

## ВЕКТОРНО-ДИАГРАММНЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ РЕПЛИКАЦИИ ДНК, РНК И ТРАНСКРИПЦИИ ДНК

В.В. Щербик, Л.П. Бучацкий  
Киевский национальный университет  
имени Тараса Шевченко

### Введение

Репликация ДНК, РНК и транскрипция РНК относятся к важнейшим биохимическим процессам, лежащим в основе сохранения и преобразования генетической информации. Высокая точность репликации ДНК обуславливает сохранение генетической информации в большом числе поколений. Транскрипция ДНК - синтез первичного фрагмента РНК по матрице ДНК. Синтезируемая РНК подобна смысловой цепи ДНК, но комплементарна матричной цепи ДНК. Потенциальная способность ДНК к размножению, когда из одной родительской молекулы образуются две дочерние копии полностью обусловлена ее структурой. После открытия Уотсоном и Криком свуспиральной комплементарной структуры ДНК стало ясно, что самоудвоение, то есть репликация ДНК, возможна путем синтеза дочерних комплементарных цепей на исходных двух родительских цепях. В природе получил распространение полуконсервантный способ репликации ДНК, что впервые было подтверждено в эксперименте Месельсона-Сталя [1]. Возможные два других способа репликации ДНК - консервантный и дисперсный - не получили распространения. Причина этого в настоящее время неизвестна. В репликации ДНК участвует большое количество ферментов. Роль ферментов состоит в реализации потенциальной способности ДНК к размножению. Репликация ДНК имеет ряд характерных особенностей, из которых выделим основные [2]: - каждая цепь дуплекса ДНК является матрицей для синтеза дочерней комплементарной цепи; - синтез дочерних цепей идет в направлении 5'→3' как в лидирующей, так и в отстающей цепях репликативной вилки; -

лидирующая цепь синтезируется непрерывно, отстающая цепь синтезируется прерывисто фрагментами Оказаки, которые сшиваются ДНК-лигазой; - инициация синтеза лидирующей и отстающей цепи ДНК начинается с синтеза РНК-затравок, в дальнейшем замещаемых сегментами ДНК. Транскрипция ДНК - передача информации ДНК на уровень РНК - производится ДНК-зависимой РНК-полимеразой. Этот фермент самостоятельно выполняет все функции, связанные с расплетением ДНК, синтезом РНК и восстановлением дуплексной ДНК. Репликация РНК - процесс, характерный для размножения вирусов.

### Основа метода - группа ISO(2)

Группа ISO(2) в обозначениях Вайнберга [3], известная как группа сдвигов и поворотов евклидовой плоскости, вошла в обиход теоретической физики благодаря фундаментальной работе Вигнера [4]. Это одна из малых групп (наряду с группой SO(3)) группы Пуанкаре, которая обычно связана с частицами нулевой массы. Мы предлагаем воспользоваться свойствами этой группы для объяснения наиболее важных биологических процессов. Хотя в настоящее время кодовые представления групп Ли неизвестны, все же основные свойства транскрипции ДНК, РНК и трансляции ДНК в РНК, да и вообще сама возможность размножения ДНК обязаны уникальным свойствам группы ISO(2).

На первый взгляд, группа ISO(2) не содержит в себе каких-либо экзотических свойств, тем более она хорошо изучена [5]. Появление этой группы в физических приложениях не очень понятна физикам (например, Райдер [6] весьма удивлен, что для объяснения спина массивной и безмассовой частицы необходимо использовать различные группы). Считается, что элементарные частицы, спин которых описывается группой ISO(2), необходимо должны двигаться со скоростью света, так как внутреннее свойство частиц - спиральность, определяемое как проекция спина на направление импульса частицы, не должна изменяться в зависимости от ориентации и скорости движения частицы относительно наблюдателя (спиральность - лоренц-инвариантная характеристика элементарной частицы).

Для элементарной частицы это действительно так. Но для таких массивных молекул как РНК и ДНК можно предполо-

жить, что спиральность не является лоренц-инвариантной характеристикой и при преобразованиях Лоренца может измениться как свою величину так и знак.

Какие же имеются экспериментальные данные, которые могут быть основой такого подхода?

Во первых, обе спирали дуплексной ДНК являются правозакрученными соосными спиралями. Если, например, (+)-цепь ДНК развернуть на 180 градусов, то ее химическая структура (не информационная) перейдет в (-)-цепь ДНК.

