} = rX^n(1-X^n),$$

так называемое логистическое отображение. Эта функция описывает динамику популяций в замкнутой системе. Относительная (нормированная) численность  $X^{n+1}$  в  $n+1$  год пропорциональна численности в предыдущий год  $X^n$ , а также свободной части жизненного пространства, которая пропорциональна  $1-X^n$ , т.е.  $X^{n+1} = rX^n(1-X^n)$ , где параметр  $r$  зависит от плодовитости, реальной площади для жизни и т. д.

Казалось бы, можно ожидать, что благодаря механизму обратной связи, интересующие нас величины (численность популяции или величина счета в банке) будут стремиться к некоторым средним значениям. Однако итерации  $X^1, X^2, \dots$  отображения (2) при варьировании внешнего параметра  $r$  демонстрируют довольно сложное поведение, которое становится хаотическим при больших  $r$  (рис.2). Подчеркну еще раз, что такое поведение не зависит от точности, то есть от количества знаков после запятой при каждой итерации.

Теперь понятно, как можно “честным путем” сделать капитал из ничего или наоборот, будучи богатым человеком с кругленьким счетом в банке, в одночасье разориться. Отслеживая динамику курса валюты в первом случае надо успеть снять деньги со счета, когда сумма приобретает согласно уравнению (2), максимальное значение. Знать бы только *когда* – Джордж Сорос, например, угадал *когда* и стал меценатом. Это и называется спекуляцией на валютном рынке.

Таким образом, довольно простые системы, описываемые точными аналитическим или разностным уравнениями, при определенных значениях параметров демонстрируют **ХАОТИЧЕСКУЮ ДИНАМИКУ**. Отметим, что в обоих случаях уравнения содержат нелинейные члены. В этом то и заложены причины **ДЕТЕРМИНИРОВАННОГО ИЛИ ДИНАМИЧЕСКОГО ХАОСА**.

Зададимся вопросом – сколько реальных физических систем описываются интегрируемыми аналитическими дифференциальными уравнениями, имеющими точное аналитическое решение?

***Линейный классический осциллятор мы уже рассмотрели. К этому же классу относятся уравнение небесной механики для задачи двух тел, уравнение квантового осциллятора для двух противоположных зарядов. Всего три уравнения из того великого многообразия уравнений, претендующих на реальное описание мира?!***

Необходимо отметить, что все эти строгие математические описания годятся лишь для идеальных изолированных объектов, **реально в природе несуществующих** – нет в Солнечной системе и в галактиках двух отдельно существующих изолированных масс, нет двух изолированных зарядов, нет линейных осцилляторов. Получается, что **хаос правит миром?**

Физика долгое время почиталась за свою способность предсказывать события в сколь угодно далеком будущем, используя математический аппарат. Даже великий Лаплас считал, что для точного описания мира ему не хватает самой малости – начальных данных, то есть координат и скоростей всех частиц. Как уже видно из приведенных примеров, чем больше физике приходится иметь дело со сложными системами, из которых и построен реальный мир, тем больше осознается необходимость введения новых понятий. Физика все более утрачивает некоторые черты, считавшиеся ее неотъемлемой принадлежностью, например, способность делать точные предсказания.

Согласно принятому в физике подходу, сложную систему подразделяют на те или иные части, поведение которых подвергается воспроизводимому исследованию, при чем в ходе изучения части целого изменяется либо один параметр, либо весьма ограниченное число параметров. В современной физике представление о полной предсказуемости было поколеблено дважды.

Квантовая механика утверждает, что скорость и положение микроскопической частицы невозможно измерить одновременно сколь угодно точно. Этот квантовый предел точности следует из соотношения неопределенности  $\Delta X \times \Delta P = h$  здесь  $\Delta X$  неточность в определении координаты частицы,  $\Delta P$  неточность определения ее импульса,  $h$  постоянная Планка. Если  $\Delta P \rightarrow 0$ , тогда  $\Delta X \rightarrow \infty$  и наоборот. Следовательно, мы не можем точно предсказать траекторию частицы в будущем, так как для этого необходимо знать в начальный момент и точную координату, и точное значение скорости. Выше мы увидели, что и в классической механике предсказуемость, следовательно, повторяемость событий имеет ограниченную точность. Вы можете возразить, “но ведь астрономические наблюдения, например, за движением Луны позволяют с высокой точностью предсказать лунные и солнечные затмения на многие годы вперед”. Все зависит от характерных временных масштабов – наша Солнечная система существует несколько миллиардов лет, а еще через несколько миллиардов Солнце как звезда прекратит существование в современном виде, а вместе с ним прекратит существование и жизнь на Земле в ее современной форме. И что там будет предсказать невозможно.

