

## Модель нейрона как квантово-оптического устройства

© С.Л. Григорьев

(Поступило в Редакцию 4 апреля 2001 г.)

Описана возможность инверсии в структуре полиаминокислот и белков, построена электродинамическая и квантово-оптическая модель нейрона и рассмотрена возможность квантово-логического суммирования возбуждающих импульсов наномембраной. Модель соответствует физиологии и предполагает техническую реализацию методами микроэлектроники, интегральной и нанооптики.

Физические свойства нейронов определяют белки и аминокислоты, входящие в состав их мембран. Они содержат полярные молекулярные группы (пептидные и др.) [1] и могут быть отнесены к полярным диэлектрикам, характерные резонансные частоты которых лежат в микроволновой и дальней инфракрасной областях спектра [2,3]. В микроволновой области, вплоть до частот резонанса полярных молекулярных групп ( $50\text{--}200\text{ см}^{-1}$ ), для анализа динамики колебаний атомов этих веществ может быть использован классический подход [4,5].

Пептидные группы, входящие в белковые цепи, показаны на рис. 1. Дипольный момент группы имеет величину порядка  $0.3D$  и существует за счет смещения электронной плотности от атома азота к атому кислорода. Пептидные группы способны легко вращаться вокруг связей  $C_1\text{--}C_2$ ,  $C_2\text{--}N$ .

Для белков и аминокислот характерна самоорганизация во вторичные структуры, подобные кристаллам, и в структуры более высокого порядка [6]. Одной из простейших вторичных структур является складчатый лист (рис. 2). Вторичная структура состоит из первичных полимерных молекул, имеющих водородные связи. Такие структуры легко поляризуются и имеют высокую диэлектрическую проницаемость в широком диапазоне частот [1].

Механизм поляризации наглядно описывается моделью Полинга [7] (рис. 3). По аналогии с этой моделью в структуре типа складчатый лист возможны два инверсных состояния: со связями, находящимися в плоскости листа (рис. 2, *a*), и между листами (рис. 2, *b*). Это частный случай конформации, присущей многим высокомолекулярным веществам [8].

Рассмотрим эту структуру с точки зрения электродинамики и микроволновой спектроскопии. Во вторичной структуре базового типа (рис. 2, *a*) элементарная ячейка содержит четыре диполя, образующих электронейтральную систему (рис. 2, *a1*). Диполи расположены под разными углами друг к другу, поэтому их реакция на внешнее поле различна. Кроме того, в рассматриваемых веществах преобладают вращательные колебания пептидной группы (рис. 4), частота которых описывается моделью крутильного маятника  $T = 2\pi\sqrt{I/D}$ , где  $T$  — период колебаний,  $I$  — момент инерции маятника,  $D$  — крутильная жесткость связи. Момент инерции обусловлен массой атома кислорода ( $m = 3 \cdot 10^{-26}\text{ kg}$ ) и длиной

связи  $C_1\text{--}O$  ( $r = 10^{-10}\text{ m}$ ):  $I = mr^2$ . Крутильная жесткость обусловлена жесткостью валентной связи  $C_1\text{--}C_2$ , водородными связями  $O \dots H$  и кулоновским взаимодействием соседних диполей [9]. Экспериментальные данные о молекулярном движении в кристаллах простейшей аминокислоты-глицина можно найти в работе [4].

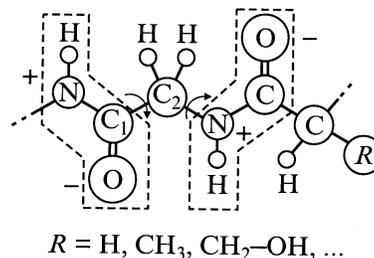


Рис. 1. Пептидные группы  $H\text{--}N\text{--}C\text{--}O$  в белковой цепи.

