

## VARIABILITY OF STRUCTURES AND FORMS OF ORGANIC COMPOUND MOLECULES

L. P. OLEKHNOVICH

*The question of genesis and the variety of the types of mirror configurational isomerism of organic compounds are discussed with the application of some elements of graph theory. Briefly the principles of analysis of molecular forms ("figures") on the basis of symmetry operations are enlightened. Differences of achiral and chiral compounds are classified.*

Рассмотрены вопросы происхождения многообразия видов зеркальной конфигурационной изомерии органических соединений с привлечением элементов теории графов. Кратко освещены принципы анализа форм (фигур) молекул на основе представлений об операциях симметрии, классифицированы особенности строения симметричных и асимметричных соединений, дано определение киральной симметрии.

© Олехнович Л.П., 1997

## МНОГООБРАЗИЕ СТРОЕНИЯ И ФОРМ МОЛЕКУЛ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

Л. П. ОЛЕХНОВИЧ

Ростовский государственный университет, Ростов-на-Дону

### ВВЕДЕНИЕ

Химия углерода – органическая химия – выделяется разнообразием строения и чрезвычайной многочисленностью индивидуальных соединений [1, 2]. Общее число известных органических соединений (свыше десяти миллионов) ежегодно пополняется десятками тысяч новых веществ, синтезируемых в лабораториях. Органическая химия удивляет многообразием классов молекул, в строении которых на первый взгляд не видно никакой логики. Основной причиной появления не поддающегося простому перечислению ( $>10^7$ ) множества органических соединений являются уникальные свойства центрального элемента – углерода.

Мир соединений углерода – это неисчерпаемая комбинаторика вариантов и способов построения молекул из  $n$  атомов С,  $m$  атомов О,  $k$ –N,  $l$ –S,  $h$ –P и т.д.

### ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ГРАФОВ В ИЗОБРАЖЕНИЯХ МОЛЕКУЛ

Подобно тому как физики пользуются экономным, но емким языком математических формул и выкладок, химики используют особый язык записей строения соединений. Этот язык тем более необходим в органической химии для упорядочивания представлений о многочисленных подклассах гигантского разнообразия молекул. Чтобы тратить меньше времени и места при изображении структурных формул, химики-органики часто не затрудняют себя обозначениями атомов. Этот прием особенно удобен, когда рассматриваются не какие-либо свойства конкретного соединения, а общие закономерности строения и формы рядов молекул. Так, вместо того чтобы рисовать буквенные обозначения углеродных и водородных атомов во всех структурных изомерах, например предельного углеводорода гексана –  $C_6H_{14}$ , изображаются графы (схема 1)

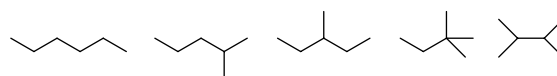


Схема 1

Вершины графов (точки) – это атомы углерода, а соединяющие их линии (ребра) – это связи С–С. Поскольку углерод четырехвалентен, а водород одновалентен, то ясно, что при концевых (свободных) вершинах графа должно быть по три атома Н, при средних вершинах типа  $\wedge$  – по два, при третичных вершинах  $\text{>}$  – по одному и не должно быть водородных атомов при четвертичных вершинах  $\text{+}$ . Приведенные выше графы, следовательно, неполные, однако они достаточны для представления структурных изомеров углеводородов. Ниже приведены графы молекул непредельных углеводородов с двойными (С=С) и тройными (С≡С) связями, а также графы некоторых циклических и каркасных углеводородов (табл. 1).

