

УДК 577.22 + 577.212.4 + 577.112.012

**В. А. Карасев**, канд. биол. наук,  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

## О принципах построения цепных полимеров. III. Минорные элементы и полная пространственная структура пентафрагментов на гиперкубе $B^4$

**Ключевые слова:** бионическая наноэлектроника, цепные полимеры, белки, вторичная структура, пентафрагменты, пространственная структура, булев гиперкуб  $B^4$ , булев гиперкуб  $B^6$

**Key words:** bionical nanoelectronics, chain polymers, proteins, secondary structure, pentafragments, spatial structure, boolean hypercubes  $B^6$  and  $B^4$ .

*Этой статьей завершается публикация серии из трех статей Карасева В. А. (Биотехносфера. 2009. № 5, 6), посвященных анализу пентафрагментов в белках, являющихся частным случаем цепных полимеров. Проведен анализ минорных элементов, найденных в выборке из 100 тыс. пентафрагментов белков в количестве около 1,2%. Показано, что в отличие от основных пентафрагментов миноры относятся к другим восьми подклассам. Найденные минорные элементы относятся в основном к видам, образующим небольшое число водородных связей во вторичной структуре. Основой классификации минорных пентафрагментов белков и других цепных полимеров является блочная матрица из 64 элементов. Предложена пространственная структура всех подклассов пентафрагментов, включая восемь основных и восемь минорных, которая представляет собой систему булевых гиперкубов  $B^6$ , расположенных в вершинах четырехмерного гиперкуба  $B^4$ .*

### Введение

Цепные полимеры являются перспективными материалами для бионической наноэлектроники [1]. Удобной моделью и частным случаем цепных полимеров служат белки. В работах [1, 2] были сформулированы представления о молекулярной векторной машине (МВМ), которая обеспечивает возможность построения вторичной структуры цепных полимеров. Элементами МВМ являются: 4-звенный фрагмент цепного полимера (пентафрагмент —  $\alpha$ -атомы  $R_i^\alpha — R_{i-4}^\alpha$ ); тетраэдрический  $R_i^\alpha$ -атом, с которым связаны сменяемые физические операторы  $S_i$ ; фрагмент  $i + 1$ -го звена, имеющего направление на атом  $R_{i+1}^\alpha$ . Областью действия физиче-

ских операторов является пентафрагмент, в котором возможно образование водородной связи между  $Q_iH...X_{i-4}$ -атомами.

Разработка этого подхода проводится нами в серии статей, посвященных анализу принципов построения структуры цепных полимеров [3, 4]. В предыдущих сообщениях данной серии были изложены результаты анализа пентафрагментов, важных элементов МВМ. Из 537 файлов белков Protein Data Bank были получены текстовые файлы с описанием водородных связей основной цепи, на основе которых было выделено более 100 тысяч пентафрагментов. Нами была проведена их систематизация, в результате которой предложена классификация в виде восьми блочных суперматриц по 64 элемента, пригодная для любых цепных полимеров [3]. Далее была представлена пространственная структура пентафрагментов, состоящая из восьми гиперкубов  $B^6$ , расположенных в вершинах трехмерного куба  $B^3$  [4].

Форма представления и номенклатура пентафрагментов в процессе анализа претерпели ряд изменений, связанных с задачами их исследования (рис. 1). Первоначально мы использовали цельные фрагменты белка вместе с названиями аминокислот и их связями (рис. 1, а) [3]. Затем они анализировались уже как фрагменты белка [3] независимо от состава аминокислот (рис. 1, б), а также как фрагменты цепного полимера независимо от типа входящих в него атомов (рис. 1, в). Для анализа путей формирования спиральных участков цепного полимера [4] была использована форма представления фрагментов в виде псевдогексаграмм (рис. 1, г).