Комплементарные цепи ДНК можно разрезать и, изменив ориентацию одной из них на противоположную, затем состыковать их в последовательную цепь. Процесс расплетения дуплексной ДНК аналогичен расплетению пары массивных правых нейтрино. Это чисто релятивистский эффект. При превышении скорости фермента (геликазы) относительно скорости движения одной из спиралей ДНК, последняя меняет спиральность и переходит в левое нейтрино. Расплетение пары из левой и правой нейтрино является тривиальным.

Мы используем векторную интерпретацию группы ISO(2). Векторы группы - это спин-векторы ДНК или РНК, кратные 1/2. Биспираль ДНК представляется как пара правых нейтрино с противоположными спинами.

Группа ISO(2) - это группа комплексных матриц 2-го порядка следующего строения:

$$G(\alpha, r, \varphi) = \begin{vmatrix} \exp i\alpha & r \exp i\varphi \\ 0 & 1 \end{vmatrix}$$

где  $r \exp i\varphi \equiv r e^{i\varphi}$  - вектор спина (радиус-вектор точки евклидовой плоскости),  $\exp i\alpha$  - фазовый множитель этой же точки после сдвига вдоль оси OX. Группа ISO(2) - это группа Ли. Не трудно вычислить генераторы этой группы, которые удовлетворяют коммутационным соотношениям:

$$[a_1, a_2] = 0; [a_2, a_3] = a_1; [a_3, a_1] = a_2.$$

В наших рассуждениях большую роль играют внутренние автоморфизмы группы ISO(2), которые порождаются действием группы саму на себя преобразованием подобия:

$$G(\alpha_0, r_0, \varphi_0) \Rightarrow G(\alpha, r, \varphi) G(\alpha_0, r_0, \varphi_0) G(\alpha, r, \varphi)^{-1}.$$

## Полученные результаты и их обсуждение

### Транскрипция ДНК

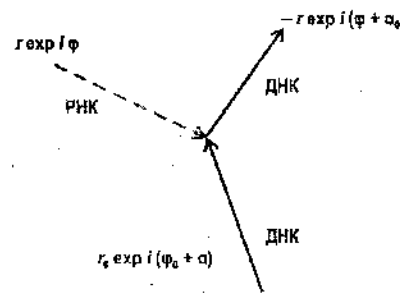
Наиболее просто выглядит диаграмма транскрипции ДНК, поэтому именно с нее мы и начнем изложение диаграммного метода исследования преобразований генетической информации.

В простейшем случае транскрипция ДНК - это автоморфизм нерасплетенной спирали дуплексной ДНК относительно группы ISO(2). Запишем уравнение автоморфизма группы ISO(2) в виде:  $g_s = g g_0 g^{-1}$ , где

$$g = \begin{vmatrix} \exp i\alpha & r \exp i\varphi \\ 0 & 1 \end{vmatrix}; g^{-1} = \begin{vmatrix} \exp(-i\alpha) & r \exp i(\varphi - \alpha) \\ 0 & 1 \end{vmatrix}; g_0 = \begin{vmatrix} \exp i\alpha_0 & r_0 \exp i\varphi_0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix};$$

$$g_s = \begin{vmatrix} \exp i\alpha_0 & -r \exp i(\varphi + \alpha_0) + r_0 \exp i(\varphi_0 + \alpha) + r \exp i\varphi \\ 0 & 1 \end{vmatrix}$$

Элемент матрицы  $g_s$  (12) имеет векторную интерпретацию: сумма трех векторов состоит из вектора спина нерасплетенной спирали ДНК  $r_0 \exp i(\varphi_0 + \alpha)$ , вектора спина расплетенной спирали ДНК  $r \exp i(\varphi + \alpha_0)$  и вектора спина РНК  $r \exp i\varphi$ . В сумме  $g_s$  (12) векторы, имеющие знак плюс, входят в узел суммирования; вектор, имеющий знак минус, выходит из узла суммирования (Рис.1).



Угол  $\alpha_0$  является углом расхождения РНК с матричной цепью ДНК. Угол  $\alpha$  может быть произвольным, но его роль сводится к препятствию комплементарного спаривания РНК с нерасплетенной матричной цепью ДНК.

Рис.1. Диаграмма транскрипции ДНК.

Спиновый вектор РНК противоположно направлен спиновому вектору матричной цепи ДНК.