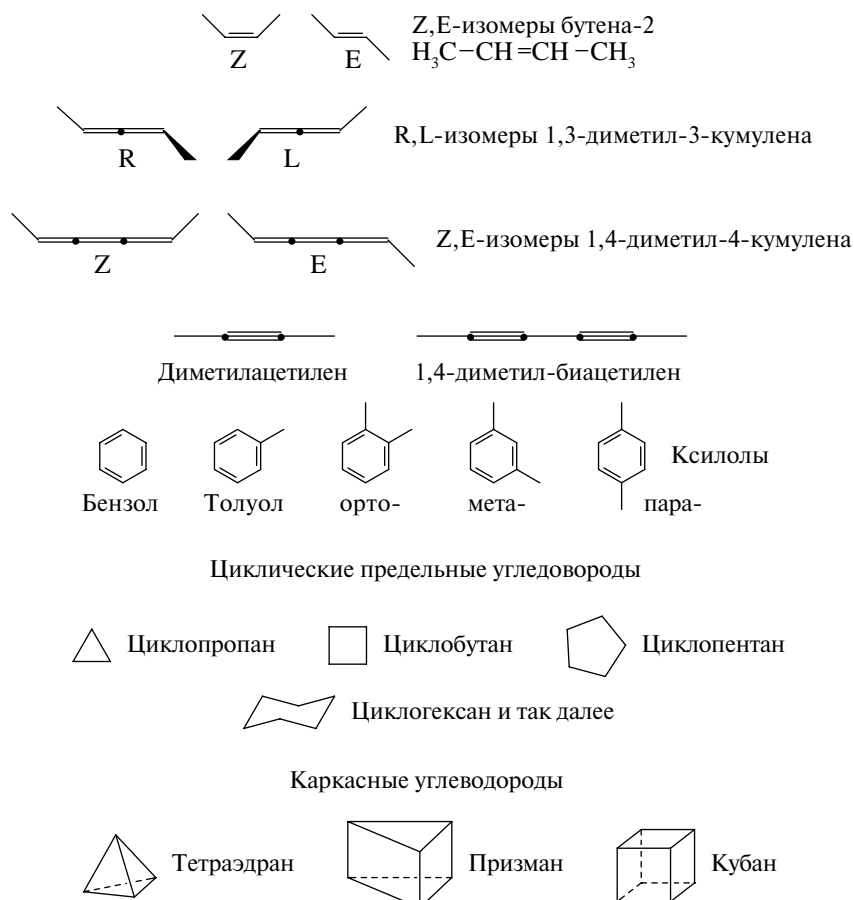
Тригональный граф (схема 2) обобщает представления о фигурах весьма различных молекул.

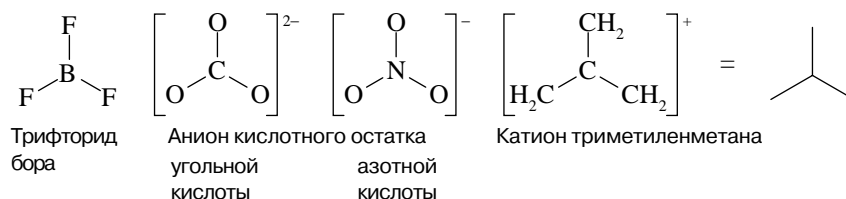
Таким образом, графическая (графовая) формула соединения – это экономное представление важных частных и наиболее общих закономерностей его строения и формы. Химикам достаточно подобных графов, чтобы, не пользуясь длинными названиями

соединений, изображать также сложные превращения молекул (реакции) и понимать друг друга.

Вообще химические графы имеют прямое отношение к специальной отрасли математики – теории графов [3]. В этой теории граф  $G$  порядка  $n$  определяется как непустое множество вершин  $V_1, V_2, \dots, V_n$  с множеством ( $m$ ) парных отношений – ребер, связывающих различные вершины. Начало теории графов положили знаменитые рассуждения Л. Эйлера (1736) о кёнигсбергских мостах, где были сформулированы критерии обхода всех ребер графа без повторений, а также другие его работы, связанные с математическими головоломками и развлечениями. Важные вехи на пути развития этой теории составили работы Г. Кирхгофа (1847) и В. Гамильтона (1859). А. Кэли (1857, 1874–1875) был первым, кто использовал графовые представления (перечисления графовых “деревьев”) в связи с подсчетом числа изомеров первых членов ряда предельных углеводородов – алканов. Действительно, только с помощью аппарата теории графов (теорема Пойа, 1937) можно решать задачи перебора (перечисления) всех структурных изомеров молекул  $C_nH_{2n+2}$ ,  $C_nH_{2n}$ ,  $C_nH_{2n-2}$ ,  $C_nH_{2n-4}$  и т.д. (см. графы изомеров гексана),

Таблица 1





**Схема 2**

а также изомеров производных (замещенных) углеводородов, когда “вручную”, при больших  $n$ , это требует много времени. В настоящее время теория графов естественным образом входит во многие разделы современной математики, такие, как топология и комбинаторика, линейная алгебра и теория групп, теория вероятностей и численный анализ. Она успешно применяется в физике, химии, генетике, антропологии, электротехнике, проектировании ЭВМ, архитектуре, социологии и лингвистике.