В процессе работы мы пришли к необходимости использования бинарной системы обозначения связей: отсутствие Н-связи обозначали как 0, а наличие связи — как 1. При этом чтение значений переменных (рис. 1, б—г, показаны справа от рисунков) производили попарно, снизу вверх. Например, пары переменных при  $i$ -м и  $i - 4$ -м углеродных

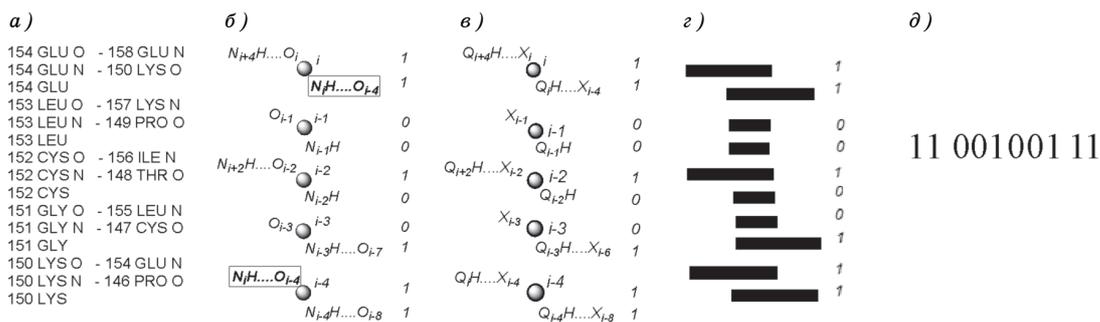


Рис. 1 Эволюция форм представления пентафрагментов: а — фрагменты на основе текстовых файлов; б — формализованные фрагменты для белков; в — фрагменты для всех цепных полимеров; г — пентафрагменты в виде псевдогексаграмм; д — описание связей фрагментов в бинарной системе в виде десятизначного числа

атомах (1-я и 5-я сверху пары) читали как 11, пара при  $i - 1$ -м атоме — как 00, при  $i - 2$ -м — как 01 и при  $i - 3$ -м — как 10. Перевод этих значений в линейную последовательность из десяти цифр (рис. 1, д) проводили иначе. Первой слева записывали пару переменных для  $i$ -го атома (11), затем записывали 2-, 3- и 4-ю пары соответственно для  $i - 1$ -го,  $i - 2$ -го,  $i - 3$ -го атомов основной цепи со значениями 00, 10 и 01 (читаются как пара сверху вниз), а в конце — 5-ю пару — связи для  $i - 4$ -го атома пентафрагмента (11). Для данной работы оказалось удобным использовать именно цифровую форму их представления. В табл. 1 показана полная система основных видов пентафрагментов, полученная на основе выборки из 537 файлов белков [3]. На основе этой таблицы путем подстановки 1-й и 5-й

пар переменных легко получить все восемь подклассов пентафрагментов, каждый из которых содержит по 64 элемента.

Для обозначения подклассов пентафрагментов в работе [3] были введены обозначения, соответствующие  $i$ -й и  $i - 4$ -й парам переменных: 00-00, 00-10, 01-00, 01-10, 10-01, 10-11, 11-01, 11-11. Они будут использоваться и в настоящей работе. В табл. 1 видно, что классы 00 и 01 имеют в  $i - 4$ -й позиции пары переменных 00 и 10, а классы 10 и 11 — пары 01 и 11.

В процессе работы нами были обнаружены пентафрагменты, которые не относятся ни к одному из выделенных выше подклассов. Они были названы минорными, или минорами. Их количество (порядка 1200) составляет примерно 1,2 % от числа

Таблица 1 Полная система описания связей основных пентафрагментов цепных полимеров [3], представленная в цифровой форме

α-атом	Тип фрагмента							
	ациклический				циклический			
$i$	00		01		10		11	
$i - 2$	00				01			
$i - 1$ $i - 3$	00	01	10	11	00	01	10	11
00	000000	010000	100000	110000	000100	010100	100100	110100
10	000010	010010	100010	110010	000110	010110	100110	110110
01	000001	010001	100001	110001	000101	010101	100101	110101
11	000011	010011	100011	110011	000111	010111	100111	110111
$i - 2$	10				11			
$i - 1$ $i - 3$	00	01	10	11	00	01	10	11
00	001000	011000	101000	111000	001100	011100	101100	111100
10	001010	011010	101010	111010	001110	011110	101110	111110
01	001001	011001	101001	111001	001101	011101	101101	111101
11	001011	011011	101011	111011	001111	011111	101111	111111
$i - 4$	00				01			
	10				11			