***Все объекты, системы и их математические описания, рассмотренные выше создают некоторое ощущение безысходности и беспомощности науки для описания сложных систем – такое впечатление, что научное познание мира завершилось.***

Однако, в некоторых случаях осознанный барьер (в данном случае барьер непредсказуемости) не только лишает иллюзий, но и помогает увидеть в одних случаях обнадеживающие перспективы, а в других – истинный масштаб стоящих проблем. Безвыходных ситуаций, как известно, не бывает – нужно лишь похоронить старые догмы и тогда начнется новый этап в развитии науки, как сказал Галилей. Давайте с соответствующими почестями похороним догму о том, что эволюционирующая природа может быть адекватно описана только линейными уравнениями. Современные ученые пытаются понять сложность нашего мира, опираясь на простейшие нелинейные модели. Эта методология познания называется **синергетикой**. Автором этого термина является немецкий ученый Хакен.

Как и всякая наука, синергетика имеет свои объекты исследования, свою терминологию и свои методы. Объектом исследования синергетики являются **сложные системы**. Прежде всего, нам необходимо обсудить, что понимается под сложными системами. Интуитивно

кажется, что их можно описать как системы, состоящие из большого числа частей, элементов или компонентов, которые могут быть как одного, так и различного рода. Компоненты или части могут соединяться между собой более или менее сложными образом. Но далеко не всегда многокомпонентные системы могут быть отнесены к классу сложных.

Сравним, например, два типа кристаллов льда, состоящих из одного вида молекул  $H_2O$ . Если такой кристалл формируется при медленном замораживании воды в стакане, то молекулы воды формируют строгую периодичную в пространстве структуру в виде монокристалла. При замерзании атмосферной воды также формируется кристаллическая структура, но смею утверждать, что среди мириад снежинок вы не найдете двух идентичных по форме, хотя в общем на макроуровне они имеют форму шестигранников (рис. 3). В обоих случаях и в стакане, и в снежинках содержится огромное количество молекул, но с точки зрения синергетики лед в стакане это не сложная система, а снежинка наоборот сложная и поэтому является объектом исследования синергетики. В чем разница? Дело в том, что монокристалл в стакане формируется в так называемых квазиравновесных условиях, а снежинки в условиях атмосферы формируются в кинетическом режиме, весьма далеком от равновесия, поэтому имеют столь разнообразные формы. Хотя на молекулярном уровне оба типа кристаллической структуры идентичны.

***Таким образом, чтобы попасть в разряд сложных систем, объект не только должен состоять из большого количества элементов, но иметь многообразие форм, способов их расположения и взаимодействия как внутри системы, так и с окружающей средой.***

В начале лекции приведен пример живой системы клетки микроорганизма, состоящей из небольшого “джентльменского” набора атомов, но там же было сказано, что взаимное их расположение уникально и в этом смысле любой микроорганизм колоссально сложная система. Система настолько сложна, что мы до сих пор не можем понять, как такое образование могло самопроизвольно возникнуть.

Каждый человек изо дня в день решает в принципе одни и те же задачи и поэтому мы являемся “идентичными” объектами, но, вступая во взаимодействия друг с другом, мы формируем и пытаемся решать множество социальных, экономических, финансовых, политических и т.д. задач и в этом смысле любой даже небольшой коллектив людей является чрезвычайно сложной системой, являющейся так же предметом синергетики. Теперь легко понять, что и экосистемы это тоже объект исследования синергетики – и так далее вплоть до галактических масштабов, на которых формируются сложные “межзвездные отношения”.

Теперь попытаемся ответить на вопрос – можно ли считать сосуд с газом сложной системой? И да, и нет - все зависит от того, в каких условиях он находится. Если это банка с газом, находящимся в термодинамическом равновесии, то молекулы претерпевают взаимодействие лишь в момент столкновения, большую же часть времени при свободном движении молекулы “не догадываются” о присутствии соседей. И в этом состоянии газ простая система. Однако, если банка с газом ограничена с торцов двумя параллельными зеркалами, а сбоку освещается интенсивным световым потоком, который способен возбуждать молекулы то при определенных условиях, они начинают себя вести скоррелированно, то есть все одновременно возбуждаются и излучают свет через отверстие в одном из зеркал. Легко догадаться, что здесь описан газовый лазер. ***Такое кооперативное поведение молекул газа возможно лишь в условиях, весьма далеких от равновесия, степень удаления от которого задается интенсивностью потока энергии от внешнего источника.*** Эта система также является сложной и также является предметом исследования синергетики.