### 10-Параметрическая схема репликации ДНК

$$(r, r_0, \alpha, \alpha_0, \beta, \beta_0, \varphi, \varphi_0, \psi, \psi_0)$$

Репликация ДНК в группе ISO(2) основана на виртуальном повороте пары спиновых векторов комплементарных фрагментов ДНК. Такой поворот возможен из-за присутствия в группе

двух коммутирующих генераторов. В отличие от транскрипции вектор спина  $r_0$  соответствует расплетенной старой спирали ДНК, а вектор спина  $r$  соответствует как вновь синтезированной спирали ДНК, так и нерасплетенной старой спирали ДНК.

$$g_1 = \begin{vmatrix} \exp i\alpha_0 & -r \exp i(\varphi + \alpha_0) + r_0 \exp i(\varphi_0 + \alpha) + r \exp i\varphi \\ 0 & 1 \end{vmatrix}$$

$$g_2 = \begin{vmatrix} \exp i\beta_0 & -r \exp i(\psi + \beta_0) + r_0 \exp i(\psi_0 + \beta) + r \exp i\psi \\ 0 & 1 \end{vmatrix}$$

произведение  $g_s = g_1 g_2$

$$g_s = \begin{vmatrix} \exp i(\alpha_0 + \beta_0) & -r \exp i(\varphi + \alpha_0) + r_0 \exp i(\varphi_0 + \alpha) + r \exp i\varphi - \\ & -r \exp i(\psi + \beta_0 + \alpha_0) + r_0 \exp i(\psi_0 + \beta + \alpha_0) + r \exp i(\psi + \alpha_0) \\ 0 & 1 \end{vmatrix}$$

содержит 2 вектора длины  $r_0$  и 4 вектора длины  $r$ .

Построение диаграммы репликации начинается со спаривания двух противоположно направленных спиновых векторов нерасплетенной дуплексной ДНК. Пусть это будут пара векторов  $\{-r \exp i(\psi + \beta_0 + \alpha_0), -r \exp i(\varphi + \alpha_0)\}$ . Условие спаривания имеет вид:  $\pi + \varphi = \psi + \beta_0$ . Затем вводится угол виртуального поворота  $\Theta$ , который совмещает две оставшиеся пары векторов. Условия совмещения имеют вид:

$$\{r_0 \exp i(\psi_0 + \beta + \alpha_0) \uparrow, r \exp i\varphi \downarrow\}; \{r \exp i(\psi + \alpha_0) \uparrow, r_0 \exp i(\varphi_0 + \alpha) \downarrow\};$$

$$\psi_0 + \beta + \alpha_0 = \pi + \varphi; \psi + \alpha_0 = \pi + \varphi_0 + \alpha; \Theta = \varphi - \varphi_0 - \alpha,$$

где стрелками показано направление векторов совмещения.

Для несимметричной репликации ДНК лидирующая цепь синтезируется непрерывно, отстающая - прерывисто. При этом лидирующая цепь ДНК ассоциируется со спин-вектором группы ISO(2) большей длины, а спин-вектор ДНК отстающей цепи имеет меньшую длину.

На рис. 2 показана диаграмма репликации ДНК, когда синтез новых цепей ДНК идет несимметрично от начала точки репликации. Несимметрия синтеза новых цепей ДНК проявляется в том, что виртуальный поворот на угол  $+\Theta$  является накрытием большей цепи ДНК над меньшей, но не наоборот.

Проективная часть накрытия  $\Theta$  реализуется фрагментами Оказаки; обратное отображение  $-\Theta$  является инъекцией нуклеотидов в лидирующую цепь.

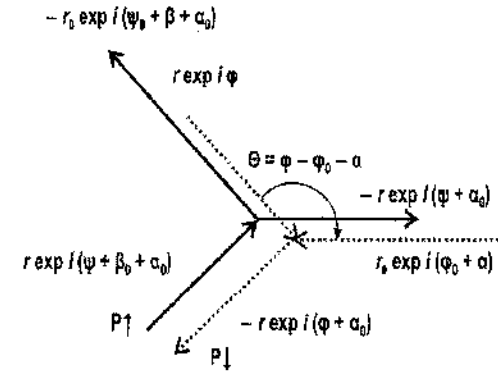


Рис. 2. Диаграмма несимметричной репликации ДНК. Недореплицированная пара спиралей ДНК обозначена как P↓, P↑.

Далее рассмотрим репликацию кольцевой дуплексной ДНК. Рассмотрим две взаимно связанные диаграммы репликации ДНК.