основных пентафрагментов. Тем не менее игнорировать их присутствие оказалось невозможным ввиду важных функций, которые, как оказалось, выполняют миноры в белках. Проведенный нами анализ показал, что они также подразделяются на восемь подклассов и могут описываться на основе матриц из 64 элементов, хотя степень заполнения матриц оказалась существенно меньше, чем в случае основных пентафрагментов. С учетом восьми основных пентафрагментов общее число подклассов составило 16, что позволило построить пространственную структуру для всех пентафрагментов на гиперкубе  $V^4$ . Данная работа посвящена подробному изложению полученных результатов.

## 1. Анализ минорных пентафрагментов

### 1.1. Выделение подклассов миноров

В процессе работы нами было найдено четыре класса и восемь подклассов минорных пентафрагментов. Принципы их классификации показаны в табл. 2. Как и ранее [3], пентафрагменты представлены в таблице состоящими из трех частей: начальной ( $i$ -й  $\alpha$ -углеродный атом и его связи), цен-

тральной ( $\alpha$ -атомы  $i - 1$ -й,  $i - 2$ -й,  $i - 3$ -й и их связи) и конечной ( $\alpha$ -атом  $i - 4$  и его связи).

Минорные пентафрагменты в отличие от основных [3] не имеют разделения на группы ациклических и циклических (они все ациклические), однако образуют те же четыре класса в соответствии с количеством водородных связей при  $i$ -м  $\alpha$ -углеродном атоме: 00, 01, 10, 11. Однако характер этих связей иной. В отличие от основных пентафрагментов, где эти связи возникают внутри цикла (типичный пример —  $N_iH...O_{i-4}$ ), в минорных они образуются вне пентафрагментов:  $N_{i+4}H...O_i$ ,  $N_iH...O_{i+4}$ . Это касается также и связей при  $i - 4$ -м  $\alpha$ -углеродном атоме:  $N_{i-8}H...O_{i-4}$ ,  $N_{i-4}H...O_{i-8}$ .

Каждый класс минорных пентафрагментов подразделяется на два подкласса: первый класс (00) — на 00-01 и 00-11, второй класс (01) — на 01-01 и 01-11, третий класс (10) — на 10-00 и 10-10 и четвертый класс — на 11-00 и 11-10. Центральная часть пентафрагментов, приведенная в табл. 2, отражает число водородных связей в наиболее характерных для этих классов видах пентафрагментов. Оно является переменным. В принципе, так же как и для основных пентафрагментов, в подклассах миноров может содержаться по 64 вида, однако на практике нами обнаружено для каждого

Таблица 2 Принципы классификации минорных пентафрагментов

Класс	00		01		10		11	
Подкласс	00-01		01-01		10-00		11-00	
$i$		00		01		10		11
$i - 1$ $i - 2$ $i - 3$								
$i - 4$		01		01		00		00
	00 000000 01		01 010101 01		10 000000 00		11 000000 00	
Подкласс	00-11		01-11		10-10		11-10	
$i$		00		01		10		11
$i - 1$ $i - 2$ $i - 3$								
$i - 4$		11		11		10		10
	00 000000 11		01 010101 11		10 000000 10		11 000000 10	

подкласса лишь от 5 до 11 видов. Под каждым подклассом приведено его описание в двоичной системе, в котором 1-я и 5-я пары переменных в них разделены интервалом.

1.2. Количественное распределение минорных пентафрагментов

Как и в работе [3], в этой статье мы приводим данные о количестве разных видов в классах и подклассах минорных пентафрагментов, найденных в данной выборке (табл. 3). Принцип построения этой таблицы, основанный на классификации пентафрагментов, был предложен ранее [3]. При заполнении

таблицы мы вписывали лишь количество найденных пентафрагментов того или иного вида, а для отсутствующих видов клетки оставляли пустыми.

