

О МЕХАНИЗМАХ ХИРАЛЬНОСТИ МАКРОСКОПИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Твердислов В.А., Мазуров М.Е., Яковенко Л.В.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
Ленинские горы, д. 1, г. Москва, 119991, РФ; e-mail: mazurov37@mail.ru

Поступила в редакцию: 05.05.2018

Аннотация. Установлено, что механизмы хиральности и хиральные свойства являются инвариантными как для макроскопических, так и для микроскопических объектов. Хиральные системы обладают рядом замечательных свойств, позволяющих реализовать самоорганизацию в сложных системах. В данной работе рассмотрены свойства хиральных систем на примере энергоемких упругих закрученных нитей, обладающих запасом свободной энергии и элементами хиральной асимметрии. Установлены следующие свойства макроскопических хиральных систем: влияние упругости при сгибании нити, чем меньше упругость на изгиб, тем меньше шаг двойной спирали и наоборот; допустимо закручивать три, четыре и большее количество упругих нитей, ограничений нет. Прочность системы из нескольких скрученных нитей увеличивается при увеличении числа скрученных нитей; хиральные системы являются аккумуляторами энергии; имеется возможность роста «усов» в хиральной системе; необходимость существования «замков» в хиральных структурах, соединяющих отдельные скрученные нити хиральной системы; влияние начальных условий на возникновение хиральности; имеет место масштабная инвариантность скейлинг эволюции хиральных систем. Многие свойства хиральности для макроскопических механических систем имеет место и на молекулярном уровне.

Ключевые слова: макроскопические хиральные системы, энергоемкие закрученные нити, аккумуляторы энергии, замки хиральных систем, масштабная инвариантность.

Введение.

Установлено, что механизмы хиральности и хиральные свойства являются инвариантными как для макроскопических, так и для микроскопических объектов. Например, свойства хиральности для макроскопических механических систем можно наблюдать и для молекулярных систем. Более детально свойства макроскопических хиральных систем будут описаны ниже с разъяснениями о наличии этих свойств для молекулярных систем.

Хиральные системы обладают рядом замечательных свойств, позволяющих реализовать самоорганизацию в сложных системах. Области приложения хиральных систем весьма значительны, более подробные сведения изложены в работах, например, [1-4]. В данной работе будут рассмотрены свойства хиральных систем на примере энергоемких упругих закрученных нитей, обладающих запасом свободной энергии и элементами хиральной асимметрии.

1. Математическая модель хиральной системы.

Хиральная система может быть получена путем закручивания двух упругих нитей. Рассмотрение данной «хиральной» системы является удобным для исследования влияния параметров нити – упругости к закручиванию, упругости к сгибанию относительно длины на динамику процесса закручивания и параметров, возникающих при этом шагов спиральной нити.

Уравнение хиральной системы в виде двух закрученных упругих нитей можно записать в виде системы двух дифференциальных уравнений в частных производных гиперболического типа.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} = D_1 \Delta u_1 + \alpha_1 u_1 + \beta_1 f_{12}(u_2) \\ \frac{\partial^2 u_2}{\partial t^2} = D_2 \Delta u_2 + \alpha_2 u_2 + \beta_2 f_{21}(u_1) \end{array} \right. , \quad (1)$$

где u – отклонение фазы от состояния равновесия в плоскости, нормальной направлению нитей; f_{12} и f_{21} характеризуют связь упругих нитей; α_1, α_2 – константы, характеризующие линейную составляющую упругости; D_1, D_2 – коэффициенты диффузии; Δu – лапласиан в цилиндрических координатах, равный

$$\Delta u = \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial^2 u}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} .$$

Связь упругих нитей реализуется через их взаимодействие по их длине. При этом существенное значение имеет толщина упругих нитей, поскольку каждая из нитей закручивается относительно другой, как вокруг цилиндра. При умеренной связи зависимость связей от отклонения можно считать линейной, то есть

$$f_{12}(u_2) = \beta_1 u_2; \quad f_{21}(u_1) = \beta_2 u_1.$$

В первом приближении можно не учитывать процессы распространения возбуждения в вертикальной плоскости по оси OZ , и считать тела маятников твердыми. Уравнение для отклонения можно записать в виде

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} = \alpha_1 u_1 + \beta_1 u_2 \\ \frac{\partial^2 u_2}{\partial t^2} = \alpha_2 u_2 + \beta_2 u_1 \end{array} \right.$$

Уравнение (1) является нелинейным дифференциальным уравнением в частных производных гиперболического типа. В случае симметричности закрученных нитей $f_{12} = f_{21}$. Нити нельзя считать бесконечно тонкими. Эту линию в дальнейшем считаем бесконечно тонкой, если нет другой оговорки.