Как видно из приведенных примеров, синергетика в отличие от других конкретных наук физики, химии, биологии, социологии, экономики, экологии .... – всеядна, если речь идет об исследовании **сложных и неравновесных открытых систем**. А теперь попробуем проанализировать степень ее могущества, то есть понять, обладает ли она прогностическим началом и как далеко оно может распространяться в пространстве и времени.

Господа студенты! Попробуйте ответить на такой вопрос: по какой траектории движется электрон в процессе перескока с одной орбиты на другую или более корректно – где находится электрон в процессе перехода из одного стационарного состояния в другое?... Этот достаточно “наивный” вопрос является запрещенным в квантовой механике – на него нет ответа. И второй вопрос: а так ли уж важно знать конкретную траекторию электрона? Нас интересует, прежде всего, будет ли новое состояние устойчиво, то есть сколько времени оно просуществует и как в этом состоянии атом или молекула будут взаимодействовать с окружением, то есть нас интересует конечное состояние, а не путь к нему.

Допустим, что мы научились “видеть” электрон в переходном состоянии: каково значение этой информации для описания стационарных состояний системы? Возможно, что эта новая информация послужит толчком для познания глубинных свойств материи. Однако, для адекватного описания конкретной молекулярной системы с точки зрения поставленной цели эта информация ничего нового не дает, то есть она бесполезна и “биться в стенку головой” для ее добывания бессмысленно.

Перенесемся теперь из мира атомов в макромир и попробуем предсказать соотношение числа рысей и зайцев в некотором гипотетическом заповеднике, где на огражденной территории живут только эти представители фауны, а флоры пусть будет много. Поскольку рыси хищники, то могут в данном заповеднике питаться только зайцами, а жертвы зайцы питаются только травкой. Мы рассматриваем модель заповедника, следовательно, нашей целью является сохранение его видового состава, не конкретного зайца по имени Вася или конкретной рыси по имени Полкан, а стационарного состояния численности обоих видов. Для этой цели построим математическую модель в следующем виде:

$$(3) \quad \begin{aligned} \frac{dX}{dt} &= k_1 AX - sXY \\ \frac{dY}{dt} &= sXY - k_2 Y \end{aligned}$$

Первое уравнение описывает динамику популяции зайцев: коэффициент  $k^1$  определяет эффективность размножения, которая в первом приближении пропорциональна числу особей,  $A$ - ресурсы среды (в данном случае количество травы),  $s$  - смертность из-за поедания их хищниками, которая пропорциональна числу парных встреч хищник-жертва. Второе уравнение описывает динамику популяции рысей, скорость их размножения наоборот определяется числом парных встреч с жертвой. В этом уравнении введен также коэффициент естественной смертности  $k^2$  хищников, для зайцев его вводить нет необходимости, так они все равно не умирают своей смертью. Это так называемая модель Лотки-Вольтерра. Как видим, система уравнений нелинейная, следовательно, возможны всякие “фокусы”.

Наша задача, определить при каких значениях параметров в системе уравнений (3) возможно невымирание, то есть стационарное сосуществование обоих видов. Система уравнений (3) допускает единственное ненулевое стационарное решение:

$$(4) \quad X^o = \frac{k_2}{s}, \quad Y^o = \frac{k_1}{s} A.$$

В конечном счете, нас интересует - будет ли такое экологическое сообщество устойчиво сосуществовать в заповеднике. Для ответа на этот вопрос внесем возмущение в стационарное состояние (4), то есть позволим охотникам отстрелять некоторое количество зайцев и рысей.