Следует иметь в виду особенности “языка” химических графов:

- молекулярные графы формализуют соединения, включающие, как правило, несколько (два и более) сортов атомов-вершин;

- если общая теория графов допускает произвольное количество ребер, исходящих из одной вершины (в том числе изолированные вершины при полном отсутствии ребер), то вершины химического графа обязаны иметь ровно столько ребер (связей), какова валентность (координационное число) данного атома в химическом соединении;

- вершины химического графа вместе с направлениями ребер должны быть четко ориентированы, ибо они представляют собой взаиморасположение атомов в молекулах, а также углы между связями атомов: для тетраэдрического атома углерода эти углы обычно равны  $109,5^\circ$ , для тригонально-плоского —  $120^\circ$ , для дигонального, ацетиленового —  $180^\circ$ , но могут быть и исключения (см. графы каркасных углеводородов в табл. 1), а трехмерные (объемные) проекции графов необходимы для представления конфигураций молекул.

Химики-экспериментаторы проектируют, подобно инженерам, графы новых, неизвестных ранее соединений, продумывают и реализуют способы их синтеза. Химики-теоретики подвергают сравнительному анализу в квантовохимических расчетах подчас весьма разные структуры, чтобы выявить пределы изменений межатомных расстояний и распределения электронов в ионах и молекулах, представляемых одним графом (см. схему 2). Графические формулы стали обиходными немногим более 100 лет назад, и графовый язык общения химиков непрерывно совершенствуется.

## СИММЕТРИЯ И АСИММЕТРИЯ МОЛЕКУЛ, КИРАЛЬНАЯ СИММЕТРИЯ

Обратимся теперь к другой особенности нашего сознания — вниманию. Когда мы рассматриваем какой-либо из окружающих объектов (в том числе молекулярные графы), то при этом зачастую реализуются тоже сознательно неконтролируемые операции внимания, которые отмечают, в каком соответствии друг другу находятся части объекта. Древние греки термином “соизмеримый” (σῖζμετρος) обозначали такие особенности взаиморасположения, относений частей объекта, которые и обуславливают его симметричный вид, форму — строгую симметрию зданий, кристаллов минералов, двустороннюю симметрию листьев растений, поворотную симметрию цветов и т.д.

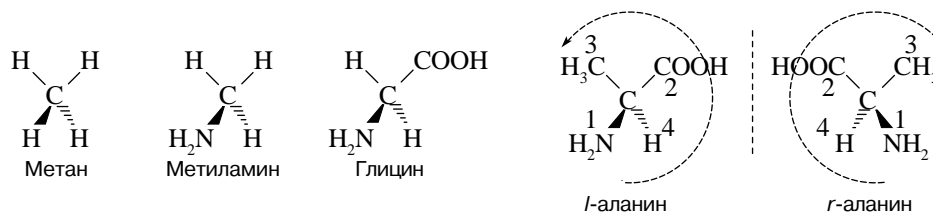
Объекты симметричны, если соразмерность и взаиморасположение их частей допускают такие операции поворотов, внутренних отражений, инверсий (комбинирование поворотов и отражений), действие которых оставляет их (объекты) неизменными, переводит их самих в себя. Строение симметричных объектов таково, что оно характеризуется наличием хотя бы одного из следующих элементов симметрии:

- плоскости зеркального отражения  $\sigma$  ( $S_1$ ) — плоскости симметрии, имеющие ее объекты, состоят из одинаковых, зеркально-тождественных половин (см. графы на схемах 1, 2 и в табл. 1);

- оси симметрии  $C_n$ ,  $n = 2, 3, 4, \dots$  — части объекта совмещаются, как и объект в целом, при его поворотах на углы  $2\pi/n$  (см. табл. 1 и схему 2);

- зеркально-поворотной оси  $S_n$ ,  $S_2 = i$  — центр инверсии — является комбинацией  $C_2 + S_1$ ,  $S_4 =$  комбинации  $C_4 + S_1$  (см. Е-изомеры бутена-2, четных кумуленов, тетраэдр и кубан в табл. 1).

