

К06
С379
кр

Симферопольский государственный университет

УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ

**СИМФЕРОПОЛЬСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА**

№ 4 (43)

Симферополь

1997

УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ
СИМФЕРОПОЛЬСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

№4(43):

Математика. Физика. Химия. Биология.

Физическая культура.

ISBN 5-7763-9818-5

Журнал зарегистрирован 31 января 1996 года
Серия КМ № 238

Редакционная коллегия:

Сидякин В. Г. - главный редактор
Багров Н. В. - заместитель главного редактора
Ена В. Г. - ответственный секретарь

Редакционный совет:

Исторические науки

Буров Г. М.
Гарчев П. И. (*редактор отдела*)
Дементьев Н. Е.
Урсу Д. П.
Филимонов С. Б.

Филология

Казарин В. П.
Киречек П. М. (*редактор отдела*)
Меметов А. М.
Новикова М. А.
Орехова Л. А.

География

Боков В. А. (*редактор отдела*)
Дублянский В. Н.
Олиферов А. Н.
Пистун Н. Д.
Топчиев А. Г.

Экономика

Апатова Н. Б.
Ефремов А. В.
Кудряшов А. П.
Подсолонко В. А. (*редактор отдела*)
Процай Ф. И.

Математика

Донской В. И.
Игнатенко В. Ф. (*редактор отдела*)
Копачевский Н. Д.
Кужель А. В.
Чехов В. Н.

Биология

Апостолов Л. Г. (*редактор отдела*)
Коренюк И. И.
Мананков М. К.
Толкачева Н. В.
Юрахно М. В.

Физика

Бержанский В. Н. (*редактор отдела*)
Воляр Н. В.
Мицай Ю. Н.
Селезнев З. Н.
Терез Э. И.

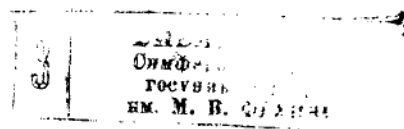
Химия

Дрюк В. Г.
Конощенко С. В.
Федоренко А. М.
Чирва В. Я. (*редактор отдела*)
Шульгин В. Ф.

Статьи опубликованы в авторской редакции.

© Симферопольский государственный университет, 1997 г.

Подписано в печать 28.11.97. Формат 60x84 1/8
Усл. печ. л. 28,7. Тираж 500 экз. Заказ № 76.
Отпечатано в информационно-издательском отделе СГУ.
333036, г. Симферополь, ул. Ялтинская, 4



902878

О ДОСТАТОЧНЫХ УСЛОВИЯХ СУЩЕСТВОВАНИЯ НЕНУЛЕВОГО ПРЕДЕЛА ДЛЯ РЕШЕНИЯ БЕСКОНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ ЛИНЕЙНЫХ АЛГЕБРАИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ

В. Н. Чехов, доктор физико-математических наук, профессор, С. О. Папков, аспирант

Асимптотическое поведение решений бесконечных систем линейных алгебраических уравнений изучалось в работах Б.М. Кояловича [1,2], Л. В. Канторовича и В. И. Крылова [3], В. Т. Гринченко [4]. Для парной бесконечной системы с неотрицательными коэффициентами:

$$x_j = \sum_{s=1}^{\infty} a_{j,s} y_s + f_j, \quad y_j = \sum_{s=1}^{\infty} \alpha_{j,s} x_s + q_j \quad (j=1,2,3,\dots) \quad (1)$$

Б. М. Кояловичем сформулированы [1] два достаточных условия сходимости последовательностей $\{x_j\}, \{y_j\}$ к одному и тому же положительному пределу.

Аналогичные условия сформулированы здесь для бесконечной системы вида:

$$z_k = \sum_{n=1}^{\infty} c_{k,n} z_n + b_k \quad (k=1,2,3,\dots). \quad (2)$$

Показано, что второе из условий Б.М. Кояловича применительно к системе должно быть опущено. Предполагается, что коэффициенты системы (2) неотрицательны ($c_{k,n} \geq 0$; $b_k \geq 0 \quad \forall k, n \in \mathbb{N}$), удовлетворяют условиям регулярности

$$\forall k \in \mathbb{N} \quad \sum_{n=1}^{\infty} c_{k,n} < 1 \quad (3)$$

и теореме существования решения:

Теорема 1. Если $\exists B > 0: \forall k \in \mathbb{N} \quad b_k \leq B \rho_k \quad (\rho_k = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} c_{k,n} > 0)$, (4)

то $\exists \{z_k\}$ – ограниченное главное решение регулярной бесконечной системы (2):

$$\forall k \in \mathbb{N} \quad 0 \leq z_k \leq B. \quad (5)$$

Доказательство основано [3] на том, что следующая из условия (4) мажорантная для системы (2) бесконечная система:

$$Z_k = \sum_{n=1}^{\infty} c_{k,n} Z_n + B \rho_k \quad (k=1,2,3,\dots) \quad (6)$$

имеет тривиальное положительное решение $Z_k = B$. Главным решением называют решение, которое может быть вычислено методом последовательных приближений с нулевым начальным приближением:

$$z_k = \lim_{m \rightarrow \infty} z_k^{(m)}; \quad z_k^{(0)} = 0; \quad z_k^{(m)} = \sum_{n=1}^{\infty} c_{k,n} z_n^{(m-1)} + b_k \quad (k, m=1,2,3,\dots)$$

Очевидно, что главное решение однородной системы ($b_k = 0 \quad \forall k \in \mathbb{N}$) совпадает с нулевым решением.

Проблема единственности ограниченного решения системы (2) связывается [3] со свойствами мажорантной системы (6). Для системы с неотрицательными коэффициентами можно сформулировать следующее предложение:

Теорема 2. Для единственности ограниченного решения регулярной бесконечной системы (2) с неотрицательными коэффициентами необходимо и достаточно, чтобы положительное решение $Z_k = B$ мажорантной системы (6) совпадало с главным решением системы (6).

Доказательство достаточности сводится к известной [3] теореме, поскольку выполнение условия приводит к ограниченности снизу положительным числом

В главного решения мажорантной системы (6). Необходимость же следует из того, что матрицы систем (2) и (6) одинаковы. Из единственности ограниченного решения системы (2) следует, что соответствующая системе (6) однородная регулярная бесконечная система имеет только нулевое ограниченное решение.

Поэтому все ограниченные решения системы (6) совпадают с ограниченным решением $Z_k = B$

Для того, чтобы нижний предел ограниченного решения $\{z_k\}$ системы (2) был положительным, достаточно, чтобы последовательность $\{z_k\}$ была ограничена снизу некоторым положительным числом. Докажем предложение, позволяющее находить иногда такое положительное число, анализируя последовательность отношений $\{b_k / \rho_k\}$.

Теорема 3. Если выполнено условие (4) существования ограниченного решения регулярной бесконечной системы (2) с неотрицательными коэффициентами, то для ограниченности этого решения снизу положительным числом достаточно двух дополнительных условий:

$$a) \exists \inf_{k \geq 1} (b_k / \rho_k) = h > 0; \quad (7)$$

b) главное решение $\{z_k\}$ бесконечной системы (2) является единственным ограниченным решением.

Доказательство. Из условия (4) следует существование мажорантной системы (6) для системы (2), главное решение которой согласно условию b) и теореме 2 совпадает с тривиальным положительным решением. Подстановкой $Z_k = B$ в (6) и последующим вычитанием системы (2) приходим к следующей регулярной бесконечной системе с неотрицательными коэффициентами:

$$B - z_k = \sum_{n=1}^{\infty} c_{k,n} (B - z_n) + B\rho_k - b_k \quad (k=1,2,3,\dots). \quad (8)$$

Согласно условию (7) для бесконечной системы (8) выполнено условие (4): $\exists B_1 = B - h > 0: \quad \forall k \in \mathbb{N} \quad B\rho_k - b_k \leq B_1\rho_k$. Поэтому существует главное решение $\{B - z_k\}$ системы (8), удовлетворяющее неравенству (5): $B - z_k \leq B - h$, эквивалентному условию:

$$\forall k \geq 1 \quad z_k \geq h. \quad (9)$$

Приведем пример регулярной бесконечной системы

$$z_k = \left(1 - \frac{1}{(k+1)^2}\right)z_{k+1} + \left(1 + \frac{1}{k} + \frac{1}{k+1}\right)/(k+1)^2 \quad (k=1,2,3,\dots) \quad (10)$$

с неотрицательными коэффициентами, для которой условие b) не выполняется, поскольку эта бесконечная система имеет однопараметрическое множество ограниченных решений $z_k = 1/k + C/k/(k+1)$. Здесь $C \in \mathbf{R}$; $\rho_k = 1/(k+1)^2$; $b_k/\rho_k = 1 + 1/k + 1/(k+1) \in [1, 2.5]$; $h = 1$; $B = 2.5$; мажорантная система

$$Z_k = \left(1 - \frac{1}{(k+1)^2}\right)Z_{k+1} + \frac{2.5}{(k+1)^2} \quad (k=1,2,3,\dots)$$

имеет тривиальное решение $Z_k = 2.5$, которое не совпадает с главным решением $Z_k = 2.5/(k+1)$. Соответственно главное решение $z_k = 1/k$ системы (10) нарушает неравенство (9) при $k > 1$.

Более содержательные условия положительности нижнего предела для главного решения системы (2) получаются на основе анализа свойств лимитант, введенных Б.М. Кояловичем [1]. Лимитанты вводятся в предположении, что значения первых p неизвестных главного решения системы (2) вычислены. Остальные неизвестные удовлетворяют системе

$$\forall k > p \quad z_k = \sum_{n=p+1}^{\infty} c_{k,n} z_n + b_k^{(p)} \quad ; \quad b_k^{(p)} = b_k + \sum_{n=1}^p c_{k,n} z_n. \quad (11)$$

В соответствии с неравенством (3) система (11) является регулярной, и для нее величины $\rho_k^{(p)}$ из условия (4) принимают вид:

$$\forall k > p \quad \rho_k^{(p)} = 1 - \sum_{n=p+1}^{\infty} c_{k,n} = \rho_k + \sum_{n=1}^p c_{k,n} > 0. \quad (12)$$

Лимитантами названы [1] отношения:

$$\forall k > p \quad V_k^{(p)} = b_k^{(p)} / \rho_k^{(p)} = (b_k + \sum_{n=1}^p c_{k,n} z_n) / (\rho_k + \sum_{n=1}^p c_{k,n}). \quad (13)$$

Название связано с тем, что точные грани лимитант:

$$B^{(p)} = \sup_{k>p} V_k^{(p)}; \quad h^{(p)} = \inf_{k>p} V_k^{(p)} \quad (14)$$

служат [3] границами для главного решения бесконечной системы (11):

$$\forall k > p \quad h^{(p)} \leq z_k \leq B^{(p)}. \quad (15)$$

Левая часть неравенства для z_k справедлива, как и неравенство (9), при условии единственности ограниченного (главного) решения систем (2) и (11).

При возрастании параметра p грани лимитант образуют последовательности границ вложенных промежутков:

$$\forall k > p+1 \quad h^{(p)} \leq h^{(p+1)} \leq z_k \leq B^{(p+1)} \leq B^{(p)}. \quad (16)$$

Согласно теореме о встречающихся последовательностях [5] обе последовательности граней $\{h^{(p)}\}$ и $\{B^{(p)}\}$ имеют конечные пределы.

$$\exists \lim_{p \rightarrow \infty} h^{(p)} = h ; \quad \exists \lim_{p \rightarrow \infty} B^{(p)} = B ; \quad h \leq B. \quad (17)$$

Достаточные условия Б.М. Кояловича для существования положительного предела решения парной бесконечной системы (1) с неотрицательными коэффициентами запишем в виде следующего предложения:

Теорема 4. Чтобы существовал положительный предел главного решения парной регулярной бесконечной системы с неотрицательными коэффициентами, кроме условия существования решения, достаточно выполнения двух условий:

$$a) \exists L \geq l > 0: \quad \forall j, s \in \mathbb{N} \quad (s < j) \quad l \leq a_{j,s} / \rho_{2j-1}, \quad \alpha_{j,s} / \rho_{2j} \leq L; \quad (18)$$

$$(\rho_{2j-1} = 1 - \sum_{s=1}^{\infty} a_{j,s}; \quad \rho_{2j} = 1 - \sum_{s=1}^{\infty} \alpha_{j,s})$$

$$b) \exists \theta > 0: \quad \forall p, k \in \mathbb{N} \quad (2p < k \leq 4p) \quad \rho_k^{(2p)} \geq \theta. \quad (19)$$

Для системы (2) перепишем условия этой теоремы несколько иначе.

Теорема 5. Чтобы существовал положительный предел главного решения неоднородной регулярной бесконечной системы (2) с неотрицательными коэффициентами, кроме условия (4) существования решения, достаточно выполнения двух дополнительных условий:

$$a) \exists L \geq l > 0: \quad \forall k, n \in \mathbb{N} \quad (n < k) \quad l \rho_k \leq c_{k,n} \leq L \rho_k; \quad (20)$$

b) главное решение $\{z_k\}$ бесконечной системы (2) является единственным ограниченным решением.

Здесь условие b) теоремы 4 заменено условием единственности ограниченного решения, без которого несправедливы нижние оценки в неравенствах (15), (16).

Доказательство. Согласно условию (20) все диагонали, расположенные ниже главной диагонали, заполнены положительными числами. Совместно с неотрицательностью свободных членов $\{b_k\}$ это приводит к следующему свойству главного решения системы (2):

$$\exists m_0 \in \mathbb{N}: \quad \forall k \geq m_0 \quad z_k > 0. \quad (21)$$

Действительно, главное решения $\{z_k\}$ системы (2) неотрицательно. Оно не может быть нулевым для неоднородной системы. Поэтому $\exists m \in \mathbb{N}: z_m > 0$. Из системы (2) с учетом положительности диагоналей матрицы, расположенных ниже главной, следует положительность последовательности $\{z_{m+1}, z_{m+2}, \dots\}$, что и приводит к значению $m_0 = m$. Полагая $p > m_0$, запишем неравенства для сумм в выражениях лимитант (13), следующие из условия (20):

$$\forall k > p \quad l \rho_k \sum_{n=1}^p z_n \leq \sum_{n=1}^p c_{k,n} z_n \leq L \rho_k \sum_{n=1}^p z_n; \quad l \rho_k p \leq \sum_{n=1}^p c_{k,n} \leq L \rho_k p. \quad (22)$$

С их помощью находится оценка лимитант снизу

$$\forall k > p \quad V_k^{(p)} \geq \sum_{n=1}^p c_{k,n} z_n / (\rho_k + \sum_{n=1}^p c_{k,n}) \geq l \sum_{n=1}^p z_n / (1 + Lp) \equiv \omega^{(p)}.$$

Величина $\omega^{(p)} > 0$ не зависит от k , поэтому $h^{(p)} = \inf_{k > p} V_k^{(p)} \geq \omega^{(p)}$, и предел неубывающей последовательности $\{h^{(p)}\}$ положителен.

$$\lim_{p \rightarrow \infty} h^{(p)} = h \geq \omega^{(p)} > 0. \quad (23)$$

Таким образом, условие а) обеспечивает положительность нижнего предела h последовательности лимитант. Теперь можно показать, что при фиксированном достаточно большом k все лимитанты $V_k^{(p)}$ как угодно близко приближаются к нижнему пределу h при возрастании параметра p .

Фиксируя $p=p_0$, представим неизвестные в виде:

$$\forall k > p_0 \quad z_k = h^{(p_0)} + \delta_k, \quad \delta_k \geq 0. \quad (24)$$

Выбирая $p_1 > p_0$ и подставляя (24) в выражение (13), разложим лимитанты на

$$\text{две части } V_k^{(p_1)} = U_k^{(p_1)} + \eta_k. \quad (25)$$

$$U_k^{(p_1)} = (b_k^{(p_0)} + h^{(p_0)} \sum_{n=p_0+1}^{p_1} c_{k,n}) / \rho_k^{(p_1)}; \quad \eta_k = \sum_{n=p_0+1}^{p_1} c_{k,n} \delta_n / \rho_k^{(p_1)}. \quad (26)$$

С помощью зависимостей (12), (13) можно проверить тождество:

$$U_k^{(p_1)} - h^{(p_0)} = (V_k^{(p_0)} - h^{(p_0)}) \rho_k^{(p_0)} / \rho_k^{(p_1)}. \quad (27)$$

Поскольку $V_k^{(p_0)} \geq h^{(p_0)}$, то из тождества следует неравенство:

$$\forall k > p_1 \quad U_k^{(p_1)} \geq h^{(p_0)}. \quad (28)$$

Для оценки величины η_k перепишем первое утверждение (17) в виде

$$\forall \varepsilon > 0 \quad \exists p_0(\varepsilon) : \quad \forall p \geq p_0 \quad 0 \leq h - h^{(p)} < \varepsilon. \quad (29)$$

Последовательность $\{h^{(p)}\}$ неубывающая, поэтому $h^{(p_0)} \leq h^{(p_1)} \leq h$. Отсюда и

$$\text{из (29) следует неравенство: } h^{(p_1)} - h^{(p_0)} < \varepsilon. \quad (30)$$

Нижняя грань $h^{(p_1)}$ достигается при некотором $k_1 > p_1$, либо при $k \rightarrow \infty$:

$$h^{(p_1)} = V_{k_1}^{(p_1)}, \quad \text{либо } h^{(p_1)} = \lim_{k \rightarrow \infty} V_k^{(p_1)}. \quad (31)$$

Выразим величину η_{k_1} из (25) и оценим с помощью неравенств (28),(30)

$$\eta_{k_1} = V_{k_1}^{(p_1)} - U_{k_1}^{(p_1)} = h^{(p_1)} - U_{k_1}^{(p_1)} \leq h^{(p_1)} - h^{(p_0)} < \varepsilon, \quad \text{или } \lim_{k \rightarrow \infty} \eta_k \leq \varepsilon. \quad (32)$$

Из второго выражения (26) следует $\sum_{n=p_0+1}^{p_1} c_{k_1,n} \delta_n = \eta_{k_1} \rho_{k_1}^{(p_1)} < \varepsilon \rho_{k_1} + \varepsilon \sum_{n=1}^{p_1} c_{k_1,n}$,

поэтому для отношения сумм получается неравенство:

$$g_{k_1} \equiv \frac{\sum_{n=p_0+1}^{p_1} c_{k_1,n} \delta_n}{\sum_{n=1}^{p_1} c_{k_1,n}} < \varepsilon + \varepsilon \rho_{k_1} / \sum_{n=1}^{p_1} c_{k_1,n}. \quad (33)$$

С учетом неравенств (22) получаем

$$g_{k_1} < (1 + \frac{1}{lp_1})\varepsilon, \text{ или } \lim_{k \rightarrow \infty} g_k \leq (1 + \frac{1}{lp_1})\varepsilon. \quad (34)$$

Теперь можно оценить сверху величины $\eta_k \forall k > p_1$. Из выражения (26) для η_k при последовательном использовании оценок (22) для сумм следует

$$\eta_k < g_k \leq \frac{L\rho_k}{l\rho_k p_1} \sum_{n=p_0+1}^{p_1} \delta_n = \frac{L^2}{l^2 p_1 L} \sum_{n=p_0+1}^{p_1} l\delta_n = \frac{L^2}{l^2 L\rho_{k_1} p_1} \sum_{n=p_0+1}^{p_1} l\rho_{k_1} \delta_n \leq \frac{L^2}{l^2} g_{k_1}.$$

$$\text{Наконец, из оценок (34) находим } \forall k > p_1 \eta_k \leq \frac{L^2}{l^2} (1 + \frac{1}{lp_1})\varepsilon. \quad (35)$$

Положительное число ε можно сделать как угодно малым, выбирая достаточно большим параметр p_0 в неравенствах (29). При этом как угодно малой будет составляющая η_k лимитанты $V_k^{(p_1)}$ в (25).

Оценим снизу величины $\rho_k^{(p_1)}$ посредством неравенств (22)

$$\forall k > p_1 \quad \rho_k^{(p_1)} = \rho_k + \sum_{n=1}^{p_1} c_{k,n} \geq \rho_k (1 + lp_1). \quad (36)$$

С увеличением параметра p_1 неограниченно возрастает величина $\rho_k^{(p_1)}$. При этом левая часть в тождестве (27) может быть сделана меньше числа ε выбором параметра p_1 , от которого числитель в правой части (27) не зависит:

$$\forall p > p_1 \quad (k > p) \quad 0 < U_k^{(p)} - h^{(p_0)} < \varepsilon.$$

Отсюда и из неравенства (29) (при значении $p=p_0$) получается сходимость величин $U_k^{(p)}$ к значению h : $\forall p > p_1 \quad (k > p) \quad -\varepsilon < U_k^{(p)} - h < \varepsilon$, (37) что равносильно сходимости лимитант $V_k^{(p)}$ к нижнему пределу h , так как составляющая η_k лимитанты $V_k^{(p)}$ согласно неравенству (35) стремится к нулю с возрастанием параметра p .

$$\text{Изменив представление (24) на следующее: } \forall k > p_0 z_k = B^{(p_0)} - \Delta_k, \Delta_k \geq 0, \quad (38)$$

после аналогичной модификации соотношений (25)- (37) установим, что при неограниченном возрастании параметра p все лимитанты $V_k^{(p)}$ как угодно близко приближаются к верхнему пределу B из соотношений (17). Применяя к последовательности лимитант $\{V_k^{(p)}, V_k^{(p+1)}, V_k^{(p+2)}, \dots\}$ теорему о единственности предела [5], получим равенство $h = B$, что и требовалось доказать.