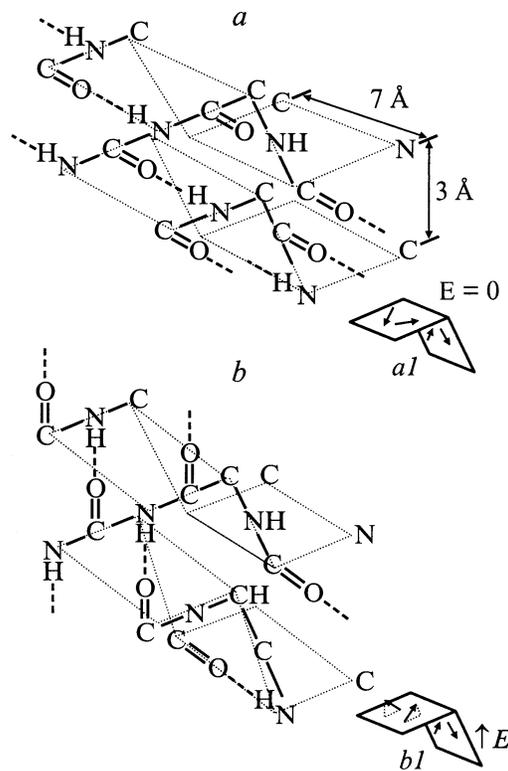
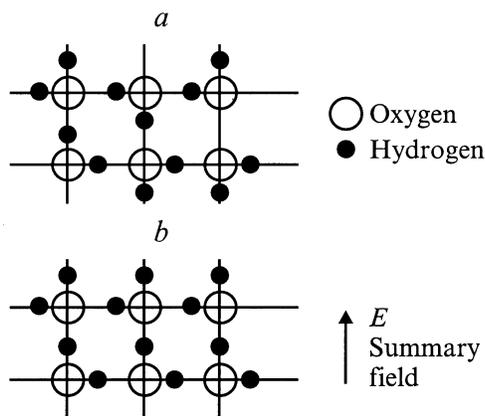
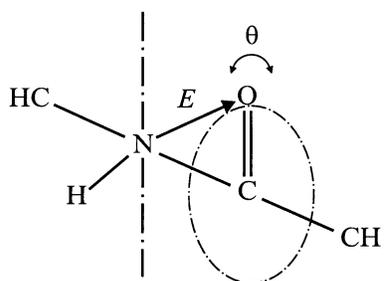


Рис. 2. Вторичная структура полиаланина: *a* — базовая, *b* — инверсная; *a1*, *b1* — дипольные схемы.



**Рис. 3.** Модель Полинга для полярных молекул воды и льда: *a* — неупорядоченная структура, *b* — упорядоченная структура.

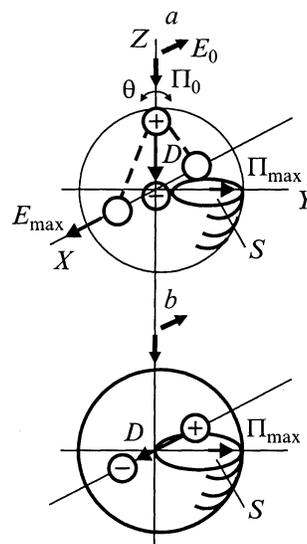


**Рис. 4.** Вращательные колебания ( $\Theta$ ) пептидной группы.  $E$  — электрический вектор диполя.

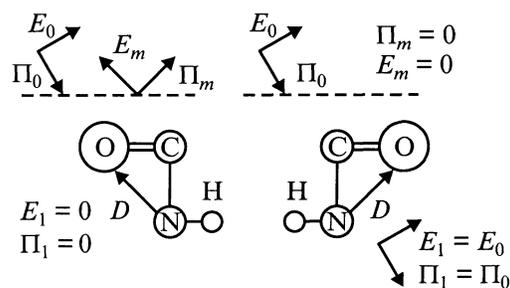
Рассмотрим поведение диполя-маятника, способного к вращению, в электромагнитном поле (рис. 5). Очевидно, что его реакция отличается от реакции классического диполя Герца с продольной связью зарядов [10]. Максимум рассеянного (отраженного) излучения у диполя-маятника наблюдается при направлении внешней волны вдоль вектора диполя, при этом электрический вектор падающей волны должен быть ортогонален вектору диполя. Если при той же ориентации внешнего поля дипольный момент пептидной группы будет повернут на  $180^\circ$ , то полное отражение сменится полным пропусканием волны (рис. 6). Таким образом, конформация структуры приводит к эффекту "оптического ключа" (но в микроволновой области). Поскольку в естественном электромагнитном поле Земли микроволновая компонента практически отсутствует, то описанный "ключевой эффект", по-видимому, был использован природой для биологической памяти животных [3].

