

ОТ СИММЕТРИЙ – К ЗАКОНАМ ЭВОЛЮЦИИ. I. ХИРАЛЬНОСТЬ КАК ИНСТРУМЕНТ СТРАТИФИКАЦИИ АКТИВНЫХ СРЕД

© 2012. г. В.А. Твердислов, А.Э. Сидорова, Л.В. Яковенко

*Физический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова,
119992, Москва, Воробьевы горы*

Поступила в редакцию 14.10.11 г.

*Развитие Вселенной с момента ее возникновения
выглядит как непрерывная последовательность
нарушений симметрии... Феномен жизни
естественно вписывается в эту картину.
Фриман Дж. Дайсон*

Активные среды генерируют симметричные, в том числе хиральные, паттерны с выделенными степенями свободы. Биологические машины, от макромолекулярных до биосферных, как предельный случай активных сред уже сами используют выделенные степени свободы и являются хиральными объектами, чем обеспечивается «правильная» цикличность их функционирования. Рассмотрены особенности гипотетической эволюции иерархии хиральных объектов, сформированных активными средами. На основании известных экспериментальных фактов сформулировано новое синергетическое обобщение: в ходе развития система может многократно расширять спектр типов симметрий внутри одного иерархического уровня, повышая ее «сложность», а при переходе на более высокий уровень менять знак хиральности. Переключение знака хиральности макроскопических объектов обеспечивает необратимость стратификации. Хиральность биологических структур разного уровня делает процесс стратификации по L/D-принадлежности универсальным, а иерархические уровни – детерминированными, устойчивыми. Энантиоморф высшего уровня, оставаясь хирально эквивалентным, обретает более широкий спектр функциональных задач. Отмечена неадекватность фрактального описания природных иерархических систем, связанная с принципиальной повторяемостью знака хиральных объектов в разномасштабных воспроизведениях.

Ключевые слова: симметрия, эволюция, активные среды, самоорганизация, хиральность, фракталы, иерархичность.

Ответы по существу на ключевые вопросы о движущих силах, механизмах, выборе траектории биологической эволюции, границах устойчивости биосферы вряд ли будут получены исключительно в рамках и в представлениях самой биологии [1]. Проблема интердисциплинарная: «в науку возвращается идея сквозного эволюционизма, т.е. понимание ее (эволюции) как процесса, единого для всей природы» [2,3]. Нам представляется, что термодинамические, кинетические, информационные подходы [4–6] могут быть продуктивно дополнены синергетической моделью, основанной на представлениях об активных средах и симметриях [3,7]. При этом авторы сознательно не будут входить в область сугубо биологических аспектов эволюционизма, оставаясь в границах системного анализа.

СИММЕТРИИ И ЗАКОНЫ САМООРГАНИЗАЦИИ

Биологическая физика завершает долгий этап инвентаризации регулярных биологиче-

ских структур и процессов [8,9], сменяя его восприятием смены симметрий как системного и универсального механизма эволюции [3,7]. Берущая начало от Платона и эмпирически востребованная идея геометризации физики стала инструментом ее современной теоретической ветви, позволяя на основании ряда базовых принципов формулировать общие законы природы [10,11]. Представления о симметрии в естествознании переходят из разряда статичной геометрии к восприятию пространственных паттернов как объективного отражения развития природных систем. Идеи симметрии пронизывают космогонические представления всех времен и народов, и в значительной степени это относится к современным теориям происхождения и эволюции Вселенной [12].

Положение о взаимно однозначной связи законов сохранения и определенных симметрий было сформулировано в 1918 г. в качестве важного принципа классической механики, известного как *теорема Нётер*, которая утвер-

ждает: если лагранжиан обладает непрерывной (гладкой) симметрией, то существует некий закон сохранения, связанный с этой симметрией [13]. Соответствующий формализм позволяет вывести закон сохранения из каждой такой симметрии, которой обладают законы этой системы. Симметрия относительно временных трансляций приводит к закону сохранения энергии, а симметрия относительно пространственных трансляций – закону сохранения импульса. Вращательная симметрия «обеспечивает» сохранение момента импульса.

Согласно одной из классификаций, симметрии, отражающие свойства пространства и времени, можно отнести к *геометрическим формам симметрии*. Это однородность пространства и времени, изотропность пространства, пространственная четность, эквивалентность инерциальных систем отсчета. А симметрии, непосредственно не связанные со свойствами пространства и времени и выражающие свойства определенных физических взаимодействий, относят к *динамическим формам симметрии*. Динамические симметрии выявляются при рассмотрении преобразований, включающих переходы между состояниями системы с различными уровнями энергии (например, симметрии электрического заряда). В мире живого к геометрическим формам симметрии, к примеру, можно отнести клеточное строение организмов, а к динамическим – идею конвариантной редупликации. Однако уже и на самых ранних уровнях эволюционной иерархии имеется свой «сборник прецедентов» в отношении обоих типов симметрий.