Из табл. 3 следует, что минорные фрагменты имеются во всех перечисленных в разделе 1.1 подклассах. В большинстве из них заполняются в первую очередь начальные клетки первого (00) и второго (01) блоков. Так, в подклассе 00-01 больше всего фрагментов с центральными парами переменных 000000 (463 фрагмента). Аналогичная картина наблюдается и для других подклассов: 00-11 (101 фрагмент), 10-00 (354 фрагмента), 11-00 (74 фрагмента). В других подклассах количество миноров существенно ниже, хотя максимальное их число имеется также у первых представителей подкласса

Таблица 3 Количество минорных пентафрагментов, найденных в белках

Класс 00																	
Подкласс 00-01								Подкласс 00-11									
$i-2$	00				01				00				01				
$i-3$ $i-1$	00	01	10	11	00	01	10	11	00	01	10	11	00	01	10	11	
00	463	3	3	1	5				101	1	1		2				
10						1			1								
01	6	1			1	1			3								
11																	
$i-2$	10				11				10				11				
$i-3$ $i-1$	00	01	10	11	00	01	10	11	00	01	10	11	00	01	10	11	
00																	
10																	
01	1																
11																	
Класс 01																	
Подкласс 01-01								Подкласс 01-11									
$i-2$	00				01				00				01				
$i-3$ $i-1$	00	01	10	11	00	01	10	11	00	01	10	11	00	01	10	11	
00	24																
10																	
01	18			20	17				4				3	2	1		
11																	
$i-2$	10				11				10				11				
$i-3$ $i-1$	00	01	10	11	00	01	10	11	00	01	10	11	00	01	10	11	
00																	
10																	
01																	
11	1					1											

Продолжение табл. 3

Класс 10																
Подкласс 10-00									Подкласс 10-10							
$i-2$	00				01				00				01			
$i-3$ $i-1$	00	01	10	11	00	01	10	11	00	01	10	11	00	01	10	11
00	354		9	1	3				20		4					
10	4	2							1							
01									1		1					
11																
$i-2$	10				11				10				11			
$i-3$ $i-1$	00	01	10	11	00	01	10	11	00	01	10	11	00	01	10	11
00	2								1		4					
10	3		1								10					1
01						1										
11									1							
Класс 11																
Подкласс 11-00									Подкласс 11-10							
$i-2$	00				01				00				01			
$i-3$ $i-1$	00	01	10	11	00	01	10	11	00	01	10	11	00	01	10	11
00	74	2	3						7		3					
10	3															
01					2	1					1					
11						1										
$i-2$	10				11				10				11			
$i-3$ $i-1$	00	01	10	11	00	01	10	11	00	01	10	11	00	01	10	11
00	2								1		1					
10																
01																
11						1										

с переменными 000000 (подклассы 01-01, 01-11, 10-10, 11-10). Для подкласса 01-01 в блоке 01 характерно относительно высокое число пентафрагментов видов 01 010100 01 (20 фрагментов) и 01 010101 01 (17 фрагментов), а для подкласса 10-10 в блоке 10 — видов 10 001010 10 (4 фрагмента) и 10 101010 10 (10 фрагментов).

В целом же, как следует из приведенных в табл. 3 данных, степень заполнения таблицы оставляет не более 10–12 %, а некоторые блоки вообще остались незаполненными.

### 1.3. Полная система описания связей минорных пентафрагментов

Поскольку минорные пентафрагменты описываются так же, как и основные, то, несмотря на низкую степень заполнения табл. 3, наиболее подходящей структурой для них является блочная матрица, подобная табл. 1. Такая структура для миноров приведена в табл. 4. Сопоставление с табл. 1 показывает, что, хотя, как мы рассмотрели в разделе 1.1, имеются и различия в характере водородных

Таблица 4 Полная система описания связей минорных пентафрагментов цепных полимеров, представленная в цифровой форме