От рассмотрения отдельного диполя перейдем к рассмотрению элементарной ячейки, состоящей из 4 диполей. Для построения модели используем электро-механическую аналогию. Представим пептидную группу как крутильный маятник, имеющий два заряженных полюса, которые притягиваются к полюсам других маятников или отталкиваются от них в зависимости от

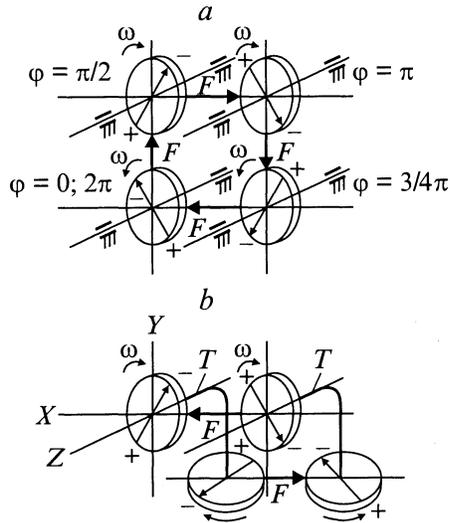
соотношения знаков заряда (рис. 7, *a*). Система из четырех таких маятников не имеет точки устойчивого равновесия, если направления диполей в исходном положении смещены на  $1/4$  периода ( $\pi/2$ ). Такая система, как известно из квантовой электродинамики, может существовать только в движении [11]. Кулоновские силы обеспечивают потенциальную энергию, а вращающиеся массы — кинетическую. При параллельности осей маятников эта система, однако, не обладает анизотропией взаимодействия с внешним электромагнитным полем: электрическое поле любого направления ускоряет два маятника и замедляет два других маятника. Анизотропия возникает, если оси одной из пар маятников повернуть относительно другой пары, т.е. при создании структуры диполей типа "складчатый лист" (рис. 7, *b*). Для более полной аналогии со структурой полиаланина две из четырех кулоновских связей на этом рисунке заменены на торсионные.



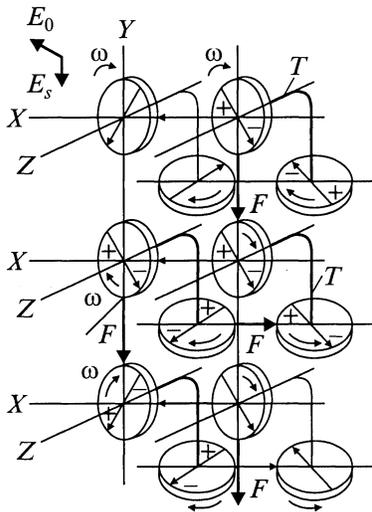
**Рис. 5.** Схема рассеяния падающей волны  $\Pi_0, E_0$  диполем  $D$ :  $\Pi_{\max}, E_{\max}$  — направление и электрический вектор рассеянной волны;  $S$  — сечение тороида, в котором сосредоточено рассеянное излучение; *a* — диполь-маятник, *b* — диполь Герца.



**Рис. 6.** Изменение отражения и прохождения падающей волны при различных состояниях структуры. Индекс 0 — падающая волна, *m* — отраженная, *l* — проходящая. Остальные обозначения те же, что и на рис. 5.



**Рис. 7.** Электромеханическая схема колебательной системы: *a* — изотропная, *b* — анизотропная; *F* — кулоновские силы, *T* — торсионные связи,  $\omega$  — мгновенное направление вращения.



**Рис. 8.** Электромеханическая модель инверсионной структуры:  $E_0$  — внешнее поле,  $E_s$  — поле заряда структуры. Остальные обозначения те же, что и на рис. 7.