В заключение приведем пример регулярной бесконечной системы

$$\forall k \in \mathbb{N} \quad x_k = \frac{2k^2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{x_n}{n^2 + k^4} + \frac{1}{3k^2} - \frac{1}{k^4 \pi} + \frac{1}{k^6 \pi^2} - (1 + \frac{1}{k^4 \pi}) \frac{e^{-k^2 \pi}}{sh(k^2 \pi)}, \quad (39)$$

которая имеет единственное ограниченное решение $x_k=1-1/(k^2\pi)$. Здесь условия теоремы 5 выполнены ($l=32/17, L=2$). А второе условие теоремы 4, которое для системы (39) принимает вид:

$$\exists \theta > 0: \quad \forall p, k \in \mathbb{N} \quad (p < k \leq 2p) \quad \rho_k^{(p)} \geq \theta \quad (40)$$

не выполняется. Действительно, величина $\rho_k^{(p)}$ в соответствии с формулами (12) представляется

выражением $\rho_k^{(p)} = 1 + \frac{2k^2}{\pi(p^2 + k^4)} - \frac{2k^2}{\pi} \sum_{n=p}^{\infty} \frac{1}{n^2 + k^4}$, которое после применения формулы

суммирования Эйлера-Маклорена [6] для оценки асимптотического поведения ряда $\sum_{n=p}^{\infty} \frac{1}{n^2 + k^4}$ при больших значениях p и замены $k = pt; t \in]1, 2]$ принимает вид:

$$\pi \rho_{pt}^{(p)} \sim \operatorname{arctg}\left(\frac{1}{pt^2}\right) + \frac{t^2}{p^2 + t^2} + o(p^{-2}).$$

Следовательно величина $\rho_{pt}^{(p)} \rightarrow 0$ при $p \rightarrow \infty$, и положительной нижней грани θ для условия (40) не существует.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коялович Б.М. Исследование о бесконечных системах линейных алгебраических уравнений. - Изв. Физ.-мат. ин-та им. В.А. Стеклова, 1930, 3, с.41-167.
2. Коялович Б.М. К теории бесконечных систем линейных уравнений. - Труды Физ.-мат. ин-та им. В.А. Стеклова, 1932, 2, №4, с.1-16.
3. Канторович Л.В., Крылов В.И. Приближенные методы высшего анализа. М.-Л. Физматгиз, 1962. 695 с.
4. Гринченко В.Т. Равновесие и установившиеся колебания упругих тел конечных размеров. К., Наук. Думка, 1978. 264 с.
5. Избранные главы анализа и высшей алгебры: учебн. пособие / Фаддеев Д.К., Вулих Б.З., Уральцева Н.Н. и др. - Л-д, Изд-во Ленингр. ун-та, 1981, 200 с.
6. Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и таблицами. /Под ред. М. Абрамовица и И. Стиган. - М., Наука, 1979. 832 с.

ОБ ОДНОМ СВОЙСТВЕ ПАРЫ ВЗАИМНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

В. И. Мягков, кандидат физико-математических наук, доцент

Пусть F — поверхность в евклидовом пространстве E^3 , отнесенная к криволинейным координатам u и v ; Q — фиксированная точка. С каждой точкой $M(u, v) \in F$ сопоставим два вектора: радиус-вектор $\overline{QM} = \bar{r}(u, v)$ и вектор нормали $\bar{n}(u, v)$ к поверхности F в этой точке.

Две поверхности F и F^* называются взаимными с центром взаимности в точке Q , если существует такое точечное взаимно однозначное соответствие, при котором для каждой пары соответствующих точек $M(u, v)$ и $M^*(u, v)$ радиус-вектор первой поверхности будет параллелен вектору нормали ко второй поверхности и, наоборот, радиус-вектор второй поверхности будет параллелен вектору нормали к первой поверхности, т.е. для пары взаимных поверхностей выполняются условия

$$\bar{r}(u, v) \parallel \bar{n}^*(u, v), \quad r^*(u, v) \parallel \bar{n}(u, v). \quad (1)$$

Соответствующие друг другу точки M и M^* имеют совпадающие криволинейные координаты. Преобразование поверхности F во взаимную поверхность F^* с центром взаимности Q назовем преобразованием взаимности и обозначим через H_Q (Q — центр преобразования).

В 1966 году Н. И. Кованцов сформулировал задачу: для заданной поверхности и заданного центра взаимности Q найти взаимную поверхность F^* .

Если допустить, что для заданной поверхности F существует взаимная поверхность F^* :

$$\overline{QM^*} \equiv \bar{r}^*(u, v) = \{x^*(u, v), y^*(u, v), z^*(u, v)\},$$

то из (1) получим систему четырех дифференциальных уравнений в частных производных относительно трех искомых функций $x^*(u, v)$, $y^*(u, v)$, $z^*(u, v)$.

Методом безынтегрального представления [1,2] в статье [3] было найдено в явном виде решение задачи Н.И. Кованцова в n -мерном евклидовом пространстве E^n . В частности, если $n = 3$ и для поверхности F

$$\overline{QM} \equiv \bar{r}(u, v) = \{x(u, v), y(u, v), z(u, v)\}$$

выполняются два условия

$$\text{rang} \begin{pmatrix} x_u & y_u & z_u \\ x_v & y_v & z_v \end{pmatrix} = 2, \quad (\bar{r}, \bar{n}) \neq 0, \quad (2)$$

то для F существует взаимная поверхность F^* и она задается [3] векторным уравнением

$$\overline{QM^*} \equiv \bar{r}^* = c \frac{\bar{n}}{(\bar{r}, \bar{n})}. \quad (3)$$

Здесь $C = \text{const} \neq 0$, (\bar{r}, \bar{n}) — скалярное произведение.

В [4] анонсирована следующая

Теорема. Под действием преобразования взаимности H асимптотическая сеть поверхности F переходит в асимптотическую сеть взаимной поверхности $F^* = H(F)$.

Доказательство. Допустим, что на F существует асимптотическая γ с кривизной $k \neq 0$.

Отнесем γ к длине дуги s и к каждой точке $P(s) \in \gamma$ присоединим репер Френе $\{P, \bar{e}_1, \bar{e}_2, \bar{e}_3\}$.

Тогда

$$\bar{P}' = \bar{e}_1, \quad (4)$$

$$\bar{e}_1' = k\bar{e}_2, \quad \bar{e}_2' = -k\bar{e}_1 + \varpi\bar{e}_3, \quad \bar{e}_3' = -\varpi\bar{e}_2 \quad (5)$$

Здесь k и ϖ — кривизна и кручение асимптотической γ . Вектор бинормали \bar{e}_3 кривой γ совпадает с вектором нормали \bar{n} к F .

Пусть разложение вектора $\bar{P}(s)$ по векторам $\bar{e}_i(s)$ имеет вид

$$\bar{P}(s) = A(s)\bar{e}_1(s) + B(s)\bar{e}_2(s) + E(s)\bar{e}_3(s). \quad (6)$$

Продифференцируем обе части (6):

$$\bar{P}'(s) = (A' - kB)\bar{e}_1 + (B' + kA - \varpi E)\bar{e}_2 + (E' + \varpi B)\bar{e}_3. \quad (7)$$

В силу (4) из (7) получаем три следствия

$$A' = kB + 1, \quad B' = -kA + \varpi E, \quad E' = -\varpi B. \quad (8)$$

Рассмотрим кривую $\dot{\gamma} = H_\sigma(\gamma)$ на F^* , она задается (см. (3)) уравнением

$$QM \dot{\gamma} \equiv \dot{r} = c \frac{\bar{e}_3}{(P, \bar{e}_3)}. \quad (9)$$

Используя (9), (4), (5) и (6), найдем два вектора

$$\begin{aligned} \dot{\bar{P}} &= -c \frac{\varpi}{E} \bar{e}_2 - c \frac{E'}{E^2} \bar{e}_3, \\ \dot{\bar{P}}'' &= c \frac{k\varpi}{E} \bar{e}_1 + c \frac{2\varpi E' - \varpi'E}{E^2} \bar{e}_2 + c \left(2 \frac{E'^2}{E^3} - \frac{\varpi^2}{E} - \frac{E''}{E^2} \right) \bar{e}_3. \end{aligned}$$

Векторы $\dot{\bar{P}}$ и $\dot{\bar{P}}''$ лежат в соприкасающейся плоскости кривой $\dot{\gamma}$.

Вычислим два скалярных произведения $(\bar{P}, \dot{\bar{P}}')$ и $(\bar{P}, \dot{\bar{P}}'')$. Опуская обширные промежуточные выкладки, в которых используется (8), получим

$$(\bar{P}, \dot{\bar{P}}') \equiv 0, \quad (\bar{P}, \dot{\bar{P}}'') \equiv 0.$$

А это означает [5], что соприкасающаяся плоскость кривой $\dot{\gamma}$ совпадает с касательной плоскостью к поверхности F^* , т.е. образ $\dot{\gamma} = H(\dot{\gamma})$ асимптотической γ ($k \neq 0$) на F будет асимптотической на $F^* = H(F)$.

Рассмотрим отдельно случай, когда асимптотическая на F является прямой. Пусть γ — прямая ($k \equiv 0$). Присоединим к каждой точке $P(s) \in \gamma$ ортонормированный репер $T = \{P, \bar{e}_1, \bar{e}_2, \bar{e}_3\}$, направив \bar{e}_1 вдоль прямой γ , а вектор \bar{e}_3 — по нормали к поверхности F . Этим самым направление вектора \bar{e}_2 будет однозначно определено. Построенный таким образом репер T не будет репером Френе. Для репера T справедливы формулы

$$\bar{P}' = \bar{e}_1, \quad \bar{\gamma}' = \bar{0}, \quad \bar{e}_2' = \varpi \bar{e}_3, \quad \bar{e}_3' = -\varpi \bar{e}_2. \quad (10)$$

Формально они совпадают с результатом подстановки $k \equiv 0$ в (4), (5). (Заметим, что в (10) в силу ограничений (2) обязано выполняться дополнительное условие $\varpi \neq 0$).

Аналогично предыдущему можно установить, что образ $\dot{\gamma} = H(\dot{\gamma})$ асимптотической γ ($k \equiv 0$) на F является асимптотической на поверхности $F^* = H(F)$.

Теорема доказана.

Отметим, что преобразование взаимности H не является проективным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мягков В.И. Второе безынтегральное представление комплекса, допускающего H/K -расслоение // Укр. геометр. сб., 1981, вып. 24, Харьков, с.85—90.
2. Мягков В. И. Безынтегральное представление комплекса с четырехкратным бесконечно удаленным инфлекссионным центром // Укр. геометр. сб., 1987, вып.30, Харьков, с. 76—81.
3. Мягков В. И., Таранина Е. И. Характеристическое свойство действительных нераспадающихся кривых второго порядка // 1989—16 с. Библиогр. 10 названий. Рукопись депонир. в УКР. НИИНТИ. 19.02.90, № 248—УК90.
4. Мягков В. И. Характеристическое свойство нераспадающихся коник. П'ята міжнародна Наукова конференція. Тези доповідей. Київ, 1996, с. 294.
5. Рашевский П.К. Курс дифференциальной геометрии // Москва, 1956, 420 с.

О ВПИСЫВАНИИ ПРАВИЛЬНОГО N-СИМПЛЕКСА В ОБОБЩЕННЫЙ N-КУБ

О. И. Рудницкий, кандидат физико-математических наук, доцент

Известна задача вписывания правильного n -симплекса α_n в n -куб γ_n в n -мерном евклидовом пространстве (все вершины n -симплекса α_n являются вершинами n -куба γ_n). Эта проблема эквивалентна проблеме существования матрицы Адамара порядка $n+1$ и не имеет полного решения; обзор результатов см. в [1].

В n -мерном унитарном пространстве U^n ($n > 4$) существуют три типа правильных многогранников: вещественный n -симплекс α_n , обобщенный n -куб γ_n^m и взаимный ему обобщенный n -крест β_n^m ($m > 1$ — натуральное) [2]; при этом γ_n^2 и β_n^2 — вещественные n -куб и n -крест. Вершины n -симплекса α_n определим $n+1$ векторами (с общим началом) длины \sqrt{n} , скалярное произведение любой пары которых равно -1 . Координаты m^n вершин обобщенного n -куба γ_n^m можно задать так [2]:

$$(\theta^{k_1}, \theta^{k_2}, \dots, \theta^{k_n}) \quad (1)$$

где θ есть первообразный корень степени m из единицы, $k_i = 0, \dots, m-1$, $i = 1, \dots, n$.

В Ф. Игнатенко предложил рассмотреть следующую задачу: указать все значения m и n , для которых правильный n -симплекс α_n можно вписать в обобщенный n -куб γ_n^m .

Цель настоящей заметки — привести связь сформулированной задачи с задачей существования обобщенной матрицы Адамара, а также дать ее решение при некоторых значениях m и n .

1. Квадратная матрица $H = H(m, n)$ порядка n , все элементы которой есть корни степени m из единицы, называется обобщенной матрицей Адамара, если $H \cdot H^{CT} = n \cdot E$, где E — единичная матрица [3].

Теорема 1. *Правильный n -симплекс α_n вписываем в обобщенный n -куб γ_n^m при тех и только тех значениях m и n , при которых существует обобщенная матрица Адамара $H(m, n+1)$ порядка $n+1$.*

Доказательство теоремы аналогично доказательству, предложенному Н. А. Григорьевым [4] для вещественного случая ($m=2$). Действительно, пусть существует обобщенная матрица Адамара $H(m, n+1)$. Ее всегда можно считать приведенной к стандартному виду [3], т.е. к матрице, у которой все элементы первых строки и столбца равны единице. Обозначим через h_{kj} ($k, j = 1, \dots, n+1$) элементы матрицы $H(m, n+1)$, а через H' — матрицу, полученную из $H(m, n+1)$ вычеркиванием

первого столбца. Строки матрицы H' представимы в виде (1) и, следовательно, являются $n+1$ вершинами n -куба γ_n^m . С другой стороны, для всех $k, l = 1, \dots, n+1$,

$$\sum_{j=2}^{n+1} h_{kj} h_{lj} = \begin{cases} n, & \text{если } k = l, \\ -1 & \text{если } k \neq l, \end{cases}$$

т.е. векторы $\overline{OV_k} = (h_{1j})$, $k=1, \dots, n+1$, $j=2, \dots, n+1$, задают вершины правильного n -симплекса α_n . Таким образом, α_n вписываем в γ_n^m .

Проведя обратные рассуждения, убедимся в существовании матрицы $H(m, n+1)$, если n -симплекс α_n можно вписать в обобщенный n -куб γ_n^m . Теорема доказана.

2. Известно [3], что при простом m матрица $H(m, n)$ может существовать только для $n = mt$, где t — натуральное. Кроме того, матрица $V = (v_{ij})$, определенная равенством $v_{ij} = \theta^{ij}$ ($i, j = 0, \dots, m-1$), есть симметричная $H(m, m)$ -матрица. Следовательно, для каждого значения n всегда существует значение $m = n+1$, при котором n -симплекс α_n вписываем в обобщенный n -куб γ_n^m .

Рассмотрим случай $n = 2$. Имеем место

Теорема 2. *Обобщенная матрица Адамара $H(m, 3)$ существует тогда и только тогда, когда $m = 3t$, t — натуральное.*

Доказательство. Не нарушая общности, выберем матрицу

$$H = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \theta^{k_1} & \theta^{k_2} \\ 1 & \theta^{k_3} & \theta^{k_4} \end{pmatrix},$$

где $\theta^m = 1$, $k_i = 1, \dots, m$, $i = 1, \dots, 4$, $k_1 \geq k_2$ [3].

Матрица H является обобщенной матрицей Адамара $H(m, 3)$ тогда и только тогда, когда выполняются следующие равенства:

$$\begin{aligned} 1 + \theta^{k_1} + \theta^{k_2} &= 0, \\ 1 + \theta^{k_3} + \theta^{k_4} &= 0, \\ 1 + \theta^{k_1 - k_3} + \theta^{k_2 - k_4} &= 0. \end{aligned} \tag{2}$$

Рассмотрим первое равенство системы (2). Переходя к тригонометрической записи комплексного числа ($\varepsilon^2 = -1$), имеем

$$2 \cos \frac{\pi(k_1 + k_2)}{m} \cos \frac{\pi(k_1 - k_2)}{m} + 2\varepsilon \sin \frac{\pi(k_1 + k_2)}{m} \cos \frac{\pi(k_1 - k_2)}{m} = -1,$$

что равносильно системе

$$\begin{aligned} \sin \frac{\pi(k_1+k_2)}{m} \cos \frac{\pi(k_1-k_2)}{m} &= 0, \\ \cos \frac{\pi(k_1+k_2)}{m} \cos \frac{\pi(k_1-k_2)}{m} &= -\frac{1}{2}. \end{aligned}$$

Отсюда, $\cos \frac{\pi(k_1-k_2)}{m} \neq 0$, $\sin \frac{\pi(k_1+k_2)}{m} = 0$. Поэтому $k_1+k_2 = m$ или $2m$. Если $k_1+k_2 = 2m$, то $k_1 = k_2 = m$, что невозможно. Пусть $k_1+k_2 = m$. Тогда $\cos \pi \cos \frac{\pi(k_1-k_2)}{m} = -\frac{1}{2}$. Значит, $k_1-k_2 = \frac{6l \pm 1}{3}m$, $l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$. Так как $k_1 \geq k_2 > 0$, то $k_1-k_2 = \frac{1}{3}m$. Таким образом, $k_1+k_2 = m$, $k_1-k_2 = \frac{1}{3}m$. Отсюда, $k_1 = \frac{2}{3}m$, $k_2 = \frac{1}{3}m$.

Аналогично из второго равенства системы (2), получим $k_3 = \frac{1}{3}m$, $k_4 = \frac{2}{3}m$ или $k_3 = \frac{2}{3}m$, $k_4 = \frac{1}{3}m$. При этом второе решение невозможно в силу третьего равенства системы (2). Итак, из системы (2), имеем $k_1 = k_3 = \frac{2}{3}m$, $k_2 = k_4 = \frac{1}{3}m$. Поскольку k_i — натуральные, то матрица H является обобщенной матрицей Адамара $H(m,3)$ тогда и только тогда, когда $m = 3l$, где l — натуральное. Матрица $H(3l,3)$ всегда может быть приведена к виду

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \omega & \omega^2 \\ 1 & \omega^2 & \omega \end{pmatrix},$$

где $\omega = \frac{-1 + \sqrt{-3}}{2} + \varepsilon^{\frac{2}{3}}$ — первообразный корень третьей степени из единицы. Теорема доказана.

Таким образом, правильный треугольник вписываем в γ_2^m только при $m = 3l$. Геометрически это осуществимо следующим образом. Выберем из множества m^2 вершин γ_2^m подмножество вида (1) при $k_1+k_2 \equiv 0 \pmod{m}$. Таких вершин m , и они определяют многоугольник $\frac{1}{m}\gamma_2^m$, который является правильным m -угольником. Поскольку $m = 3l$, в него можно вписать правильный треугольник.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Ф. Игнатенко, Некоторые вопросы геометрической теории инвариантов групп, порожденных ортогональными и косыми отражениями // Пробл. геометр. Итоги науки и техн. - М.: ВИНТИ АН СССР. - 1984. - Т.16. - С.195-229.
2. G. C. Shephard, Unitary groups generated by reflections // Can. J. Math. — 1953. — V.5. - P.364-383.
3. A. T. Butson, Generalized Hadamard matrices // Proc. Amer. Math. Soc. — 1962.— V.13, N 6. - P. 894-898.
4. Н. А. Григорьев, Вписанные в куб правильные симплексы и матрицы Адамара // Тр. Мат. ин-та АН СССР. - 1980. - Т.152. - С. 87-88.

ПРОСТРАНСТВО ГРАНИЧНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ДЛЯ ЭРМИТОВЫХ ОПЕРАТОРОВ С РАЗЛИЧНЫМИ ДЕФЕКТНЫМИ ЧИСЛАМИ

А. Ю. Поречнов, И. И. Карпенко, кандидат физико-математических, доцент

В последнее время в теории расширений эрмитовых операторов используется подход, основанный на понятии пространств граничных значений (ПГЗ). Для эрмитовых операторов с равными дефектными числами описание ПГЗ получено в работах [1], [2].

В настоящей работе это понятие естественно обобщается на случай эрмитовых операторов с различными дефектными числами. Следует отметить, что предлагаемый подход существенно отличается от предложенных ранее в работах [3], [4].

Общие свойства пространства граничных значений

Пусть A – замкнутый эрмитов оператор в гильбертовом пространстве H с областью определения $D(A)$, которая не предполагается плотной в H . Ис ограничивая общности, можем считать, что $D(A) \cup \Delta(A) = H$, где $\Delta(A)$ – множество значений оператора A .

Обозначим N_λ – дефектное подпространство, соответствующее числу λ ($H = N_\lambda \oplus \Delta(A - \lambda I)$), $n_+ = \dim N_+$, $n_- = \dim N_-$ – дефектные числа и $\varepsilon = \text{sign}(n_+ - n_-)$

Определение 1 Пятерка $(X, X', \Gamma_1, \Gamma_2, I)$, где X, X' – некоторые гильбертовы пространства, операторы $\Gamma_1, \Gamma_2 \in [N_\lambda \dot{+} N_{\bar{\lambda}}, X]$, $\Gamma \in [N_\lambda \dot{+} N_{\bar{\lambda}}, X']$ ($\text{Im } \lambda \neq 0$), называется пространством граничных значений (п.г.з.) эрмитового оператора A , если:

1) для любых $x = x_\lambda + x_{\bar{\lambda}}, y = y_\lambda + y_{\bar{\lambda}}$ из $N_\lambda \dot{+} N_{\bar{\lambda}}$

$$(\Gamma_1 x, \Gamma_2 y)_X - (\Gamma_2 x, \Gamma_1 y)_X - 2\varepsilon i (\Gamma x, \Gamma y)_{X'} = (\lambda - \bar{\lambda}) \left[(x_\lambda, y_\lambda) - (x_{\bar{\lambda}}, y_{\bar{\lambda}}) \right], \quad (1)$$

2) для любых $\varphi, \psi \in X, \alpha \in X'$ в $N_\lambda \dot{+} N_{\bar{\lambda}}$ найдется такой элемент x , что

$$\Gamma_1 x = \varphi, \Gamma_2 x = \psi, \Gamma x = \alpha. \quad (2)$$

Удобно переписать определение в другом виде. Для этого обозначим $\tilde{X} = X \oplus X'$. Пусть операторы A_1, A_2 действуют из $N_\lambda \dot{+} N_{\bar{\lambda}}$ в X, X' соответственно. Тогда операторы вида

$$\tilde{A} = \langle A_1, A_2 \rangle \text{ действуют из } N_\lambda \dot{+} N_{\bar{\lambda}} \text{ в } \tilde{X} \text{ так: } \tilde{A}x = \langle A_1 x, A_2 x \rangle.$$

Определение 2 Тройка $(\tilde{X}, \tilde{\Gamma}_1, \tilde{\Gamma}_2)$, где $\tilde{X} = X \oplus X'$ – некоторое гильбертово пространство, операторы $\tilde{\Gamma}_1 = \langle \Gamma_1, \Gamma \rangle$, $\tilde{\Gamma}_2 = \langle \Gamma_2, \varepsilon i \Gamma \rangle$, $\tilde{\Gamma}_1, \tilde{\Gamma}_2 \in [N_\lambda + N_{\bar{\lambda}}, \tilde{X}]$ ($\text{Im } \lambda \neq 0$), называется пространством граничных значений (п.г.з.) эрмитового оператора A , если:

1) для любых $x = x_\lambda + x_{\bar{\lambda}}, y = y_\lambda + y_{\bar{\lambda}}$ из $N_\lambda + N_{\bar{\lambda}}$

$$(\tilde{\Gamma}_1 x, \tilde{\Gamma}_2 y)_{\tilde{X}} - (\tilde{\Gamma}_2 x, \tilde{\Gamma}_1 y)_{\tilde{X}} = (\lambda - \bar{\lambda}) \left[(x_{\bar{\lambda}}, y_{\bar{\lambda}}) - (x_\lambda, y_\lambda) \right], \quad (3)$$

2) для любых $\langle \varphi, \alpha \rangle, \langle \psi, \varepsilon i \alpha \rangle \in \tilde{X}$ в $N_\lambda + N_{\bar{\lambda}}$ найдется такой элемент x , что

$$\begin{aligned} \tilde{\Gamma}_1 x &= \langle \varphi, \alpha \rangle, \\ \tilde{\Gamma}_2 x &= \langle \psi, \varepsilon i \alpha \rangle. \end{aligned} \quad (4)$$

Легко убедиться, что определения 1 и 2 эквивалентны.