Представляет интерес, каким образом происходит взаимодействие нитей двойной хиральной системы. Установлено, что касание нитей при конечной их толщине происходит по винтовой линии. В общем случае сами закручиваемые нити, как было отмечено, не могут быть бесконечно тонкими, поскольку закручивание происходит именно вокруг этих линий. В дальнейшем полагаем, что нити имеют круглое сечение диаметром d_0 . Теоретически можно представить взаимное закручивание двух бесконечно тонких нитей вокруг бесконечно тонкой линии касания лишь при предельном переходе при $d_0 \rightarrow 0$.

Линия связи может иметь в ряде случаев и другую форму. Взаимодействие закрученных энергоемких нитей может быть реализовано через гибкую полосу. Например, в виде спирально закрученной полоски, что имеет место при конформации белков. Основные закономерности взаимодействия сохраняются. Примером такой двойной хиральной структуры являются также спиральные структуры ДНК.

2. Физические свойства механической хиральности.

2.1 Свойства, обусловленные наличием свободной энергии.

Интересным свойством механических хиральных систем является возможность фиксации потенциальной энергии скрученных упругих нитей. Для фиксации состояний хиральной системы необходима установка двух замков. Один из замков связывает закрученные упругие нити в точке A , а другой из замков связывает закрученные упругие нити в точке B , стоящей от точки A на некоторое расстояние, равное l .

Эволюционирующая система, обладающая запасом свободной энергии и элементами хиральной асимметрии, реализуемая в виде скручиваемых нитей обладает следующими свойствами: 1) Влияние упругости при сгибании нити, чем меньше упругость на изгиб, тем меньше шаг двойной спирали и наоборот; 2) Допустимо закручивать три, четыре и большее количество упругих нитей, ограничений нет. Прочность системы из нескольких скрученных нитей увеличивается при увеличении числа скрученных нитей; 3) Хиральные системы являются аккумуляторами энергии; 4) Имеется возможность роста «усов» в хиральной системе; 5) Необходимость существования «замков» в хиральных структурах, соединяющих отдельные скрученные нити хиральной системы; 6) Влияние начальных условий на возникновение хиральности; 7) Имеет место масштабная инвариантность скейлинг эволюции хиральных систем.

2.2 Правила возникновения механических хиральных систем.

Можно сформулировать некоторые правила возникновения механических хиральных систем, учитывая общие правила возникновения хиральных систем [3-17].

Правило 1. Эволюционирующая система, обладающая запасом свободной энергии и элементами хиральной асимметрии, находясь в пределах одного иерархического уровня, способна в процессе самоорганизации изменять тип симметрии, повышая свою «сложность», но сохраняя знак преобладающей хиральности («правой»-D или «левой»-L закрученности).

Правило 2. Эволюционирующая система, обладающая запасом свободной энергии и элементами хиральной асимметрии, имеет тенденцию к спонтанному формированию через ряд бифуркаций последовательности иерархических уровней с чередующимся знаком хиральности заново образующихся структур и с увеличением их относительного масштаба.

Возможна самоорганизация до более сложных замкнутых хиральных систем. Пример такой самоорганизации, полученной в результате моделирования, показан на рисунке 1.

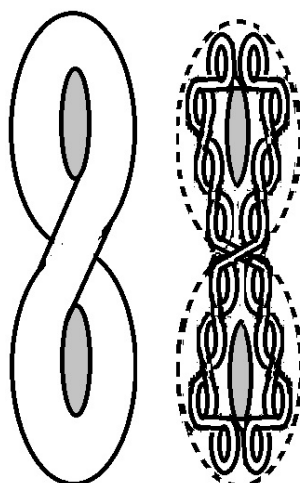


Рисунок 1. Пример сложной хиральной самоорганизации, полученной в результате моделирования

Рассмотрим более подробно отдельные свойства хиральных систем.

2.3 Хиральные системы – аккумуляторы энергии.

Одним из фундаментальных свойств хиральных систем является способность аккумулировать и сохранять энергию. Таким образом, хиральный объект является автономным аккумулятором энергии. Существенно то, что для сохранения запасенной энергии необходимо взаимодействие с внешней средой. Например, для механической системы закрученной пружины необходим упор, препятствующий её раскручиванию и являющийся внешней средой. В хиральной системе, состоящей из двух закрученных пружин, каждая упирается в другую, и энергия сохраняется без взаимодействия внешней средой.

2.4 Необходимость существования замков в хиральных структурах.

Необходимым условием создания автономного аккумулятора является наличие замка, фиксирующего стабильность гашения усилий обеих частей хиральной системы. Иллюстрация замков по обе стороны хиральной системы в виде сплошных прямоугольников показана на рисунке 2.