На данной структуре проследим за взаимодействием диполей и слабого внешнего электрического поля за некоторый малый промежуток времени (значительно меньше периода колебаний). Последнее условие позволяет использовать простое правило: если направление волны ( $E$ ) и мгновенное направление ( $\omega$ ) вращения маятника (диполя) совпадают, то поле отдает энергию данному маятнику-диполю (происходит поглощение), если направления не совпадают, то данный маятник-диполь отдает энергию полю (усиливает его). Пользуясь этим правилом и суммируя результат по всем диполям, нетрудно видеть, что максимумы поглощения

рассматриваемой структуры соответствуют совпадению направления внешнего поля и направления одного из диполей, эти максимумы повторяются через каждые  $90^\circ$ . Данное явление экспериментально известно для тонких пленок белка в инфракрасном диапазоне волн [1].

Теперь рассмотрим инверсную структуру, в которой часть диполей повернута на  $90^\circ$  и зафиксирована в этом положении водородными связями между листами (рис. 2). Электромеханическая модель для этого случая показана на рис. 8. В этом случае слабая внешняя волна, направленная вдоль вектора одного из диполей, не поглощается, а, наоборот, получает энергию от вещества. Вещество — полярный диэлектрик имеет направленное внутреннее поле и поверхностный заряд. Таким образом, может наблюдаться эффект усиления волны за счет стимулированной эмиссии излучения в процессе конформации (инверсии) структуры. Следовательно, нанопленка из нескольких складчатых листов полипептида может функционировать как мазер (аналог лазера в диапазоне микроволнового и дальнего инфракрасного излучения [12]). Аналогичные свойства могут быть обнаружены у белков и полиаминокислот со спиральной структурой. Данная «содержательная» по форме модель может быть уточнена в виде модели математической.

Далее рассмотрим ферроэлектрическую мембрану, способную к инверсии состояний, с точки зрения квантово-механической теории когерентного излучения. Система будет рассматриваться за период времени, меньший времени релаксации возбуждения в тепловые колебания молекул. Состояние заряженной частицы такой мембраны может быть описано суперпозицией волновых функций двух ее возможных состояний [13]

$$\psi = \psi_1(r) \exp((-i/\hbar)E_1 t) + \psi_2(r) \exp((-i/\hbar)E_2 t), \quad (1)$$

где  $r$  — координата частицы,  $t$  — время,  $E_1$  и  $E_2$  — энергии состояний.

Поляризация мембраны внешним импульсом приводит к появлению электрического поля с потенциальной энергией  $U$ , влияющего на энергию состояний,

$$E_1 = E_1^0 - U, \quad E_2 = E_2^0 + U. \quad (2)$$

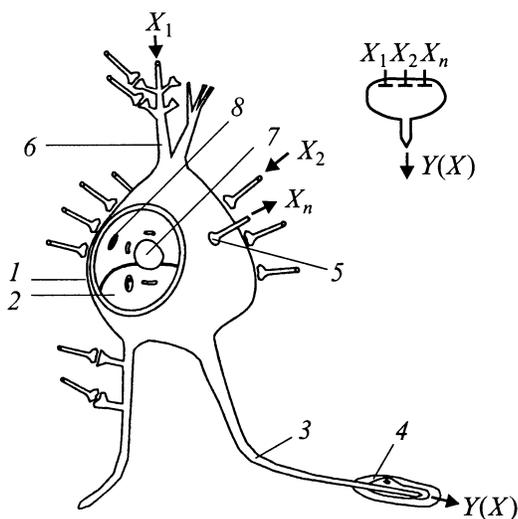
Существует вероятность самопроизвольного перехода поляризованной мембраны в исходное состояние путем излучения. Плотность потока вероятности этого излучения

$$S = 1/2m(\psi^* p \psi - \psi p \psi^*), \quad (3)$$

где  $p$  — оператор импульса частицы,  $\psi^*$  — комплексно-сопряженная волновая функция частицы,  $m$  — масса частицы.

Подставим (1) и (2) в (3), оставим только члены, зависящие от времени, выделим действительную часть и получим выражение для плотности потока вероятности

$$S \sim [\cos(U + (E_2 - E_1)) - \cos(U - (E_2 - E_1))]. \quad (4)$$



**Рис. 9.** Пирамидальный нейрон и его схема (справа): 1 — оболочка нейрона, 2 — мембрана аксона, 3 — аксон — волокно периферического нерва, 4 — миелиновая оболочка — шванновская клетка, 5 — синапсы — окончания волокон других клеток нервной системы, 6 — дендрит нейрона (пучок волокон), 7 — ядро нейрона, 8 — цитоплазма и органеллы. Ядро показано в разрезе.