Сейчас на пути к Великому объединению физических теорий вслед за моделью СРТ-симметрий формируется модель E8. Возможно, структура Вселенной в масштабах элементарных частиц будет описана единой геометрической теорией E8 с ее 248 наборами окружностей, «наматывающихся друг на друга, вращающимися и танцующими в пространстве-времени всеми возможными способами» [12]. Заметим, что вездесущие законы сохранения не являются движущей силой эволюции Вселенной, но жестко определяют границы «движения материи».

Нерасторжимость понятий симметрий и асимметрий, составивших звенья цепи биологической эволюции, делает принципиально важным выделить отдельный класс хиральных объектов, встречающихся на всех уровнях организации живых систем. В соответствии с классическим определением Кельвина, к хиральным веществам относятся соединения, включающие асимметричный атом углерода с четырьмя различными заместителями, образующими с ним ковалентные связи. Они образуют зеркальные

изомеры – энантиомеры, обладающие оптической активностью – способностью вращать плоскость поляризации света (L – влево, D – вправо). Энантиомеры аминокислот, сахаров, фосфолипидов несимметричны по их содержанию в биосфере. В химических синтезах, природных и промышленных, образование L- и D-энантиомеров хиральных соединений равновероятно, если синтез не стереоспецифичен. Образуется смесь с равными концентрациями L- и D-энантиомеров – рацемат.

По многим физико-химическим параметрам энантиомеры не отличаются. Однако в живых клетках для рибосомального синтеза белков используются только L-аминокислоты, а в состав нуклеиновых кислот входит только D-рибоза [14]. В общем случае хиральную фигуру и ее зеркальный образ называют энантиоморфами. По биологической значимости существование энантиоморфов сравнимо с наличием двух спиновых состояний у электронов для физики и химии. От спина электрона зависят свойства атомов и молекул, от знака хиральности зависят структура и функции энантиоморфов в биологических иерархиях, начиная от систем с биохимической стереоспецифичностью, вплоть до уровней морфогенеза и филотаксиса [1,7].

По всей вероятности, хиральность как диалектическое проявление дуализма является не артефактом в эволюционном процессе, а одним из важных инструментов биологической эволюции. Так, согласно нашим представлениям, «хиральная чистота биосферы» состоит не в исключении энантиомеров одного знака из эволюционного процесса, а в разделении их по иерархическим уровням и функциям (L-аминокислоты – в структуры белков, D-аминокислоты – в регуляторные системы).

Одно из соображений, ранее высказанное и много лет обосновываемое авторами, состоит в том, что бифуркация, выделившая на Земле живую природу и направившая ее на путь коэволюции с неживой природой, стартовала с формирования двух базовых сопряженных асимметрий – хиральной (молекулярной) и ионной (клеточной) [15] (см. ч. II настоящей статьи). Две эти асимметрии, будучи для биологических систем энергетически и информационно значимыми, составили первичную основу и «эскорт» биологических иерархий, определивших формирование одноклеточных и многоклеточных организмов, биоразнообразие, и, тем самым, траекторию эволюции биосферы.

Еще одно соображение состоит в том, что диссипативными системами, формирующими в макроскопических системах отдельные типы

симметрий (соответственно, и выделенные степени свободы), а также и переходы между ними, являются активные среды. Они же в ходе эволюции формируют с помощью изменений типов симметрии и смены знака хиральных структур иерархическую структуру биосферы с кинетической необратимостью возникающей стратификации. При этом совершенно не важно, равновесна (кристалл) или неравновесна (диссипативная структура) исходная симметричная структура: неравновесная асимметрия породит явление, став его движущей силой. Простейший пример – градиент температуры или (электро)химического потенциала. Симметрия и асимметрия выступают и как механизмы, и как проявления самоорганизации в активных средах.

АКТИВНЫЕ СРЕДЫ И ХИРАЛЬНОСТЬ

Традиционная физика в макроскопических масштабах имеет дело с пассивными средами, какими являются пространства для распространения механических или электромагнитных волн. Вместе с тем привнесение в космофизику представлений о темной материи и темной энергии позволяет не только объяснить феномен ускоренного расширения Вселенной, но, вполне вероятно, по-новому через парадигмы синергетики увидеть механизмы ее эволюции как эволюции активной среды.