Предложение 1 1) $\ker \tilde{\Gamma}_1 \cap \ker \tilde{\Gamma}_2 = \{0\}$,

$$2) N_\lambda + N_{\bar{\lambda}} = \ker \tilde{\Gamma}_1 + \ker \tilde{\Gamma}_2 = \ker \Gamma_1 + \ker \Gamma_2.$$

□ 1) Пусть $x \in \ker \tilde{\Gamma}_1 \cap \ker \tilde{\Gamma}_2$, тогда на основании (3) $\forall y \in N_\lambda + N_{\bar{\lambda}}$

$$0 = (x_{\bar{\lambda}}, y_\lambda) - (x_\lambda, y_{\bar{\lambda}}). \text{ Полагая } y_\lambda = 0, y_{\bar{\lambda}} = x_\lambda, \text{ получим } \|x_\lambda\|^2 = 0, \text{ следовательно, } x_\lambda = 0.$$

Аналогично, полагая $y_\lambda = 0, y_{\bar{\lambda}} = x_{\bar{\lambda}}$, получим $\|x_{\bar{\lambda}}\|^2 = 0$, откуда $x_{\bar{\lambda}} = 0$ и $x = 0$.

2) Используя формулу (1), аналогично пункту 1) доказывается, что $\ker \tilde{\Gamma}_1 \cap \ker \tilde{\Gamma}_2 = \{0\}$.

Пусть $x = x_\lambda + x_{\bar{\lambda}} \in N_\lambda + N_{\bar{\lambda}}$ и $\tilde{\Gamma}_1 x = \langle \varphi, \alpha \rangle$. Для пары $\{\langle \varphi, \alpha \rangle, \langle \psi, \varepsilon i \alpha \rangle\} \subset \tilde{X}$ найдется $x_1 \in N_\lambda + N_{\bar{\lambda}}$, такой, что $\tilde{\Gamma}_1 x_1 = \langle \varphi, \alpha \rangle, \tilde{\Gamma}_2 x_1 = \langle \psi, \varepsilon i \alpha \rangle$, т.е. $x_1 \in \ker \tilde{\Gamma}_2$.

Обозначим $x_2 = x - x_1$. $\tilde{\Gamma}_1 x_2 = \tilde{\Gamma}_1 x - \tilde{\Gamma}_1 x_1 = \langle 0, 0 \rangle$, т.е. $x_2 \in \ker \tilde{\Gamma}_1$.

Аналогично доказывается, что $N_\lambda + N_{\bar{\lambda}} = \ker \tilde{\Gamma}_1 + \ker \tilde{\Gamma}_2$. ■

Предложение 2 $\dim \ker \tilde{\Gamma}_k = \dim X \quad (k = \overline{1,2})$.

□ Пусть $\{\varphi_k\}_1^r$ – линейно независимая система векторов из X . Для каждой пары

$$\{\langle \varphi_k, 0 \rangle, \langle 0, 0 \rangle\} \text{ найдется такой вектор } x_k \in N_\lambda + N_{\bar{\lambda}}, \text{ что } \tilde{\Gamma}_1 x_k = \langle \varphi_k, 0 \rangle, \tilde{\Gamma}_2 x_k = \langle 0, 0 \rangle.$$

Т.е. $x_k \in \ker \tilde{\Gamma}_2$. Предположим, что $\sum_{k=1}^r \alpha_k x_k = 0$, тогда, применяя к этому равенству

оператор Γ_1 , получим $\sum_{k=1}^r \alpha_k \varphi_k = 0$, откуда $\alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_r = 0$ и, следовательно, $\{x_k\}_1^r$ –

линейно независима. Таким образом, $\dim \ker \tilde{\Gamma}_2 \geq \dim X$.

Пусть $\{x_k\}_1^s$ – линейно независимая система векторов из $\ker \tilde{\Gamma}_2$, т.е. $\tilde{\Gamma}_1 x_k = \langle \psi_k, 0 \rangle$,

$\tilde{\Gamma}_2 x_k = \langle 0, 0 \rangle$. Предположим $\sum_{k=1}^s \alpha_k \psi_k = 0$, но $\sum_{k=1}^s \alpha_k \psi_k = \Gamma_1 \left(\sum_{k=1}^s \alpha_k x_k \right)$. Следовательно,

$\sum_{k=1}^s \alpha_k x_k \in \ker \Gamma_1$ и, в силу предложения 1, $\sum_{k=1}^s \alpha_k x_k = 0$ и $\alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_s = 0$. Поэтому

$\{\psi_k\}_1^s$ – линейно независима, и $\dim \ker \tilde{\Gamma}_2 \leq \dim X$. Это доказывает, что $\dim \ker \tilde{\Gamma}_2 = \dim X$.

Аналогично доказывается, что $\dim \ker \tilde{\Gamma}_1 = \dim X$. ■

Предложение 3 $\dim \ker \Gamma_k = \dim \tilde{X} \quad (k = \overline{1,2})$.

Пусть $\{\langle \beta_k, \alpha_k \rangle\}_1^r$ – линейно независимая система векторов из \tilde{X} . Для каждой пары

$\{\langle \beta_k, \alpha_k \rangle, \langle 0, \varepsilon \alpha_k \rangle\}$ найдется вектор $x_k \in N_{\beta_k} + N_{\alpha_k}$: $\tilde{\Gamma}_1 x_k = \langle \beta_k, \alpha_k \rangle$, $\tilde{\Gamma}_2 x_k = \langle 0, \varepsilon \alpha_k \rangle$.

Т.е. $x_k \in \ker \Gamma_2$. Предположим, что $\sum_{k=1}^r p_k x_k = 0$, тогда, применяя к этому равенству

оператор $\tilde{\Gamma}_1$, получим $\sum_{k=1}^r p_k \langle \beta_k, \alpha_k \rangle = \langle 0, 0 \rangle$, откуда $p_1 = p_2 = \dots = p_r = 0$. Следовательно,

$\{x_k\}_1^r$ – линейно независима и $\dim \ker \Gamma_2 \geq \dim \tilde{X}$.

Пусть $\{x_k\}_1^s$ – линейно независимая система векторов из $\ker \Gamma_2$, $\tilde{\Gamma}_1 x_k = \langle \beta_k, \alpha_k \rangle$,

$\tilde{\Gamma}_2 x_k = \langle 0, \varepsilon \alpha_k \rangle$. Предположим $\sum_{k=1}^r p_k \langle \beta_k, \alpha_k \rangle = \langle 0, 0 \rangle$, тогда $\tilde{\Gamma}_1 \left(\sum_{k=1}^s p_k x_k \right) = \langle 0, 0 \rangle$ и

$\sum_{k=1}^s p_k x_k \in \ker \tilde{\Gamma}_1$. В силу предложения 1, $\sum_{k=1}^s p_k x_k = 0$, следовательно, $p_1 = p_2 = \dots = p_s = 0$ и

$\{\langle \beta_k, \alpha_k \rangle\}_1^s$ – линейно независима. Итак, $\dim \ker \Gamma_2 \leq \dim \tilde{X}$ и, поэтому, $\dim \ker \Gamma_2 = \dim \tilde{X}$.

Аналогично доказывается, что $\dim \ker \Gamma_1 = \dim \tilde{X}$.

■

Возможны два случая: $\dim N_\lambda \geq \dim N_{\bar{\lambda}}$ ($\varepsilon \operatorname{Im} \lambda \geq 0$) и $\dim N_\lambda \leq \dim N_{\bar{\lambda}}$ ($\varepsilon \operatorname{Im} \lambda \leq 0$).

Предложение 4

Если $\dim N_\lambda \geq \dim N_{\bar{\lambda}}$, то $\ker \Gamma_k = (I + \Phi_k)N_\lambda$, $\Delta(\Phi_k) = N_{\bar{\lambda}}$, Φ_k – сжатие, $-1 \notin \sigma_p(\Phi_k)$, $\ker \tilde{\Gamma}_k = (I + \tilde{\Phi}_k)D(\tilde{\Phi}_k)$, $\Delta(\tilde{\Phi}_k) = N_\lambda$, $\tilde{\Phi}_k$ – изометрический оператор, $-1 \notin \sigma_p(\tilde{\Phi}_k)$, $N_{\bar{\lambda}} = D(\tilde{\Phi}_k) \oplus \ker \Phi_k$, если $\dim N_\lambda \leq \dim N_{\bar{\lambda}}$, то $\ker \Gamma_k = (I + \Phi_k)N_{\bar{\lambda}}$, $\Delta(\Phi_k) = N_\lambda$, Φ_k – сжатие, $-1 \notin \sigma_p(\Phi_k)$, $\ker \tilde{\Gamma}_k = (I + \tilde{\Phi}_k)D(\tilde{\Phi}_k)$, $\Delta(\tilde{\Phi}_k) = N_\lambda$, $\tilde{\Phi}_k$ – изометрический оператор, $-1 \notin \sigma_p(\tilde{\Phi}_k)$, $N_{\bar{\lambda}} = D(\tilde{\Phi}_k) \oplus \ker \Phi_k$, ($k = \overline{1,2}$).

Рассмотрим случай $\dim N_\lambda \leq \dim N_{\bar{\lambda}}$. Пусть $x \in \ker \Gamma_2$, $x = x_\lambda + x_{\bar{\lambda}}$. Имеет место равенство $(\Gamma_1 x, \Gamma_2 x)_X - (\Gamma_2 x, \Gamma_1 x)_X - 2\varepsilon i (\Gamma x, \Gamma x)_X = (\lambda - \bar{\lambda}) \left[(x_\lambda, x_\lambda) - (x_\lambda, x_\lambda) \right]$, или $-2\varepsilon i \|\Gamma x\|_X^2 = 2(\operatorname{Im} \lambda) i \left[\|x_{\bar{\lambda}}\|^2 - \|x_\lambda\|^2 \right]$ (5). Т.к. ε и $\operatorname{Im} \lambda$ разных знаков, то из (5) следует $\|x_{\bar{\lambda}}\| \geq \|x_\lambda\|$ (6).

Компонента x_λ однозначно определяется компонентой $x_{\bar{\lambda}}$. Действительно, если $x' = x'_\lambda + x_{\bar{\lambda}} \in \ker \Gamma_2$, то $(x - x') = 0 + (x_\lambda - x'_\lambda) \in \ker \Gamma_2$, из (6) следует $\|0\| \geq \|x_\lambda - x'_\lambda\|$, откуда $x_\lambda = x'_\lambda$.

Т.о. на множестве $x_{\bar{\lambda}}$ таких, что $x_\lambda + x_{\bar{\lambda}} \in \ker \Gamma_2$ можно определить оператор Φ_2 :

$\Phi_2 x_{\bar{\lambda}} = x_\lambda$. Причем $\|\Phi_2 x_{\bar{\lambda}}\| \leq \|x_{\bar{\lambda}}\|$ и $-1 \notin \sigma_p(\Phi_2)$.

Далее, допустим $\overline{D(\Phi_2)} \neq N_{\bar{\lambda}}$. Тогда $\exists y_{\bar{\lambda}} \neq 0: (y_{\bar{\lambda}}, x_{\bar{\lambda}}) = 0 \quad \forall x_{\bar{\lambda}} \in D(\Phi_2)$. Пусть $\tilde{\Gamma}_2 y_{\bar{\lambda}} = \langle \varphi, \varepsilon i \alpha \rangle$. Для пары $\{\langle 0, (-\alpha) \rangle, \langle \varphi, \varepsilon i \alpha \rangle\} \exists x \in N_{\lambda} \dot{+} N_{\bar{\lambda}}: \tilde{\Gamma}_1 x = \langle \varphi, \varepsilon i \alpha \rangle, \tilde{\Gamma}_2 x = \langle 0, (-\alpha) \rangle$ (т.е. $x \in \ker \Gamma_2$ и $x = x_{\bar{\lambda}} + \Phi_2 x_{\bar{\lambda}}$). В этом случае из равенства:

$$(\tilde{\Gamma}_1 x, \tilde{\Gamma}_2 y_{\bar{\lambda}}) - (\tilde{\Gamma}_2 x, \tilde{\Gamma}_1 y_{\bar{\lambda}}) = (\lambda - \bar{\lambda})(x_{\bar{\lambda}}, y_{\bar{\lambda}}) \quad \text{получаем: } \|\varphi\|^2 + 2\varepsilon^2 \|\alpha\|^2 = 0 \quad \text{и} \quad \varphi = \alpha = 0.$$

Тогда

$y_{\bar{\lambda}} \in \ker \Gamma_2$ и $y_{\bar{\lambda}} = z_{\bar{\lambda}} + \Phi_2 z_{\bar{\lambda}}$, но в этом случае $\Phi_2 z_{\bar{\lambda}} = 0$ и $z_{\bar{\lambda}} = 0$. Таким образом, $y_{\bar{\lambda}} = 0$, что противоречит предположению $y_{\bar{\lambda}} \neq 0$. Следовательно, $\overline{D(\Phi_2)} = N_{\bar{\lambda}}$.

Докажем, что $\overline{D(\Phi_2)} = D(\Phi_2)$. Пусть $x_{\bar{\lambda}} \in \overline{D(\Phi_2)} \Rightarrow x_{\bar{\lambda}} = \lim_{n \rightarrow \infty} x_{\bar{\lambda}}^{(n)}, x_{\bar{\lambda}}^{(n)} \in D(\Phi_2)$.

Рассмотрим вектор $x = \lim_{n \rightarrow \infty} (x_{\bar{\lambda}}^{(n)} + \Phi_2 x_{\bar{\lambda}}^{(n)}) = x_{\bar{\lambda}} + x_{\lambda}$, и докажем, что $x \in \ker \Gamma_2$. Действительно,

$$\forall y \in N_{\lambda} \dot{+} N_{\bar{\lambda}}, \quad y = y_{\lambda} + y_{\bar{\lambda}} \quad (\tilde{\Gamma}_1 x, \tilde{\Gamma}_2 y) - (\tilde{\Gamma}_2 x, \tilde{\Gamma}_1 y) = (\lambda - \bar{\lambda}) [(x_{\bar{\lambda}}, y_{\bar{\lambda}}) - (x_{\lambda}, y_{\lambda})] = \\ = \lim_{n \rightarrow \infty} [(x_{\bar{\lambda}}^{(n)}, y_{\bar{\lambda}}) - (\Phi_2 x_{\bar{\lambda}}^{(n)}, y_{\lambda})] = \lim_{n \rightarrow \infty} [(\tilde{\Gamma}_1 (x_{\bar{\lambda}}^{(n)} + \Phi_2 x_{\bar{\lambda}}^{(n)}), \tilde{\Gamma}_2 y) - (\tilde{\Gamma}_2 (x_{\bar{\lambda}}^{(n)} + \Phi_2 x_{\bar{\lambda}}^{(n)}), \tilde{\Gamma}_1 y)] \quad (7)$$

Выберем y так, чтобы $\tilde{\Gamma}_1 y = \langle \Gamma_2 x, 0 \rangle, \tilde{\Gamma}_2 y = \langle 0, 0 \rangle$. Тогда из (7) следует $\|\Gamma_2 x\|^2 = 0$ и $\Gamma_2 x = 0$.

Тогда $x_{\bar{\lambda}} \in D(\Phi_2)$ и $\overline{D(\Phi_2)} = D(\Phi_2) = N_{\bar{\lambda}}$.

Аналогично доказывается, что $\Delta(\Phi_2) = N_{\lambda}$.

Предположим $x \in \ker \tilde{\Gamma}_2$, тогда в выражении (5) левая часть равна 0, поэтому $\|x_{\bar{\lambda}}\| = \|x_{\lambda}\|$ и, следовательно, $\tilde{\Phi}_2$ – изометрический оператор

Аналогично приведенному выше, доказывается, что

$$\overline{D(\tilde{\Phi}_2)} = D(\tilde{\Phi}_2), \Delta(\tilde{\Phi}_2) = N_{\lambda}, -1 \notin \sigma_p(\tilde{\Phi}_2).$$

Теперь пусть $y_{\bar{\lambda}} \perp D(\tilde{\Phi}_2), \tilde{\Gamma}_1 y_{\bar{\lambda}} = \langle \psi, \alpha \rangle, \tilde{\Gamma}_2 y_{\bar{\lambda}} = \langle \varphi, \varepsilon i \alpha \rangle$. Для пары $\{\langle \varphi, 0 \rangle, \langle 0, 0 \rangle\}$

$\exists x: \tilde{\Gamma}_1 x = \langle \varphi, 0 \rangle, \tilde{\Gamma}_2 x = \langle 0, 0 \rangle$, т.е. $x \in \ker \tilde{\Gamma}_2$ и $x = x_{\bar{\lambda}} + \tilde{\Phi}_2 x_{\bar{\lambda}}$. Из равенства $(\tilde{\Gamma}_1 x, \tilde{\Gamma}_2 y_{\bar{\lambda}}) - (\tilde{\Gamma}_2 x, \tilde{\Gamma}_1 y_{\bar{\lambda}}) = (\lambda - \bar{\lambda})(x_{\bar{\lambda}}, y_{\bar{\lambda}})$ следует $\|\varphi\|^2 = 0$ и $\varphi = 0$, а значит $y_{\bar{\lambda}} \in \ker \Phi_2$.

Если $y_\lambda \in \ker \Phi_2$, $\tilde{\Gamma}_1 y_\lambda = \langle \psi, \alpha \rangle$, $\tilde{\Gamma}_2 y_\lambda = \langle 0, \epsilon i \alpha \rangle$, то $\forall x \in \ker \tilde{\Gamma}_2$, $x = x_\lambda + \tilde{\Phi}_2 x_\lambda$, из того же равенства следует $(x_\lambda, y_\lambda) = 0$. Т.о. $y_\lambda \perp D(\tilde{\Phi}_2)$. Т.к. $\overline{D(\tilde{\Phi}_2)} = D(\tilde{\Phi}_2)$, то $N_{\tilde{\lambda}} = D(\tilde{\Phi}_2) \oplus \ker \Phi_2$.

Аналогичные рассуждения можно провести и для $\Phi_1, \tilde{\Phi}_1, \ker \Gamma_1, \ker \tilde{\Gamma}_1$, и для случая $\dim N_\lambda \geq \dim N_{\tilde{\lambda}}$.

■

Предложение 5

Если $\dim N_\lambda \geq \dim N_{\tilde{\lambda}}$, то $N_\lambda + N_{\tilde{\lambda}} = \ker \tilde{\Gamma}_k + N_\lambda = \ker \Gamma_k + N_\lambda$,

если $\dim N_\lambda \leq \dim N_{\tilde{\lambda}}$, то $N_\lambda + N_{\tilde{\lambda}} = \ker \tilde{\Gamma}_k + N_{\tilde{\lambda}} = \ker \Gamma_k + N_{\tilde{\lambda}}$,

$(k = \overline{1, 2})$.

Пусть $\dim N_\lambda \geq \dim N_{\tilde{\lambda}}$, $x \in \ker \tilde{\Gamma}_1 \cap N_{\tilde{\lambda}}$. Тогда $x = x_\lambda + \tilde{\Phi}_1 x_\lambda$, причем $\tilde{\Phi}_1 x_\lambda = 0$.

Следовательно, $x_\lambda = 0$ и $x = 0$. Т.о. $\ker \tilde{\Gamma}_1$ и $N_{\tilde{\lambda}}$ — линейно независимы. Пусть теперь $x = x_\lambda + x_{\tilde{\lambda}} \in N_\lambda + N_{\tilde{\lambda}}$. Тогда $x = x_\lambda - \tilde{\Phi}_1^{-1} x_\lambda + \tilde{\Phi}_1^{-1} x_\lambda + x_{\tilde{\lambda}} = (x_\lambda - z_\lambda) + (z_\lambda + \tilde{\Phi}_1 z_\lambda)$, где $x_\lambda - z_\lambda \in N_\lambda$, а $z_\lambda + \tilde{\Phi}_1 z_\lambda \in \ker \tilde{\Gamma}_1$. Т.о. $N_\lambda + N_{\tilde{\lambda}} = \ker \tilde{\Gamma}_1 + N_\lambda$.

Аналогично доказываются остальные случаи.

■

Предложение 6

Если $\dim N_\lambda \geq \dim N_{\tilde{\lambda}}$, то $\dim \tilde{X} = \dim N_\lambda$, $\dim X = \dim N_\lambda$, $\dim X' = \dim N_\lambda - \dim N_{\tilde{\lambda}}$,

если $\dim N_\lambda \leq \dim N_{\tilde{\lambda}}$, то $\dim \tilde{X} = \dim N_{\tilde{\lambda}}$, $\dim X = \dim N_{\tilde{\lambda}}$, $\dim X' = \dim N_\lambda - \dim N_{\tilde{\lambda}}$.

Пусть $\dim N_\lambda \geq \dim N_{\tilde{\lambda}}$. Система векторов $\{x_\lambda^{(k)}\}_1^r$ линейно независима тогда и только тогда, когда линейно независима система векторов $\{x_\lambda^{(k)} + \Phi_1 x_\lambda^{(k)}\} \subset \ker \Gamma_1$. Поэтому $\dim N_\lambda = \dim \ker \Gamma_1$, что согласно предложению 3 равно $\dim \tilde{X}$.

Т.к. $\tilde{\Phi}_1$ — изометрический, то любой x_λ имеет свой единственный прообраз x_λ :

$\tilde{\Phi}_1 x_\lambda = x_\lambda$. Поэтому система векторов $\{x_\lambda^{(k)}\}_1^s$ линейно независима тогда и только тогда, когда

линейно независима система векторов $\{x_\lambda^{(k)} + \tilde{\Phi}_1 x_\lambda^{(k)}\} \subset \ker \tilde{\Gamma}_1$, следовательно,

$\dim N_{\bar{\lambda}} = \dim \ker \tilde{\Gamma}_1$, что согласно предложению 2 равно $\dim X$.