$\alpha$ -атом	Классы фрагментов							
$i$	00		01		10		11	
$i - 2$	00				01			
$i - 1$ $i - 3$	00	01	10	11	00	01	10	11
00	000000	010000	100000	110000	000100	010100	100100	110100
10	000010	010010	100010	110010	000110	010110	100110	110110
01	000001	010001	100001	110001	000101	010101	100101	110101
11	000011	010011	100011	110011	000111	010111	100111	110111
$i - 2$	10				11			
$i - 1$ $i - 3$	00	01	10	11	00	01	10	11
00	001000	011000	101000	111000	001100	011100	101100	111100
10	001010	011010	101010	111010	001110	011110	101110	111110
01	001001	011001	101001	111001	001101	011101	101101	111101
11	001011	011011	101011	111011	001111	011111	101111	111111
$i - 4$	01				00			
	11				10			

связей между основными и минорными фрагментами, внешне различия между ними заключаются в лишь характере общих подклассов. Если для основных фрагментов подклассы 00 и 01 имели общие пары переменных 00 и 01, то для минорных подклассов — это пары 01 и 11. Аналогично для подклассов 10 и 11 вместо пар переменных 01 и 11 в табл. 4 находятся пары 00 и 10. Принцип же расположения переменных для  $i - 1$ -й,  $i - 2$ -й и  $i - 3$ -й пар остался неизменным.

В работе [4] для каждого из подклассов основных пентафрагментов была предложена структура, изморфная булеву гиперкубу  $B^6$  [5]. Полная структура всех подклассов была представлена в виде трехмерного куба, в вершинах которого расположены гиперкубы  $B^6$  соответствующих подклассов, связанные между собой однобитовыми переходами. Эта структура оказалась удобной для описания траектории формирования спиральных структур цепных полимеров [4]. Аналогичную структуру можно предложить и для минорных пентафрагментов. Однако, как показал анализ, минорные пентафрагменты не имеют самостоятельного значения и оказалось целесообразным включить их единую структуру для основных и минорных пентафрагментов (см. заключение).

#### 1.4. Роль минорных пентафрагментов

Как мы упоминали во введении, низкое содержание минорных фрагментов в общей выборке пентафрагментов явилось одной из причин, почему

на первых порах они не привлекали нашего внимания. Ситуация существенно изменилась после того, как мы начали анализировать пентафрагменты, выделяемые в изгибах бета-структур белков. Как известно, в изгибах основной цепи (реверсивных поворотах) в бета-структурах белков возникают водородные связи между  $N_iH...O_{i-4}$ -атомами или  $N_iH...O_{i-3}$ -атомами [6]. При этом могут быть право- и левозакрученные варианты. Мы рассмотрим эти варианты для случая H-связей между  $N_iH...O_{i-4}$ -атомами, показанные на рис. 2. Как видно на рисунке, в случае правозакрученного изгиба (рис. 2, б), водородная связь возникает между  $N_iH$  и  $O_{i-4}$ , а в случае левозакрученного (рис. 2, а) — между  $N_{i-4}H$  и  $O_i$ . Проведем рассмотрение формирующихся фрагментов на основе обоих типов изгибов (табл. 5). Запись выделяемых пентафрагментов мы провели в соседних столбцах таблицы. Сопоставление пентафрагментов этих двух вариантов показывает, что в состав правозакрученных  $\beta$ -изгибов входят только основные пентафрагменты (см. табл. 1), а левозакрученных — как минорные пентафрагменты (выделены жирным шрифтом, их можно найти в табл. 2–4), так и основные (табл. 1). Как мы отмечали в разделе 1.2, именно фрагменты видов 10 000000 00 и 00 000000 01 представлены в табл. 3 в наибольшем количестве.

Таким образом, мы показали, что минорные пентафрагменты в качестве одиночных элементов, включаются в редко встречающиеся левозакрученные изгибы бета-структур и другие элементы вторичных структур белков. Кроме того, как показал анализ,