Аналитически это возмущение можно представить так:

$$(5) \quad X(t) = X^o + xe^{at}, \quad Y(t) = Y^o + ye^{at} \quad \text{где } \omega - \text{ комплексная величина, а}$$

$$\left| \frac{x}{X} \right| \ll 1, \quad \left| \frac{y}{Y} \right| \ll 1.$$

Подставим (5) в (3) получим дисперсионное уравнение:

$$(6) \quad \omega^2 + k_1 s A = 0.$$

Здесь  $\operatorname{Re} \omega = 0$ ,  $\operatorname{Im} \omega = \pm(k_1 s A)^{1/2}$ . Это значит, что экспоненты в уравнении (5) не содержат расходящихся членов. На практике это означает: *какое бы возмущение ни вносилось в описанную экологическую систему, она будет устойчиво существовать.*

На данном рисунке показан фазовый портрет этой системы: координаты X, Y соответствуют количеству зайцев и рысей в условных единицах. Вид замкнутой кривой определяется параметрами экосистемы. Очевидно, что, зная их можно, прогнозировать запасы мяса и пушнины в охотничий сезон.

На этом рисунке показаны соответствующие данные за многолетний период наблюдения. Поскольку модель (3) построена для идеальной экосистемы – один хищник и одна жертва на замкнутой территории, а экспериментальные данные получены в реальной многокомпонентной и открытой среде с множеством неучтенных взаимодействий, то ожидать идеальных совпадений не приходится. Однако, сам факт наличия устойчивых колебаний популяций свидетельствует о том, что модель работоспособна и оправдывает надежды по предсказанию.

Мы рассмотрели очень простую математическую нелинейную модель и на ее примере увидели прогностические возможности синергетического анализа. Отмечу, что для этого нам не понадобилось искать точное аналитическое решение системы дифференциальных уравнений, – достаточно было провести качественный анализ наличия стационарного состояния и характера его устойчивости. В настоящее время построено уже достаточно большое количество моделей, описывающих разнообразные экологические, экономические, биологические и др. системы с множеством стационарных состояний и анализом характера их устойчивости. Так, например, удалось построить модель, описывающую ритмы сердечных колебаний, которая предсказывает возможность сбоя сердечной активности и переход его в состояние фибрилляции, то есть частых беспорядочных осцилляций. На основе этой модели можно предсказывать – что не должен делать больной аритмией в данный момент, чтобы его сердце через час или завтра, или через неделю не свалилось в состояние фибрилляции. Мы не будем останавливаться на конкретной математической модели этого явления. Это предмет отдельной лекции.

Рассмотрим теперь *обратную* задачу, которую оказалось возможно решить, используя

аналитический аппарат науки синергетики. В середине 50-х годов прошлого столетия была открыта химическая реакция, которая поначалу была зачислена в разряд явлений “этого не может быть, потому что не может быть никогда”.

Советский (это было в старые добрые времена еще при социализме :) ) химик Белоусов проводил исследование окисления лимонной кислоты броматом калия. Реакция протекала в кислой среде в присутствии ионов церия  $Ce^{3+}$ , которые играли двойную роль - катализатора и цветного индикатора. К его великому удивлению, после приготовления гомогенного раствора колба начала периодически изменять окраску с бледно-желтой на бесцветную. Впоследствии оказалось, что аналогичные явления происходят и с другими наборами реактивов. Наиболее изящно, эстетически зрелищно выглядит колба, если вместо лимонной кислоты использовать малоновую, а вместо ионов церия ионы железа  $Fe^{2+}$ . Тогда раствор в колбе может часами со строгой как часы периодичностью изменять цвет во всем видимом диапазоне от рубиново-красного до небесно-голубого. Брутто-формула этой реакции (ее называют реакцией Белоусова-Жаботинского по имени исследователей) выглядит достаточно просто:



здесь  $CH_2(COOH)_2$  - малоновая кислота. Однако, эта суммарная реакция протекает более, чем в 20 стадий и, соответственно, с образованием такого же количества промежуточных продуктов.

Интересна и поучительна история открытия этой удивительной реакции. Советский химик Белоусов Б.П. в процессе тематических исследований натолкнулся на комбинацию химических соединений, водный раствор которых в определенных условиях начинал “пульсировать в цвете”. Попытка опубликовать эти результаты первоначально закончилась полным неприятием их в научной среде химиков потому, что этого не должно быть согласно тогдашним представлениям о кинетике химических реакций. Отчаявшись доказать свое открытие, Белоусов выбросил пропись реакции и забыл о ней. Это было в начале 50-х годов прошлого века.

Через несколько лет в беседе со своими менее ортодоксальными коллегами он рассказал о своих давних наблюдениях. Поскольку первоначальная пропись была утеряна, с этого момента начался драматический поиск исходных компонент реакции и составление нужных пропорций. На большом листе ватмана была составлена двумерная матрица, по горизонтали которой были записаны все химреактивы, стоящие на полке в лаборатории, а по вертикали – всевозможные их концентрации. Далее путем последовательного перебора, наконец, были найдены и исходные компоненты, и их пропорции. Таким образом, открытие было сделано дважды одним и тем же исследователем – первый раз случайно, второй раз в результате системного поиска.