С этой точки зрения представляется естественным возникновение геометрически подобных паттернов в активных средах самой разной физической, химической, биологической, экологической, экономической, социальной и т.д. природы. По-видимому, все эволюционирующие системы, которые могут рассматриваться как активные среды, с обязательностью проходят одинаковые начальные этапы развития, визуально воспринимаемые нами как сменяющиеся симметричные геометрические фигуры разного физического наполнения – центрально-симметричные, структуры с осевой симметрией, регулярные фигуры более высокого уровня симметрии, структуры хиральные и ахиральные молекулярного и макроскопического масштабов.

В рамках развиваемых представлений филогенетический закон Геккеля (осторожно воспринимаемый в настоящее время многими биологами) в основе своей справедлив и является нестрогим отражением более общей закономерности воспроизведения типов симметрии в ходе развития иерархических структур самой разной природы, а две названные фундаментальными биологические асимметрии сопроводили все этапы филогенеза и онтогенеза [7,16]. В ходе разработки настоящего подхода общебиологи-

ческой направленности было бы неправильно ограничиваться буквальными представлениями относительно симметрий, характерных для семейства самых простых геометрических фигур (концентрических окружностей, плоских и винтовых спиралей), хотя они, благодаря своей наглядности, чрезвычайно полезны при обсуждениях. В чем-то буквально, в чем-то как модель, как образ сложных систем.

Основные свойства активных сред как генераторов симметрий можно представить следующим образом:

Активные среды характеризуются наличием распределенных ресурсов (энергии, вещества, информации), относятся к уникальному разряду нелинейных систем, которые могут быть описаны в терминах «реакция – диффузия – автокатализ» и обладают свойством самоорганизации, проявляющимся в образовании автоволновых диссипативных структур. В простейшем случае мы имеем дело с концентрически распространяющимися от водителя ритма – пейсмекера – автоволнами [17].

При образовании автоволновых паттернов происходит уменьшение исходного числа степеней свободы, эффективно описывающих систему (исходно система является или гомогенным автокаталитическим пространством, или пространством конечноразмерных автономных осцилляторов, генераторов автоколебаний). Выделенные степени свободы определяют типы симметрии образующихся структур и тенденции их эволюции.

Из-за наличия рефрактерной зоны в активной среде исключена интерференция, и потому водитель ритма с наибольшей частотой в системе концентрических автоволн постепенно захватывает все реакционное пространство, «поедая» более медлительных соседей. Данный вид конкуренции явно демонстрирует один из критериев отбора – кинетический: пространство захватывает система, более эффективно преобразующая свободную энергию [6].

В однородной активной среде скорость распространения, длина и форма автоволн постоянны и не зависят от начальных и граничных условий. Неоднородные активные среды вследствие наличия порогового эффекта могут модулировать или гасить автоволновые процессы. Исходные тенденции к образованию тривиальных однородных структур в активных средах могут приводить к их трансформации в хиральные паттерны в неоднородных средах (например, плоские или концентрические автоволны при попадании на параллельный фронт волны наклонный барьер (в зависимости от направления наклона) трансформируются в спи-

ральные автоволны разных знаков хиральности – правые или левые ревербераторы) [18]. Левые и правые (L, D) спиральные автоволны закручиваются и «наматываются» во встречных направлениях. Симметричные и несимметричные статические неоднородности в автоволновой среде порождают гетерохиральность в первом случае и гомохиральность – во втором. В качестве неоднородностей могут выступать механические включения, а также локальные градиенты рН, ионной силы, температуры или состава самой реакционной смеси, в общем случае создающие градиент возбудимости среды. Взаимодействие хиральных процессов с хиральными структурами в латеральной (квазидвумерной) системе может изменить соотношение зеркальных компонентов в развивающихся процессах. Существенно, что подобная эволюция носит необратимый характер.

Спиральные автоволны (ревербераторы) вследствие особенностей их формирования имеют минимальную длину волны и максимально конкурентно эффективны («кинетическое совершенство» [6]) в борьбе за реакционное пространство с автоволновыми паттернами других симметрий.

Активные среды в ходе автоволновой самоорганизации способны сопрягать процессы соизмеримого временного и пространственного масштабов. Подобные системы автоматически стануются когерентными и соотносимыми по размерности.

Для нас принципиальна задача соотносить два уровня: макроскопический, характерный для существования хиральных режимов в активных средах, и микроскопический уровень хиральных молекулярных соединений. Проблемы макроскопического отбора хиральных форм в активных средах представляют интерес в связи с возможностью создания асимметричных макроскопических условий, которые, в свою очередь, могли бы создать предпочтения для отбора хиральных молекул на микроуровне. Наиболее реальным нам представляется возможность взаимодействия макроскопических и микроскопических хиральных объектов и процессов на термодинамически неравновесных границах фаз. К обсуждению этого вопроса мы вернемся в следующей статье.