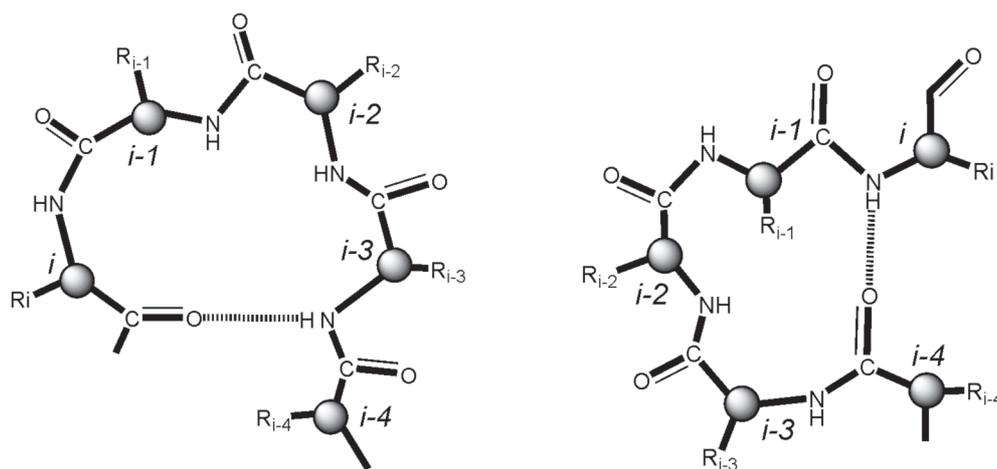


Рис. 2 Варианты закручивания изгибов  $\beta$ структуры и представление на их основе пентафрагментов: а — левозакрученный изгиб; б — правозакрученный изгиб

Таблица 5

**Выделение пентафрагментов для правозакрученных и левозакрученных  $\beta$ -изгибов**

	Левозакрученные $\beta$ -изгибы	Правозакрученные $\beta$ -изгибы
$i + 4$	00 000000 01	00 000000 10
$i + 3$	00 000001 00	00 000010 00
$i + 2$	00 000100 00	00 001000 00
$i + 1$	00 010000 00	00 100000 00
$i$	01 000000 10	10 000000 01
$i - 1$	00 000010 00	00 000001 00
$i - 2$	00 001000 00	00 000100 00
$i - 3$	00 100000 00	00 010000 00
$i - 4$	10 000000 00	01 000000 00

в отличие от основных пентафрагментов, они не склонны к формированию протяженных участков вторичной структуры (ср. с [4]). Все это в сумме объясняет, почему рассмотренные этой работе подклассы пентафрагментов выделяются в группу миноров. Тем не менее отсутствие этих редких пентафрагментов в структурах будет существенно снижать возможности получения разнообразных вариантов вторичных структур цепных полимеров, что должно учитываться в дальнейшей работе.

### Заключение

Модель пространственной структуры минорных и основных пентафрагментов цепных полимеров

В данной серии работ [3, 4], включая настоящую работу, мы провели анализ особенностей структур пентафрагментов, выделяемых из структуры белков как модели цепных полимеров. Мы показа-

ли, что основные пентафрагменты, которые описаны с помощью бинарных матриц из 10 переменных, подразделяются на восемь подклассов и располагаются в восьми суперматрицах, содержащих по 64 элемента [3]. Эти суперматрицы оказались практически полными. Пространственной структурой суперматриц являются гиперкубы, изоморфные булеву гиперкубу  $V^6$  [4]. С другой стороны, проведенный в настоящей работе анализ минорных пентафрагментов белков выявил еще восемь подклассов. Они также описываются с помощью бинарных матриц из 10 переменных и располагаются в восьми суперматрицах, содержащих по 64 элемента. Степень заполнения этих суперматриц, однако, составила лишь 10–12%. Тем не менее их структура также описывается гиперкубами  $V^6$ . Все выводы, полученные для пентафрагментов белков, по всей вероятности, без существенных изменений могут быть распространены и на другие цепные полимеры, в которых, очевидно, будут присутствовать минорные и основные подклассы пентафрагментов.

Поскольку все подклассы пентафрагментов обозначались нами по номеру первой и последней пары переменных, т. е. двумя парами, то для построения структуры основных и минорных пентафрагментов цепных полимеров, включая и белки, может быть использована структура, содержащая четыре булевы переменные, а именно: булев гиперкуб  $V^4$ . Из нескольких вариантов представления этой структуры [5, 7, 8] мы предпочли вариант, приведенный в работе [7] и показанный на рис. 3.