Рассмотрим хиральные системы с изменяющейся величиной закрутки вдоль линии. Уравнение винтовой линии, по которой происходит касание закрученных упругих нитей, может быть записано в параметрической форме. Из параметрического уравнения винтовой линии следует, что винтовая линия – трехмерный объект. Рассмотрим состояние двойной хиральной структуры, когда ее один конец наглухо закреплен, а другой свободен. В этом случае взаимное давление линий наибольшее в закрепленной части двойной хиральной структуры. При наличии трения вдоль оси винтовой линии, когда сила трения F пропорциональна давлению d справедливо соотношение $F = kd$. Если витки двойной хиральной структуры расположены равномерно, то давление d в них одинаковое. Если один из концов свободен, исходит постепенное ослабление взаимодействия ближе к свободному концу. Это обстоятельство приводит к двум последствиям: 1. Сила трения уменьшается по мере приближения конца спирали; 2. Длина витков двойной хиральной структуры возрастает по мере приближения к свободному концу. Рассмотрим хиральную систему, замкнутую на одном конце и свободную на другом конце. Величина скручивания в такой системе будет уменьшаться от замкнутого конца к свободному. При этом длина витка хиральной системы будет увеличиваться от начала к концу системы.

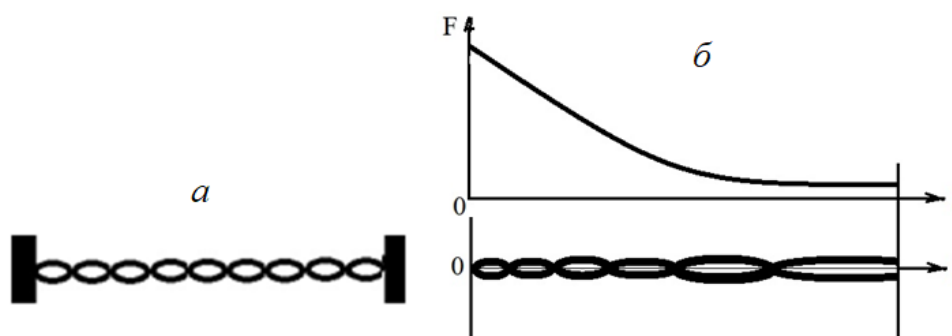


Рисунок 2. (а) Иллюстрация замков по обе стороны хиральной системы, показанных схематически в виде сплошных прямоугольников; (б) Наличие замка с одной левой стороны при свободной правой стороне, сверху показано уменьшение коэффициента трения между упругими нитями при движении слева направо. Хиральная система замкнутая на одном конце и разомкнутая на другом конце. Верхний рисунок – Зависимость силы трения двойной хиральной структуры с одним закрепленным и вторым свободным концами зависимость скручивания по длине нити. Нижний рисунок иллюстрирует увеличение длины витка скрученной нити при движении к свободному концу

Возникновение устойчивых хиральных структур в молекулярных биологических системах требует наличия застёжек скрученных упругих нитей спиралей. Примером взаимодействия хиральных структур в ДНК-белковых системах является «лейциновая молния». При связывании двух параллельных α -спиралей на уровне третичной структуры образуется левоспиральный димер, подобный застёжке-молнии, который взаимодействует с правозакрученной ДНК также на уровне третичной структуры

Эволюция хиральности при её развитии. Рождение и рост «усов».

Образование вторичной хиральности может приводить к появлению хиральности более высокого порядка. Причиной появления усов служит неустойчивость закрученной упругой нити, на которую действуют две силы закручивания: нормальная к нити и сила упругости нити, препятствующая смещению нити к центру спирали. Если давление вверх симметрии спирали, то возникает дополнительная сила, приводящая к появлению нормальной составляющей силы к направлению спирали. Эта сила может приводить либо к увеличению отклонения и образованию усов или к возвращению к прежнему состоянию равновесия [9, 10].

Рост усов обусловлен неустойчивостью и наличием флуктуаций в разных участках закрученной нити. Наличие закрутки упругой нити приводит к возможности отклонения нити в любую сторону. Отклонение компенсируется упругостью нити, которая препятствует увеличению отклонения. Если величина силы, обусловленной упругостью, больше силы, обусловленной отклонением, то устойчивость не нарушается. Если величина силы, обусловленной упругостью, меньше силы, обусловленной отклонением, то устойчивость нарушается и происходит двуххиральная эволюция нити по направлению нормальному прежнему направлению нити. В результате происходит образование «усов».

Между растущими в разных участках «усами» возникает конкуренция, приводящая к росту одного или большего числа усов (2-х, 3-х) и подавлению роста усов в других точках нити. В результате возникает один, два уса. Иллюстрация роста «усов» и получения хиральной системы, содержащей множество видов «усов» иллюстрируется рисунком 3, а, где показано образование одного и двух усов. Возможно образование более сложной структуры, содержащей три, четыре из многих усов, как показано на рисунке 3, б.

3. Некоторые приложения хиральности в макроскопических системах и на молекулярном уровне.

3.1 Образование сгустка крови – образование хиральных полимеров фибрина.

Хиральные процессы активно реализуются при свертывании крови, когда происходит образование тромба. Как происходит образование тромба? При повреждении мелких кровеносных сосудов остановка кровотечения в норме происходит через 1-3 мин. Этот первичный гемостаз определяется сужением сосудов и образованием на месте повреждения первичного тромба – агрегата одного из видов клеток крови, тромбоцитов. Дальнейшее создание плотного сгустка (вторичный гемостаз), надежно закрывающего место повреждения, обусловлено появлением белка фибрина. Полимеризация фибрина быстро приводит к образованию плотного геля, составляющего основу тромба. В нормальной, «жидкой» крови фибрина нет. Зато много его предшественника – фибриногена, из которого образуется фибрин в результате отщепления от него небольших фрагментов. Этот процесс показан на рисунке 4. Фермент тромбин расщепляет четыре пептидные связи, отщепляя четыре небольших фрагмента: фибринопептиды А и В.