Аналогичны рассуждения в случае $\dim N_{\lambda} \leq \dim N_{\bar{\lambda}}$.

■

Полученные свойства ПЗ позволяют ввести понятие функции Вейля эрмитова оператора, исследовать ее свойства, а также описать некоторые свойства регулярных расширений в терминах абстрактных граничных значений.

В заключение рассмотрим пример, иллюстрирующий изложенные выше теоретические понятия.

Рассмотрим в пространстве $H = L_2[0, +\infty)$ симметрический оператор $(Ax)(t) = ix'''(t)$ с областью определения $D(A) = \{x \in H : x(0) = x'(0) = x''(0) = 0\}$.

$N_{\lambda} = \ker(A^* - \bar{\lambda}I)$. Пусть $\text{Im } \lambda > 0$, тогда $x_{\lambda}(t) = c_0 e^{\mu_0 t}$, $x_{\bar{\lambda}}(t) = c_1 e^{-\mu_1 t} + c_2 e^{-\mu_2 t}$, где μ_0, μ_1, μ_2 – корни уравнения $\mu^3 = -i\bar{\lambda}$. Т.о. $n_+ = 1$, $n_- = 2$, $\varepsilon = -1$.

$$(\lambda - \bar{\lambda})[(x_{\lambda}, y_{\bar{\lambda}}) - (x_{\bar{\lambda}}, y_{\lambda})] = (A^*x, y) - (x, A^*y) = i(x'(0)\overline{y'(0)} - x''(0)\overline{y''(0)} - x(0)\overline{y''(0)}).$$

Выберем $\Gamma_1 x = x''(0)$, $\Gamma_2 x = ix(0)$, $\Gamma x = \frac{1}{\sqrt{2}}x'(0)$. Тогда $\tilde{\Gamma}_1 x = \langle x''(0), \frac{1}{\sqrt{2}}x'(0) \rangle$.

$$\tilde{\Gamma}_2 x = \langle ix(0), -\frac{1}{\sqrt{2}}x'(0) \rangle.$$

$\ker \Gamma_1$ состоит из таких $x(t)$, что $x''(0) = 0$ ($\mu_0^2 c_0 + \bar{\mu}_1^2 c_1 + \bar{\mu}_2^2 c_2 = 0$), а $\ker \Gamma_2$ из таких, что $x(0) = 0$ ($c_0 + c_1 + c_2 = 0$). Т.о. $\dim \ker \Gamma_1 = \dim \ker \Gamma_2 = 2 = n_+$.

$\ker \tilde{\Gamma}_1$ состоит из таких $x(t)$, что $\begin{cases} x'(0) = 0, \\ x''(0) = 0. \end{cases}$ или $\begin{cases} \mu_0 c_0 - \bar{\mu}_1 c_1 - \bar{\mu}_2 c_2 = 0, \\ \mu_0^2 c_0 + \bar{\mu}_1^2 c_1 + \bar{\mu}_2^2 c_2 = 0. \end{cases}$, а $\ker \Gamma_2$ из

таких, что $\begin{cases} x(0) = 0, \\ x'(0) = 0. \end{cases}$ или $\begin{cases} c_0 + c_1 + c_2 = 0 \\ \mu_0 c_0 - \bar{\mu}_1 c_1 - \bar{\mu}_2 c_2 = 0. \end{cases}$ Т.о. $\dim \ker \tilde{\Gamma}_1 = \dim \ker \tilde{\Gamma}_2 = 1 = n_-$.

$$\Phi_1(c_1 e^{-\mu_1 t} + c_2 e^{-\mu_2 t}) = -\frac{\bar{\mu}_1^2 c_1 + \bar{\mu}_2^2 c_2}{\mu_0^2} e^{\mu_0 t}, \quad \Phi_2(c_1 e^{-\mu_1 t} + c_2 e^{-\mu_2 t}) = -(c_1 + c_2) e^{\mu_0 t}.$$

$$\tilde{\Phi}_1(c_1(e^{-\mu_1 t} + \alpha e^{-\bar{\mu}_2 t})) = -c_1 \frac{\bar{\mu}_1^2 + \alpha \bar{\mu}_2^2}{\mu_0^2} e^{\mu_0 t}, \quad \tilde{\Phi}_2(c_1(e^{-\mu_1 t} + \beta e^{-\bar{\mu}_2 t})) = -c_1(1 + \beta) e^{\mu_0 t}, \text{ где}$$

$$\alpha = -\frac{\bar{\mu}_1(\bar{\mu}_1 + \mu_0)}{\bar{\mu}_2(\bar{\mu}_2 + \mu_0)}, \quad \beta = -\frac{\bar{\mu}_1 + \mu_0}{\bar{\mu}_2 + \mu_0}.$$

ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Деркач, М. М. Маламуд. О характеристических функциях расширений эрмитова оператора. (1984), Макеевка, 45с.
2. А. В. Кужель, И. И. Карпенко. Пространства граничных значений эрмитовых операторов. (1989), Симф.: СГУ, 8с.
3. С. А. Кужель. О правильных расширениях эрмитовых операторов.– Функциональный анализ. Линейные пространства: Межвузовский сборник научных трудов. (1990), Ульяновск, с.91-100.
4. О. Г. Сторож. Методы теории расширений и дифференциально–граничные операторы.– Дисс-я... докт. физ.-мат. наук. (1995), Львов, 277с.

О БАЗИСНЫХ ИНВАРИАНТАХ ШЕСТОЙ СТЕПЕНИ ГРУПП F_4 И B_N

А. А. Кобец

Пусть G есть конечная группа, порожденная отражениями относительно гиперплоскостей в вещественном пространстве E^n . Особое многообразие I состоит из действительных векторов x , таких что $\prod_{i=1}^n I_n^G(x) = 0$; здесь $I_n^G(n_i = \deg I_n^G, i = \overline{1, n})$ — базисные инварианты Флатто – Винер группы G [1]. вектор $x = (x_i)$. Многообразие M для групп $G = I_2^*, A_3$ приведено в работе [1]. Найдём здесь подмногообразие I для групп I_4^* и A_n .

1°. Пусть в пространстве A^4 задана прямоугольная система координат $Ox_i (i = \overline{1, 4})$. Если к вершинам 4-куба $(\pm 1, \pm 1, \pm 1, \pm 1)$ присоединить точки $(\pm 2, 0, 0, 0)$, $(0, \pm 2, 0, 0)$, $(0, 0, \pm 2, 0)$, $(0, 0, 0, \pm 2)$, то получим все вершины правильного 24-гранника с группой симметрий I_4^* . Его плоскости симметрии определяются уравнениями

$$x_i = 0, x_i \pm x_j = 0 (i, j = \overline{1, 4}; i < j),$$

$$x_1 \pm x_2 \pm x_3 \pm x_4 = 0.$$

Найдём базисный инвариант Флатто-Винер шестой степени группы I_4^* . Рассмотрим $\hat{O}_6 = aI_2^3 + bB_6$, где $I_2 = I_2^{F_4} = \sum_{i=1}^4 x_i^2, B_6 = \sum_{i=1}^4 x_i^6 + 5 \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^4 x_i^4 x_j^2$ (см. [2]). Уравнение $I_2(\hat{c})\hat{O}_6 = 0$,

где $I_2(\hat{c})$ — оператор Лапласа, даёт $b = -\frac{5}{4}a$, тогда

$$I_6^{F_4} = \sum_{i=1}^4 x_i^6 - 5 \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^4 x_i^4 x_j^2 + 30 \sum_{\substack{i,j,k=1 \\ i \neq j, k}}^4 x_i^2 x_j^2 x_k^2.$$

Отобразим пространство E^4 в пространство $R^4(y_i)$ по формулам $y_i = x_i^2, i = \overline{1, 4}$. Это преобразование подробно изучено, например, в работе [3]. Инварианту $I_6^{F_4}$ в R^4 соответствует форма $I_6^{F_4}(y)$, где $y = (y_i)$. Уравнение $I_6^{F_4} = 0$ задает конус C_3 . Плоскость с уравнением $y_1 = t, t \neq 0$, пересекает C_3 по гладкой двумерной кубической поверхности — направляющей конуса C_3 . Плоскость $y_3 = c, c \neq 0$, пересекает указанную направляющую по кубике

$$y_1^3 + y_2^3 - 5(y_1^2 y_2 + y_1 y_2^2) - 5(c+t)(y_1^2 - 6y_1 y_2 + y_2^2) - 5(c^2 - 6ct + t^2)(y_1 + y_2) + c^3 + t^3 - 5(c^2 t + ct^2) = 0. \quad (1)$$

Выясним тип этой кривой. Для этого найдем число её бесконечно удалённых точек. Из уравнения $y_1^3 - 5(y_1^2 y_2 + y_1 y_2^2) + y_2^3 = 0$ находим, что таких точек три, все они — вещественные и различные. Это значит, что кривая (1) является раскинутой гиперболой [4].

С помощью аффинного преобразования (y_1, y_2) а $\left(x + \frac{1}{4}y + \frac{5}{2}(c+t), x - \frac{1}{4}y + \frac{5}{2}(c+t)\right)$ уравнение (1) приведём к виду $xy^2 = 8x^3 + 40(c+t)x^2 + 20(3t^2 + 3c^2 + 2ct) + 24(c^3 + t^3 - 5c^2t - 5ct^2)$. Вспомогательное уравнение

$$8x^4 + 40(c+t)x^3 + 20(3c^2 + 3t^2 + 2ct)x^2 + 24(c^3 + t^3 - 5c^2t - 5ct^2) = 0$$

имеет четыре различных вещественных корня. Значит, кривая (1) состоит из двух гиперболических ветвей и одной прямолинейной (рис. 1).

В случае, когда одно из чисел c, t равно нулю, имеем кривую того же типа. Если $c = t = 0$, то кривая (1) распадается на три прямые.

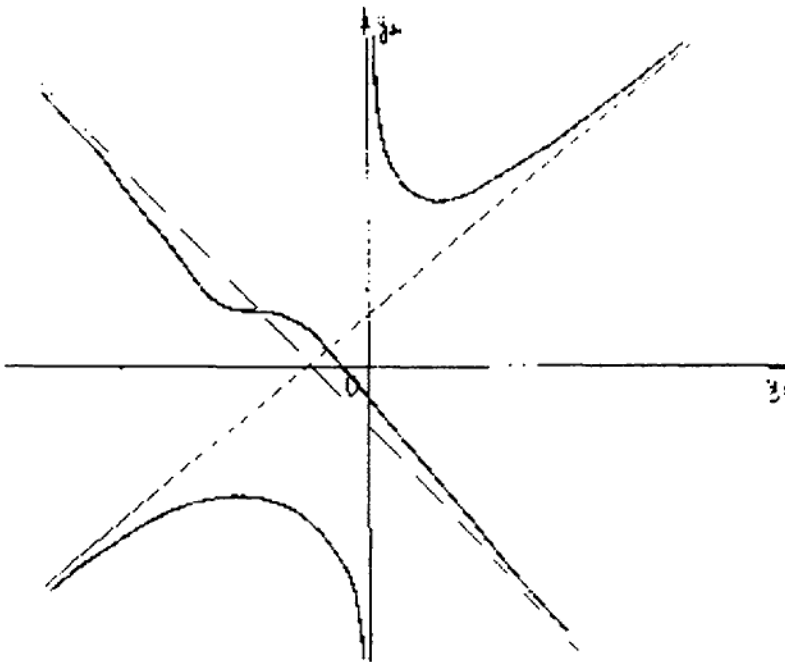


Рис. 1

Таким образом, справедлива

Теорема 1. В пространстве $R^4(y_i), i = \overline{1,4}$, особое подмногообразие, определяемое инвариантом $I_6^{F_4}$, состоит из направляющих векторов вещественных полупрямых, которые лежат при $y_i \geq 0$ на конусе C_3 , не имеющем особых точек вне его вершины. 2 — плоскость с уравнениями $y_3 = c, y_4 = t$ пересекает конус C_3 по раскинутой гиперболе, которая при $c = t = 0$ вырождается в три прямые.

2°. Пусть плоскости симметрии n -куба в пространстве E^n определяются уравнениями

$$\begin{aligned} x_i &= 0, i = \overline{1, n}, \\ x_i \pm x_j &= 0 (i, j = \overline{1, n}, i < j). \end{aligned}$$

Тогда инварианты группы B_n имеют вид (см. [2]):

$$A_{2j} = \sum_{i=1}^n x_i^{2j}, j = \overline{1, n}$$

Найдём базисный инвариант Флатто-Винер шестой степени при $I_2 = I_2^{B_n} = \sum_{i=1}^n x_i^2$. Базисный инвариант четвёртой степени находится среди форм $\hat{O}_4 = aA_2^2 + bA_4$. Из уравнения $I_2(\hat{c})\hat{O}_4 = 0$ имеем $a(n+2) + 3b = 0$. Поэтому

$$I_4^{B_n} = (n-1) \sum_{i=1}^n x_i^4 - 6 \sum_{i,j=1}^n x_i^2 x_j^2.$$

Инвариант шестой степени запишем в виде $\hat{O}_6 = aA_2^3 + bA_2A_4 + cA_6$. Система дифференциальных уравнений $I_2(\hat{c})\hat{O}_6 = 0, I_4(\hat{c})\hat{O}_6 = 0$ приводит к линейным уравнениям $3a(n+4) + b(n+14) + 15c = 0, a(n+4) + 2b = 0, b(n+8) + 15c = 0$. Отсюда

$$a = -\frac{2b}{n+4}, c = -\frac{b(n+8)}{15}. \text{ Следовательно, инвариант}$$

$$I_6^{B_n} = (n-1)(n-2) \sum_{i=1}^n x_i^6 - 15(n-2) \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^n x_i^4 x_j^2 + 180 \sum_{\substack{i,j,k=1 \\ i \neq j, k}}^n x_i^2 x_j^2 x_k^2. \quad (2)$$

Как и в 1°. отображение пространства E^n в пространство $R^n(y_i)$ зададим формулами $y_i = x_i^2, i = \overline{1, n}$. В R^n получим форму $I_6^{B_n}(y)$.

2.1. Рассмотрим случай $n = 3$. Согласно (2), инвариант

$$I_6^{B_3} = 2 \sum_{i=1}^3 x_i^6 - 15 \sum_{i,j=1}^3 x_i^4 x_j^2 + 180 \sum_{i,j,k=1}^3 x_i^2 x_j^2 x_k^2.$$

Пересекая конус K_3 с уравнением $I_6^B = 0$ плоскостью $y_3 = c$, получим кривую третьего порядка

$$2(y_1^3 + y_2^3) - 15(y_1^2 y_2 + y_1 y_2^2) - 15c(y_1^2 - 12y_1 y_2 + y_2^2) - 15c^2(y_1 + y_2) + 2c^3 = 0. \quad (3)$$

Тип этой кривой определим по числу различных точек на бесконечности. Из уравнения $2(y_1^3 + y_2^3) - 15(y_1^2 y_2 + y_1 y_2^2) = 0$ следует, что таких точек три, они являются вещественными и различными. Это означает, что кривая (3) — тоже раскинутая гипербола. Подвергнем кубик (3) аффинному преобразованию (y_1, y_2) в $(x + \sqrt{42} + 5c, x - \sqrt{42} + 5c)$, тогда (3) примет вид $xy^2 = 26x^3 + 240cx^2 + 480c^2x - 352c^3$. Вспомогательное уравнение $26x^4 + 240cx^3 + 480c^2x^2 - 352c^3x = 0$ имеет два различных вещественных и два комплексных корня. Вид кривой показан на рис. 2. При $c = 0$ получаем кубик, которая распадается на три прямые.

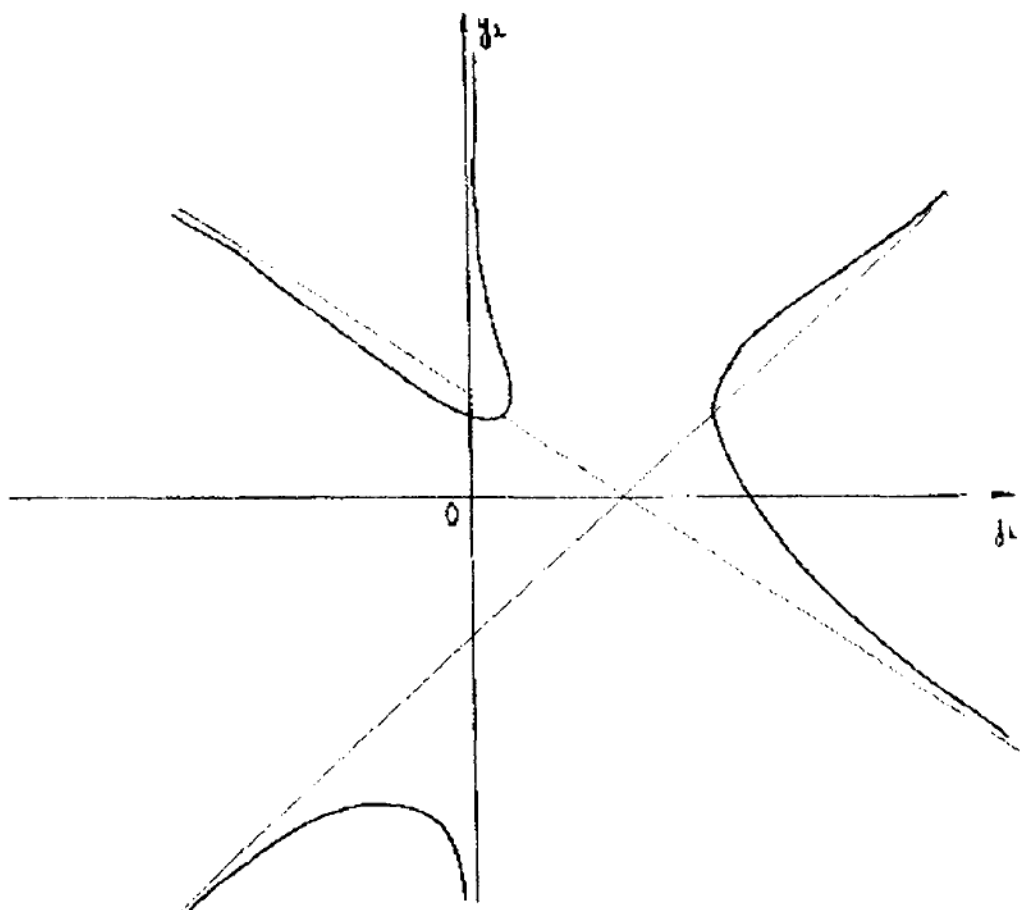


Рис. 2

Отметим, что K_3 является конусом, направляющая которого есть раскинутая гипербола. Такой конус называется раскинутым гиперболическим конусом.

Итак, доказана

Лемма. Особое подмногообразие, определяемое инвариантом $I_6(x)$, в пространстве R^3 состоит из направляющих векторов вещественных полупрямых первого октанта, расположенных на раскинутом гиперболическом конусе K_3 . Плоскость $y_3 = 0$ пересекает его по трем прямым.

2.2. В случае $n > 3$ конус L_3 с уравнением $I_6^n(y) = 0$ пересечем плоскостью $y_n = c_n, c_n \neq 0$. Получим гладкую кубическую поверхность — $(n-1)$ -мерную направляющую L_3 .

Если конус L_3 пересечь 2-плоскостью с уравнениями $y_i = c_i, i = \overline{3, n}$, то получим кубику

$$\begin{aligned} & (n-2)(n-2)(y_1^3 + y_2^3) - 15(n-2)(y_1^2 y_2 + y_1 y_2^2) - \\ & - 15((n-2)(y_1^2 + y_2^2) - 12y_1 y_2) \sum_{i=3}^n c_i - \\ & - 15 \left((n-2) \sum_{i=3}^n c_i^2 - 12 \sum_{\substack{i,j=3 \\ i \neq j}}^n c_i c_j \right) (y_1 + y_2) + (n-1)(n-2) \sum_{i=3}^n c_i^3 - \\ & - 15(n-2) \sum_{\substack{i,j=3 \\ i \neq j}}^n c_i^2 c_j + 180 \sum_{\substack{i,j,k=3 \\ i \neq j \neq k}}^n c_i c_j c_k = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Для определения типа этой кривой найдем число ее бесконечно удаленных точек. Решив уравнение $(n-1)(n-2)(y_1^3 + y_2^3) - 15(n-2)(y_1^2 y_2 + y_1 y_2^2) = 0$, получим, что эта кубика имеет три различные вещественные точки на бесконечности. Поэтому кривая (4) относится к раскинутым гиперболам.

Если $\sum_{i=3}^n c_i^2 > 0$, то также имеем раскинутую гиперболу. При $\sum_{i=3}^n c_i^2 = 0$ получаем кубику,

которая распадается на три прямые.

Таким образом, справедлива

Теорема 2. В пространстве $R^n(y_i), i = \overline{1, n}$, особое подмногообразие, определяемое инвариантом $I_n^{H_n}$, состоит из направляющих векторов вещественных полупрямых, которые лежат при $y_i \geq 0$ на конусе L_3 , не имеющем особых точек вне его вершины. 2-плоскость с

уравнениями $y_i = c_i, i = \overline{3, n}$, пересекает L_3 по раскинутой гиперболе, которая при $c_i = 0, i = \overline{3, n}$, вырождается в три прямые.

Теоремы 1 и 2 показывают, что конусы C_3 и L_3 образованы семействами раскинутых гипербол. Лемма выделяет случай, когда раскинутая гипербола является направляющей конуса K_3 .

ЛИТЕРАТУРА

1. Flatto L. Invariants of finite reflection groups // Enseign math., (1978), v. 24, № 3-4, p. 234-292.
2. Игнатенко В. Ф. Геометрия алгебраических поверхностей с симметриями // Итоги науки и техники. ВИНТИ. Пробл. геометрии (1980), т. 11, с. 203-240.
3. Чуб А. Т. О некоторых кривых на поверхностях второго порядка // Изв. Крым. пед. ин-та (1961) т. 35, с. 56-71.
4. Савелов А. А. Плоские кривые // М. : Физматгиз. (1960). — 296 с.

ДАТЧИКИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ОСНОВЕ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЕНОК ФЕРРИТ-ГРАНАТОВ

С. В. Дубинко, кандидат физико-математических наук, доцент

Эпитаксиальные пленки феррит-гранатов (ЭПФГ) традиционно рассматриваются как среда для записи и хранения информации. Основными носителями информации в ЭПФГ являются цилиндрические магнитные домены (ЦМД) или линии Блоха, индуцированные в доменных границах [1]. Но ЭПФГ обладают еще свойствами магниточувствительного элемента — датчика, в котором в зависимости от величины и ориентации вектора напряженности внешнего магнитного поля относительно кристаллографических и магнитных осей пленок происходит зарождение доменов различных конфигураций.