Отсюда следует, что существует некоторый потенциал поляризации ферроэлектрической наномембраны, при котором вероятность когерентного излучения максимальна.

Приведенная модель показывает важное свойство ферроэлектрической наномембраны: она может являться логическим сумматором квантованных поляризующих импульсов. Каждый импульс увеличивает потенциал мембраны (или уменьшает в зависимости от направления его поляризации) и при достижении потенциала действия мембрана излучает когерентный импульс.

Очевидно, что реальным устройством, реализующим описанную модель, является пирамидальный нейрон [14] (рис. 9). Ферроэлектрической мембраной здесь является мембрана аксона, содержащая полярные высокомолекулярные вещества. Таковыми являются все аминокислоты-нейромедиаторы [14]. Накачка мембраны осуществляется импульсами, поступающими через множество синапсов, являющихся окончаниями нервных волокон дендрита этого и других нейронов. Нервные волокна являются волноводами, как это было показано в предыдущей работе автора [15]. Источником квантованных импульсов (солитонов) в этих волокнах являются рецепторы органов чувств и другие нейроны различных типов [14,15].

## Заключение

1. Нервная система высших животных и человека является голографической нейросетью, предсказанной в работе [16], в которой преобразование сигналов про-

исходит не только известным электрохимическим, но и квантово-оптическим способом.

2. Нейрон как квантово-оптический прибор подобен лазеру с параллельной накачкой, активным веществом которого является ферроэлектрическая наномембрана.

3. На основе ферроэлектрических нанотрубок и наномембран с учетом их квантово-химических свойств могут быть построены искусственные квантово-оптические устройства для преобразования энергии и информации.

## Список литературы

- [1] Волькенштейн М.В. Биофизика. М.: Наука, 1981. 576 с.
- [2] Блейкмор Дж. Физики твердого тела. Пер. с англ. М.: Мир, 1988. 608 с.
- [3] Бецкий О.В., Девятков Н.Д. // Радиотехника. 1996. № 9. С. 4–11.
- [4] Кеннет Н. Турблад // Молекулярные структуры / Под ред. А. Доменикано, И. Харгиттаи. Пер. с англ. М.: Мир, 1997. С. 244–267.
- [5] Бок П. ван Эйк // Там же. С. 69–87.
- [6] Степанов В.М. Молекулярная биология. М.: Высшая школа, 1996. 336 с.
- [7] Займан Дж. Модели беспорядка. Пер. с англ. М.: Мир, 1982. 592 с.
- [8] Шевченко С.М. Молекула в пространстве. Вопросы современной химии. Л.: Химия, 1986. 145 с.
- [9] Антонов В.Ф. и др. Биофизика. Учебное пособие. М.: Арктос-Вика-Пресс, 1996. 256 с.
- [10] Терлецкий Я.П., Рыбаков Ю.П. Электродинамика, Учебное пособие. 2-е изд. М.: Высшая школа, 1990. 352 с.
- [11] Вихман Э. Квантовая физика. Учебное руководство (Берклевский курс физики). Пер. с англ. М.: Наука, 1986. 392 с.
- [12] Рябов С.Г., Торопкин Г.Н., Усольцев И.Ф. Приборы квантовой электроники / Под ред. М. Стельмаха. 2-е изд. М.: Радио и связь, 1985. 280 с.
- [13] Ахизер А.И. Атомная физика. Справочное пособие. Киев: Наукова думка, 1988. 268 с.
- [14] Физиология человека / Под ред. Р.Ф. Шмидта, Ж. Тевса. Пер. с англ. М.: Мир, 1996. Т. 1. 323 с.
- [15] Григорьев С.Л. // ЖТФ. 2001. Т. 71. Вып. 11. С. 110–113.
- [16] Проблемы оптической голографии / Под ред. Ю.Н. Денисюка. Л.: Наука, 1981. 320 с.