Оставшиеся после такого отщепления мономеры фибрина быстро полимеризуются в длинные разветвленные цепочки. Таким образом, в зоне повреждения возникает сеть фибриновых полимеров, и вся среда переходит в новое, «твердое» агрегатное состояние – гель. Хорошо знакомое нам в быту состояние, которое в кулинарии было переведено с французским акцентом, – желе. Клетки крови оказываются заключенными в фибриновую сеть. Все вместе образуют тромб, закрывающий поврежденную часть сосуда. После образования геля довольно быстро происходят биохимические реакции, создающие поперечные сшивки между нитями полимеров фибрина. Это превращает сгусток в настоящее твердое тело.

Интересным примером аккумуляции энергии, рационального использования замковых структур в хиральной системе является мышечная структура сердца, реализующая режим движения крови

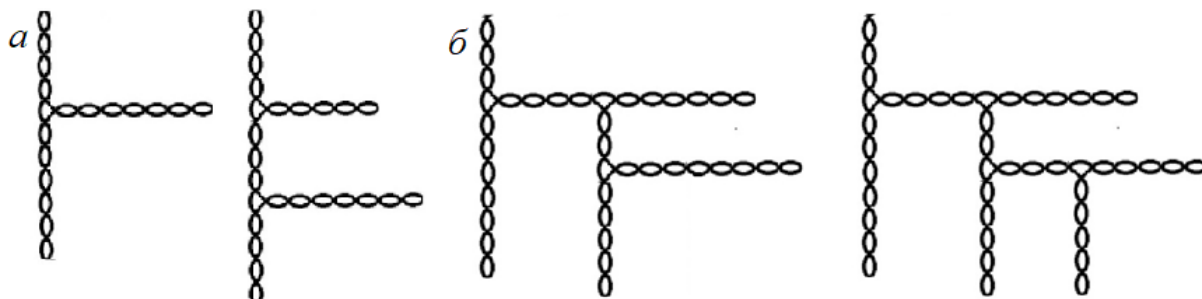


Рисунок 3. Иллюстрация роста «усов» и получения хиральной системы, содержащей множество видов «усов».

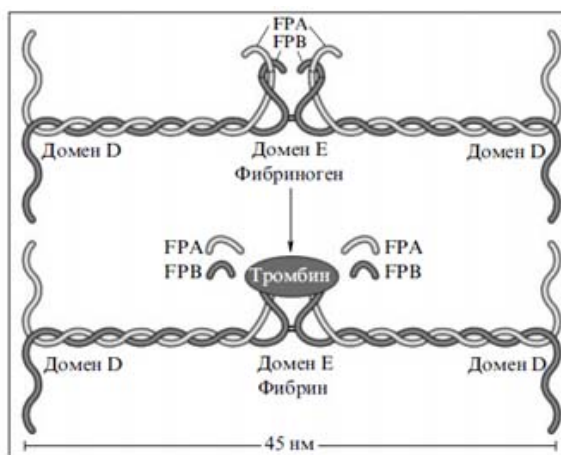


Рисунок 4. Образование полимера фибрина. Отщепление от фибриногена фибринопептидов А и В (FPA, FPB) под действием тромбина

3.2 Организация мышечного сокращения сердца, структура которого реализует хиральную структуру с двумя замками.

Рассмотрим мышечную структуру сердца, реализующую режим движения крови, основанный на использовании свойств вогнутых спиральных автоволн, переносящих энергию и хиральной структуры с двумя замками. Мышечные волокна сердца по спирали спускаются к верхушке сердца, а затем снова поднимаются к его основанию, как показано на рисунке 5, а [18, стр. 89-91].

Анатомическая структура сердца при удаленном эпикарде, иллюстрирующая мышечный слой желудочков сердца, при виде со стороны верхушки сердца, показана на рисунке 5, б. На рисунке 5, б показаны мышечные слои сердца: наружный слой, средний слой, глубокий слой. Сокращения всех трех слоев суммируются, повышая эффективность выбрасывания крови. Накачка сердца кровью после её выбрасывания в аорты, легочную и венечные осуществляется с помощью синхронного вбрасывания крови из предсердий. Следует отметить, что наличие трех дублирующих мышечных слоев сердца повышает его устойчивость при возникновении паталогических изменений, таких как инфаркт миокарда или других повреждений структур сердца.