Настоящая работа посвящена исследованию возможности использования ЭПФГ как датчиков магнитных полей для реализации различных задач.

1. Методы измерения характеристик магнитных полей

Основными характеристиками магнитных полей являются напряженность магнитного поля и параметры его неоднородности. В частности, одним из таких параметров служит радиус кривизны силовых линий магнитного поля.

Предлагается вариант датчика магнитного поля, показанный на рис.1 [2]. Луч света от источника 1 вводится устройством 2 в У-образный световод 3 и через него передается на ЭПФГ 4. Свет дифрагирует на регулярной ДС в ЭПФГ, и лучи нулевого порядка дифракции через второй отрезок световода 3 поступают на фотоприемник. Лучи более высоких порядков дифракции рассеиваются в световоде, если для угла дифракции φ выполняется соотношение $|\varphi| > \theta_{\max}$ или $\lambda/d > 2NA$, где θ_{\max} - максимальный угол, под которым распространяется свет в световоде, λ - длина волны источника света 1, NA - числовая апертура световода 3. Интенсивность лучей нулевого порядка дифракции

$$I_0 = I_{\text{пад}} e^{-\alpha t} [((2S-d)/d)^2 \sin^2 Ft + \cos^2 Ft],$$

где $I_{\text{пад}}$ - интенсивность падающих на ЭПФГ лучей, α - коэффициент поглощения ЭПФГ, t - длина пути света в ЭПФГ, S - ширина домена одной полярности в измеряемом поле, d - период ДС в нулевом поле, F - удельное фарадеевское вращение ЭПФГ. При внешнем магнитном поле, равном полю насыщения ЭПФГ, ДС исчезает, интенсивности первого и более высоких порядков дифракции становятся равными нулю, при этом практически весь свет, прошедший через 4, попадает на фотоприемник 5. При изменении внешнего магнитного поля от нуля до поля насыщения пленки 4 интенсивность падающего на фотоприемник 5 света плавно возрастает. Между напряженностью внешнего магнитного поля и сигналом фотоприемника существует однозначная зависимость. Измерение магнитного поля осуществляют путем измерения

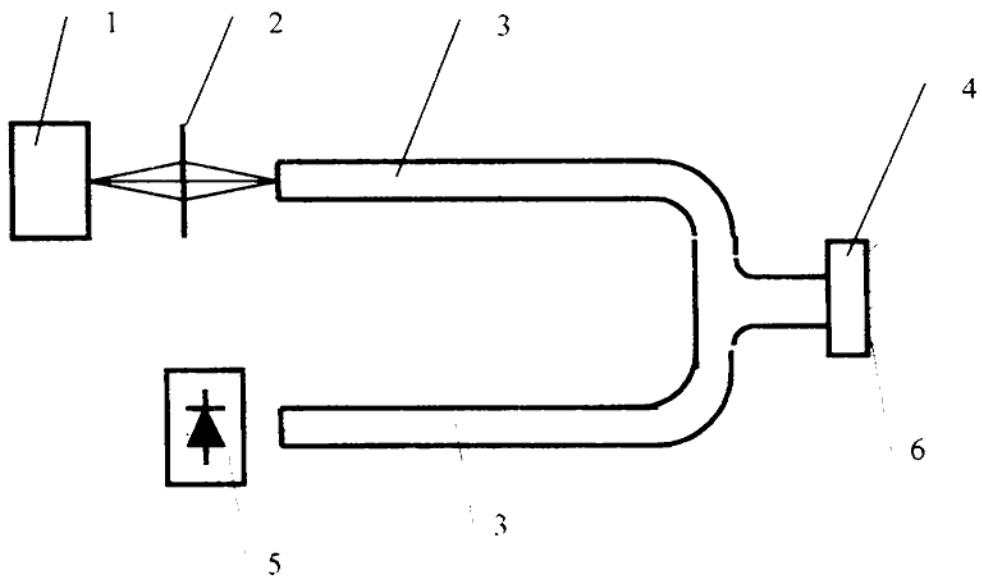


Рис. 1. Оптическая схема датчика магнитного поля

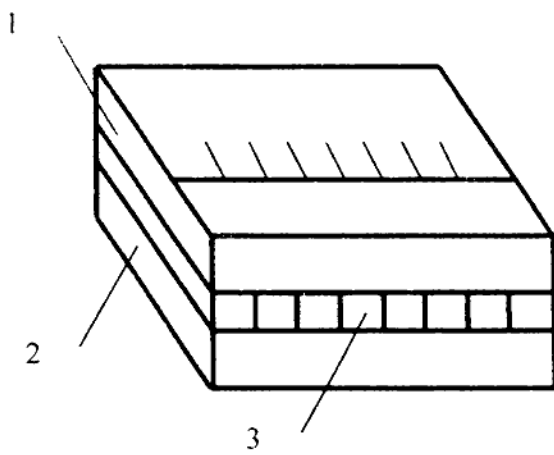


Рис. 2. Схема устройства для измерения напряженности магнитного поля

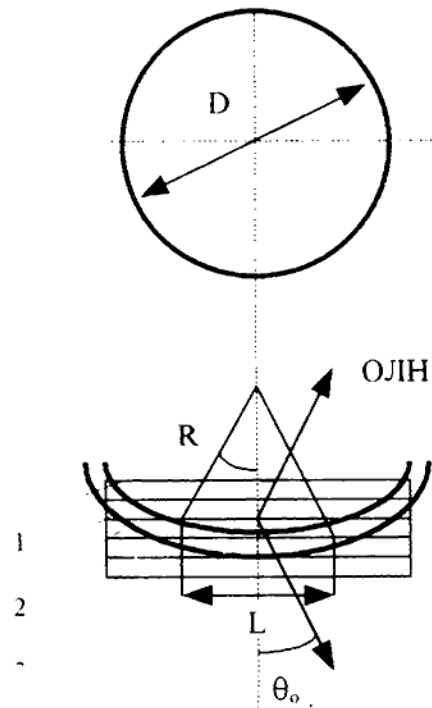


Рис.3. Структурная схема устройства для измерения R

интенсивности падающего на фотоприемник света. Диапазон измеряемых полей определяется полем насыщения ЭПФГ.

Устройство для измерения напряженности магнитного поля предложено в [3], рис.2. Принцип работы устройства заключается в следующем. Для измерения напряженности магнитного поля магниточувствительный элемент вносится в зону измерения. Каждая пленка, входящая в элемент, имеет определенную величину H^* . Измерение напряженности внешнего поля происходит посредством наблюдения за изменением характера ДС в результате воздействия магнитного поля на элемент. В исходном состоянии пленка, входящая в элемент, имеет лабиринтную ДС. В результате воздействия исследуемого магнитного поля на элемент ряд пленок, образующих элемент, перемагничиваются. После вынесения элемента из зоны исследуемого постоянного магнитного поля, а в случае импульсного поля, после прекращения импульса, в пленках, в которых произошло перемагничивание, реализуется ДС путем однородного зарождения. Переход ДС от лабиринтной к ДС, соответствующей однородному зарождению, происходит при строго определенных значениях внешнего магнитного поля, приложенного в плоскости магниточувствительного элемента.

$$H^* = 2K_u(1 - 2/[Q_1(1+Q_1)]^{1/2})\Lambda/M_s h.$$

где $\Lambda = (A/2\pi M_s)^{1/2}$, A - константа обмена, K_u - константа одноосной анизотропии, Q_1 - фактор качества, M_s - намагниченность, h - толщина пленки. Наблюдение ДС осуществляется в оптический микроскоп. Измерение конкретного значения исследуемого магнитного поля производится с помощью наблюдения за границей, разделяющей два типа ДС.

Для определения величины напряженности магнитного поля достаточно иметь размер пленки шириной в десять периодов ДС, поэтому элемент, состоящий из ста пленок, может иметь размер порядка одного миллиметра. Шкала, расположенная на поляризаторе устройства, построена таким образом, что против каждой магнитной пленки, входящей в элемент, нанесено значение напряженности магнитного поля, соответствующего полю однородного зарождения для данной пленки. Такое построение шкалы позволяет оперативно измерять напряженность внешнего поля.

Устройство для измерения радиуса кривизны силовых линий магнитного поля (R) описано в [4]. Предлагаемое устройство (рис.3) содержит магнитооптический активный элемент 2, расположенный между поляризатором 1 и анализатором 2, снабженный шкалой отсчета. Магнитооптический элемент выполнен в виде двух слоев, представляющих собой ЭПФГ с лабиринтной ДС, причем два идентичных магнитных слоя устройства скреплены таким образом, что направление оси легкого намагничивания (ОЛН) одного слоя является зеркальным отображением ОЛН другого слоя, а шкала отсчета наносится на анализатор. Устройство работает следующим образом: при действии на элемент внешнего магнитного поля, превышающего заданный предел (определенный магнитными свойствами элемента), происходит однородное

зарождение ДС в этом объеме элемента, где направление касательной к силовой линии внешнего магнитного поля и ОЛН взаимно перпендикулярны. Ввиду разной ориентации ОЛН в каждом слое элемента, зоны однородного зарождения возникают на расстоянии L друг от друга. Это расстояние зависит от R в плоскости, проходящей через ОЛН обоих слоев, и угла θ_0 . Из рисунка очевидно, что расстояние L есть хорда, стягивающая дугу окружности с центральным углом $2\theta_0$ и радиусом R_0 . Следовательно, радиус кривизны измеряемого поля в заданной плоскости определяется по формуле $R = L/2\text{tg } \theta_0$.

Устройства для измерений напряженности магнитного поля, описанные выше, дополняют друг друга. С помощью первого из них измеряются пороговые значения магнитных полей, другое — позволяет измерять непрерывный ряд значений полей. Магнитооптическому измерению R трудно предложить альтернативу, так как все другие методы предполагают механические перемещения датчиков, что при микронных объемах измеряемых полей сильно снижает точность измерений.

2. Устройства считывания информации с магнитных носителей

Данный раздел посвящен магнитооптическим способам считывания информации.

Устройство для оптического воспроизведения информации с носителя магнитной записи [5] показано на рис.4. Световой поток от лазера 1 направляется во входные торцы подводящих одномодовых световодов 2 узла формирования оптического сигнала и, выйдя из выходных торцов, образует воспроизводящий световой пучок, попадающий на рабочую поверхность ЭПФГ 4. Часть воспроизводящего пучка, попадающая на слой 5 из светопоглощающего материала, расположенный на пленке, поглощается материалом этого слоя. Другая часть пучка после отражения от рабочей поверхности пленки 4 в области щели 6 образует информационный световой пучок и попадает в отводящий многомодовый световод 3. Торцы обоих световодов 2 и 3 установлены под углом α к поверхности пленки 4. Угол определяется из соотношения $\alpha \leq 90^\circ - [\arcsin(1/n_c) + \arcsin(NA/n_c)]$, где n_c - показатель преломления сердцевины световода. Информационный световой поток, дважды пройдя через толщу намагниченной пленки 4, приобретает поворот плоскости поляризации излучения за счет двойного эффекта Фарадея. Величина этого поворота зависит от амплитуды записанного информационного сигнала на носителе магнитной записи 7, далее информационный световой пучок, пройдя через поляризатор фотоприсемного блока, модулируется по амплитуде и попадает на фотоприемник, с которого снимается информационный сигнал, пропорциональный полю рассеивания носителя магнитной записи 7 в области щели 6, ширина которой может быть доведена до 5 мм. В зависимости от типа сигнала, записанного на носителе магнитной записи, электрический сигнал с фотоприемника может быть передан на любое исполнительное устройство.

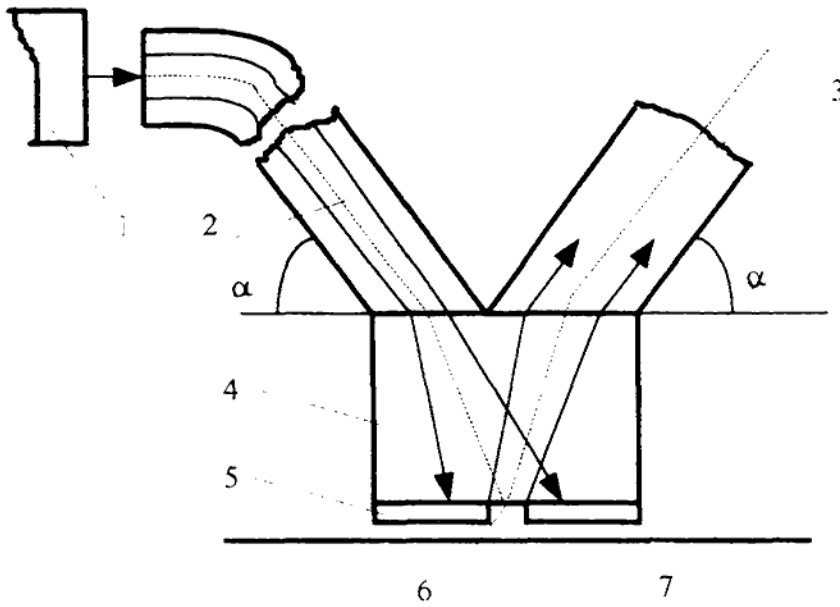


Рис. 4. Схема устройства для оптического воспроизведения информации с магнитного носителя

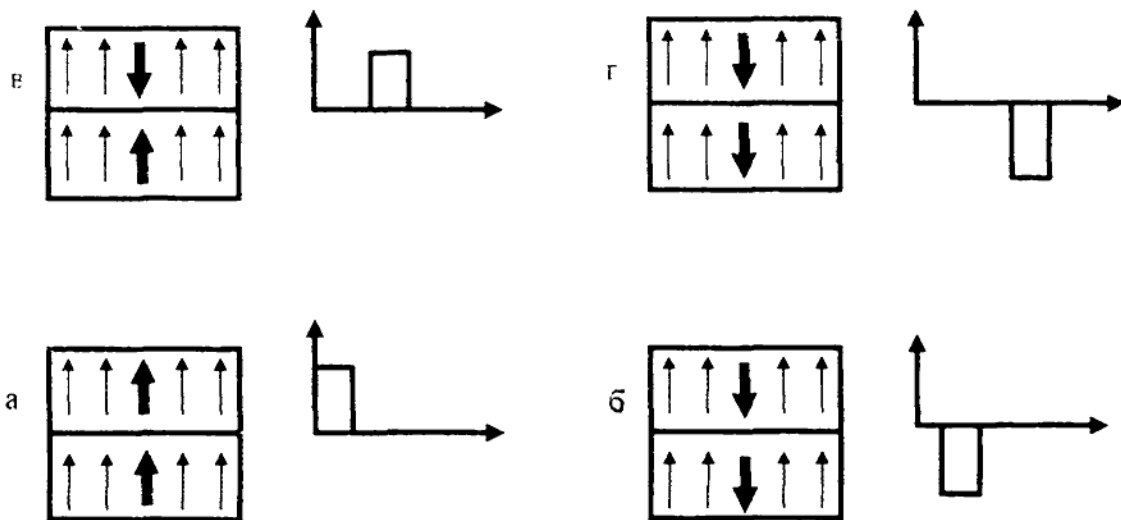


Рис. 5. Схематическое состояние ячеек матрицы записи-выборки в различных фазах работы устройства

Возможен иной вариант устройства для оптического воспроизведения информации [6], в котором световод в устройстве [5] заменен на призму с многослойным диэлектрическим износостойким покрытием.

Рассмотрим запоминающее устройство с произвольной выборкой информации [7]. Матрица записи-выборки выполнена в виде двухслойной ЭПФГ. Внешний слой пленки выращен из материала, имеющего меньшую величину коэрцитивной силы, чем материал внутреннего слоя. На поверхность пленки нанесена система токоведущих шин. В исходном состоянии все ячейки матрицы записи — выборки намагничены в одном направлении (рис. 5а). При записи информации в определенные ячейки матрицы записи-выборки от дешифраторов и подаются импульсы тока, обеспечивающие перемагничивание ячеек внешнего и внутреннего слоев матрицы (рис. 5 б). Затем на матрицу подается токовый сигнал меньшей величины и противоположного направления, позволяющий перемагничивать ячейки только внешнего слоя пленки и сохранить информацию, записанную во внутреннем слое (рис. 5 в). При выборке информации из какой-либо ячейки матрицы на эту ячейку подается токовый сигнал, позволяющий перемагнитить лишь внешний слой пленки (рис. 5 г). Плоскополяризованный свет, проходя через эту ячейку, будет претерпевать поворот плоскости поляризации во внешнем слое ячейки на угол φ . В зависимости от направления намагниченности внутреннего слоя данной ячейки плоскость поляризации света будет дополнительно поворачиваться на угол φ или $-\varphi$. В результате угол поворота плоскости поляризации света, прошедшего через выбранную ячейку матрицы, составит 2φ или 0 , в зависимости от информации (лог. "0" или "1"), записанной во внутреннем слое ячейки. Один из этих лучей гасится анализатором. Таким образом, регистрируя изменения интенсивности света, попадающего на фотоприемник при подаче токового сигнала выборки на определенную ячейку матрицы записи-выборки, считывают информацию, записанную во внутреннем слое данной ячейки.

Первое из описанных устройств адаптировано к считыванию сигналов звукового диапазона, а наличие системы световодов позволяет выделять узкую полосу сигналов. Второе устройство по сути является спектроанализатором сигналов в широком частотном диапазоне и обладает повышенным отношением сигнал/шум. Запоминающее устройство с произвольной выборкой информации является фактически магнитооптическим транспарантом и может быть использовано для обработки информации оптическими методами и в системах оперативной памяти ЭВМ.

3. Способы определения параметров магнитных пленок

Основными магнитными параметрами ЭПФГ являются: поле анизотропии, намагниченность насыщения, ориентация магнитных осей относительно поверхности пленок.

Поле одноосной анизотропии ЭПФГ измеряют следующим способом [8], (рис.6). Пленку 2 помещают между катушками 1 и воздействуют на нее криволинейным градиентным полем, ориентированным перпендикулярно ОЛН. ЭПФГ перемагничивается в тех областях, где магнитное поле было равно или превышало поле одноосной анизотропии. ДС, зародившаяся в этих областях, представляет собой смесь полосовых доменов и ЦМД разной полярности и отличается по конфигурации от неупорядоченной плотноупакованной системы ЦМД, получающихся при всех других значениях и ориентациях перемагничивающего поля. После окончания действия импульса наблюдаются три области конфигурационно отличающихся ДС. В тех областях пленки, где поле было равно или превышало поле одноосной анизотропии, появляются ДС, состоящие из неупорядоченных плотноупакованных ЦМД, причем линия, разделяющая ДС с ЦМД противоположной полярности, возникает в том объеме пленки, где касательная к магнитной силовой линии перпендикулярна нормали к пленке, что соответствует однородному зарождению ДС. В тех областях пленки, где магнитное поле было меньше поля одноосной анизотропии, пленка не перемагничивается и ДС представляет собой периодическую полосовую структуру (рис.7). Зная значение магнитного поля как функцию координат плоскости наблюдения, поле одноосной анизотропии определяют по координатам точки 1 (рис.7), разделяющей три различных по конфигурации типа ДС.

Измерения поля кубической анизотропии и наклона ОЛН производят с помощью устройства [9]. Пленка помещается в рабочий объем перемагничивающих катушек 1 (рис.6) и фиксируется на поворотном столике. По катушкам пропускается импульс тока, производится топографирование магнитного поля, фиксируется положение линии раздела разнополярных плотноупакованных ЦМД, затем пленку поворачивают на угол, задаваемый шагом изменения угла поворота пленки и повторяют цикл измерения положения границы раздела разных типов ДС при воздействии на образец криволинейным полем. По точкам измерения экстраполируется и строится зависимость отклонения линии однородного зарождения от линии смены знака, нормальной к плоскости пленки компоненты перемагничивающего поля в виде рядов Фурье, определяют угол наклона ОЛН относительно нормали образца по формуле $\text{ctg } \theta_0 = 2C/\Delta g$, где C - константа прибора, Δg - амплитуда первой гармоники. Константу кубической анизотропии K_1 определяют по формуле

$$K_1 = K_d/M_0^2 (2 \cdot 2^{1/2} C/3\Delta g + 1).$$

Проекции кристаллографических направлений на поверхности без применения сложных физических измерений можно определять достаточно простым магнитооптическим методом [10], заменив в устройстве [9] систему катушек на конический концентратор.