Условия совмещения векторов имеют вид:

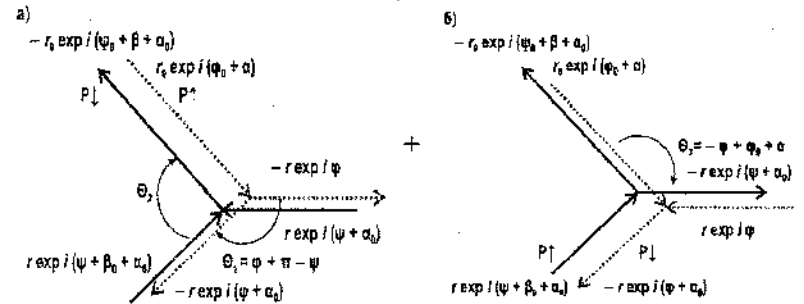


Рис. 3. Диаграммы репликации кольцевой ДНК. Недореплицированная пара спиралей ДНК обозначена как P : а). Репликация ДНК ( $\Theta_1$ ) и индукция комплементарного спаривания нуклеотидов ( $\Theta_2$ ). б). Накрытие и репликация ДНК ( $\Theta_3$ ).

Виртуальный поворот на угол  $\Theta_1$  обозначает репликацию ДНК как автоморфизм большей, недореплицированной части ДНК, то есть синтез (-) цепи ДНК  $-r \exp i(\varphi + \alpha_0)$ . Виртуальный поворот на

угол  $\Theta_2$  соответствует комплементарному спариванию нуклеотидов во вновь синтезируемые цепи ДНК. Далее происходит накрытие большей части ДНК на меньшую часть виртуальным поворотом на угол  $\Theta_3$  синтез (+)-цепи ДНК  $r \exp i\varphi$ . Процесс повторяется.

**II-параметрическая схема транскрипции ДНК и репликации РНК**

$$(r_1, r_2, r_0, \alpha, \alpha_0, \beta, \beta_0, \varphi, \varphi_0, \psi, \psi_0)$$

Рассмотрим два автоморфизма группы ISO(2) с общим вектором  $r_1$ . Для двух автоморфизмов группы  $g_1, g_2$

$$g_1 = \begin{vmatrix} \exp i\alpha_0 & -r_1 \exp i(\varphi + \alpha_0) + r_0 \exp i(\varphi_0 + \alpha) + r_1 \exp i\varphi \\ 0 & 1 \end{vmatrix}$$

$$g_2 = \begin{vmatrix} \exp i\beta_0 & -r_2 \exp i(\psi + \beta_0) + r_1 \exp i(\psi_0 + \beta) + r_2 \exp i\psi \\ 0 & 1 \end{vmatrix}$$

их произведение  $g_s = g_1 g_2$  равно

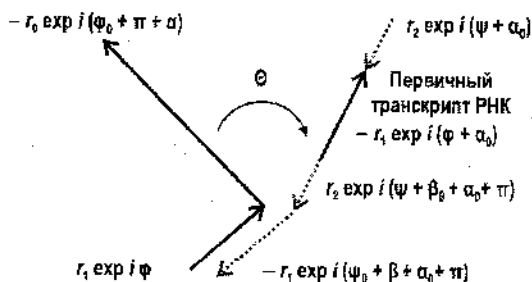
$$g_s = \begin{vmatrix} \exp i(\alpha_0 + \beta_0) & -r_1 \exp i(\varphi + \alpha_0) + r_0 \exp i(\varphi_0 + \alpha) + r_1 \exp i\varphi - \\ & -r_2 \exp i(\psi + \beta_0 + \alpha_0) + r_1 \exp i(\psi_0 + \beta + \alpha_0) + r_2 \exp i(\psi + \alpha_0) \\ 0 & 1 \end{vmatrix}$$

Диаграмма транскрипции ДНК, более сложная, чем представлена на рис. 1 может быть получена на основе предположения, что первичный транскрипт РНК коллинеарен матричной цепи ДНК, но противоположно ей направлен. Тогда первичный транскрипт РНК накрывается комплементарной цепью ДНК виртуальным поворотом на угол  $\Theta$  и поэтому имеет меньшую длину (Рис. 4).

Соотношения совпадения векторов:

$$\varphi = \psi_0 + \beta + \alpha_0; \psi + \alpha_0 = \varphi + \alpha_0 + \pi = \psi + \beta_0 + \alpha_0 + \pi; \beta_0 = -\pi;$$

$$\Theta = \varphi_0 + \alpha + \pi - \varphi - \alpha_0; r_0 = r_1 + 2r_2$$



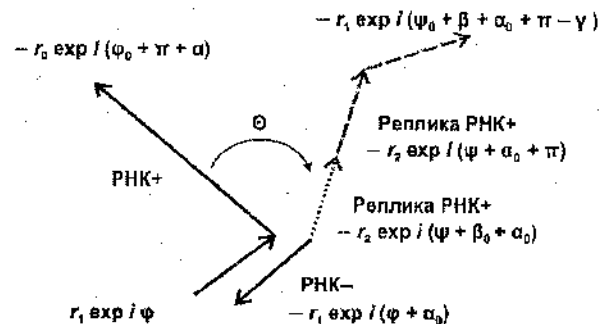
**Рис. 4.** Транскрипция ДНК. Вектор  $-r_1 \exp i(\varphi + \alpha_0)$  из автоморфизма  $g_1$  вложен в автоморфизм  $g_2$ .