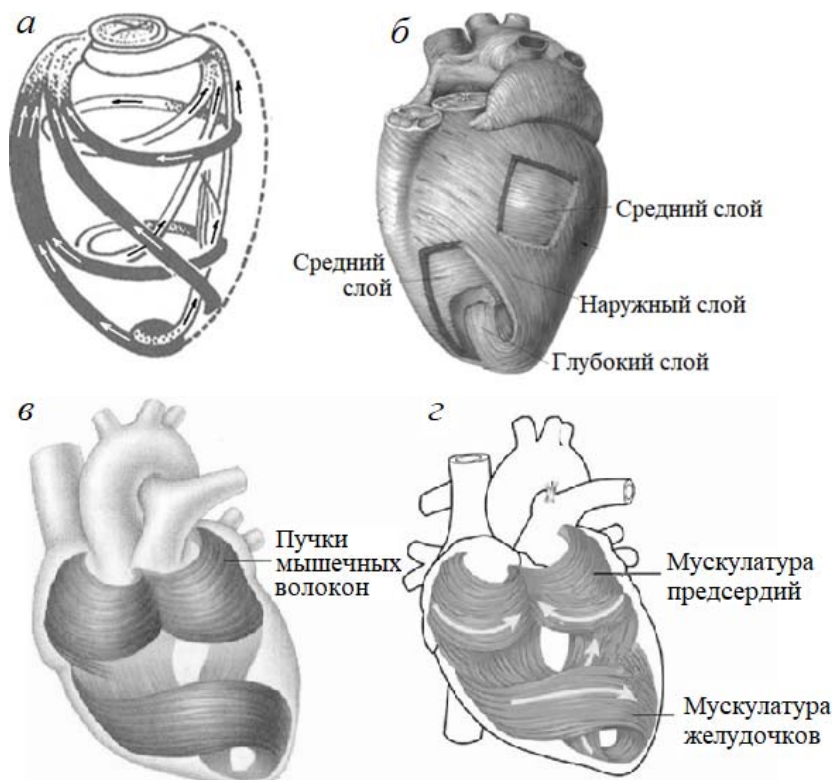


Рисунок 5. (а) Мышечные волокна сердца по спирали спускаются к верхушке сердца, а затем снова поднимаются к его основанию, образуя хиральную систему [18, стр. 89-91]. (б) показано анатомическое строение мышечных волокон сердца. Каждый пучок волокон обвивает желудочки сердца от верхушки до основания, образуя хиральную систему волокон. Мышечные волокна предсердия также образуют хиральную систему, как это видно из рисунков в, з

Механическая работа предсердий также осуществляется за счет реализации вогнутых спиральных автоволн, переносящих энергию и реализуемых мышечной структурой предсердий, что иллюстрируется рисунке 5, в, з.

Движение крови в желудочках сердца похоже на всасывающий центр водоворота, к которому устремляется кровь с периферии со все возрастающей скоростью, чтобы вернуться обратно в более медленном темпе и разойтись по всему телу [18, стр. 89-91]. Мышечные волокна сердца формируют вогнутую волну механического сокращения при отсутствии жесткого скелета в сердце (в сердце имеются только гибкие фиброзные волокна). Внутреннюю эндокардиальную структуру сердца можно сравнить с гибким мешком, стягиваемым хиральной структурой мышечных волокон во время систолы и раздуваемым во время диастолы во время заполнения кровью. Интересно отметить, что при окончании систолы происходит круговое движение, похожее на отжим белья прачкой, что позволяет осуществить более полное изгнание крови из желудочков сердца. Имеется три слоя мышечных волокон, каждый из которых реализует вогнутых спиральных автоволн, переносящих энергию, обеспечивающую выталкивание крови из клапанов, расположенных вблизи предсердий.

Понимание механизма сокращения мускулатуры сердца, происходящего под действием наружного электромеханического возбуждения, может оказаться полезным при лечении инфаркта миокарда. При инфаркте миокарда происходит частичное повреждение мускулатуры сердца из-за частичных кровоизлияний. В зависимости от его локализации повреждений можно прогнозировать план лечения и ликвидацию последствий инфаркта миокарда. Отметим, что изучение макроскопической механической деятельности сердца требует дальнейших экспериментальных и практических исследований.

3.3 Эволюция хиральности при изменении масштаба структур.

Установлено возможность взаимодействия двух хиральных структур. Это приводит к возникновению хиральных структур четвертого порядка и более. Например, при перегибе двух хиральных нитей и соприкосновении ветвей происходит возникновение четыреххиральной системы. Возникновение двойных хиральных механических систем на скрученных нитях иллюстрируется рисунком 6.

Процессы образования многохиральных структур характерны для конформации белков. Белковые молекулы могут образовывать 4 типа хиральных структур. Пример сложной хиральной структуры от первичной до четвертичной, возникающей при конформации белков, показан на рисунке 7.

