

# МОЛЕКУЛЯРНАЯ БИОЛОГИЯ КАК ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЗНАКОПЕРЕМЕННЫХ ХИРАЛЬНЫХ СТРУКТУР

Твердислов В.А.

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

Явление хиральности рассмотрено как фундаментальный физический фактор (мотив) иерархического структурообразования в физико-химических и молекулярно-биологических системах. Некоторое время назад нами было сформулировано синергетическое правило, имеющее общий физико-химический характер и касающееся механизмов структурообразования и эволюции хиральных систем в неживой и живой природе [1, 2]. Эволюционирующая нелинейная система, обладающая запасом свободной энергии и хиральной асимметрией, находясь в пределах одного иерархического уровня и проходя точки бифуркации, способна в процессе самоорганизации изменять соотношение имеющихся типов симметрии, повышая свою «сложность», но сохраняя знак преобладающей хиральности («правой» - D или «левой» - L закрученности). Та же система в точках бифуркации проявляет тенденцию к спонтанному формированию последовательности иерархических уровней с чередующимся знаком хиральности заново образующихся структур. Оба случая связаны с нарушением симметрии, но во втором случае в системе происходит стратификация – появляется более высокий уровень структурной организации. В живых системах это может быть и более высокий функциональный уровень.

Приведем пример из наших работ, касающихся образования хиральных струн и суперспиралей и выполненных совместно со С.В.Стовбуном и коллегами [3]. Экспериментально установлено, что в гомохиральных растворах трифторацетилованных аминокислот в циклогексане, бензоле и других растворителях, а также в водном растворе фенилаланина наблюдается образование струн - анизометрических (отношение длины к диаметру  $\sim 10^2 - 10^5$ ) спиральных структур, обладающих характерной жесткостью. D-изомер одного из аминокислот за счет диполь-дипольных взаимодействий формирует левую супрамолекулярную хиральную струну, свивающуюся в правую суперспираль.

Гомохиральность первичных структур биологических макромолекул определяет исходный запас свободной энергии, который используется в

процессе формирования внутримолекулярных и межмолекулярных структур. В иерархию макромолекулярных структур (первичную, вторичную, третичную, четвертичную) вмонтирован принцип разделения уровней, или стратификации, базирующийся на тенденции смены знака хиральности. После асимметричного углерода в аминокислотах и дезоксирибозе, начиная с вторичной структуры, хиральность связана с образами спиральности. Для ДНК в качестве первичной структуры мы рассматриваем цепочку молекул дезоксирибозы, а не нуклеотидов, как общепринято.

Начиная с уровня асимметричного углерода в дезоксирибозе и аминокислотах, прослежена тенденция чередования знака хиральности внутримолекулярных структурных уровней D-L-D-L для ДНК и L-D-L-D для белков. Эта система хиральностей зацикливается в супрамолекулярную машину, включающую ахиральный ДНК-белковый инвариант. Смещение знака хиральных структур ДНК и белков на половину периода имеет принципиальное значение для формирования регулярной системы межмолекулярных взаимодействий.

Система транспортных, информационных РНК, рибосомы предназначены играть роль активного фильтра – хирального насоса, отбирающего из цитоплазмы исключительно L-аминокислоты, соединяя их в полипептидную цепь, обладающую в силу гомохиральности запасом свободной энергии. Отбор необходим по причине того, что в цитоплазме присутствует определенное количество D-аминокислот. Возможно, и сам «мир ДНК» первично сформирован эволюцией как физический хиральный фильтр, а затем как химически специфический транспортёр аминокислот в рибосомы.

При межмолекулярных взаимодействиях в каждой из молекул существенен знак хиральности внутримолекулярной структуры высшего уровня, непосредственно участвующей во взаимодействиях. Для однотипных молекул (белок-белок, ДНК-РНК, тРНК-мРНК, рибозимы) взаимодействие реализуется в случае одного знака хиральности L-L или D-D, а для разнотипных молекул (ДНК-белок, тРНК-аминокислоты, фермент-субстрат) – в случае разного знака D-L или L-D.

В целом рассмотренная система чередующихся вертикальных и горизонтальных D и L структур макромолекул составляет регулярную сеть, которую в определенной степени можно уподобить периодической системе элементов, а аналогом спина, участвующего в формировании дискретности электронных орбиталей, может служить хиральный дуализм структур. Знакопеременная хиральная иерархичность сопряженных уровней макромолекулярных структур в белках и нуклеиновых кислотах

обуславливает их дискретность, служит структурной основой «выделенных механических» степеней свободы в конструкциях макромолекулярных машин, а также инструментом фолдинга.

Запас свободной энергии, связанный с гомохиральностью первичных структур, используется в фолдинге белковых макромолекул для построения знакопеременной хиральной иерархии структур. Термодинамическое обоснование состоит в следующем. Известно, что гомохиральная молекулярная субстанция, будь то раствор аминокислот или углеводов, подвергается рацемизации, стремясь уравнивать концентрации энантиомеров, повышая до максимума энтропию системы и понижая уровень её свободной энергии. Вместе с тем, для линейного гомохирального полимера имеется принципиальная возможность понизить свою свободную энергию не только за счет рацемизации мономеров (назовём это «горизонтальной» рацемизацией), но и за счет «вертикальной» рацемизации: за счет создания структур высшего уровня с другим знаком хиральности. Таким образом, система «размазывает» свою гомохиральность, понижая свободную энергию, и это сопровождается появлением у части или всех макромолекул более устойчивого (стабильного, долгоживущего, жесткого) каркаса, нежели в исходном состоянии.

Способность атома углерода образовывать хиральные соединения является существенным фактором, определившим углеродную основу живых систем на Земле, а также их развитие через череду хиральных бифуркаций. Разграниченная знаком хиральности иерархичность макромолекулярных структур предопределила возможность «блочного», солитарного характера молекулярно-биологической эволюции.

### Литература

1. Твердислов В.А. Биофизика. 2013. 58, № 1. С. 159.
2. Твердислов В.А., Малышко Е.В., Ильченко С.А. Известия РАН. Серия физическая, том 79, № 3, с. 1728-1732
3. Стовбун С.В., Занин А.М., Скоблин А.А., Михалева М.Г., Зленко Д.В., Твердислов В.А. Вестник Московского университета. Серия 3. Физика, астрономия. 2015. №1, с. 51–56.