

# Введение в теорию активных сред

*А.Ю.Лоскутов*

*МГУ им.М.В.Ломоносова, физический факультет*

## **Аннотация**

Первоначально понимание сложных систем было связано с представлением о том, что их невозможно описать при помощи математических моделей. Более того, долгое время жизнь рассматривалась как антипод неорганической природы. Сегодня, однако, происходит все более активное проникновение физических методов и подходов в биологию. Оказывается также, что основные формы кооперативного поведения, свойственные живым организмам, имеют свои аналоги среди неорганических систем. Любой живой организм представляет собой иерархию достаточно автономных подсистем, в которой исходящие от верхнего уровня сигналы управления не имеют характера жестких команд, подчиняющих себе активность всех индивидуальных элементов более низких уровней. Вместо этого от высших уровней иерархии поступают сигналы, которые предопределяют переходы подсистем из одного режима функционирования к другому. Иерархическое устройство сложных живых систем, которые представляют собой ансамбль связанных подсистем более простого строения, позволяет избежать неустойчивостей и нежелательной динамики, которые неизбежно возникают в сложных системах с жестким централизованным управлением.

Наиболее очевидная особенность биологических систем заключается в том, что они способны к самоорганизации, т.е. спонтанному образованию и развитию сложных упорядоченных структур. Это не противоречит законам термодинамики, поскольку все живые биологические системы не являются замкнутыми и обмениваются энергией с окружающей средой. Энтропия, служащая мерой беспорядка, может уменьшаться в открытых системах с течением времени. Необходимая предпосылка эффектов самоорганизации заключается в наличии потока энергии, поступающего в систему от внешнего источника и диссипируемого ею. Именно благодаря этому потоку система становится активной, т.е. приобретает способность к автономному образованию структур. Очевидно, что эффекты самоорганизации не могут быть исключительным свойством биологических объектов, и должны наблюдаться в той или иной форме также в системах неорганического происхождения.

Большой интерес представляют распределенные среды, которые построены из дискретных элементов, локально взаимодействующих друг с другом и, таким образом, являющихся приближением естественных пространственно протяженных систем. Хотя разнообразие таких сред чрезвычайно велико, число математических моделей, которые используются для описания процессов образования и развития структур в таких системах, не столь значительно. По-видимому, даже когда отдельные элементы системы (например, живые клетки) обладают сложной внутренней структурой, вся их сложность не проявляется во взаимодействиях между ними, и с точки зрения макросистемы они функционируют как достаточно простые объекты с малым числом эффективных степеней свободы.

В противном случае никаких упорядоченных структур в системе обычно не возникает.

Знание закономерностей самоорганизации дает возможность в самом прямом смысле вмешиваться в деятельность существующих биосистем и управлять их динамикой. В этом направлении наиболее примечательным является разработка принципиально новых методов стабилизации некоторых сильно нерегулярных сокращений сердечной мышцы (т.е. различного рода аритмий) и иногда возникающих в сердечной ткани смертельно опасных нарушений — фибрилляций.

Сердечная мышца (как и любая другая мышечная ткань) относится к так называемым возбудимым системам. Распространение волн в таких системах осуществляется посредством источника энергии, распределенного в ней. При подаче импульса в такую систему от места его приложения начинает распространяться возмущение — волна возбуждения: поступивший импульс не затухая последовательно передается от элемента к элементу. Обычно после возбуждения каждый элемент не способен сразу же возбудиться вновь. Как правило, существует определенное "время релаксации", называемое периодом рефрактерности, во время которого элемент как бы восстанавливается. Это приводит к упорядоченному пространственному распространению волны возбуждения.

При описании ряда возбудимых сред часто прибегают к аппроксимации исходной системы совокупностью отдельных возбудимых элементов, локально взаимодействующих друг с другом. Каждый такой элемент способен находиться в одном из трех состояний — покоя, возбуждения и рефрактерности. Из состояния покоя элемент может перейти в возбужденное состояние, в котором будет находиться определенное время. Затем он переходит в состояние рефрактерности и только потом вновь в состояние покоя. Таким образом, переход в возбужденное состояние оказывается возможным лишь из состояния покоя. Хотя такая модель является определенным приближением, она очень хорошо воспроизводит основные явления в возбудимых средах, в том числе и в тканях сердца.

Предположим, что имеется однородная возбудимая среда, в которой все элементы обладают идентичными свойствами. Тогда частота возбуждения всех таких элементов будет одинаковой. Если некоторую область такой среды начать периодически возмущать, то в этой области возникнет источник концентрически расходящихся волн возбуждения. Такой источник называют *ведущим центром* или *пейсмекером*. Если в возбудимой среде есть два или несколько пейсмекеров, то пейсмекер меньшей частоты генерации с течением времени подавляется пейсмекером большей частоты. Иными словами, имеет место *конкуренция* между пейсмекерами. В идеальном случае через определенное время во всей среде останется только один пейсмекер. Кроме пейсмекеров, в возбудимых средах возможно появление иных источников возбуждения — спиральных волн, которые представляют собой "вращающиеся" спирали. Все спиральные волны имеют одинаковую частоту. Поэтому они всегда сосуществуют между собой, но гасят ведущий центр, являющийся более медленным автоволновым источником. Кроме того, спиральные волны представляют собой главный тип элементарных самоподдерживающихся структур в однородных возбудимых средах. Подобно вихрям в сверхпроводнике или в сверхтекучем гелии, они чрезвычайно устойчивы.