Объект асимметричен, если его внутреннее строение и внешнюю форму нельзя охарактеризовать ни одним из перечисленных элементов симметрии (см. 2-й и 4-й изомеры гексана на схеме 1, аланин на схеме 3). Для таких объектов имеется единственная тривиальная операция симметрии —  $C_1$ . Поворот  $C_1$  на  $360^\circ$  ( $2\pi$ ) совмещает асимметричный объект сам с собой. Разумеется, действием операции  $C_1$  совмещаются сами с собой и все симметричные объекты, поскольку этот поворот тривиален.



**Схема 3**

Сферы, шары – примеры объектов, имеющих бесконечные множества всех элементов симметрии –  $S_1(\sigma)$ ,  $C_n$ ,  $S_n$ . Шар совмещается сам с собой при любых поворотах, любых ориентациях зеркальных плоскостей и осей вращения, проходящих через его центр. Поэтому правильные выпуклые многогранники (тетраэдр, куб, октаэдр, додекаэдр, икосаэдр – идеальные Платоновы тела), в которые вписываются сферы, имеют хотя и конечные наборы элементов симметрии, но их число и разнообразие всегда наибольшие в сравнении с другими многогранниками.

Уже давно было отмечено, что если асимметричную фигуру отразить в зеркальной плоскости, расположенной вне этого объекта, то получается фигура, в точности подобная исходной, но несовместимая с первой при любых сдвигах и поворотах. Следовательно, всем асимметричным объектам можно сопоставить зеркальноподобные двойники. Обыденные примеры этого – наша обувь и перчатки, левые и правые пары фигур которых облегают соответственно левые и правые зеркально-дублетные конечности наших вообще-то планарно-симметричных фигур. Кристаллографы еще несколько веков назад отметили распространенность зеркальноподобных энантиоморфных форм в неорганическом мире – левые и правые кристаллы кварца, турмалина, кальцита (исландский шпат).

Зеркальная изомерия, энантиомерия, в органической химии – весьма распространенное явление. Приоритет ее открытия в середине прошлого столетия принадлежит выдающемуся французскому химику Луи Пастеру, обратившему внимание на зеркальное подобие форм кристаллов калий-аммонийных солей винной кислоты. С именем Пастера связано становление стереохимии, основывающейся на проблемах симметрии и асимметрии молекул, их строения (формы) в трехмерном пространстве. Важной вехой развития стереохимии явилась предложенная в 1874 году Я. Вант Гоффом и Ж. Ле Белем тетраэдрическая модель атома углерода. Если в простейшем углеводороде, фигура которого аналогична высокосимметричному тетраэдру, – метане атомы водорода последовательно заменять (замещать) другими атомами и атомными группировками, то симметрия получающихся молекул быстро понижается. После трех таких процедур с тетраэдрическим углеродным центром связаны уже четыре разных заместителя, и

асимметричная молекула (аланин) имеет зеркального двойника – дубль (см. схему 3).

В 60–70-е годы нашего столетия ученые-стереохимики Р. Кан, К. Ингольд и В. Прелог выработали общие правила для отнесения компонентов-дублетов подобного типа к левым (*l*) и правым (*r*) формам:

- заместители (атомы), связанные с асимметрическим углеродным или иным атомным центром, сортируются по их иерархии, и самым старшим (номером 1) является тот, который имеет большую атомную массу: в аланине (схема 3)  $^{14}\text{N}$  старше  $^{12}\text{C}$ , а среди атомов углерода метильной и карбоксильной групп старше последний: он связан с тяжелыми  $^{16}\text{O}$ , в то время как первый – с легкими  $^1\text{H}$ ;

- наблюдатель ориентируется (конечно, мысленно) к молекуле, или молекула ориентируется к наблюдателю таким образом, чтобы углеродный центр “заслонял” самый младший заместитель (*H*), и если при этом траектория последовательного перехода от самого старшего к младшим (незаслоненным) заместителям (то есть от первого номера к последующим) аналогична движению стрелок часов, то конфигурация абсолютной правая (*r*), если наоборот, то абсолютно левая (*l*).