Симметрии и асимметрии создают регулярную среду, формирующую выделенные степени свободы и типы движения. На пути биологической эволюции активные среды составили начальный тип самоорганизации. Структурно детерминированные в результате эволюционного отбора упоминавшиеся выше элементарные трансформаторы энергии и информации стали

молекулярными или макроскопическими биологическими машинами, конструкции которых были депонированы в генетическом аппарате индивидуумов. *Это и был переход от неживого к живому.* Общеизвестны симметрии в тепловых и электромеханических машинах, электронные машины обладают выделенными направлениями переноса зарядов и энергии, симметриями или асимметриями на уровне микроструктур. В не меньшей степени это касается известных биологических макромолекулярных машин (моторов), связанных с переносом электронов, протонов, неорганических ионов, а также механохимических преобразователей, имеющих в цитоскелете и мышцах.

Термодинамика как научное направление не имеет дела с симметриями непосредственно, но встречается с ними в самоорганизующихся диссипативных системах и машинах. Два самых ярких проявления энергопреобразующих систем – активные среды и биологические машины, микроскопические (макромолекулярные) и макроскопические. *Активные среды генерируют симметрии, машины их используют.* В общем случае 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 [20]. Естественно, изотропные или хаотические структуры неспособны составлять машины. 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 «вентиль» или «защелки» [21,22]. С этой точки зрения любая машина является хиральным объектом – энантиоморфом. По этой причине «обращение» цикла (условно, L/D-замена) полностью заменяет «вход» и «выход». Электромотор становится генератором тока, холодильник – тепловым насосом, протонная помпа и Na-насос мембран – АТФ-синтазами [23]. Разумеется, паровоз, скатывающийся с горки, не синтезирует дрова, поскольку, независимо от конструкции, речь может идти только о непосредственных участниках термодинамического цикла.

«Воспользовавшись» процессами спонтанной самоорганизации в неживых активных средах, Жизнь стартовала с формирования машин двух типов: машин, преобразующих вещество и энергию, и машин, преобразующих информацию и вовлеченных в управление. Диссипа-

тивные структуры всякий раз воссоздаются *de novo*, а машины воссоздаются в организмах по чертежам геномов. Возникают устойчивые сопряженные иерархии активных сред и машин. Благодаря динамическому сопряжению симметрий, формируются активные среды, составленные машинами, и сами биологические иерархии становятся машинами.

ИЕРАРХИИ И ФРАКТАЛЬНОСТЬ

Уместно процитировать ремейк нашего коллег А.Н. Заикина «Жизнь – это способ существования активных сред», который в контексте нашего обсуждения хотелось бы трактовать как «Жизнь – это способ существования *иерархии* активных сред».

Стала расхожей фраза, что неравновесные системы в нелинейной области могут недетерминировано развиваться через череду бифуркаций. Нелинейность систем, удаленных от состояния термодинамического равновесия, проявляется не только в особенностях развития таких систем во времени, но также и в особенностях эволюции их пространственной структуры [24]. Классическая трактовка известных бифуркационных кривых, описывающих эволюцию систем, обычно использует терминологию «порядок-беспорядок». Авторам представляется целесообразным включить в перечень признаков «эволюции через бифуркации» смену классов симметрий и знака симметрии для хиральных объектов. По всей вероятности, существует некий общий принцип изменений в «чередности симметрий» при прохождении хиральной системой иерархических уровней. Если это касается спиральных образований, то «левые» элементы на последующем уровне формируют «правые» макроструктуры, «правые» формируют «левые» мегаструктуры и т.д. С какого-то уровня относительно простая иерархия спиралей сменяется последовательностью симметрий более высокого ранга. *Типы симметрий сменяются при латеральных взаимодействиях, знак – при переходе на следующий уровень.*

Чрезвычайно ярким в этом отношении является пример формирования спиральных структур на поверхности водных растворов синтетических L- и D-фосфолипидов [25]. С помощью лазерной брестерской микроскопии показано, что «левые» изомеры образуют «правые» макроскопические спирали размером в несколько миллиметров, а «правые» изомеры – «левые» спирали. Таким образом, уровень молекулярных асимметрий сменяется асимметриями миллиметровых размеров типа двумерных кристаллов и, что крайне существенно, другого

знака хиральности. Из рацемического раствора образуется поверхностная структура (текстура), включающая оба типа спиралей.