Появление нескольких источников возбуждения в сердечной мышце в настоящее время связывается с опасными нарушениями нормальной работы сердца — *аритмией*. При большом числе аномальных источников наступает фибрилляция.

Современные методы выведения сердца из состояния фибрилляции являются очень жесткими (подача короткого электрического импульса громадного напряжения и большого тока). Развитие теории сложных систем позволило понять, что такое силовое воздействие вовсе необязательно. Часто вполне достаточно слабых электрических воздей-

ствий непосредственно на сердечную мышцу. Именно, если в среде имеются спиральные волны с противоположными направлениями вращения, то, подбирая фазу и частоту внешнего воздействия, можно добиться движения центров двух волн навстречу друг другу и их *аннигиляции*.

Почему для некоторых нелинейных сред сложное пространственно-временное состояние является более предпочтительным чем простое однородное поведение (т.е. когда из практически однородной система как бы "самопроизвольно" переходит в пространственно неоднородную) и каким образом такое состояние может реализоваться? Это один из давно известных и волнующих вопросов, восходящий к проблеме уменьшения энтропии в живых системах. До сих пор на него не получено исчерпывающего ответа. С позиции теории нелинейных неравновесных систем можно неожиданно просто подойти к решению этого вопроса.

К теории неравновесных сред тесно примыкает не менее интересная область исследований нелинейной динамики, изучающая колебательные химические реакции. В настоящее время ряд результатов теории динамических систем достаточно эффективно используются в химической кинетике. В частности, многие из колебательных химических реакций впервые нашли объяснение в рамках качественной теории дифференциальных уравнений.

Любая химическая реакция достаточно сложна. Ее стехиометрическое уравнение, как правило, не учитывает всю сложность элементарных процессов. Это уравнение выявляет природу реагирующих веществ и определяет общее число реагирующих молей, но не учитывает промежуточных компонент, появляющихся в ходе реакции (ионов, свободных радикалов и т.д.) на каждой ее элементарной стадии. Совокупность элементарных стадий, вовлеченных в суммарную реакцию, называется *механизмом* реакции. Используя закон действия масс и зная константы скоростей, можно описать реакцию динамически.

Химические системы диссипативны, и поэтому они не могут пребывать в каком-либо динамическом режиме: спустя некоторое время большинство химических реакций приходит в равновесие. Однако имеются исключения из этого правила (реакции Белоусова-Жаботинского, Бриггса-Раушера, Брея-Либавски, и некоторые другие), когда до образования конечных продуктов концентрации промежуточных соединений периодически изменяются с течением времени. В зависимости от концентраций реагентов (т.е., в сущности, параметров соответствующей системы дифференциальных уравнений), реакционная смесь может проявлять самые разнообразные режимы поведения: периодические, сложнопериодические, квазипериодические и хаотические.

## СОДЕРЖАНИЕ КУРСА

- 1 Основные типы активных сред
- 2 Волны переключения и заселения в простых бистабильных средах
- 3 Общие свойства структур в простых бистабильных средах
- 4 Бегущие импульсы в возбудимых средах
- 5 Процессы в возбудимых средах, образованных клеточными автоматами
- 6 Спиральные волны в распределенных возбудимых средах
- 7 Кинематика автоволновых фронтов в возбудимых средах
- 8 Резонанс и дрейф спиральных волн
- 9 Автоволновые структуры в трехмерных возбудимых средах

- 
- 10 Фазовая динамика в осциллирующих активных средах
  - 11 Фазовые волны и пейсмекеры
  - 12 Спиральные волны в автоколебательных активных средах
  - 13 Стационарные диссипативные структуры

## Список литературы

- [1] А.Ю.Лоскутов, А.Ю.Михайлов. *Основы теории сложных систем.*— Москва–Ижевск: РХД, 2007.
- [2] *Mathematical Methods in Contemporary Chemistry.* Ed. S.I.Kuchanov.— Gordon and Breach, USA, 1995.
- [3] A.S.Mikhailov, A.Loskutov. *Chaos and Noise.*— Springer, Berlin, 1996.
- [4] A.S.Mikhailov. *Distributed active systems.*— Springer, Berlin, 1995.
- [5] В.А.Васильев, Ю.М.Романовский, В.Г.Яхно. *Автоволновые процессы.*— М., Наука, 1987.