Введя представления об абсолютно левых и правых конфигурациях, мы должны предупредить об относительности этой абсолютности. Операции зеркального отражения соответствует *P* – инверсия координат всех атомных и субатомных частей объекта. Однако поскольку неизвестно внутреннее строение атомных (электроны) и субатомных (кварки, глюоны) частиц, то операцию *P* физики дополняют формальной операцией зарядового сопряжения *C* – сменой на противоположные знаки зарядов и всех других антиподных квантовых характеристик атомных (протонов, нейтронов, электронов) и субатомных (кварков, глюонов) частиц, а также операцией инверсии направлений движения (импульсов и моментов импульсов) всех составляющих объекта, которая соответствует обращению времени *T*. Поэтому действительно предельной инверсией является комбинированная *CPT*-операция. Отсюда следует, что абсолютным антиподом исходной, например, *r*-молекулы должен быть ее *l*-партнер, но состоящий из антивещества и движущийся во времени вспять. Идеи комбинирования *P*-, *C*- и *T*-операторов

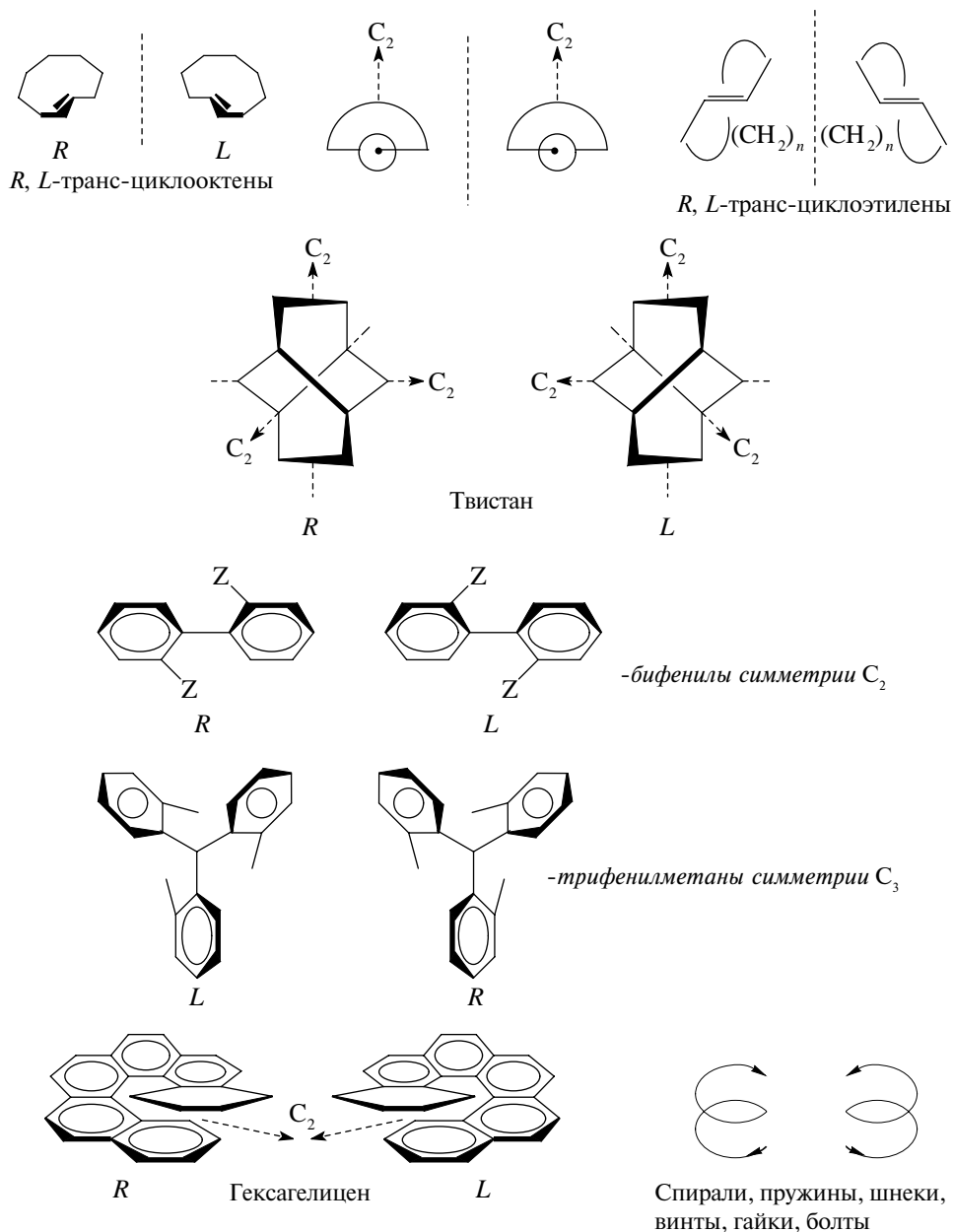
симметрии принадлежат Г. Людерсу и В. Паули (1954–1955).