Вторичная такая структура может сформироваться изначально от природы либо при воздействии на первичную температурой или иными условиями. Данная конформация имеет три разновидности: ровные, правильные, стереорегулярные витки, построенные из остатков аминокислот, которые закручиваются вокруг основной оси соединения. Причем строение считается правильным из-за того, что витки равномерно повторяются через каждые 4 звена. Такая структура может быть как левозакрученной, так и правозакрученной. Но в большинстве известных белков преобладает правовращающий изомер. Такие конформации принято называть альфа-структурами. Есть одна особенность, которую должен проявлять белок. Строение аминокислот на ответвлениях должно быть максимально коротким, как у глицина или аланина, например. Этот тип вторичной конформации носит название бета-листов за способность будто слипаться при образовании общей структуры. Относящееся к третьему типу строение белка биология обозначает как сложные, разноразбросанные, неупорядоченные фрагменты, не обладающие стереорегулярностью и способные изменять структуру под воздействием внешних условий.



Рисунок 6. Возникновение двойных хиральных механических систем на скрученных нитях

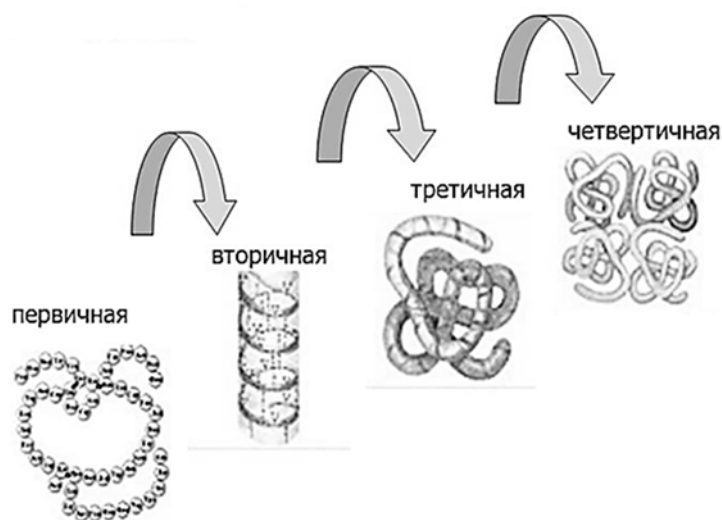


Рисунок 7. Хиральные структуры от первичной до четвертичной, возникающие при конформации белков

3.4 Влияние начальных условий на возникновение хиральности.

Установлено, что характер хиральности правой или левой зависит от установки начальных условий. Поскольку начальные условия можно установить произвольно, то и тип хиральности будет определяться начальными условиями.

Биологам удалось научиться управлять направлением закрутки панциря улитки *Lymnaea stagnalis*, то есть хиральностью при помощи физического воздействия. При этом генетическая предрасположенность к той или иной ориентации оказалась неважна. При помощи тонких стеклянных штырей исследователи смогли расположить зародыш на восьмиклеточной стадии так, чтобы добиться нужной им хиральности.

При этом результат опыта не зависел от экспрессии гена *nodal*, который, как считается, определяет направление закрутки. Биологи подчеркивают, что изменение направления закрутки панциря приводило к полной перестройке программы развития улитки, то есть из опытного зародыша вырастала полноценная улитка с правильным для данной хиральности расположением органов.

По словам ученых, новое исследование показывает, что корни геометрической симметрии того или иного организма лежат не только в генетике, но и в обычной механике расположения организма во время развития.

3.5 Реализация свойств молекулярных хиральных систем в виде энергоемких упругих закрученных нитей, обладающих запасом свободной энергии и элементами хиральной асимметрии.

Эволюция молекулярных хиральных систем была изучена в работе проф. В.А. Твердислова и его школы [3-10]. Была сконструирована периодическая таблица знакопеременных иерархий хиральных (спиральных) структур от первичной до четвертичной для ДНК и белков. Были рассмотрены L – левые конфигурации энантиомера или спирали и D – правые конфигурации [3-10]. Более подробно периодические свойства молекулярных структур изучены в работах проф. В.А. Твердислова и его школы [3-10].

Заключение.

Экспериментальные наблюдения показывают, что механизмы хиральности и хиральные свойства являются инвариантными как для макроскопических, так и для микроскопических объектов. Хиральные системы обладают рядом замечательных свойств, позволяющих реализовать самоорганизацию в сложных системах. В данной работе рассмотрены свойства хиральных систем на примере энергоемких упругих закрученных нитей,

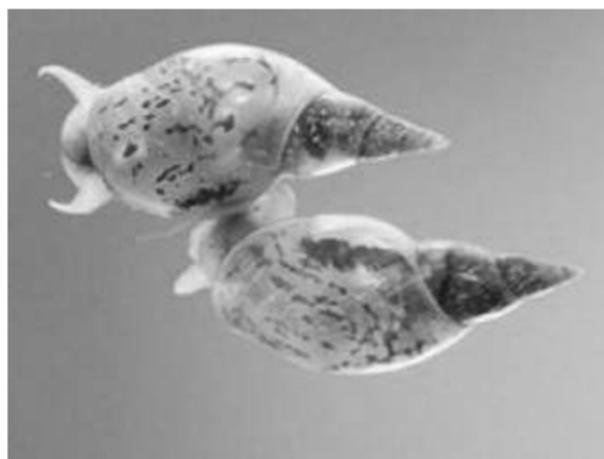


Рисунок 8. Искусственно созданные хирально-симметричные улитки *Lymnaea stagnalis*

обладающих запасом свободной энергии и элементами хиральной асимметрии. Установлен ряд физических свойств макроскопических хиральных систем. Установлено, что многие свойства хиральности для макроскопических механических систем наблюдаются и на молекулярном уровне.