Еще один пример. Экспериментально установлено, что в гомохиральных растворах трифторацетилованных аминспиртов (ТФААС) в циклогексане, бензоле и других растворителях, а также в водном растворе фенилаланина наблюдается образование анизометрических (отношение длины к диаметру $\sim 10^2$ – 10^5) спиральных структурных элементов, обладающих характерной жесткостью – струн, а также формирование развитой системы струн [26]. Авторами этой работы «выявлена тенденция последовательного формирования хиральных струн более высокого уровня организации в результате объединения и спирального сплетения хиральных струн предыдущего уровня организации. Подтверждено сформулированное ранее авторами полумпирическое правило смены знака хиральности при переходе к структурам более высокого уровня».

Подобный же принцип смены знака в хиральных структурах реализуется в биомолекулах. Каждый нуклеотид ДНК состоит из остатка фосфорной кислоты, присоединенного по 5'-положению к дезоксирибозе, к которой по 1'-положению присоединено одно из четырех (А, Т, Г, Ц) азотистых оснований. В состав РНК входит рибоза. Дезоксирибоза и рибоза, являются D-изомерами, тогда как включающие их нуклеотиды, формирующие боковые группы полимерной цепи, находятся преимущественно в левой форме (гош-конформации) [27]. А двойная спираль ДНК – правая. И далее по иерархии биосинтеза: полипептидные цепи белков, синтезируемые рибосомами, сформированы из L-аминокислот, тогда как важнейшая вторичная структура – α -спираль – правая. Налицо чередование знака хиральности D-L-D-L-D при переходе на более высокий уровень структурно-функциональной организации.

Наглядным проявлением смены знака хиральности является также суперспирализация двойной спирали ДНК – образование конформации молекулы двухцепочечной ДНК более высокого ранга, возникающей под действием скручивающего давления при взаимодействии ДНК с белками. Величина скручивающего давления соответствует направлению супервитков дуплекса. В левосторонней суперспирали (направление витков которой противоположно правосторонней двойной спирали) напряжение скручивания ослаблено. В правозакрученной суперспирали напряженность структуры увеличивается.

Еще один пример смены знака симметрии в структурно-функциональной организации, свойственный, по-видимому, всем организмам на Земле (о нем мы уже упоминали), состоит в том, что L-аминокислоты через рибосомальный синтез попадают в пептидные структуры белков, тогда как D-аминокислоты (аспарагин, серин) уходят на «управленческий» уровень, регулируя важнейшие гормональные, морфогенетические и другие процессы [7,28]. Подробнее – в части II настоящей статьи.

Таким образом, мы полагаем, что *существует общая закономерность: в ходе развития система может многократно изменять тип симметрии внутри одного иерархического уровня, а при переходе на более высокий уровень – знак хиральности*. Диалектическая целесообразность хиральности биологических структур разного уровня (как идеи дуализма) состоит в том, что процесс стратификации по L/D-принадлежности становится универсальным, а иерархические уровни – несмешиваемыми, детерминированными, устойчивыми. Смена знака хиральности – это вентильный ключ, обеспечивающий несводимость и неперемешиваемость уровней (вентиль, хиральный свич, защелка). Даже на вершине филогенетического древа, у *Homo sapiens*: левая часть тела управляется правой частью мозга, а правая – левой. И, в дополнение, известен процесс «симметризации» со сменой симметрий в эмбриогенезе, но не ясны геометрические принципы морфогенеза, это – предмет последующих размышлений.

Сказанное о формировании и заполнении уровней организации динамических систем хиральными объектами внешне напоминает принцип, который был сформулирован Вольфгангом Паули в 1925 г. для электронов и в дальнейшем распространен на все частицы с полуцелым спином: волновая функция системы фермионов является антисимметричной относительно их перестановок, и в пределах одной квантовой системы в данном квантовом состоянии может находиться только одна частица, состояние другой должно отличаться хотя бы одним квантовым числом. Нечто подобное мы можем увидеть в формировании дискретных разномасштабных структур в физико-химических и биологических системах. Однако речь не должна идти о простом критерии минимума энергии, как при заполнении электронных уровней. Принципиально другим должен бы быть и набор «квантовых чисел». Более того, подобающей принципу Паули строгости квантовых систем в макросистемах ожидать не приходится, возможно лишь отражение тенденций.

В качестве межуровневого «вентиля» хиральность эффективна лишь в макроскопических системах одного типа симметрии. Как и в системах «храповик и собачка» или «демон Максвелла», необратимость теряется на микроуровне [21,22]. На молекулярном уровне у хиральных соединений с различными константами скоростей реализуется изоэнтальпийный спонтанный процесс рацемизации хиральных соединений, сопровождающийся ростом энтропии. Для поддержания неравновесного баланса гетерохиральных соединений в живых клетках непрерывно работают специализированные ферментативные системы репарации. Напротив, макроскопически гомохиральная трехмерная структура не может на уровне активных сред спонтанно сменить знак хиральности (например, L на D) или понизить ранг симметрии (к примеру, перейти от спирали к окружности) – спонтанная редукция невозможна. Для этого структура, имеющая данный тип симметрии, должна полностью исчезнуть, чтобы затем сформировался ее антипод.