Короткая публикация результатов в виде тезисов в 1958 году произвела буквально взрыв в научной среде химиков. В настоящее время такого типа реакции изучают во многих лабораториях мира сотни, если не тысячи экспериментаторов и теоретиков. Именно эта реакция Белоусова-Жаботинского является одним из столпов, на которые опирается новая наука синергетика. Первооткрыватель же реакции Белоусов Б.П. при жизни не получил признания и уже посмертно “получил” государственную премию. Такова судьба многих первопроходцев в науке.

Но вернемся к “нашим баранам”. Не вдаваясь пока в детали этой сложной химической реакции, тем более, что и профессиональным ученым они не до конца еще ясны, отметим основные моменты, без которых описанный колебательный процесс был бы невозможен. Во-первых, **кооперативное поведение молекул в растворе не возможно без обратной связи**. Смысл последней можно понять на примере взаимодействия зайцев и рысей: увеличение числа особей хищника ведет к уменьшению популяции жертв и наоборот. Наличие такой обратной связи обеспечивает устойчивое существование экосистемы.

В аллегорической форме можно описать колебательные химические реакции также в терминах хищник-жертва. Роль “хищников” выполняют промежуточные продукты, которые замедляют или совсем блокируют отдельные стадии процесса – ингибиторы. Роль “жертв” выполняют катализаторы, которые ускоряют ход реакции. Хотя, как известно, сами молекулы катализатора Fe (или Ce) не расходуются в реакции, но соотношение концентраций ионов  $[Fe^{2+}]/[Fe^{3+}]$  (или  $[Ce^{3+}]/[Ce^{4+}]$ ) как показали исследования претерпевает сложную эволюцию. Несомненно, это весьма упрощенная схема, но она позволяет в общих чертах представить молекулярный механизм обратной связи в растворе.

Во-вторых, **колебательный процесс невозможен без источника энергии**, роль которого в модели Лотки-Вольтерра выполняла фауна, которую поедали зайцы. Очевидно, что ни о каких колебаниях и тем более устойчивости цикла хищник-жертва не может быть и речи, если в заповеднике забетонировать всю территорию – рыси съедят зайцев и потом сами вымрут.

В реакции Белоусова-Жаботинского источником энергии служит органическая малоновая кислота. Действительно, при ее полном окислении колебания в реакции затухают, да и сама реакция прекращается.

На следующем рисунке приведена та же реакция, но в тонком слое жидкости, налитой в чашку Петри. Мы видим, что реакция протекает совсем не так просто и равномерно во всем объеме, как могло показаться из предыдущего примера. Это еще одна особенность колебательных химических реакций – образование так называемых автоволн, которые представляют собой кольцевые или спиральные структуры. **Основным отличием автоволн, возбуждаемых в активных средах, от волн, например, на поверхности воды является отсутствие интерференции у первых. Они также не отражаются от стенок и других препятствий. При встрече двух автоволн они не проходят друг через друга, но взаимно гасятся.** Автоволны могут возникать за счет неоднородности среды: наличия частичек пыли или концентрационных флуктуаций в растворе.

Обычно на различных участках поверхности одновременно возбуждается несколько центров, от которых расходятся концентрические круги или спирали со скоростью порядка мм в секунду. Частоты колебаний автоволн, то есть частоты испускания очередного круга, возникающего у разных центров, могут довольно сильно различаться. Поскольку при столкновении автоволн происходит их аннигиляция, то выживут в этой борьбе за окружающую среду только самые быстрые, то есть те центры, которые чаще пульсируют. Вот вам **пример конкуренции и борьбы за существование в неживой системе.**

В задаче Лотки-Вольтерра сначала была построена математическая модель, затем ее

применили для описания экологического сообщества. Здесь же мы имеем обратную ситуацию – есть эксперимент Белоусова, необходимо составить его математическую модель. Ниже приведена одна из возможных математических моделей - модель Баутини колебательной химической реакции:

$$(7) \quad \begin{aligned} \frac{dX}{dt} &= aY + E_1X - X^3 - XY^2 \\ \frac{dY}{dt} &= aX + E_2Y - Y^3 - YX^2 \end{aligned}$$

Мы не будем заниматься ее подробным анализом, отметим лишь, что система содержит члены с кубической нелинейностью, стало быть, описывает тройные молекулярные взаимодействия. Число стационарных состояний в такой системе может быть от одного до трех, в зависимости от параметров кубической параболы. Анализ их весьма не тривиален, но это уже другая история.

