

**От автоволновых механизмов самоорганизации к биологическим машинам**

В. А. Твердислов,\* Е. В. Малышко, С. А. Ильченко, В. Д. Скурида

*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра биофизики  
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2*

Простейшие хиральные автоволновые структуры образуются в диссипативных системах — активных средах. В результате биологической эволюции в виде спиральных и суперспиральных иерархических структур они стали конструктивной основой молекулярных машин клеток — белков и нуклеиновых кислот.

УДК: 577

Ключевые слова: самоорганизация, хиральность, спирали, иерархии, структура белков и ДНК, молекулярные машины.

Структурно–функциональной основой живых систем на Земле с точки зрения биологии является клетка, структурно–функциональной основой живых систем с точки зрения физики являются машины, молекулярные и макроскопические. Идеи сквозной эволюции и основанные на ней представления относительно возникновения жизни на Земле подразумевают трансформацию явлений спонтанной самоорганизации в диссипативных системах неживой природы в структуры, обладающие всеми физическими признаками машин. Речь идет о самосборке конструкций, способных преобразовывать формы энергии, вещества и информации, тем самым совершая полезную работу. Переходя от неживой к живой фазе своего развития, природа «использовала» удачные находки самоорганизации, закрепляя их эволюционно. Последовательность событий, составившая биологическую иерархию структур, состояла не в переносе механизмов на более высокий уровень, а в ассимиляции принципов организации [1].

**Активные среды**, будучи распределенными диссипативными системами, организовывали пространство, создавая с помощью автоволновой самоорганизации регулярные структуры с различными типами симметрии и, соответственно, выделенными степенями свободы. Важным аспектом для суперпозиции активных сред является понятие иерархий. Сами активные среды способны изменять ранг симметрий в сторону понижения на пути к машинам, обладающим ограниченным числом выделенных конструкцией механических степеней свободы. В природе имеется тенденция превращения тривиальных структур в однородных активных средах в хиральные паттерны в неоднородных средах. Активные среды создавали симметрии, тогда как биологические машины использовали их в своих конструкциях.

**Машиной** можно назвать устройство (конструкцию), которое способно в циклическом режиме преобразовывать форму энергии, совершая «полезную» работу, благодаря наличию «выделенных механических степеней свободы» (поступательных, вращательных),

кинетически разделяющих работу и диссипацию. Эти устройства являются закрепленными эволюцией элементами активных сред, обладающими памятью о своей конструкции. Понижая степень симметрии системы, машины совершают полезную работу (так, изотропное давление пара в котле паровоза преобразуется в векторное поступательное движение).

Для реализации цикличности как принципиальной временной характеристики «машина» предполагает обязательное наличие симметрий в конструкции, а для движения по контуру цикла в «правильном» направлении — несимметричного элемента, обладающего свойством «вентиля» или «защелки». С этой точки зрения любая машина является хиральным объектом — энантиоморфом. Направленная цикличность действия основывается на присутствии в конструкции хотя бы одного нелинейного, вентиляющего элемента. К примеру, храпового механизма.

Характерной особенностью межмолекулярных взаимодействий в клетках является принцип комплементарности, позволяющий обеспечить однозначность функционирования метаболических и биосинтетических сетей. Подобная стереоспецифичность, как и уникальная структура молекулярных машин, основана на том, что система должна быть хиральной: контактирующие «детали» или объекты в целом не должны иметь зеркально-поворотной оси симметрии. Зона контакта важна не сама по себе, а как приводное сочленяющее звено какого-либо опять-таки «полезного» взаимодействия, действия, процесса.

В настоящей работе мы не обсуждаем проблемы происхождения гомохиральности мономеров (аминокислот и дезоксирибозы), из которых сформированы первичные структуры белков и ДНК (см. [2]). Ниже рассмотрены особенности иерархического структурообразования в таких молекулах и надмолекулярных структурах, обеспечившие возможности образования молекулярных машин.

**Новая синергетическая гипотеза относительно структурообразования в хиральных системах** включает следующие основные положения [3,4]:

Нелинейная эволюционирующая система, обладающая запасом свободной энергии и элементами хиральной асимметрии, находясь в пределах одного иерархи-

\*E-mail: tverdislov@mail.ru

ческого уровня, способна в процессе самоорганизации изменять соотношение объектов с имеющимися типами симметрии, сохраняя знак преобладающей хиральности («правой» — D или «левой» — L закрученности).

При прохождении точек бифуркации та же система имеет тенденцию к спонтанному повышению сложности, формируя новые ахиральные структуры в пределах своего иерархического уровня или же образуя последовательность новых иерархических уровней с чередующимся знаком преобладающей хиральности заново образующихся структур.

Подобного рода трансформации имеют место в механических, гидродинамических и молекулярных системах. Прослежено закономерное чередование «правых» и «левых» структур — знака хиральности D–L–D–L при переходе на более высокий уровень структурно-функциональной организации ДНК, так же как и смена знака хиральности L–D–L–D при переходе на более высокий уровень структурно-функциональной организации белковых структур [3]. Настоящая работа посвящена разработке и дальнейшему обоснованию высказанных положений.