Ориентацию ОЛН определяют с помощью устройства (рис.8) [11]. Образец 1 закрепляют на лимбе 2, позволяющем вращать образец в собственной плоскости, и помещают его в магнитную систему 3, состоящую из двух взаимно перпендикулярных пар катушек Гельмгольца, одна из

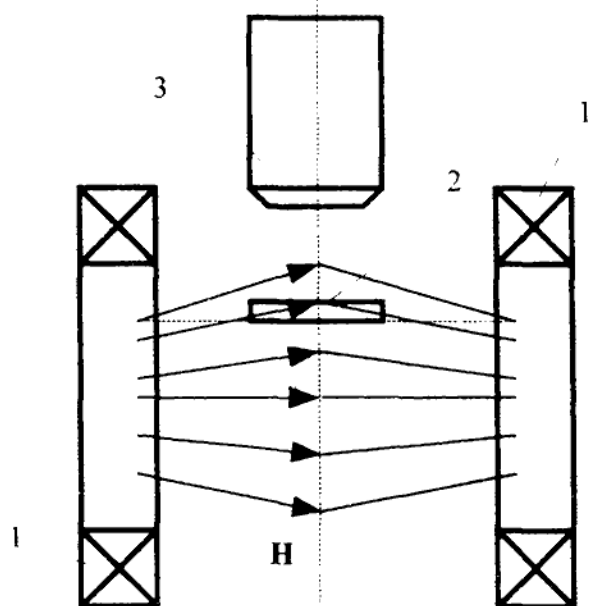


Рис. 6. Схема устройства для измерения параметров ЭПФГ

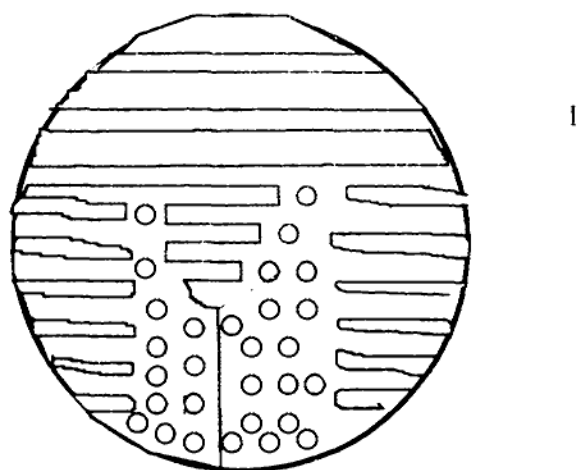


Рис. 7. Доменная структура одноосной ЭПФГ

которых создает поле, перпендикулярное плоскости образца, а другая — параллельное. Две пары катушек питаются от источника 4 двумя синусоидальными токами, сдвинутыми на 90° друг относительно друга, и создают магнитное поле, вращающееся в плоскости, перпендикулярной плоскости образца. Перпендикулярно плоскости образца направляют луч лазера 5, проходящий через поляризатор 6. Проходя через образец, луч лазера попадает на анализатор 7, который находится в скрещенном с поляризатором положении, и далее — на фотоприемник 8. Затем измеряют сдвиг фазы между сигналом с фотоприемника и сигналом с резистора 9, пропорциональным току катушек, создающих поле, параллельное плоскости образца, с помощью двухлучевого осциллографа 10. На вход внешней синхронизации осциллографа подается сигнал с формирователя прямоугольных импульсов 11, на который поступает сигнал с резистора 9. Вращая лимб с образцом, отыскивают положение, когда сдвиг фазы максимален. На рис.9 схематически изображены доменная структура и различные фазы вращения поля H_0 . ОЛН лежит в плоскости, которая совпадает с плоскостью вращения поля H_0 , направление ОЛН составляет угол θ_0 с нормалью к пленке. Стрелками на рисунке показаны направления векторов намагниченности в пределах каждого домена, совпадающие с направлением ОЛН. При отсутствии внешнего поля фарадеевское вращение равно нулю, так как образец размагничен, интенсивность проходящего света минимальна. При приложении внешнего поля ориентации β^+ энергетически выгодными становятся домены с вектором намагниченности, направленным вверх, а при ориентации поля β^- — вниз. Знаки фарадеевского вращения для света, перпендикулярного поверхности пленки для этих двух направлений, противоположны. При ориентации поля вдоль β , где $\beta = \theta_0 + 90^\circ$, фарадеевское вращение меняет знак, так как в этом положении меняет знак проекция магнитного поля на направление ОЛН. Поэтому, это направление внешнего поля соответствует размагниченному состоянию пленки, нулевому фарадеевскому вращению и, следовательно, минимальной интенсивности светового сигнала.

В заключение отметим, что использование ЭПФГ в прикладных целях позволяет создать класс новых методов и устройств, которые находят применения как в физических исследованиях, так и в микроэлектронике и вычислительной технике.

ЛИТЕРАТУРА

1. Эшенфельдер А. Физика и техника цилиндрических магнитных доменов.— М.: Мир, 1983.— 496 с.
2. А.с. 1455332 СССР, МКИ G 02 F 1/09. Датчик магнитного поля / Вилесов Ю.Ф., Дубинко С.В., Карпенко Н.И. и др.— Оpubл. 30.01.89, Бюл. № 4.
3. А.с. 1348760 СССР, МКИ G 01 R 33/00. Устройство для измерения напряженности магнитного поля / Дубинко С.В., Крамарь А.Д., Грошенко Н.А., Пухов И.К.— Оpubл. 31.10.87, Бюл. № 40.

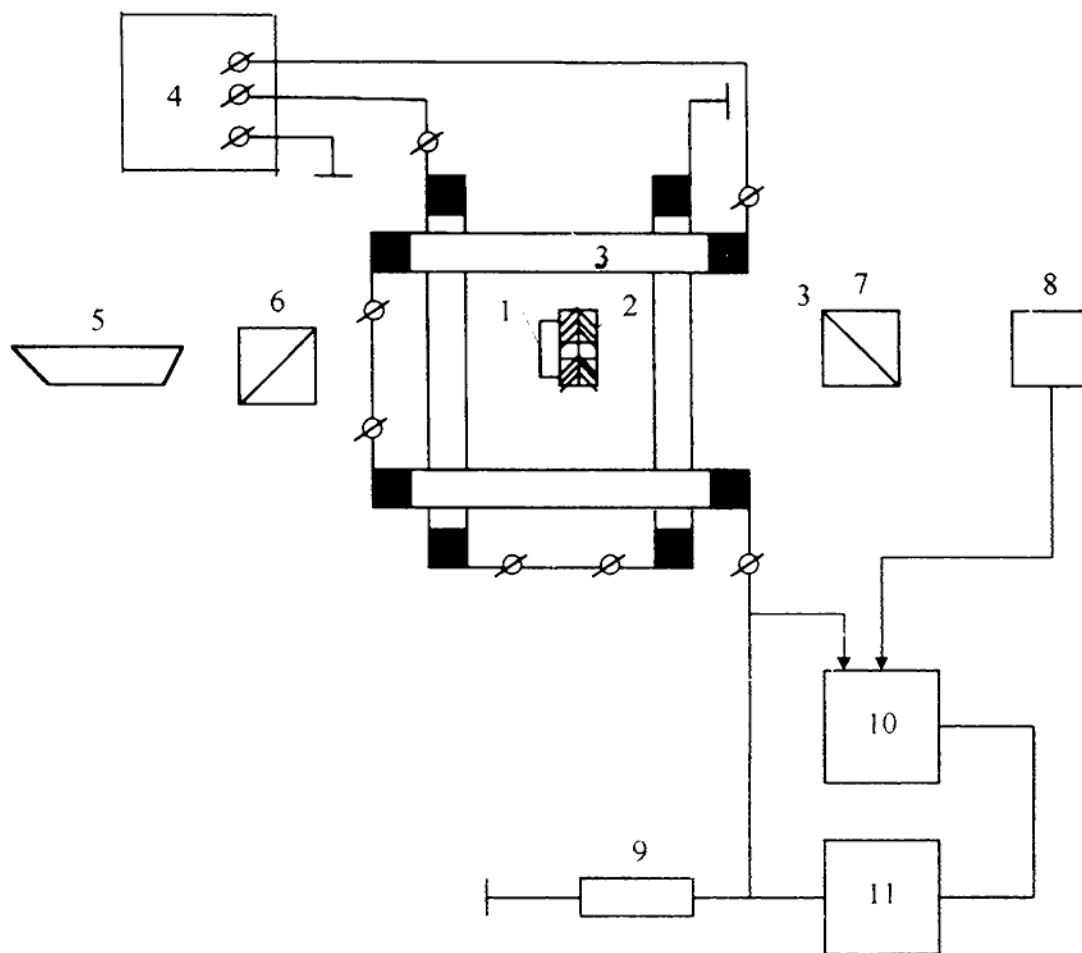


Рис. 8. Схема устройства для определения ориентации ОЛН

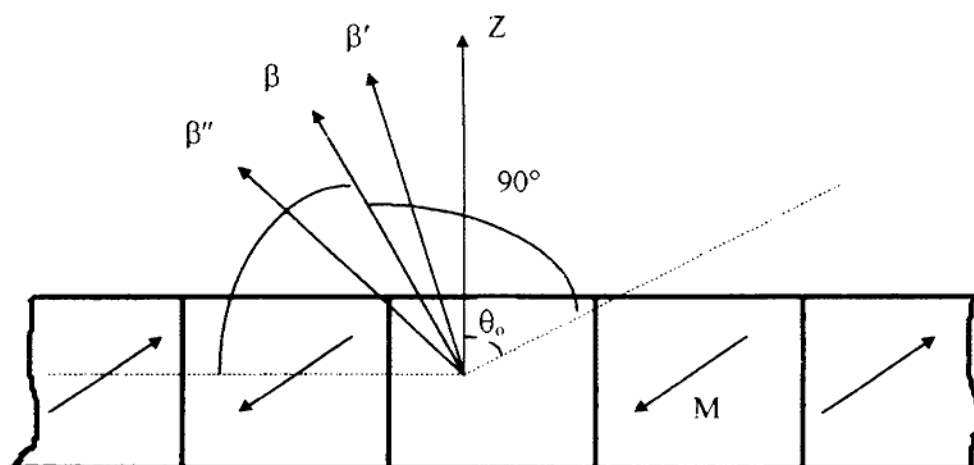


Рис. 9. ДС и фазы вращения H_ω

4. А.с. 1078369 СССР, МКИ G 01 R 33/05. Устройство для измерения радиуса кривизны магнитного поля / Дубинко С.В., Иванов В.И., Пухов И.К.— Оpubл. 07.03.84, Бюл. № 9.
5. А.с. 1522281 СССР, МКИ G 11 B 11/18. Устройство для оптического воспроизведения информации с носителя магнитной записи / Дубинко С.В., Карпенко Н.И., Панченко В.Б.— Оpubл. 15.11.89, Бюл. № 42.
6. А.с. 1732289 СССР, МКИ G 01 R 23/17. Магнитооптическая считывающая головка / Вилесов Ю.Ф., Дубинко С.В., Дубинин А.В., Ярыгин А.В.— Оpubл. 07.05.92, Бюл. № 17.
7. А.с. 1287233 СССР, МКИ G 11 C 13/06. Запоминающее устройство с произвольной выборкой / Дубинко С.В., Карпенко Н.И., Чельдиев М.И., Болдырев А.С.— Оpubл. 30.01.87, Бюл. № 4.
8. А.с. 1245096 СССР, МКИ G 01 R 33/12. Способ определения поля одноосной анизотропии пленок с цилиндрическими магнитными доменами / Дубинко С.В., Иванов В.А., Пухов И.К.
9. А.с. 1382194 СССР, МКИ G 01 R 33/05. Способ измерения поля анизотропии пленок с цилиндрическими магнитными доменами / Дубинко С.В., Иванов В.А.
10. А.с.1393102 СССР, МКИ G 01 R 33/12. Способ определения проекций кристаллографических направлений в пленках с цилиндрическими доменами / Дубинко С.В., Иванов В.А., Мицай Ю.Н.
11. А.с.1517558 СССР, МКИ G 01 R 33/04. Способ определения ориентации оси легкого намагничивания прозрачных пленок / Бурым Ю.А., Дубинко С.В.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ОБМЕННО СВЯЗАННОЙ СИСТЕМЕ МАГНИТНЫХ МОМЕНТОВ

С. Н. Полулях, кандидат физико-математических наук, доцент

Введение.

Одним из основополагающих понятий современной теории магнитоупорядоченного состояния вещества является понятие спиновых волн. Наиболее полное математическое описание спиновых волн достигается в рамках квантовомеханической теории для трехмерной спиновой системы. В то же время, для качественного описания явления достаточно часто используется простая модель одномерной цепочки классических магнитных моментов, связанных обменным взаимодействием (см. например, [1, 2]). Основное преимущество такого подхода состоит в наличии простой векторной модели, позволяющей наглядно представить динамические процессы в системе.

В настоящей работе рассматривается компьютерная модель одномерной цепочки классических магнитных моментов. Предполагается, что каждый магнитный момент прецессирует в эффективном магнитном поле обменных взаимодействий. Математическая формулировка задачи сводится к записи выражения для эффективного магнитного поля и решению уравнений движения магнитного момента в этом поле. Эффективное поле обменных взаимодействий в системе прецессирующих магнитных моментов зависит от времени и для численного решения уравнений движения в этом случае предлагается метод микроповоротов. Путем варьирования начальных условий производится моделирование возбуждения спиновых волн и их взаимодействия как в однородной, так и в неоднородной цепочке магнитных моментов.

Отличие предлагаемого подхода от известных ранее состоит в том, что сравнительно простые математические методы используются лишь на этапе формулировки задачи для описания алгоритма вычисления временной зависимости проекций вектора магнитного момента на координатные оси. Проведение дальнейших расчетов с помощью компьютера позволяет избавиться как от громоздких промежуточных выкладок, так и от дополнительных ограничений, возникающих в процессе решения (например, таких, как разложения в бесконечные ряды с последующим использованием лишь нескольких первых членов ряда). Стандартный недостаток компьютерных методов "что заложишь — то получишь" в данном случае становится преимуществом, так как фактически закладываются только свойства системы. Результатом

является наличие или отсутствие тех или иных явлений в системе с заданными свойствами. Таким образом, предлагаемый подход не заменяет а существенно дополняет стандартные аналитические методы исследования.

Целью моделирования является качественный анализ влияния динамических процессов в электронной спиновой системе магнетика на сигналы ядерного магнитного резонанса (ЯМР). Известно, что ЯМР в магнитоупорядоченных веществах предлагается в качестве одного из экспериментальных методов исследования динамики электронной спиновой системы [3]. В тоже время, при анализе результатов ЯМР эксперимента в магнетиках возникают проблемы, которые не всегда удастся решить в рамках существующих подходов [4 - 6].

1. Модель.

Для цепочки, состоящей из N магнитных моментов будем учитывать только гейзенберговские обменные взаимодействия между ближайшими соседями [1, 2]. С целью моделирования квазинсограниченной системы будем использовать циклические граничные условия [7], т.е. для N - го магнитного момента будем учитывать обменные взаимодействия с 1 - м и $(N - 1)$ - м магнитными моментами. Выражение для полной энергии обменных взаимодействий представим в виде

$$E = -J \cdot \sum_{j=1}^{N-1} (\vec{\mu}_j \cdot \vec{\mu}_{j+1}) - J \cdot \vec{\mu}_N \cdot \vec{\mu}_1, \quad (1)$$

где J — параметр обменных взаимодействий, $\vec{\mu}_j$ — магнитный момент j - й частицы.

Эффективное магнитное поле, действующее на магнитный момент $\vec{\mu}_j$ описывается выражением

$$\vec{B}_j^{\text{eff}} = - \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial \vec{\mu}_j} = \begin{cases} J \cdot (\vec{\mu}_N + \vec{\mu}_2), & j = 1; \\ J \cdot (\vec{\mu}_{j-1} + \vec{\mu}_{j+1}), & 1 < j < N; \\ J \cdot (\vec{\mu}_{N-1} + \vec{\mu}_1), & j = N. \end{cases} \quad (2)$$

Будем полагать, что в основном состоянии магнитные моменты всех частиц параллельны друг другу и ориентированы перпендикулярно оси цепочки. Лабораторную систему координат (ЛСК) представляется удобным выбрать так, что ось Oy направлена вдоль оси цепочки а ось Oz — вдоль направления ориентации магнитных моментов в исходном состоянии.

Уравнения движения классического магнитного момента $\vec{\mu}$ в магнитном поле \vec{B} представим в виде

$$\frac{d\vec{\mu}}{dt} = \gamma \cdot [\vec{\mu} \times \vec{B}] \quad (3)$$

где γ — гиромагнитное отношение. Наиболее простой вид решения уравнений (3) имеют в том случае, когда магнитное поле не зависит от времени и система координат выбрана так, что отлична от нуля только z компонента магнитного поля. В случае прецессии магнитных моментов в эффективном поле обменных взаимодействий величина и направление поля зависят от времени вследствие изменения пространственной ориентации магнитных моментов. В этом случае временной интервал t_0 , соответствующий полному времени наблюдения над системой, можно разбить на достаточно малые, но конечные интервалы длительностью Δt так, что в течение интервала Δt магнитное поле можно считать не зависящим от времени. Если $\vec{\mu}(t)$ — вектор магнитного момента в момент времени t , то в момент времени $t' = t + \Delta t$ получаем

$$\vec{\mu}(t') = M_1^- \cdot M_2^- \cdot \begin{pmatrix} \cos \Omega & \sin \Omega & 0 \\ -\sin \Omega & \cos \Omega & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot M_2^+ \cdot M_1^+ \cdot \vec{\mu}(t), \quad (4)$$

где

$$M_1^- = \begin{pmatrix} \cos \varphi & \pm \sin \varphi & 0 \\ \mp \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad M_2^- = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & \mp \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \pm \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix},$$

$$\cos \varphi = B_x / B_-, \quad \sin \varphi = B_y / B_-, \quad \cos \theta = B_z / B, \quad \sin \theta = B / B,$$

$$B_- = \sqrt{B_x^2 + B_y^2}, \quad B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}, \quad \Omega = \gamma \cdot B \cdot \Delta t.$$

Здесь $B_{x,y,z}$ — компоненты вектора магнитного поля в ЛСК. При вычислении компонент вектора магнитного момента в (4) с помощью матриц поворота $M_{1,2}^\pm$ осуществляется переход в систему координат, в которой отлична от нуля только z компонента поля. В этой системе координат производится поворот магнитного момента на угол Ω вокруг оси Oz. Затем осуществляется переход в ЛСК. Фактически, выражения (4) обеспечивают решение уравнений (3) с помощью микроповоротов.

В результате непосредственных расчетов на ЭВМ получено, что метод микроповоротов обеспечивает более высокую устойчивость решений уравнений движения (3) по сравнению со стандартными численными методами решения систем дифференциальных уравнений [7]. В

частности, в рамках предлагаемого подхода, автоматически обеспечивается сохранение модуля магнитного момента. При этом следует отметить, что для вычисления компонент вектора $\vec{\mu}(t)$ с помощью IBM PC AT при достаточно больших временах t , соответствующих более чем одному периоду прецессии, необходимо использовать переменные удвоенной точности.

Для компьютерного моделирования динамических свойств одномерной цепочки использовался следующий алгоритм. Система искусственно выводилась из основного состояния путем отклонения одного или нескольких магнитных моментов цепочки от оси Oz ЛСК. Затем, с помощью выражений (4), вычислялись "новые" значения проекций магнитных моментов всех частиц на ось ЛСК. Для вычисления эффективного магнитного поля (2) использовались "старые" значения проекций магнитных моментов. После последовательного перебора всех частиц "новые" компоненты использовались в качестве "старых", вновь вычислялись "новые" значения проекций магнитных моментов и т.д. Фактически, предлагаемый алгоритм подобен известному в компьютерной физике [6] методу молекулярной динамики.

С целью сохранения общности полученных результатов представляется удобным перейти к безразмерным единицам. Для этого компоненты вектора магнитного момента нормируем на величину модуля этого вектора $|\vec{\mu}|$. Компоненты вектора индукции магнитного поля нормируем на величину $J \cdot \vec{\mu}$. Безразмерное время будет отличаться от истинного на множитель $\gamma \cdot J \cdot \vec{\mu}$. Далее в работе под величинами $\vec{\mu}$, \vec{B} и t понимаются соответствующие величины, выраженные в безразмерных единицах.

2. Результаты расчетов.

При проведении расчетов число частиц в цепочке N выбиралось равным степени двойки с целью возможности применения быстрого дискретного преобразования Фурье [7] к полученным результатам. Численное значение $N = 128$ получено из соображений наиболее наглядного представления результатов при минимально возможном числе частиц. Длительность временного интервала Δt подобрана так, что дальнейшее уменьшение длительности не приводит к изменению результатов расчетов и при этом получено значение $\Delta t = 2\pi \times 10^{-4}$.

Рассмотрим ситуацию, когда все магнитные моменты цепочки одинаковы (однородная цепочка). Используем стандартную процедуру возбуждения волны, состоящую в отклонении первого магнитного момента от оси Oz на угол α в плоскости xOz ЛСК. Затем предоставим

возможность всем магнитным моментам прецессировать в эффективных магнитных полях обменных взаимодействий (2). Временные зависимости проекций магнитных моментов частиц на ось Ox ЛСК при $\alpha = \pi/270$ приведены на рис.1. Возле каждого графика указан порядковый номер магнитного момента в цепочке. Из данных, приведенных на рис.1 следует, что при рассмотренном возбуждении в цепочке магнитных моментов возникают колебания типа волнового пакета. Волновые пакеты распространяются симметрично в обоих направлениях от отклоненного магнитного момента. Волновой пакет, распространяющийся в отрицательном направлении оси Oy , виден на рис.1 для 36-го и 41-го магнитных моментов цепочки при больших временах. Дополнительно проведенные расчеты показали что, скорость распространения волнового пакета не зависит от угла α при его изменении, по крайней мере, в пределах от нуля до 2° .

С целью возбуждения монохроматической волны использовалась следующая процедура. Первый магнитный момент отклонялся от оси Oz на угол α . В течение времени τ для первого магнитного момента вместо эффективного поля обменных взаимодействий (2) использовалось поле $\vec{B} = (0 \ 0 \ B_1)$. При этом первый магнитный момент прецессировал вокруг оси Oz ЛСК с частотой ω (в выбранных выше безразмерных единицах частота ω численно равна величине индукции магнитного поля B_1). Все остальные магнитные моменты двигались под действием эффективного магнитного поля обменных взаимодействий (2). По истечению временного промежутка τ поле B_1 "выключалось" и первый магнитный момент также начинал двигаться под действием эффективных обменных полей. На рис.2 приведены временные зависимости x компонент магнитных моментов при $\alpha = \pi/270$, $B_1 = 1$ и $\tau = 6.5 \pi$.

Стандартная проблема теории спиновых волн — вопрос о дисперсионном соотношении. Для решения этого вопроса в рамках предлагаемой модели использовалась следующая процедура. Способом, описанным выше, в цепочке магнитных моментов возбуждалась плоская монохроматическая волна. В момент времени t_0 фиксировались массивы $\mu_x(y_j)$ и $\mu_y(y_j)$ — массивы пространственного распределения компонент магнитных моментов частиц цепочки. Здесь $y_j = j \cdot a$, где a — расстояние между ближайшими частицами цепочки. Для пространственного распределения поперечных компонент магнитных моментов использовалось дискретное преобразование Фурье. Обнаружено, что результат преобразования Фурье зависит от

момента времени t_0 , в который проводится преобразование. Чем дольше возбуждается волна, тем более четко выделяются спектральные максимумы в пространственном Фурье спектре.

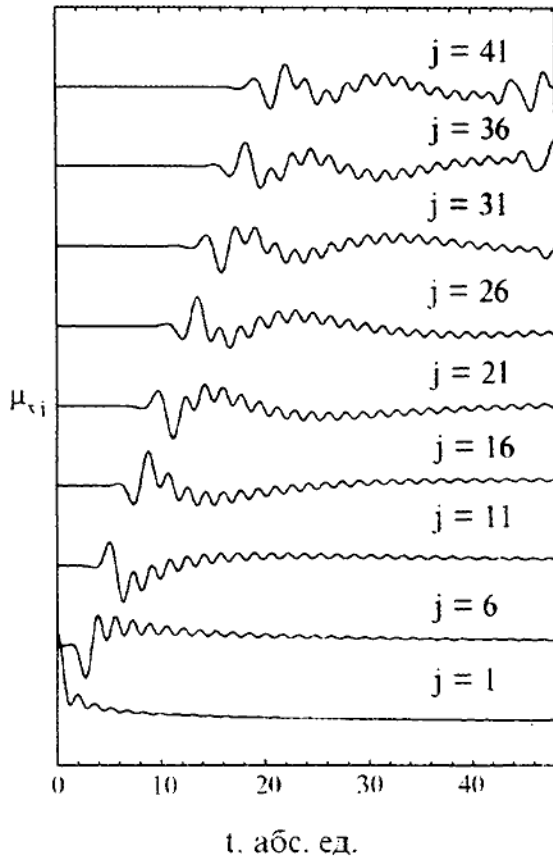


Рис. 1.