Вследствие гигантских возможностей варьирования атомов и атомных групп, способных связываться с углеродом, в принципе реализуемы бесконечные последовательности зеркальных *r*, *l*-дублетов молекул с асимметрическими углеродными центрами. Отметим их фундаментальную особенность: если асимметрический углеродный или иной атомный центр поместить в качестве заместителя на одну из вершин высокосимметричного объекта (например, на тетраэдр, кубан; табл. 1) и даже присо-

единить к бесконечно симметричной сфере, то все элементы симметрии исходного объекта деградируют полностью, то есть асимметричная “добавка” переводит идеально симметричный (синглетный) объект в класс энантиомерных дублетов.

Однако не следует считать, что энантиомерия невозможна среди симметричных фигур (молекул). Запомним простую закономерность: зеркальная конфигурационная изомерия действительно невозможна в рядах объектов (молекул), имеющих в качестве внутренних элементов симметрии плоскости зеркального отражения  $\sigma$  ( $S_1$ ) и/или зеркально-

Таблица 2





поворотные оси  $i$  ( $S_{2, 3, 4, \dots}$ ). При отражении таких фигур внешней зеркальной плоскостью получаются тождественные исходным объекты-копии (см. графы на схемах 1, 2 и в табл. 1). Наоборот, если строение объектов (молекул) характеризуется отсутствием внутренних зеркальных элементов симметрии  $S_n$  ( $\sigma, i$ ), но они симметричны относительно поворотов  $C_n$  ( $n = 2, 3, 4, \dots$ ), то такие фигуры всегда  $R, L$ -дубликаты. Простейший пример – 1,3-диметил-3-кумол (табл. 1) и все его гомологи с нечетным числом атомов углерода в линейной цепи. В табл. 2 показаны некоторые  $R, L$ -дубликаты из большого множества молекул, симметричных относительно поворотов. Отметим, что они вообще не имеют асимметрических углеродных центров. В технике молекулам бифенилов и трифенилметилол аналогичны фигуры лопастей вентиляторов, пропеллеров, роторы турбин; фигурам гелиценовых молекул аналогичны спирали, пружины, шнеки, левая и правая нарезка винтов.

Для краткой характеристики обсуждаемого явления на рубеже XIX и XX веков лорд Кельвин предложил термин “chirality” (от греч. χεῖρ – рука). В русском языке употребляются два варианта произношения и написания этого термина: киральность и хиральность. Автор вместе с физиками отдает предпочтение первому. Сопряженные операцией зеркального отражения (координатной инверсии  $P$ ) молекулы – компоненты энантиомерных дублетов – отличаются лишь единственным свойством – противоположными знаками  $+(R)$  и  $-(L)$  угла вращения плоскости поляризации света. Аналогичные антиподные  $(+, -)$  отношения характерны также для полюсов магнитов, зарядов и других квантовых характеристик атомных и субатомных частиц. Такие отношения называются физиками киральной симметрией.