Все гиперкубы, являющиеся структурами пентафрагментов, были помещены в кружки в соответствии с обозначением 1-й и 5-й пар переменных. При этом 1-я и последняя пары переменных показаны соответственно сверху и снизу кружков. Как видно на этом рисунке, в результате использования гиперкуба  $V^4$  все гиперкубы  $V^6$  с минорными и основными подклассами пентафрагментов расположились упорядоченным образом. Так, гиперку-

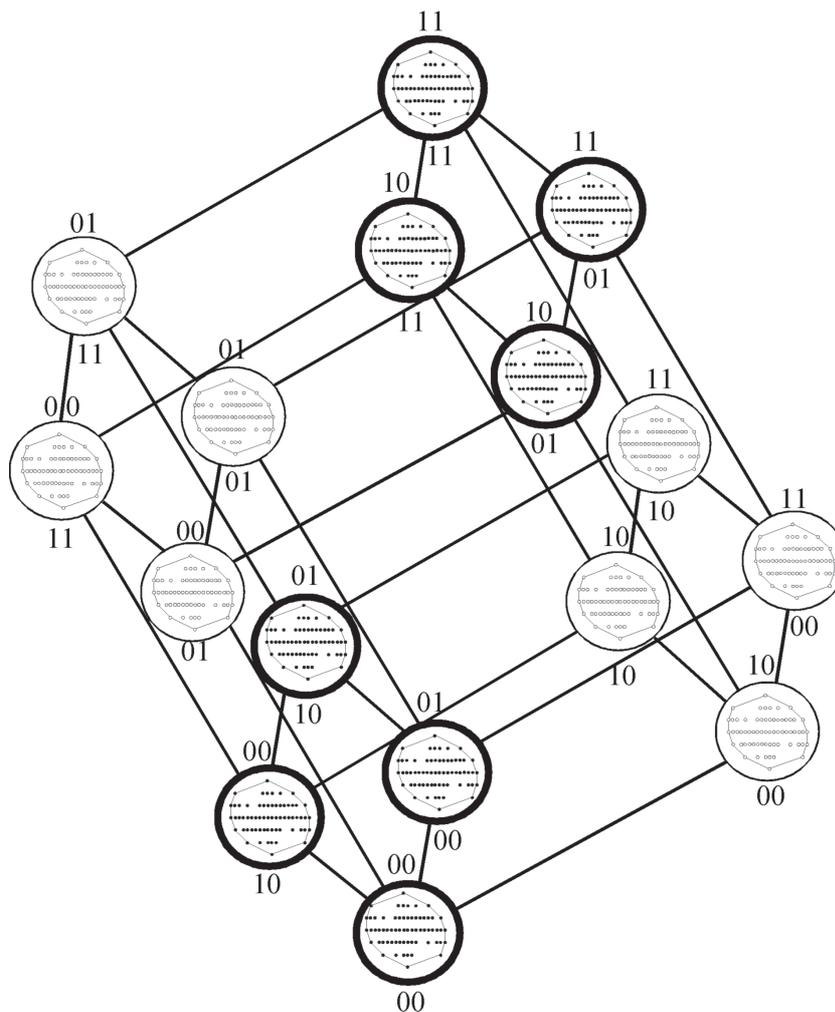


Рис. 3 Модель пространственной структуры основных и минорных пентафрагментов цепных полимеров на гиперкубе  $B^4$

бы  $B^6$  с подклассами основных пентафрагментов (кружки обведены жирными линиями) расположились в нижней и верхней частях гиперкуба, образовав два квартета. В нижний квартал входят подклассы 00-00, 00-01, 01-00 и 01-10. Путем подстановки  $0 \leftrightarrow 1$  нижний квартал подклассов преобразуется в верхний квартал: 11-11, 11-01, 10-11, 10-01, занимая при этом симметричное положение по отношению к элементам нижнего квартета. Соответственно гиперкубы с минорными подклассами пентафрагментов образовали два симметричных квартета справа и слева от центра гиперкуба  $B^4$ . Путем подстановки  $0 \leftrightarrow 1$  эти гиперкубы также преобразуются друг в друга.