Следует обратить внимание на то, что *при образовании регулярных структур – колец и спиралей, молекулы их формирующие, “не прибегают” из объема для формирования структур. Причина их образования в том, что химические реакции, то есть молекулярные взаимодействия, приводящие к соответствующему упорядочению, могут происходить только в данных геометрических зонах.* Далее, прореагировавшие молекулы покидают эти зоны за счет диффузии и освобождают место для повторного цикла реакций. *Самоорганизация реакционной смеси есть первый шаг на пути к живой клетке.*

А теперь пришло время вернуться к теме, затронутой в начале лекции.

**Вопрос 1.** Может ли современная или будущая наука, оставаясь в рамках своих категорий то есть без привлечения концепции Бога, построить экспериментально проверяемую модель самоорганизации неживой материи до состояния простейшей живой клетки микроорганизма и носителей интеллекта?

**Ответ 1.** Открытие самоорганизующихся молекулярных систем, обладающих одним из основных атрибутов жизни, – конкуренции – внесло оптимизм в среду ученых, занимающихся проблемой происхождения элементарных единиц живого - микроорганизмов. Открытие детерминированного хаоса позволяет также надеяться на возможность понимания сущности самоорганизации интеллектуального начала материи.

**Вопрос 2.** Существуют ли потенциальные способности у науки, не прибегая к астрологии и прочим субъективным методам предсказаний будущего, осуществлять долговременные прогнозы погоды, экологической, экономической, политической, социальной и др. структур общества, путей эволюции планеты Земля, Солнечной системы в целом и “судьбу” каждого отдельно взятого человека в частности?

**Ответ 2.** Основываясь на современных науках о теории катастроф, неравновесной термодинамике, синергетике можно надеяться на создание спектра особых точек (бифуркаций) или поворотных моментов, радикально меняющих состояние любых сложных эволюционирующих систем. Это, в принципе, позволит направленно варьировать управляющими параметрами систем для достижения поставленных целей.

**Заключение**

Мы рассмотрели лишь малую толику из всей проблематики, которая доступна синергетике. Но уже этот беглый просмотр завораживает перспективами и возможностями решения задач, которые раньше казались недоступными для математических методов и объяснения явлений, не имеющих право на существование в рамках канонической физики, биологии и химии. Достаточно взглянуть на мир глазами науки синергетики и невозможное, если не решается сразу, то, во всяком случае, уже не кажется неприступным. Это очень молодая и очень перспективная наука, включающая, хотя бы частично, объекты и методы многих естественных наук. Особенностью синергетики как точной науки является то, что под ее эгиду подпадают и гуманитарные науки, которые до этого оперировали лишь качественными, казалось бы, неформализуемыми категориями. Например, классическая теория информации оперирует только количеством информации, содержащемся в некоторой последовательности символов. Для выживания живых систем важно не просто количество, но и качество информации. Для формализации этого понятия необходимо учитывать состояние, в котором находится “приемник” информации, его цели. В категориях синергетики это понятие формализовано.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Баблюяц А. Молекулы, динамика и жизнь. М.: Мир, 1990, с.373.
2. Иваницкий Г.Р., Медвинский А.Б., Цыганов М.А. От динамики популяционных автоволн, формируемых живыми клетками, к нейроинформатике. УФН, т. 164, №10, с.1042-1071.
3. Николис Дж. Динамика иерархических систем. М.: Мир, 1989, с.486.
4. Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах. М.: Мир, 1979, с.512.
5. Пригожин И. От существующего к возникающему. М.: Наука, 1985, с.217.
6. Пригожин И. Время, хаос, квант. М.: “Прогресс”, 1994, с.266.
7. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса. М.: “Прогресс”, 1986, с.431.
8. Хакен Г. Информация и самоорганизация. М.: Мир, 1991, с.240.
9. Шустер Г. Детерминированный хаос. М.: Мир, 1988, с.240.
10. Эйген М., Шустер П. Гиперцикл. М.: Мир, 1982, с.270.
11. Синергетика. Сб. статей под ред. Б.Б. Кадомцева. М.: Мир, 1984, с.248.