Благодаря усилиям химиков-синтетиков, увлеченных проблемами стереостроения, за последние десятилетия стали известны и доступны весьма многочисленные, в том числе экзотические, виды киральных молекул (см. табл. 2 и схему 4). Принято считать [4, 5], что разнообразие киральных химических соединений разделяется на пять видов в соответствии с симметричными особенностями строения:

$a$  – молекулы с киральным центром не имеют никаких элементов симметрии, кроме элемента идентичности  $C_1$  (примеры – аминокислоты (аланин на схеме 3), сахара-углеводы);

$b$  – планарно-киральные молекулы симметрии  $C_1$  и/или  $C_2$  (выделенный элемент строения – плоскость, примеры – транс-циклоэтилены в табл. 2);

$v$  – аксиально-киральные молекулы с симметрией  $C_n$  (имеют форму пропеллеров или свастики, примеры – твистан, бифенил, трифенилметан в табл. 2 и т.п.);

$z$  – геликально-киральные молекулы симметрии  $C_2$  (характерная форма – спираль, примеры – гексагелицен в табл. 2, белки, ДНК);

$d$  – топологически-киральные молекулы (катенаны, узлы на схеме 4).

Все же условность разбиения очевидна в свете разработанных Р. Каном, К. Ингольдом и В. Прелогом [4], дополненных их последователями [5, 6] правил отнесения конфигураций энантиомерных молекул к  $R$ - или  $L$ -рядам – это циркулярные, спиральные (киральные) движения по ( $R$ ) или против ( $L$ ) хода стрелок часов при последовательном рассмотрении “старшинства” (веса) заместителей, располагающихся (схема 3) вокруг атомного центра –  $a$ , выделенной плоскости –  $b$  (транс-циклоэтилены, табл. 2), при обходе контуров пропеллеров –  $v$ , винтов –  $z$ , узлов –  $d$  в табл. 2, на схеме 4.

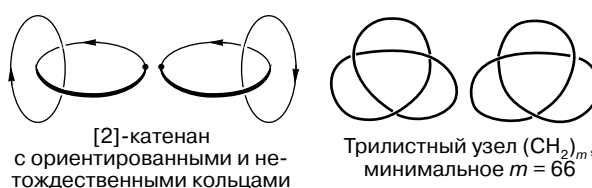


Схема 4

Следовательно, строго говоря, не существуют качественно различные виды киральности молекул. Например, называемая топологической [4] киральность  $d$  на схеме 4 всего лишь отражение той структурной особенности изображенных молекул, что отдельные их части удерживаются вместе не химическими связями, а топологией строения цепей (катенаны), замкнутых спиралей и узлов; их киральная ( $R, L$ ) форма вполне аналогична форме пропеллеров –  $v$  и спиралей –  $z$ . Поэтому все перечисленные выше виды киральности молекул количественно оцениваются единообразно: знаком  $(+, -)$  и величиной угла вращения плоскости поляризации при стандартной длине волны света.

Тем не менее известно также и то, что при поликонденсации центрально-киральных ( $r$  либо  $l$ ) аминокислот, рибонуклеотидов общая киральность полимера (белка, ДНК) не может быть оценена тривиальным суммированием индивидуальных киральностей звеньев:  $\sum r_n(l_n)$  [7]. Эта сумма “объемлетя” спиральной (геликальной) киральностью макромолекулы, имеющей свой знак  $(+R^h, -L^h)$  и абсолютную величину,

$$Nr(l) \longrightarrow \sum l_n(r_n) \subset R^h (L^h). \quad (1)$$

Тот факт, что регулярная орто-конденсация акиральных бензольных колец также приводит к спиральным гелиценам [4–6] (табл. 2), лишь подтверждает общее правило: и циркулярное объединение акиральных мономеров подходящего строения, и линейная поликонденсация киральных (только  $r$  или только  $l$ ) звеньев автоматически ведут к спиральной форме полимера. Можно полагать, что в

рядах таких макромолекул реализуется некая последовательность киральностей, соответствующая иерархии уровней стереостроения. Например, первичный, вторичный, третичный и четвертичный уровни строения гемоглобина [7], очевидно, характеризуются также последовательностями “вложенный” типа (1) суммы индивидуальных киральностей аминокислот в спиральную киральность полипептида, этих двух – в “глобулярную” киральность третичного уровня, наконец, этих трех – в “надмолекулярную” киральность квартета (тетраэдра) объединенных глобул. Отсюда, между прочим, следует, что стереохимия полимеров, их ассоциатов должна учитывать в дополнение к перечисленным выше также “глобулярную” – *e* и “надмолекулярную” – *ж* виды киральности. Именно следующие за первичным (структурным) верхние конфигурационные уровни организации макромолекул играют решающую роль при их функционировании в организмах. Так, биохимические реакции с участием ферментов эффективно осуществляются лишь в случаях, когда предварительно реализована комплементация, то есть “узнавание”, отбор тех молекул реагентов и субстратов, особенности конфигурации которых (“фигуры” которых) идеально согласуются с контурами, формами соответствующих полостей в глобулах ферментов. Бытовым аналогом такой комплементации Д. Кошланд предложил считать соответствие ключа и замка [7].