**В представлениях знакопеременной хиральности на примере глобулярных и фибриллярных белков рассмотрим их иерархическое структурообразование.** Пептидная цепь из L-аминокислотных остатков (первичная структура), как правило, сворачивается в правую  $\alpha$ -спираль, более стабильную, чем левая [5]. Убедительное доказательство правила смены знака хиральности при переходе к следующему структурному уровню получено нами на основании анализа более 1000 белковых структур по базам данных [6,7]. Практически во всех случаях, когда визуально наблюдалось внутримолекулярное перекрытие  $\alpha$ -спиралей, отмечена тенденция свивания их в левую суперспираль. Таким образом, можно считать доказанным положение о смене знака хиральности при переходе от вторичной к третичной структуре для  $\alpha$ -спиралей. Что касается

$\beta$ -листов, которым в определенной степени также присуще свойство хиральности, то анализ их комбинаций с  $\alpha$ -спиральями ещё предстоит выполнить.

При переходе к надмолекулярным четвертичным структурам мы проанализировали богатые спиральными образованиями сократительные структуры саркомеров поперечно-полосатых мышц [8–10]. В мышечном саркомере актиновая протофибрилла, состоящая из F-актина, нитей тропонина и тропомиозина, образует структуру с правой закрученностью. Миозин состоит из нескольких белковых цепей: двух больших «тяжелых» цепей и четырех небольших «легких» цепей. Одна большая цепь миозина представлена правой спиралью, а комплекс из двух цепей переплетается в левую суперспираль. Та же упаковка прослеживается и у небольших «легких» цепей. Таким образом, и на уровне четвертичных структур белков можно проследить тенденцию смены знака хиральности.

В целом же, можно предположить, что молекулярные и надмолекулярные спиральные структуры не только служат для молекулярных машин жесткими конструкциями, позволяющими реализовать «выделенные механические» поступательные степени свободы, но и становятся теми вентиляльными устройствами, которые обуславливают однонаправленное движение по циклу для молекулярных машин, реализуя теперь уже вращательные степени свободы. По всей видимости, именно по этой причине мы отмечаем обилие спиральных структур разного уровня, характерное для макромолекулярных энергопреобразующих устройств, ответственных за процессы биологической подвижности в клетках или же за транспортные процессы в мембранах. Авторы полагают, что с физической точки зрения целесообразно рассматривать в молекулярных машинах, осуществляющих энергопреобразующие процессы, сопряженное действие поступательных и вращательных степеней свободы на базе спиральных структур разного иерархического уровня.

- [1] Твердислов В. А., Сидорова А. Э., Яковенко Л. В. Биофизическая экология. (М.: URSS, КРАСАНД, 2012). 544 с.
- [2] Твердислов В. А., Яковенко Л. В. Вестник Московского университета, Серия 3, Физика. Астрономия. № 3. С. 3. (2008).
- [3] Твердислов В. А., Сидорова А. Э., Яковенко Л. В. Биофизика **57**(1). С. 146. (2012).
- [4] Tverdislov V. A. arXiv:1212.1677. (2012).

- [5] Финкельштейн А. В., Птицын О. Б. Физика белка: Курс лекций с цветными и стереоскопическими иллюстрациями и задачами. (М.: КДУ, 2005).
- [6] <http://www.rcsb.org/>
- [7] <http://coiledcoils.chm.bris.ac.uk/ccplus/search/>
- [8] Миозин <https://ru.wikipedia.org/wiki/Миозин>
- [9] Актин <https://ru.wikipedia.org/wiki/Актин>
- [10] Тропонин <https://ru.wikipedia.org/wiki/Тропонин>

## From autowave mechanisms of self-organization to biological machines

V. A. Tverdislov<sup>a</sup>, E. V. Malyshko, S. A. Ilchenko, V. D. Skurida

Department of Biophysics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University  
Moscow 119991, Russia

E-mail: <sup>a</sup>E-mail: [tverdislov@mail.ru](mailto:tverdislov@mail.ru)

The simplest chiral autowave structures are formed in dissipative systems, in active media. As a result of biological evolution as the spiral and supercoiled hierarchical structures they become a constructive basis of the molecular machinery of cells — proteins and nucleic acids.

Keywords: self-organization, chirality, spirals, hierarchy, structure of proteins and DNA, molecular machines.

Received 27.07.2015.

#### **Сведения об авторах**

1. Твердислов Всеволод Александрович — докт. физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой биофизики; тел.: (495) 939-11-95, e-mail: tverdislov@mail.ru.
2. Малышко Екатерина Владимировна — студент 1-го года магистратуры; тел.: (495) 939-11-95, e-mail: katyamalyshko@mail.ru.
3. Ильченко Стелла Алексеевна — студент 1-го года магистратуры; тел.: (495) 939-11-95, e-mail: st.ilchenko93@gmail.com.
4. Скурида Василий Дмитриевич — студент 2-го курса бакалавриата; тел.: (495) 939-11-95, e-mail: vasily-skurida@ya.ru.