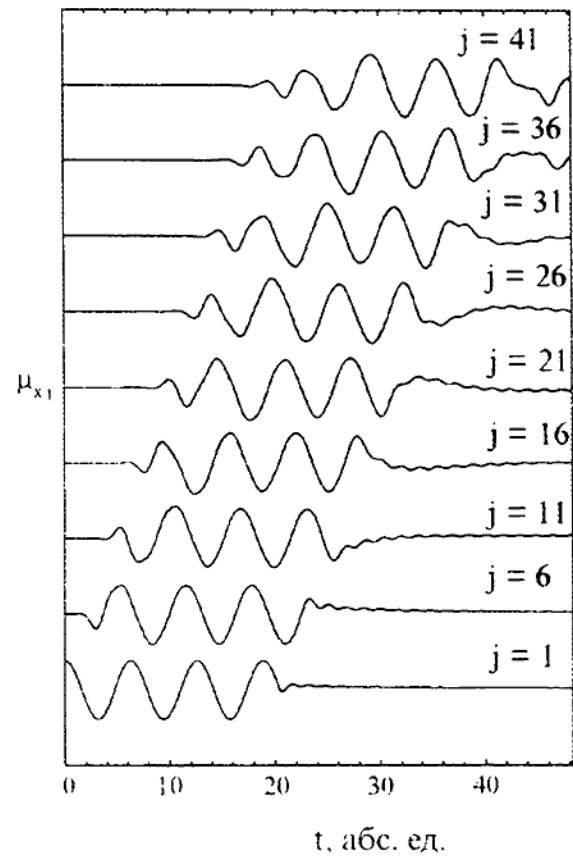


Рис. 2.

В результате использования преобразования Фурье для пространственного распределения магнитных моментов при различных значениях B_1 получена зависимость модуля волнового вектора $k = 2 \cdot \pi \cdot a / \lambda$ (λ — длина волны, выраженная в единицах) от частоты ω . На рис.3 кружочками приведены расчетные значения k , соответствующие различным частотам ω и $t_0 = 15 \pi$. При таком выборе t_0 практически все магнитные моменты цепочки принимают участие в волновом движении, однако волны, распространяющиеся в противоположных направлениях от первого магнитного момента, друг с другом не перекрываются. Пунктирная линия на рис.3 — расчетная зависимость $k = \omega^{1/2}$. Как следует из данных, приведенных на рис.3, при малых k действительно имеет место квадратичная зависимость частоты от волнового вектора, что хорошо согласуется с известными теоретическими результатами [1, 2].

Верхняя граница для значений волнового вектора k на рис.3 обусловлена ограничениями дискретного преобразования Фурье.

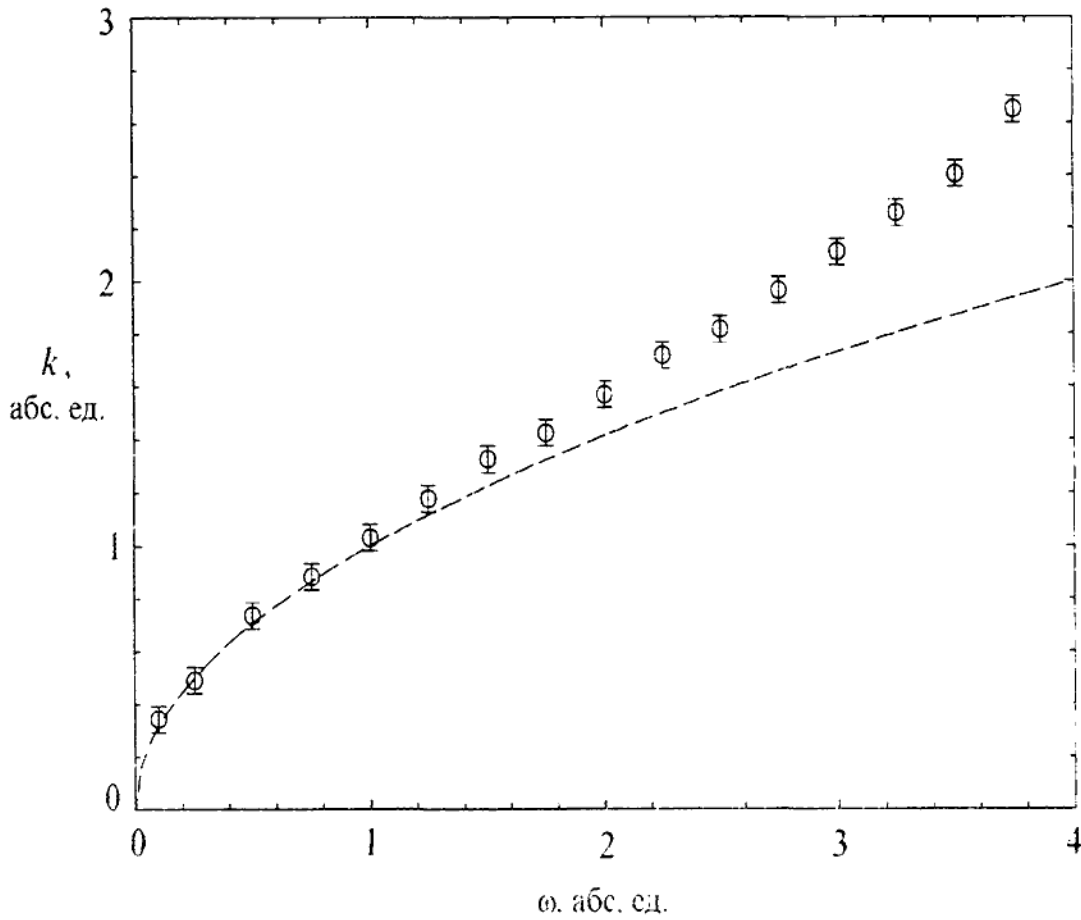


Рис.3.

В рамках предлагаемой модели представляется интересным рассмотреть ситуацию одновременного возбуждения в цепочке двух монохроматических волн. На рис. 4 приведены расчетные зависимости x компонент магнитных моментов от времени (сплошные линии) при отклонении первого магнитного момента от оси Oz на угол $\alpha = \pi/270$ и последующей принудительной прецессии этого момента в поле $B_1 = 1.7$ в течение времени $\tau = 2.75 \pi$. Одновременно, 41-й магнитный момент отклонялся на угол $\alpha = -\pi/270$ и в течение того же времени τ прецессировал в поле $B_1 = 2.75$. Пунктирные линии на рис.4 соответствуют

абсолютным значениям ($\mu_j = \sqrt{\mu_x^2 + \mu_y^2}$) поперечных компонент магнитных моментов. Возле каждой зависимости указаны порядковые номера частиц в цепочке.

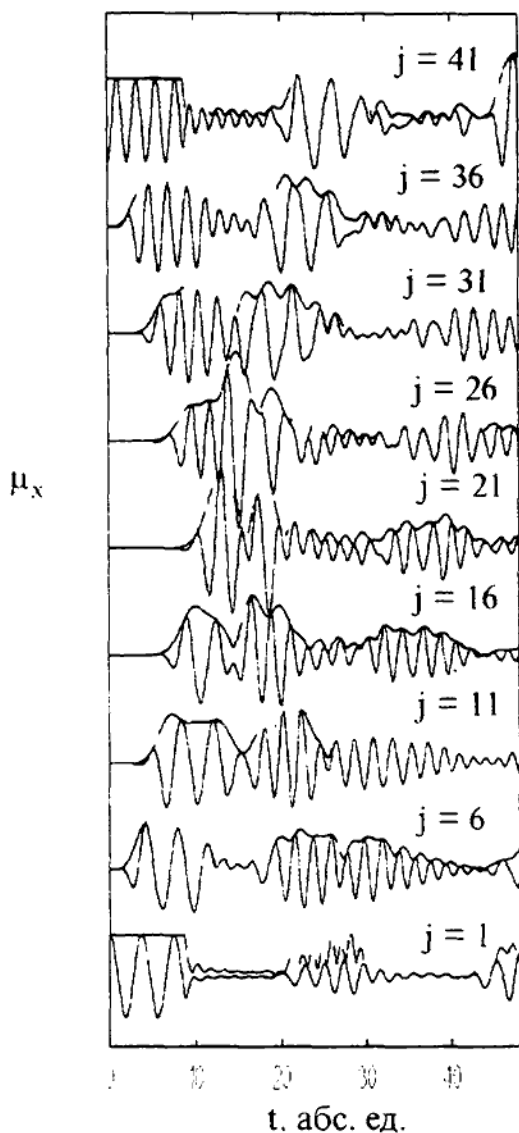


Рис. 4.

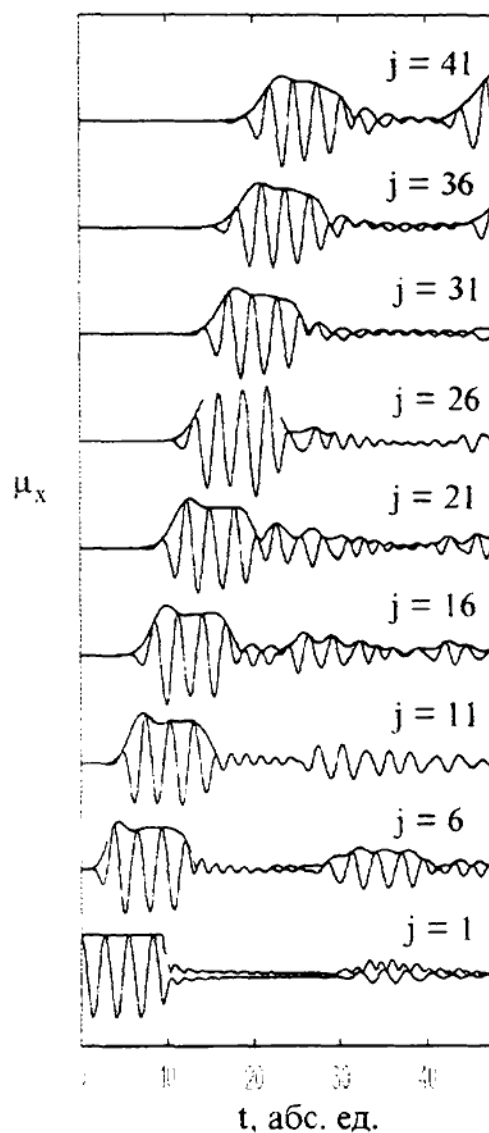


Рис. 5.

В результате расчетов, проведенных с использованием преобразования Фурье для временных зависимостей поперечных компонент магнитных моментов получено, что в однородной цепочке волны распространяются независимо друг от друга. В точках пространства, где одновременно сосуществуют две волны магнитные моменты участвуют одновременно в двух прецессионных

движениях. В результате имеют место колебания модуля поперечной проекции магнитного момента.

В качестве неоднородной цепочки предлагается рассмотреть цепочку магнитных моментов, содержащую примесь. Первый тип примеси — магнитный момент с гиромангнитным отношением γ , отличным от гиромангнитного отношения остальных магнитных моментов цепочки. На рис.5 приведены расчетные зависимости поперечных компонент магнитных моментов от времени (сплошные линии — проекции на ось Ox ЛСК, пунктирные — модули поперечных компонент), полученные при численном значении гиромангнитного отношения 31-й частицы, равном 0.75 от гиромангнитного отношения остальных частиц. Условия возбуждения волны: $\alpha = \pi/270$, $B_1 = 2.25$, $\tau = 3\pi$. Из сравнения результатов, приведенных рис.1 и рис.5, следует, что основное отличие неоднородной цепочки от однородной состоит в наличии волны, отраженной от магнитного момента, моделирующего примесь.

Второй рассмотренный тип примеси — примесь с сильной спин — орбитальной связью. С целью моделирования такой примеси для n -го магнитного момента цепочки, наряду с эффективным полем обменных взаимодействий, учитывалось дополнительное эффективное поле $B_2 = K_1 \cdot \mu_n$. Фактически, это дополнительное поле является эффективным полем магнитной кристаллографической анизотропии для одноосных кристаллов [9]. В этом случае также обнаружена волна, отраженная от примеси. Однако амплитуда этой волны становится заметной при численных значениях константы анизотропии K_1 , сравнимых с величиной параметра обменных взаимодействий J . Однако, столь сильная анизотропия вряд ли может рассматриваться как физически реальная.

3. Обсуждение полученных результатов.

Полученные в рамках предлагаемой численной модели расчетные результаты в принципе согласуются с известными результатами, полученными при помощи стандартных аналитических методов [1, 2, 9]. Особенности, связанные с зависимостью типа волны (волновые пакеты и цуги монохроматических волн) от условий возбуждения (рис. 1, 2) а также расплывание волнового цуга (рис. 2, 4, 5) в спин — волновой теории традиционно не обсуждаются, однако обнаруженные особенности соответствуют общим положениям теории колебаний и волн.

Интересно отметить следующее. В рамках предлагаемой модели максимальное значение эффективного обменного поля (2) достигается при параллельной ориентации магнитных моментов, ближайших к заданному. Численное значение величины этого поля, в выбранных безразмерных единицах, равно 2, что соответствует частоте $\omega = 2$. В тоже время, в результате проведенных расчетов обнаружены монохроматические волновые цуги с $\omega > 2$ (рис. 3 — 5). При этом оказалось, что увеличения поля B_1 (или, что тоже самое, частоты ω) приводит к ухудшению условий возбуждения волны и при $\omega > 10$ волновой процесс в цепочке практически не возбуждается. Таким образом, вопрос о верхней границе спин — волнового спектра в одномерной цепочке магнитных требует дальнейшего уточнения.

Полученные расчетные результаты представляется интересным обсудить с точки зрения влияния электронной спиновой динамики на магнитный резонанс ядерной спиновой системы магнетика. Известно, что основная особенность ЯМР в магнетиках состоит в наличии сильных магнитных сверхтонких полей на ядрах [3] и величина этого поля пропорциональна электронной намагниченности. Как правило, характерные частоты волновых процессов в электронной спиновой системе на несколько порядков выше частоты ЯМР и такие процессы не должны оказывать заметного влияния на магнитный резонанс ядер. В тоже время, из данных, приведенных на рис. 5, 6 следует, что при определенных условиях могут наблюдаться колебания поперечных компонент электронных магнитных моментов на частотах, ниже резонансной. В силу сохранения модуля вектора магнитного момента, при этом также наблюдаются колебания продольной компоненты магнитного момента. Кроме того, Фурье анализ временных зависимостей поперечных компонент магнитных моментов в случае возбуждения волны путем простого отклонения одного магнитного момента от положения равновесия показывает, что в этом случае реализуется широкий непрерывный частотный спектр с отличной от нуля спектральной плотностью на нулевой частоте.

Очевидно, что ситуация, когда магнитный момент может принимать участие в двух и более колебаниях и число колебаний является флуктуирующей величиной характерно для тепловых магнонов. При этом, в силу магнитных сверхтонких взаимодействий, будут флуктуировать локальные продольное и поперечное магнитные поля на ядрах. Флуктуации локальных магнитных полей на ядрах приводят к релаксации ядерной намагниченности. Детальное обсуждение влияния динамических процессов в обменно-связанной электронной спиновой системе образца на ядерную магнитную релаксацию в магнетиках выходит за рамки предлагаемой работы, однако следует

отметить, что увеличение скорости как продольной, так и поперечной ядерной магнитной релаксации с увеличением температуры наблюдается экспериментально (см. например [4]). Кроме того, низкочастотные колебания намагниченности могут быть ответственны за экспериментально наблюдаемый методом ЯМР [4 - 6] статический и динамический ориентационный разброс электронной намагниченности в кристаллах.

Заключение.

Таким образом, в рамках предложенной численной модели одномерной цепочки обменно-связанных магнитных моментов получены основные свойства такой цепочки непосредственно из "первопричин". Фактически все ограничения модели закладываются на этапе постановке задачи и результаты численного эксперимента могут быть использованы для непосредственной проверки результатов, полученных аналитическими методами. К преимуществам предлагаемого подхода можно отнести отсутствие громоздких промежуточных выкладок, возможность относительно простой реализации описанного алгоритма при помощи стандартных методов программирования. Кроме того, численное исследование свойств системы требует тщательной и четкой формулировки физической постановки задачи.

Предполагается дальнейшее развитие предлагаемого подхода на системы большей размерности и также для моделирования влияния динамических процессов в обменно-связанной электронной спиновой системе образца на процессы ядерной релаксации в магнитоупорядоченных веществах.

В заключении автор выражает благодарность профессору Бержанскому В. Н. за полезные обсуждения результатов работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. Гл.16. М.: Наука, 1978.
2. Маделунг О. Теория твердого тела. Гл.6. М.: Наука, 1980.
3. Куркин М. И., Туров Е. А. ЯМР в магнитоупорядоченных веществах и его применения. М.: Наука, 1990.
4. Бержанский В. Н., Полулях С. Н. ФТТ. 31 (1989) 256.
5. Abelyashev G. N., Berzhansky V. N., Polulyakh S. N., Sergeev N. A. Multiple structure and relaxation of quadrupolar spin echoes in magnetic solids. In Abstr. of "The European Conference Physics of Magnetism 96". Poznan, 1996, P. 113.
6. Abelyashev G. N., Polulyakh S. N., Berzhanskij V. N., Sergeev N. A. JMMM. 147 (1995) 305.

7. Гулд Х., Тобочник Я. Компьютерное моделирование в физике. Т.1. М.: МИР, 1990.
8. Дьяконов В. П. Справочник по алгоритмам и программам на языке Бейсик для персональных ЭВМ. Гл. 5. М.: Наука, 1987.
9. Гуревич А. Г. Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках. М.: Наука, 1975.

ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ НА МАГНИТНЫЕ СОСТОЯНИЯ ЛЕГКОПЛОСКОСТНЫХ АНТИФЕРРОМАГНЕТИКОВ

Ю. Н. Мицай, доктор физ.-мат. наук, профессор,

Ю. А. Фридман, кандидат физ.-мат наук, доцент, Г. Э. Байрамалиева

1. Легкоплоскостные антиферромагнетики являются традиционным объектом изучения [1]. Интерес к исследованию подобных систем связан с тем, что их динамика определяется голдстоуновским спектром элементарных возбуждений, а их магнитострикционные свойства усиливаются обменным взаимодействием.

В последнее время изучаются низкотемпературные антиферромагнетики такие как $\text{NiSiF}_6 \times 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{NiZrF}_6 \times 6\text{H}_2\text{O}$ и ряд других соединений. Поведение подобных систем в магнитных полях, перпендикулярных легкой плоскости изучалось в ряде работ [2,3].

Поведение таких систем в магнитном поле, ориентированном в легкой плоскости изучено явно недостаточно. В настоящей работе определены возможные магнитные состояния исследуемой системы в продольном поле при наличии внешнего давления.

Изучение магнитных состояний магнитоупорядоченных веществ под воздействием внешнего давления является эффективным способом исследования таких систем, поскольку внешнее давление эффективно проявляется в виде магнитной анизотропии.

2. Исследуемой системой является сильно анизотропный ($\beta \geq 1$) антиферромагнетик с взаимодействием Дзялошинского. Суммарный магнитный момент лежит в легкой плоскости, в этой же плоскости (ХОУ) приложено внешнее магнитное поле. Изучим возможные магнитные состояния, реализуемые в системе под действием внешнего давления на статические и динамические свойства исследуемого магнетика. Далее считаем, что внешнее давление также приложено в легкой плоскости ($P < 0$). Как мы увидим далее это наиболее интересный случай.

Гамильтониан нашей системы имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \mathbf{H} = & -H \sum_{n_1} S_{n_1}^x + \frac{\beta}{2} \sum_{n_1} (S_{n_1}^z)^2 - \sum_{n_1, n_2} \{ J(n_1 - n_2) \mathbf{S}_{n_1} \cdot \mathbf{S}_{n_2} - D(n_1 - n_2) [\mathbf{S}_{n_1} \times \mathbf{S}_{n_2}]_z \} + \\ & + \nu \sum_{n_1} S_{n_1}^j S_{n_1}^k U_{jk}(n_1) + \int dr \left\{ \frac{\lambda + \eta}{2} (U_{xx}^2 + U_{yy}^2 + U_{zz}^2) + \eta (U_{xy}^2 + U_{xz}^2 + U_{yz}^2) + \right. \\ & \left. + \lambda (U_{xx} U_{yy} + U_{xx} U_{zz} + U_{yy} U_{zz}) + P U_{xx} \right\} \end{aligned} \quad (1)$$

здесь $S_{n_i}^\alpha$ - спиновый оператор в узле i -й подрешетки ($\alpha = x, y, z; i = 1, 2$),

$D(n_1 - n_2) < 0$ - взаимодействие Дзялошинского,

ν - константа магнитоупругой (МУ) связи,

λ, η - упругие модули,

$U_{jk}(n_i)$ - тензор деформаций.

В (1) первые три слагаемых описывают магнитную подсистему, пятое слагаемое - упругую подсистему, а четвертое - МУ связь. Дальнейшие исследования будем проводить в низкотемпературном пределе ($T \ll T_N$, T_N - температура Нееля), поскольку в этом случае все расчеты удастся провести аналитически. Кроме того, не теряя общности, предположим, что спин магнитного иона $\langle S \rangle = 1$.

Ориентация магнитных моментов подрешеток, и для системы, описываемой (1) можно представить так как показано на рис. 1.