Следует заметить, что физические механизмы взаимодействия одноподобных хиральных структур одного и разного знака на молекулярном или макроскопическом уровне систематически не изучались, однако нам представляется продуктивным ход рассуждений, представленных в [29] и касающихся эффективной подгонки квазирегулярных структур в процессах спонтанного сворачивания пептидных цепей. В отношении «фолдинга» в ансамблях хиральных структур наиболее важным представляется критерий устойчивости образующихся текстур, равновесных или же стационарных. На интуитивном уровне можно полагать, что в результате самоорганизации устойчивыми могут стать планарные или трехмерные структуры, образованные элементами с разными типами хиральности: центральной, аксиальной, планарной или спиральной, причем в одном случае более устойчивыми станут гомохиральные, в другом – гетерохиральные текстуры.

Рассмотрение природных и модельных иерархических систем с хиральными подсистемами неожиданно спровоцировало вопрос о недостаточности и даже неадекватности их описания с помощью известных фрактальных моделей из-за сохранения в них знака симметрии хиральных фрагментов – принципиального свойства разномасштабного самоподобия [30]. Неадекватность фрактальных описаний реальных иерархических систем состоит в кинетической обратимости переходов между уровнями: «сложность» фрактальных инвариантов не из-

меняется необратимо в разномасштабных самоподобиях – нет «защелки».

Все это не означает, что в реальной природе не существует межуровневой гомохиральности. По всей вероятности, такого рода самоподобия возможны, но они не становятся условием детерминированности и устойчивости стратов. В грустной сказке Андерсена «Тень» тень обрела власть над ученым и заняла его место. Но тень – всего лишь копия, изменяющая размер, квазифрактальный инвариант. Тень неотрывна от оригинала, а отражение – автономно. Структура «остаётся» на своем уровне, а на следующий переходит регуляторная, управляющая функция. Отсюда поиски материальных генераторов дискретности в эволюционирующих системах.

СИММЕТРИИ, ИЕРАРХИИ, СОПРЯЖЕНИЯ, ЭВОЛЮЦИЯ

В активных средах, состоящих из распределенных элементов с хаотической динамикой, происходит рождение регулярного с прогнозируемым поведением паттерна. На базовом уровне флуктуации в такой сложной системе становятся гигантскими, обретая промежуточные симметричные формы. Вследствие этого, среди множества диссипативных систем именно в активных средах, где через автоволновой механизм самоорганизации напрямую связаны временная и пространственная самоорганизации, с необходимостью заложена тенденция к стратификации. Всегда более устойчив промежуточный уровень, упруго зафиксированный обратными связями с соседями. Наименее устойчив несбалансированный внешними связями самый верхний по данному признаку уровень, самый неравновесный и нелинейный. В нем наиболее активно по сравнению с нижними идет морфогенез симметрий, пока еще не зафиксированных хиральными антиподами следующего уровня, когда «количество перейдет в новое качество» – новый страт.

Переход от ахиральных структур к хиральным в эволюционирующих системах необратим, и этот бифуркационный скачок на пути формирования иерархической системы определяет вектор их развития. При иерархическом изменении масштаба в тонкой структуре хиральность сохраняется, но при переходах меняется ее знак, масштаб и размерность. Это и есть (вероятно, не единственное) эволюционное устройство, которое необратимо «защелкивает», подобно «собачке для храповика» в часовом механизме, запрещая обратный переход по той же траектории на прежнюю позицию (см. [21]).

Так, концентрическая автоволна, попадая на фронтальный «градиент» свойств среды, легко изменяет симметрию на спиральную [18], но никакие другие неоднородности не способны переформировать спираль в центрально-симметричную волну – обратить ситуацию вспять.

Проходя череду уровней самоорганизации, бифуркаций и отборов, природные системы усложняются, причем одним из важных признаков усложнения, независимо от общего числа элементов, служит финитное понижение ранга симметрии ключевых элементов. Эта тенденция проявлялась при возникновении молекулярных машин, метаболизма, клеток, сообществ и т.д. В литературе движение по эволюционной лестнице неопределенно трактуется как возрастание «сложности» [31]. На биологическом уровне этот путь представлен добросовестным описанием филогенетического древа с идентификацией таксонов на морфологическом и генно-молекулярном уровне. В аналитических подходах теории систем в попытке проследить стратификацию (для авторов – в понятиях симметрий) среди множества других следует ответить на два вопроса: как развивается усложнение системы на исходном иерархическом уровне и как «количество переходит в качество» при формировании следующего уровня, детерминированного и устойчивого по структуре и функциям.