Репликация РНК у вирусов выполняется РНК-зависимой РНК-полимеразой. Так как ДНК отсутствует, то автоморфизм  $g_1$  содержит комплементарные цепи РНК. Автоморфизм  $g_2$  является копией комплементарной РНК. Виртуальный поворот на угол  $\Theta$  (Рис. 5) накрывает реплику РНК.

Соотношения совпадения векторов:

$$\alpha_0 = -\pi, \psi + \alpha_0 + \pi = \psi_0 + \beta + \alpha_0 + \pi = \psi + \beta_0 + \alpha_0, \gamma > 0,$$

$$\Theta = -\varphi_0 - \alpha + \psi_0 + \beta + \alpha_0, r_0 > 2r_2$$



**Рис. 5.** Репликация РНК. Векторы  $g_2$  являются сдвинутыми репликами РНК+. Вектор  $-r_1 \exp i(\psi_0 + \beta + \alpha_0 + \pi - \gamma)$  обозначает ранее скопированную часть РНК+. Угол  $\Theta$  всегда больше нуля, так как вектор  $r_0$  является накрывающим вектором реплик РНК+.

Рассмотренные нами диаграммы репликации ДНК, РНК и транскрипции ДНК являются простейшими в группе ISO(2). В дальнейшем, авторы предполагают дополнить множество автоморфизмов группы простым произведением ее элементов.

Это позволит применить векторно-диаграммный метод для описания других биологических процессов.

**Выводы**

1. Группа ISO(2) может быть использована для интерпретации процессов репликации ДНК, РНК и транскрипции ДНК.
2. Автоморфизмы группы ISO(2) лежат в основе транскрипции ДНК.
3. Множество автоморфизмов группы ISO(2) отвечают за все преобразования генетической информации: ферменты реализуют уникальные возможности группы ISO(2) на биологических структурах.

## Література

1. Meselson M. *The Replication of DNA in E. coli* / M.Meselson, F.W.Stahl // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* - 1958.- V.44 - P.671.
2. Сингер М. *Гены и геномы* / М.Сингер, П.Берг. - М.: Мир, 1998. - Т 1. - 374 с.
3. Вайнберг С. *Квантовая теория поля* / С.Вайнберг. - М.: Физматлит, 2003. - Т 1. - 648 с.
4. Wigner E. *On unitary representation of inhomogeneous Lorents group* / E.Wigner // *Ann. Math.* - 1939. - V.40, № 1. - P.149.
5. Виленкин Н. Я. *Специальные функции и теория представлений групп* / Виленкин Н. Я. М: Наука, 1965. 588 с.
6. Райдер Л. *Квантовая теория поля* / Райдер Л. - М.: Мир, 1987. - 511 с.

## Резюме

**Щербик В.В., Бучацкий Л.П.** Векторно-диаграммный метод исследования репликации ДНК, РНК и транскрипции ДНК.

Рассмотрен метод описания репликации ДНК, РНК и транскрипции ДНК на основе группы ISO(2). Показано, что главную роль в объяснении преобразований генетической информации играют автоморфизмы группы ISO(2).

**Ключевые слова:** группа ISO(2), репликация ДНК, репликация РНК, транскрипция ДНК.

## Резюме

**Щербик В. В., Бучацкий Л. П.** Векторно-диаграммный метод дослідження реплікації ДНК, РНК та транскрипції ДНК.

Розглянуто метод опису реплікації ДНК, РНК та транскрипції ДНК на основі групи ISO(2). Показано, що головну роль в поясненні перетворень генетичної інформації відіграють автоморфізми групи ISO(2).

**Ключові слова:** група ISO(2), реплікація ДНК, реплікація РНК, транскрипція ДНК.

## Summary

**Stcherbic V. V., Buchatsky L. P.** Vector-diagram method of DNA, RNA replication and DNA transcription research.

The method of the description of DNA, RNA replication and DNA transcription is considered on the basis of group ISO(2). It is shown, that in an explanation of transformations of the genetic information, group ISO (2) automorphisms play the main role.

**Key words:** group ISO (2), DNA replication, RNA replication, DNA transcription.

**Рецензент:** д.біол.н., проф.М.Е.Держинський

# ЕКОЛОГІЧНА І КЛІНІЧНА ІМУНОЛОГІЯ ТА ІМУНОРЕАБІЛІТАЦІЯ