В работе [4] было показано, что пространственная структура гиперкубов  $B^6$  основных пентафрагментов на кубе  $B^3$  может быть с успехом использована для построения спиральных структур цепных полимеров. Очевидно, что и данная структура, являющаяся существенно более полной, может быть использована для этих целей. Однако не исключено, что это лишь одно из поверхностных суждений о значении этой структуры. В процессе дальнейшей

работы, возможно, будут выявлены и другие области ее применения. Сам факт построения структур на четырехмерном гиперкубе  $B^4$  наводит на мысль о ее связи с пространственно-временными категориями окружающей нас реальности. Кроме того, известно, что гиперкуб  $B^4$  был использован для построения структуры дуплетного генетического кода [7, 8], что может указывать на возможность их опосредованной взаимосвязи.

Данный этап исследования не является заключительным. Во-первых, представляет интерес дальнейший анализ возможной взаимосвязи между формальным конструированием вторичных структур цепных полимеров и конкретными последовательностями звеньев цепных полимеров (например, аминокислот в белке), реализующими эти структуры. Установление такой взаимосвязи, на наш взгляд, может способствовать разработке конкретных методов предсказания и конструирования вторичных структур, как белков, так и цепных полимеров в целом. Во-вторых, большую важность представляет анализ траекторий и способов построения вторичных структур цепных полимеров с использова-

нием структуры пентафрагментов на гиперкубе  $B^4$ . В-третьих, предложенная структура может иметь отношение и к другим, более высоким уровням построения цепных полимеров, например к формированию их третичной структуры. Исследование этого вопроса также представляет существенный как теоретический, так и практический интерес. Наши дальнейшие исследования будут направлены на решение этих проблем.

Выражаю искреннюю благодарность профессору В. В. Лучинину за постоянный интерес и поддержку данных исследований.

### Литература

1. Карасев В. А., Лучинин В. В. Введение в конструирование бионических наносистем. М.: Физматлит, 2009. 464 с.
2. Карасев В. А., Лучинин В. В. Модель топологического кодирования цепных полимеров для бионической нанoeлектроники. II. Молекулярная векторная машина и структура канонического набора физических операторов // Биотехносфера. 2009. № 2. С. 6–12.
3. Карасев В. А. О принципах построения цепных полимеров. I. Система пентафрагментов // Биотехносфера. 2009. № 5. С. 7–17.
4. Карасев В. А. О принципах построения цепных полимеров. II. Пространственная структура системы пентафрагментов и алгоритмы формирования вторичных структур // Биотехносфера. 2009. № 6. С. 2–13.
5. Яблонский С. В. Введение в дискретную математику. М.: Наука, 1986. 384 с.
6. Шульц Г., Ширмер Р. Принципы структурной организации белков. М.: Мир, 1982. 354 с.
7. Карасев В. А. Генетический код: новые горизонты. СПб.: Тэсса, 2003. 145 с.
8. Bertman M. O., Jungck J. R. Group graph of the genetic code // J. Heredity. 1979. V. 70. P. 379–384.



ОАО «Издательство «ПОЛИТЕХНИКА»»  
предлагает:



С. М. Аполлонский, Т. В. Коляда,  
Б. Е. Синдаловский  
**БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ  
ЧЕЛОВЕКА В ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЯХ:**  
Учеб. пособие

ISBN 5-7325-0854-6  
Объем 263 с.  
Формат 60x90 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>  
Тираж 1000 экз.

Рассматриваются медико-биологические основы безопасности жизнедеятельности человека в электромагнитных полях. Описаны и систематизированы источники электромагнитного поля искусственного происхождения в области неионизирующих излучений, рассмотрена электромагнитная обстановка в помещениях и в окружающей среде, изложены концепции механизмов биологического действия электромагнитного поля и клинико-физиологические аспекты проявления этого действия, указаны методы и средства защиты человека от воздействия электромагнитного поля, средства измерения параметров электромагнитного поля и рекомендованы методы проведения мониторинга.

Учебное пособие предназначено для студентов высших учебных заведений, преподавателей, аспирантов, научных и технических работников, а также широкого круга читателей, интересующихся проблемами безопасности человека в электромагнитных полях.