Хиральные свойства могут проявляться при эволюции автоволновых процессов в активных средах в виде структур типа синхронизированных спиральных автоволн, диссипативных структур и ряда других динамических процессов. Более подробно эти процессы описаны, например, в работах [13-16]. Динамические хиральные структуры требуют отдельного изучения, что предполагается сделать в дальнейшем.

Список литературы / References:

1. Аветисов В.А., Гольданский В.И. Физические аспекты нарушения зеркальной симметрии биоорганического мира. *УФН*, 1996, т. 166, №8, с. 873-891. [Avetisov V.A., Goldansky V.I. Physical aspects of violation of mirror symmetry of the Bioorganic world. *UFN*, 1996, vol. 166, no. 8, pp. 873-891. (In Russ.)]
2. Блюменфельд Л.А., *Решаемые и нерешаемые проблемы биологической физики*. Еditorиал УРСС, М., 2002. [Blumenfeld L.A., *Solvable and unsolvable problems of biological physics*. Editorial URSS, M., 2002. (In Russ.)]
3. Твердислов В.А., Малышко Е.В., Ильченко С.А. От автоволновых механизмов самоорганизации к молекулярным машинам. *Изв. РАН. Сер. физ.*, 2015, т. 79 (3), с. 1728. [Tverdislov V.A., Malysheko E.V., Ilchenko S. A. From autowave mechanisms of self-organization to molecular machines. *Izv. RAN. Ser. phis.*, 2015, vol. 79 (3), 1728 p. (In Russ.)]
4. Гольданский В.И., Кузьмин В.В. Спонтанное нарушение зеркальной симметрии в природе и происхождение жизни. *Успехи физ. наук.*, 1989, т. 157 (1), с. 3. [Goldansky V.I., Kuzmin V.V. Spontaneous disruption of mirror symmetry in nature and the origin of life. *Uspekhy phiz. nauk*, 1989, vol. 157 (1), 3 p. (In Russ.)]
5. Твердислов В.А., Яковенко Л.В., Ивлиева А.А. и Твердислова И.Л. Ионная и хиральная асимметрии как физические факторы биогенеза и онтогенеза. *Вестн. МГУ. Сер. 3. Физика, астрономия*, 2011, № 2, с. 3. [Tverdislov V.A., Yakovenko L.V., Ivlieva A.A., Tverdislova I.L. Ionic and chiral asymmetries as physical factors of biogenesis and ontogenesis. *Vestn. MGU. Ser. 3. Phizika, astronomiya*, 2011, no. 2, p. 3. (In Russ.)]
6. Твердислов В.А., Сидорова А.Э., Яковенко Л.В. От симметрий – к законам эволюции. I. хиральность как инструмент стратификации активных сред. *Биофизика*, 2012, т. 57 (1), с. 146. [Tverdislov V.A., Sidorova A.E., Yakovenko L.V. From symmetries – to the laws of evolution. I. chirality as an instrument of stratification of active media. *Biophizika*, 2012, vol. 57 (1), 146 p. (In Russ.)]
7. Твердислов В.А. Хиральность как первичный переключатель иерархических уровней в молекулярно-биологических системах. *Биофизика*, 2013, т. 58, №1, с. 159-164. [Tverdislov V. A. Chirality as a primary switch of hierarchical levels in molecular biological systems. *Biophizika*, 2013, vol. 58, no. 1, pp. 159-164. (In Russ.)]
8. Твердислов В.А., Яковенко Л.В., Мазуров М.Е., Калужный И.М. Автоволновая модель образования везикул на поверхности океана. *Вестник МГУ. Сек. 3. Физика. Астрономия*, 2014, № 6, с. 107-109. [Tverdislov V.A., Yakovenko L.V., Mazurov M.E., Kaluzhny I.M. Autowave model of vesicle formation on the ocean surface. *Vestnik MGU. Sek. 3. Phizika. Astronomiya*, 2014, no. 6, pp. 107-109. (In Russ.)]
9. Стовбун С.В., Скоблин А.А., Твердислов В.А. Экспериментальное наблюдение синергетической закономерности смены знака хиральности в иерархиях биомиметических структур. *Биофизика*, 2014, т. 59 (6), с. 1079. [Stovbun S.V., Skoblin A.A., Tverdislov V.A. Experimental observation of synergetic regularity of chirality sign change in hierarchies of biomimetic structures. *Biophizika*, 2014, vol. 59 (6), p. 1079. (In Russ.)]
10. Стовбун С.В., Михалева М.Г., Скоблин А.А., Твердислов В.А. Структурообразование в хиральных системах. *Супрамолекулярные струны*. под ред. В.А. Твердислова (Физический факультет МГУ, М.), 311 с. [Stovbun S.V., Mikhaleva M.G., Skoblina A.A., Tverdislov V.A. structure Formation in chiral systems. *Supramolekulyarniye struny*, ed. V. A. Tverdislov (faculty of Physics, Moscow state University), 311 p. (In Russ.)]
11. Намиот В.А., Ботьяновский А.В., Филатов И.В. и др. Дальнедействующие взаимодействия и принципы молекулярного узнавания на разных уровнях строения биосистем. *Биофизика*, 2016, т. 61, № 1, с. 54-59. [Namiot V.A., Botyanovsky A.V., Filatov I.V. et al. long-Range interactions and principles of molecular recognition at different levels of Biosystems structure. *Biophizika*, 2016, vol. 61, no. 1, pp. 54-59. (In Russ.)]
12. Шайтан К.В., Ложников М.А., Кобельков Г.М. Релаксационный фолдинг и принцип минимума скорости диссипации энергии для конформационных движений в вязкой среде. *Биофизика*, 2016, т. 61, № 4, с. 629-637. [Shaitan K.V., Lozhnikov M.A., Kobelkov G.M. Relaxation folding and the principle of minimum energy dissipation rate for conformational movements in a viscous medium. *Biophizika*, 2016, vol. 61, no. 4, pp. 629-637. (In Russ.)]
13. Мазуров М.Е. Нелинейные вогнутые спиральные автоволны и их приложения. *Изв. РАН. Сер. Физ.*, 2018, т. 82, №1. [Mazurov M.E. Nonlinear concave spiral autowaves and their applications. *Izv. RAN. Ser. phis.*, 2018, vol. 82, no. 1. (In Russ.)]
14. Мазуров М.Е., Калужный И.М. Автоволны кругового типа в предсердиях человека и начальные условия для их возникновения. *Вестник МГУ. Серия Физика*, 2014, № 3, с. 45-49. [Mazurov M. E., Kaluzhny I.M. The Waves with circular action in Atria of human and initial conditions for their occurrence. *Vestnik MGU. Seriya Phizika*, 2014, no. 3, pp. 45-49. (In Russ.)]
15. Мазуров М.Е., Твердислов В.А. Механизм самоорганизации в поверхностном микрослое воды с использованием термокапиллярной конвекции. *Биофизика*, 2016, т. 61, № 6, с. 1068-1072. [Mazurov M.E., Tverdislov V.A. Mechanism of self-organization in the surface micro-layer of water using thermocapillary convection. *Biophizika*, 2016, vol. 61, no. 6, pp. 1068-1072. (In Russ.)]