## КИРАЛЬНАЯ АСИММЕТРИЯ

Обобщим изложенное выше. Данная статья преследует цель показать, что в необозримом на первый взгляд материале органической химии легче ориентироваться, если усвоить принципы графового изображения наиболее общих характеристик строения молекул, а также принципы оценки их конфигурации – формы в трехмерном пространстве – на основе идей симметрии и асимметрии. Последние включают представления об основных операторах симметрии: плоскости, осях и зеркально-поворотных осях, используемых при выявлении тех внутренних особенностей строения молекул, которые определяют их внешний вид, форму и в конечном счете важнейшие их свойства.

При “сортировке” молекул на симметричные и асимметричные особая роль принадлежит оператору зеркального отражения – координатной инверсии  $P$ . Оператор  $P_{\sigma}$  координатам всех частей (атомов) объекта, расположенного слева от выбранной плоскости, ставит в однозначное соответствие координаты инвертированного (отраженного) объекта справа от этой плоскости. Оператор  $P_r$  осуществляет аналогичную координатную инверсию относительно точки, выбранной вне объекта (легко сообразить и проверить, что при действии  $P_r$ -оператора также получается зеркальный двойник объекта, но повернутый, опрокинутый на  $180^\circ$ ). Объекты (молекулы),

имеющие внутренние зеркальные элементы симметрии  $S_n$ , конфигурационно однозначны (синглетны), поскольку их внутреннее строение  $P$ -четно. Объекты, не имеющие внутренней  $P$ -четности строения (не имеющие элементов симметрии  $S_n$ ), всегда конфигурационно двузначны (дублетны, левый + правый). Чтобы из  $P$ -четного объекта получить его копию, достаточно одной  $P_{\sigma(i)}$ -операции, но чтобы скопировать  $P$ -нечетный объект, необходимы две последовательные  $P$ -операции:



Заметим, однако, что далеко не всем окружающим нас в живой и неживой природе  $P$ -нечетным объектам можно легко найти левых либо правых партнеров-близнецов, например выбранному дереву в лесу или камню из кучи щебня. Отметим далее, что киральная симметрия абсолютно (на 100%) не соблюдается для  $P$ -нечетных молекул органических соединений, входящих в состав всех живых организмов на нашей планете. Если это аминокислоты, то только левые (*l*); если сахара-углеводы, то только правые (*r*); если это биополимеры, то они спирально закручены только вправо (белки, ДНК). На эту закономерность, называемую киральной асимметрией биосферы, также впервые обратил внимание Л. Пастер.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Общая органическая химия: Пер. с англ. М.: Химия, 1981–1986. Т. 1–12.
2. *Жданов Ю.А.* Углерод и жизнь. Ростов н/Д: Изд-во РГУ, 1968. 131 с.
3. *Татт У.* Теория графов. М.: Мир, 1988.
4. *Соколов В.И.* Введение в теоретическую стереохимию. М.: Наука, 1982; Успехи химии. 1973. Т. 42. С. 1037–1051.
5. *Ногради М.* Стереохимия. М.: Мир, 1984.
6. *Харгиттаи И., Харгиттаи М.* Симметрия глазами химика. М.: Мир, 1989.
7. *Филиппович И.В., Сорокина Н.И.* // Успехи соврем. биологии. 1983. Т. 95. С. 163–178.

\* \* \*

Лев Петрович Олехнович, доктор химических наук, профессор, зав. кафедрой химии природных и высокомолекулярных соединений Ростовского государственного университета, зав. лабораторией внутренней динамики молекул химфака и НИИ физической и органической химии РГУ, член-корреспондент Российской академии естественных наук. Область научных интересов: органический синтез, кинетика и механизмы молекулярных агрегировок, стереохимия и стереодинамика. Соавтор двух монографий и автор более 370 научных статей.