В соответствии с принципом симметрии Кюри–Пригожина в линейной области необратимые процессы сопрягаются в соответствии со своим тензорным рангом: скалярный (изотропный) процесс сопрягается только со скалярным, векторный – с векторным. Внешние воздействия, вызывающие различные явления в макроскопической системе, не могут обладать более высокой симметрией, чем порождаемый ими процесс. Изотропный процесс (например, экзотермическая химическая реакция в гомогенной среде) не может вызвать направленного переноса теплоты или каких-либо компонентов среды. Другими словами, не все процессы в линейной области могут сопрягаться. Однако в нелинейной области этот принцип неприменим. В исходно однородной среде в нелинейной области может произойти «потеря симметрии» или самопроизвольное возникновение пространственных структур, имеющих новые выделенные степени свободы, т.е. допустимо сопряжение процессов разного ранга симметрии. При наличии адекватных физических механизмов сопрягаются процессы систем одного временного и пространственного масштаба, одного тензорного ранга симметрии, типа симметрии, знака симметрии. В одном иерархическом уровне

не перестраиваются типы симметрии, на более высоком они воспроизводятся для распознаваемости и взаимодействия, но для хиральных объектов – с измененным знаком. Тогда уровни дистанцируются, не перемешиваются. И там, уже в другом пространственно-временном масштабе на другой физической основе симметричные и асимметричные элементы систем снова взаимодействуют.

Хиральность – выделенная физическая основа детерминированности, дискретности иерархических уровней. Знаки хиральности формируют не только дискретность уровней, но и необратимость. В этом – одно из возможных воплощений «сложности», которую мы трактуем как регулярность (не обязательно «периодичность», сравни – «паркет» [32]). Как мы видим, интуитивное представление о возрастании «сложности» на эволюционном пути можно проиллюстрировать вполне конкретным и материальным физико-математическим примером эволюции хиральных структур.

Придерживаясь мнения о том, что биологически целесообразная эволюция характерна для биоценозов, а не для отдельных таксонов, их составляющих, мы полагаем, что структурная сложность возрастает в процессе латеральных взаимодействий, функциональная – при устойчивой стратификации системы. Сложность повышается внутри одного уровня, а фиксируется при образовании следующего и обретения им устойчивости. В своих построениях мы определенным образом отходим от сложившихся представлений об алломорфозе и ароморфозе. Смена знака хиральности – в модельном рассмотрении то же, что и алломорфоз биологический – преобразование биологической организации без увеличения или уменьшения ее сложности. Только реорганизация. Смена типа симметрии – то же, что и ароморфоз биологический: «повышение уровня организации, позволяющее ароморфным организмам существовать в более разнообразных условиях среды по сравнению с их предками, а ароморфному таксону расширить свою адаптивную зону» (см. [1]).

Авторы никоим образом не предлагают делать геометрические подходы основополагающими при описании формирования уровней биосистем на простом термодинамическом принципе экстремумов или сводить модель исключительно к возникновению и взаимодействию симметричных структур, как и к жестким подобиям квантовых правил заполнения атомных орбиталей. Речь идет о выяснении принципов морфогенеза в отдельных организмах, устойчивой регулярной упаковке таксонов в экосистемах, о поиске модели сопряжения энер-

гетических, материальных и информационных потоков в нелинейных стратифицированных системах. Тем более, живые и неживые системы дают примеры эволюционных соответствий симметричных, в том числе хиральных, объектов в природных и искусственных иерархиях.