16. Мазуров М.Е. *Идентификация математических моделей нелинейных динамических систем*. М.: Ленанд, 2019, 284 с. [Mazurov M. E. *Identification of mathematical models of nonlinear dynamical systems*. M.: Lenand, 2019, 284 p. (In Russ.)]
17. Ваняг В.К. *Диссипативные структуры в реакционно-диффузионных системах: Эксперимент и теория*. РХД, 2008, 300 с. [Vanag V.K. *Dissipative structures in reaction-diffusion systems: Experiment and theory*. RCD, 2008, 300 p. (In Russ.)]
18. Швенк Т. *Чувствующий хаос. Образование движущихся форм в воде и воздухе*. Москва: Новый центр, 2003, 216 с. [Schwenk T. *The Sense of chaos. Formation of moving forms in water and air*. Moscow: New center, 2003, 216 p. (In Russ.)]

ABOUT MECHANISMS OF CHIRALITY OF MACROSCOPIC SYSTEMS

Tverdislov V.A., Mazurov M.E., Yakovenko L.V.

M.V. Lomonosov Moscow State University

Moscow, 119991, Russia; e-mail: mazurov37@mail.ru

Abstract. It is established that the chirality mechanisms and chiral properties are invariant for both macroscopic and microscopic objects. Chiral systems have a number of remarkable properties that allow self-organization in complex systems. In this paper, the properties of chiral systems are examined by the example of energy-intensive elastic twisted filaments with a free energy reserve and elements of chiral asymmetry. The following properties of macroscopic chiral systems are established: the effect of elasticity during bending of the thread, the less the elasticity in bending, the smaller the step of the double helix and vice versa; it is permissible to twist three, four or more elastic threads, there are no restrictions. The strength of a system of several twisted threads increases with an increase in the number of twisted threads; chiral systems are energy storage devices; there is the possibility of the growth of "whiskers" in the chiral system; the need for the existence of "locks" in chiral structures connecting individual twisted strands of the chiral system; the influence of the initial conditions on the occurrence of chirality; scale invariance of the scaling evolution of chiral systems takes place. Many chirality properties for macroscopic mechanical systems also occur at the molecular level.

Key words: *macroscopic chiral systems, energy-intensive twisted threads, energy accumulators, chiral system locks, large-sca.*