«Физико-механическая модель живой материи есть стройность.» (Н.А.Умов).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В. А. Твердислов, А. Э. Сидорова и Л. В. Яковенко, *Биофизическая экология* (УРСС, М., 2011).
2. Ю. В. Чайковский, *Зигзаги эволюции* (Изд-во «Наука и жизнь», М., 2010).
3. В. А. Твердислов, А. Э. Сидорова и А. В. Дмитриев, *Синергетические аспекты региональной и глобальной экологии*: (ГУ «Издательский дом «Липецкая газета», Липецк, 2009).
4. Э. Шредингер, *Что такое жизнь? С точки зрения физика* (Наука, М., 1972).
5. Л. А. Блюменфельд, *Проблемы биологической физики*. изд. 2-е (Наука, М., 1977).
6. С. Э. Шноль, *Физико-химические факторы биологической эволюции* (Наука, М., 1979).
7. В. А. Твердислов, Л. В. Яковенко, А. А. Ивлиева и И. Л. Твердислова, *Вестн. МГУ. Сер. 3, Физика, астрономия*, № 2, 3 (2011).
8. Ю. А. Урманцев, *Симметрия природы и природа симметрии: Философские и естественно-научные аспекты*, изд. 2-е (КомКнига, М., 2006).
9. В. В. Исаева, *Синергетика для биологов: вводный курс* (Наука, М., 2005).
10. Г. Вейль, *Симметрия*, изд. 2-е (Едиториал УРСС, М., 2003).
11. Ж. Лошак, *Геометризация физики* (НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», М. – Ижевск, 2005).
12. Э. Г. Лиси и Д. О. Уэтерелл, *В мире науки*, № 2, 31 (2011).
13. Р. Пенроуз, *Путь к реальности, или законы, управляющие Вселенной. Полный путеводитель*. (НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Ижевск, 2007).
14. А. Ленинджер, *Основы биохимии* (Мир, М., 1985).
15. В. А. Твердислов и Л. В. Яковенко, *Вестн. МГУ. Сер. 3, Физика, астрономия*, № 3, 3 (2008).
16. *D-Amino Acids: A New Frontier in Amino Acid And Protein Research-Practical Methods and Protocols*, Ed. Ryuichi Konno (Publisher: Gazelle Distribution; 2007).
17. А. М. Жаботинский, *Концентрационные автоколебания* (Наука, М., 1974).
18. М. С. Попцова и Г. Т. Гурия, *Биофизика* **48** (6), 1116 (2003).
19. В. Эбелинг, А. Энгель и Р. Файстель, *Физика процессов эволюции*, (Едиториал УРСС, М., 2001).
20. Ю. И. Хургин, Д. С. Чернавский и С. Э. Шноль, *Молекуляр. биология* **1**, 419 (1967).
21. Р. Фейнман, Р. Лейтон и М. Сандс, *Фейнмановские лекции по физике* (Мир, М., 1965).

22. Л. А. Блюменфельд, *Решаемые и нерешаемые проблемы биологической физики* (Едиториал УРСС, М., 2002).
23. В. А. Твердислов, А. Н. Тихонов и Л. В. Яковенко, *Физические механизмы функционирования биологических мембран* (Изд-во МГУ, М., 1987).
24. И. Пригожин и И. Стенгерс, *Порядок из хаоса*, 3-е изд. (Едиториал УРСС, М., 2001).
25. N. Nandi and D. Vollhardt, *Chem. Rev.* **103**, 4033 (2003).
26. С. В. Стывбун и А. А. Скоблин, *Хим. физика* **31** (2), 1 (2012).
27. Д. С. Чернавский, *Успехи физ. наук* **170** (2), 157 (2000).
28. Takemitsu Furuchi and Hiroshi Homma, *Biol. Pharm. Bull.* **28** (9), 1566 (2005).
29. В. А. Намиот, А. В. Ботьяновский, И. В. Филатов и др., *Биофизика* **56** (4), 594 (2011).
30. Б. Мандельброт, *Фрактальная геометрия природы* (Институт компьютерных исследований, М., 2002).
31. А. Марков, *Рождение сложности. Эволюционная биология сегодня: неожиданные открытия и новые вопросы* (Изд-во «Астрель», М., 2010).
32. Р. Пенроуз, *Новый ум короля: О компьютерах, мышлении и законах физики*, Общ. ред. В. О. Малышенко (Едиториал УРСС, М., 2003).

From Symmetries to the Laws of Evolution. I. Chirality as a Means of Active Media Stratification

V.A. Tverdislov, A.E. Sidorova, and L.V. Yakovenko

Physical Department, Lomonosov Moscow State University, Vorob'evy Gory, Moscow, 119992 Russia

Features of the hypothetical evolution of a hierarchy of chiral objects formed by active media are discussed. On the basis of experimental facts a new synergetic generalization is made: an evolving system can repeatedly broaden the spectrum of its symmetry types within one level of organization which increases its complexity and change the sign of chirality during transition to a higher level. Switching the chirality sign of macroscopic objects provides irreversibility of stratification. The known chirality of biological structures at different levels suggests that the chiral L/D-stratification should be universal and the hierarchical paths are stable and determined. A high level enantiomorph with reciprocal chirality demonstrates a wider spectrum of functionality. A fractal description of natural hierarchical systems is pointed out to be inadequate because it implicates invariance of the chirality sign of the objects at different scales.

Key words: symmetry, evolution, active media, self-organization, chirality, fractals, hierarchy