Повернем систему координат вокруг оси OZ (перпендикулярной плоскости рис.1) так, чтобы новая ось квантования ξ_1 была параллельна вектору намагниченности i -й подрешетки. В этой локальной системе координат введем новые спиновые операторы $S_{n_i}^{\xi}, S_{n_i}^{\eta}, S_{n_i}^{\zeta}$, связанные со старыми соотношениями:

$$\begin{aligned} S_{n_i}^x &= S_{n_i}^{\xi} \cos \Theta_i + (-1)^{l+1} S_{n_i}^{\eta} \sin \Theta_i; \\ S_{n_i}^y &= (-1)^{l+1} S_{n_i}^{\xi} \sin \Theta_i + S_{n_i}^{\eta} \cos \Theta_i; \\ S_{n_i}^{\zeta} &= S_{n_i}^{\zeta}, \quad \psi = \frac{\Theta_1 + \Theta_2}{2}, \quad \varphi = \frac{\Theta_1 - \Theta_2}{2} \end{aligned} \quad (2)$$

Дальнейшие вычисления будем проводить, используя операторы Хаббарда [4,7], позволяющие точно учесть как одноионную так и МУ связь. Эти операторы строятся на собственных функциях одноузельного гамильтониана H_0 . Выделяя в обменной части (1) среднее поле, и переходя к локальным координатам (2), для одноузельного гамильтониана получим:

$$\begin{aligned} H &= -\sum_{n_i} H_i S_{n_i}^{\xi} + \sum_n (-1)^{l+1} \bar{H}_i (S_{n_i}^+ + S_{n_i}^-) - \frac{\beta}{8} \sum_{n_i} \left\{ (S_{n_i}^+)^2 + (S_{n_i}^-)^2 - S_{n_i}^- S_{n_i}^+ - S_{n_i}^+ S_{n_i}^- \right\} + \\ &+ \frac{\kappa}{2} \sum_{n_i} \left\{ (U_{xx}^i + U_{yy}^i - U_{zz}^i - A_1 + B_1) (S_{n_i}^+)^2 + 2A_1 (S_{n_i}^{\xi})^2 + \frac{1}{2} (U_{xx}^i + U_{yy}^i - U_{zz}^i - \right. \\ &\left. - A_1 (S_{n_i}^- S_{n_i}^+ + S_{n_i}^+ S_{n_i}^-) + (c_1^i + c_2^i) (S_{n_i}^+ S_{n_i}^{\xi} + S_{n_i}^{\xi} S_{n_i}^-) + y \cdot \vec{n} \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

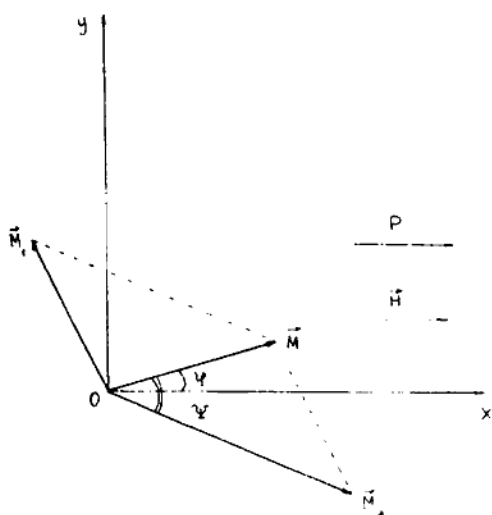


Рис.1. Ориентация магнитных моментов подрешеток.

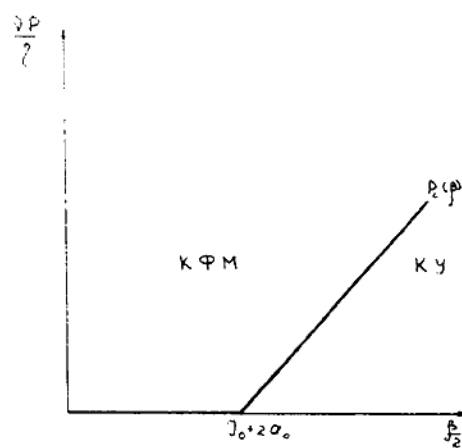


Рис.2. Фазовая диаграмма легкоплоскостного антиферромагнетика в плоскости (P, β) .

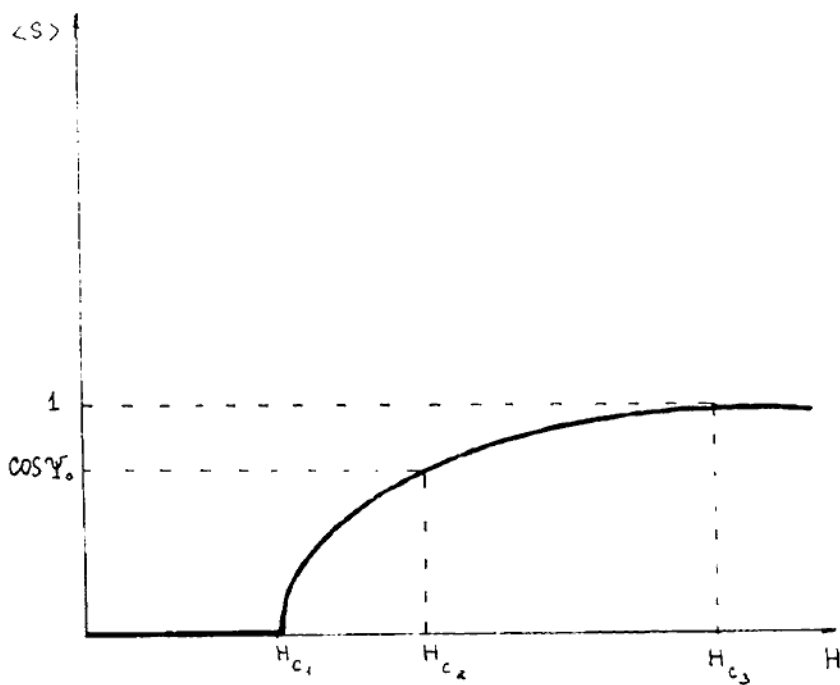


Рис.3. Зависимость средней намагниченности от величины внешнего магнитного поля.

В (3) введены следующие обозначения:

$$\begin{aligned}
 S_{n_1}^z &= S_{n_1}^z + iS_{n_1}^y, \quad \langle S_{n_1}^z \rangle = \langle S_{n_2}^z \rangle = \langle S^z \rangle, \\
 H_1 &= H \cos \Theta_1 - \langle S^z \rangle [I_0 \cos 2\psi + D_0 \sin 2\psi], \\
 \bar{H}_1 &= \frac{1}{2} \left\{ H \sin \Theta_1 - \langle S^z \rangle [I_0 \sin 2\psi + D_0 \cos 2\psi] \right\}, \\
 A_1 &= U_{xx}^1 \cos^2 \Theta_1 + U_{yy}^1 \sin^2 \Theta_1 + (-1)^{l+1} U_{yz}^1 \sin 2\Theta_1, \\
 B_1 &= -2i \left\{ U_{yz}^1 \cos \Theta_1 + (-1)^{l+1} U_{xz}^1 \sin \Theta_1 \right\}, \\
 c_1^z &= (-1) (U_{xx}^1 - U_{yy}^1) \sin 2\Theta_1 + 2U_{yz}^1 \cos 2\Theta_1, \\
 c_2^z &= -2i \left\{ U_{xz}^1 \cos \Theta_1 + (-1)^{l+1} U_{yz}^1 \sin \Theta_1 \right\}.
 \end{aligned} \tag{3'}$$

Здесь $I_0 = \sum_n I(n)$. Решая одноионную задачу $\mathbf{H}_0(n_1) \psi_{n_1}(M) = E_M^1 \psi_{n_1}(M)$ с гамильтонианом (3) удается определить собственные значения и собственные функции оператора $\mathbf{H}_0(n_1)$ (M - магнитное квантовое число. Для $S=1, M=-1, 0, 1$):

$$\begin{aligned}
 E_{1,1}^1 &= \frac{\beta}{4} + \frac{\nu^2}{H_1^2 + 4\bar{H}_1^2} \left\{ (U_{xx}^1 + U_{yy}^1)(H_1^2 + 8\bar{H}_1^2) + U_{zz}^1(H_1^2 + 4\bar{H}_1^2) + A_1(H_1^2 - 4\bar{H}_1^2) + \right. \\
 &(-1)^{l+1} 2c_1^z H_1 \bar{H}_1 \left. \right\} m \left\{ \frac{\beta^2}{16} + H_1^2 + 4\bar{H}_1^2 - \frac{\nu\beta}{H_1^2 + 4\bar{H}_1^2} \left[(U_{xx}^1 + U_{yy}^1) H_1^2 - U_{zz}^1 (H_1^2 + 4\bar{H}_1^2) - \right. \right. \\
 &- A_1 (H_1^2 - 4\bar{H}_1^2) + (-1)^{l+1} 2c_1^z H_1 \bar{H}_1 \left. \right] + \left(\frac{\nu^2}{H_1^2 + 4\bar{H}_1^2} \right)^2 \left[(U_{xx}^1 + U_{yy}^1) H_1^2 - U_{zz}^1 (H_1^2 + 4\bar{H}_1^2) - \right. \\
 &\left. - A_1 (H_1^2 - 4\bar{H}_1^2) + (-1)^{l+1} 2c_1^z H_1 \bar{H}_1 \right]^2 \left. \right\}^{1/2},
 \end{aligned} \tag{4}$$

$$E_0^1 = \frac{\beta}{2} + \frac{\nu}{H_1^2 + 4\bar{H}_1^2} \left\{ (U_{xx}^1 + U_{yy}^1) H_1^2 + U_{zz}^1 (H_1^2 + 4\bar{H}_1^2) - A_1 (H_1^2 - 4\bar{H}_1^2) + (-1)^{l+1} 2c_1^z H_1 \bar{H}_1 \right\}$$

Операторы Хаббарда строятся на собственных функциях \mathbf{H}_0 по стандартным правилам [9] $Y_{n_1}^{M'M} = |\psi_{n_1}(M') \rangle \langle \psi_{n_1}(M)|$ и описывают переход магнитного иона из состояния M в состояние M' . Эти операторы связаны со спиновыми операторами известными соотношениями [10].

Из условия минимума плотности свободной энергии

$$F = F_0 - \ln Z \tag{5}$$

где

F_0 - свободная энергия упругой подсистемы, определяемая последним слагаемым $U_{ik}^{(0)}(n_i)$ в

(1). Найдем равновесные (спонтанные) деформации, которые оказываются следующими:

$$\begin{aligned}
 U_{xx}^{(0)} &= \frac{b'_1(\eta + 2\lambda) - \lambda(b'_2 + b'_3)}{\eta(\eta + 3\lambda)}, & U_{yy}^{(0)} &= \frac{b'_2(\eta + 2\lambda) - \lambda(b'_1 + b'_3)}{\eta(\eta + 3\lambda)}, \\
 U_{zz}^{(0)} &= \frac{b'_3(\eta + 2\lambda) - \lambda(b'_1 + b'_2)}{\eta(\eta + 3\lambda)}, & U_{xz}^{(0)} &= U_{yz}^{(0)} = 0, \\
 U_{xy}^{(0)} &= \frac{(-1)^{i+1} \nu (H_i^2 - 4\bar{H}_i^2) \sin 2(\psi + (-1)^{i+1} \varphi) - 4H_i \bar{H}_i \cos 2(\psi + (-1)^{i+1} \varphi)}{2\eta (H_i^2 + 4\bar{H}_i^2)} \cdot \\
 &\cdot \left\{ \text{ch} \frac{x_i^0}{T} + \frac{\beta}{4x_i^0} \text{sh} \frac{x_i^0}{T} - \exp(\beta/4T) \right\} / Z_i^0
 \end{aligned} \tag{6}$$

где

$$\begin{aligned}
 b'_1 &= -P - \frac{\nu}{Z_i^{(0)}} \left\{ \left[1 - \frac{H_i \cos(\psi + (-1)^{i+1} \varphi) + 2\bar{H}_i \sin(\psi + (-1)^{i+1} \varphi)^2}{H_i^2 + 4\bar{H}_i^2} \right] \text{ch} \frac{x_i^0}{T} - \right. \\
 &\left. \frac{(H_i \sin(\psi + (-1)^{i+1} \varphi) - 2\bar{H}_i \cos(\psi + (-1)^{i+1} \varphi))^2}{H_i^2 + 4\bar{H}_i^2} \left(\frac{\beta}{4x_i^0} \text{sh} \frac{x_i^0}{T} \right) \cdot \exp(-\beta/4T) \right\} \\
 b'_2 &= -\frac{\nu}{Z_i^{(0)}} \left\{ \left[1 + \frac{H_i \sin(\psi + (-1)^{i+1} \varphi) + 2\bar{H}_i \cos(\psi + (-1)^{i+1} \varphi)^2}{H_i^2 + 4\bar{H}_i^2} \right] \text{ch} \frac{x_i^0}{T} - \right. \\
 &\left. \frac{(H_i \cos(\psi + (-1)^{i+1} \varphi) + 2\bar{H}_i \sin(\psi + (-1)^{i+1} \varphi))^2}{H_i^2 + 4\bar{H}_i^2} \left(\frac{\beta}{4x_i^0} \text{sh} \frac{x_i^0}{T} \right) - \exp(-\beta/4T) \right\} \\
 b'_3 &= -\frac{\nu}{Z_i^{(0)}} \left\{ \text{ch} \frac{x_i^0}{T} + \frac{\beta}{4x_i^0} \text{sh} \frac{x_i^0}{T} + \exp(-\beta/4T) \right\} \\
 Z_i^{(0)} &= 2 \text{ch} \frac{x_i^0}{T} \exp(-\beta/4T)
 \end{aligned} \tag{7}$$

Как видно из соотношений (4) и (6) энергетическим уровнем, соответствующим основному состоянию является E_1^i , аналитическое выражение, для которого в нашем приближении следующее:

$$E_1^i = -\frac{H_i^2 + 4\bar{H}_i^2}{\beta} - \frac{\nu P}{\eta} + \frac{2\nu P}{\eta} \cdot \frac{H_i \bar{H}_i}{H_i^2 + 4\bar{H}_i^2} \sin 2(\psi + (-1)^{i+1} \varphi) + O(\nu^2/\eta). \tag{8}$$

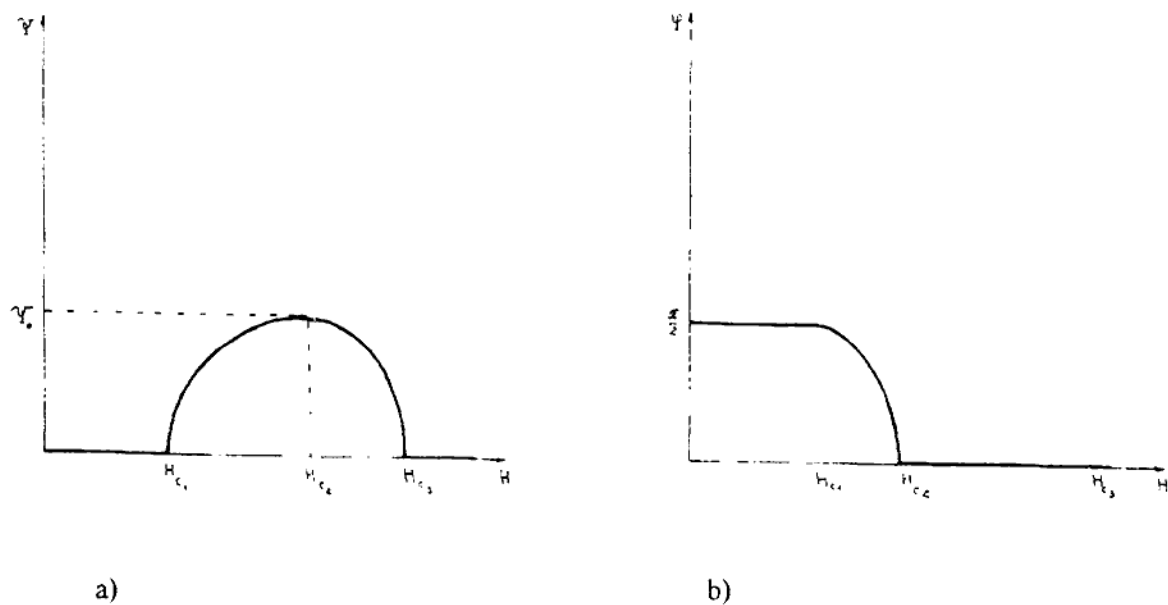


Рис. 4 (а,б). Зависимость углов ориентации подрешеток от величины внешнего магнитного поля.

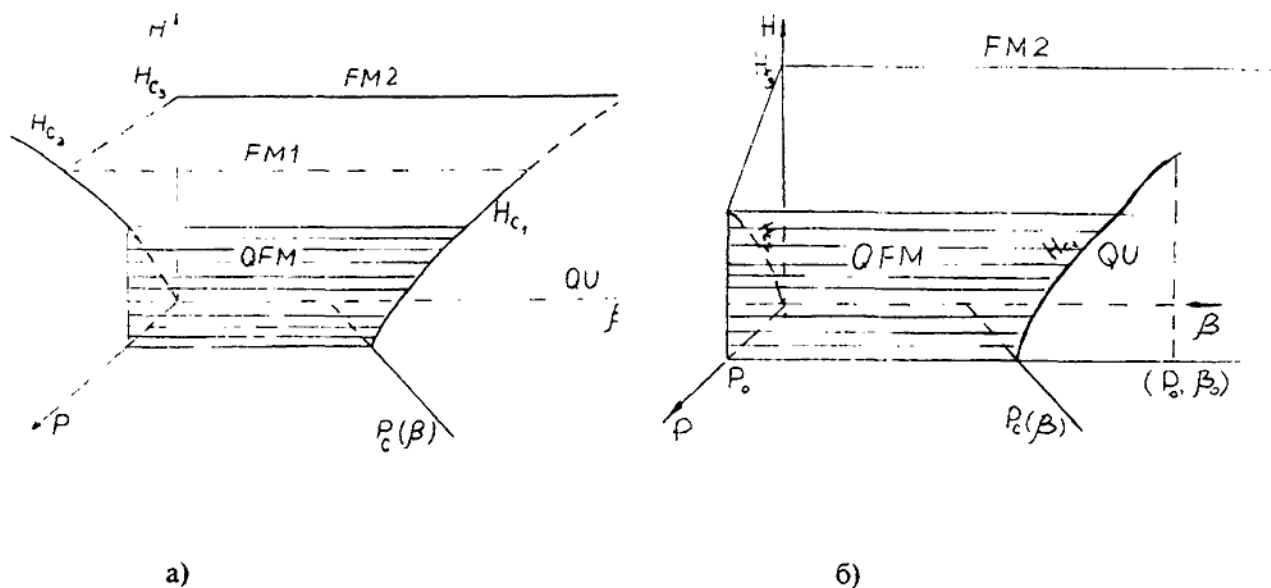


Рис. 5 (а,б). Фазовая диаграмма легкоплоскостного антиферромагнетика в плоскости (P, β, H) .

В этом случае, плотность свободной энергии можно представить в виде

$$F' = F'_{my} + E'_1 \quad (9)$$

Используя соотношение (9) определим фазы, в которых может находиться исследуемая система. Предположим, что система находится при таких значениях поля H и давления P , что средняя намагниченность в узлах ориентирована так, как показано на рис.1. При значениях магнитного поля, больших значения H_{c_2} (при фиксированном давлении) вектор средней намагниченности ориентирован вдоль направления магнитного поля H . В этом случае угол $\varphi = 0$, а ψ определяется из условия минимума плотности свободной энергии F' (9). Это условие приводит к тому, что в фазе с $\varphi = 0$, $\bar{H}_1 = 0$, откуда легко получить соотношение

$$\cos \psi = \frac{H + \langle S^z \rangle |D_0|}{2l_0 \langle S^z \rangle}$$

Можно показать, что в окрестности поля H_{c_2} средняя намагниченность подрешетки примерно равна единице, $\langle S^z \rangle \approx 1$.

Фазу, реализующуюся в полях $H \geq H_{c_2}$ назовем ФМ1-фазой. Величину поля H_{c_2} определим из спектров МУ волн.

Величину поля определим из условия обращения в нуль коэффициента при квадратичном по φ слагаемом в разложении свободной энергии (9)

$$H_{c_2} = -\frac{D_0}{2} + \sqrt{\frac{D_0^2}{4} - 2d_0 l_0} \quad (10)$$

где

$$d_0 = Pv/\eta$$

Дальнейшее увеличение поля приводит к тому, что не только вектор $\vec{M} = \vec{M}_1 + \vec{M}_2$, но и векторы намагниченности подрешеток будут ориентированы вдоль поля (т.е. $\psi = \varphi = 0$). Такая конфигурация реализуется при $H \geq H_{c_3}$, где

$$H_{c_3} = 2l_0 - |D_0|$$

Фазу, реализующуюся при $H \geq H_{c_3}$ назовем ФМ2-фазой. Наибольший интерес представляет случай малых полей, при которых реализуется так называемая квадрупольная (КУ) фаза. Для этой фазы характерно равенство нулю магнитного векторного параметра порядка [8]. Для нашей системы это означает, что равна нулю как средняя намагниченность подрешеток, так и средняя намагниченность в узле. Кроме того, хорошо известно [8], что для легкоплоскостных

ферромагнетиков в поперечном магнитном поле, реализация КУ-фазы связана с инверсией энергетических уровней, т.е. нижайшим уровнем в этой фазе становится E_0 . В рассматриваемой нами системе такой инверсии нет, а реализация КУ-фазы связана с проявлением нескольких чисто квантовых эффектов.

Рассмотрим этот вопрос подробнее. Пусть при некотором поле $H \leq H_{c1}$ система переходит в КУ-фазу. Магнитную фазу, реализуемую при полях $H_{c1} \leq H \leq H_{c2}$ назовем КФМ-фазой (квадрупольно-ферромагнитной). В нашей постановке задачи давление играет роль "эффективной" анизотропии с ОЛН параллельной оси ОУ [6]. При полях, близких к полю перехода КФМ-КУ-фаза, как следует из анализа плотности свободной энергии (9), ее минимуму соответствует значение углов и близких к следующим: $\varphi = \frac{\pi}{2}$, $\psi = 0$ т.е. вектор средней намагниченности системы, а также векторы средней намагниченности подрешеток стремятся "повернуться" к "эффективной" ОЛН.

Средняя намагниченность подрешеток оказывается равной

$$\langle S_{n_i}^z \rangle = 4 \frac{H}{\beta} \cos(\psi + \varphi) \quad (11)$$

Для типичных антиферромагнетиков с взаимодействием Дзялошинского характерны значения углов $\psi \approx \pi/2$. Резкое уменьшение этого угла до малых значений в нашем случае обусловлено, как видно из (10), стремлением модуля намагниченности подрешетки к нулю. Аналогичный эффект вблизи критической температуры для La_2CuO_4 обсуждался в [11]. При $P=0$ и $H=0$ и определенных значениях система находится в КУ-фазе, поскольку $\langle S_{n_i}^z \rangle = 0$. Этот результат можно понять следующим образом: в системе отсутствует выделенная ось, все направления в базисной плоскости (ХОУ) равноправны. Поэтому намагниченности в элементарных магнитных ячейках могут быть направлены произвольным образом, и в "среднем" намагниченность кристалла равна нулю. Эта ситуация аналогична реализации КУ-фазы в сильно анизотропном легкоплоскостном ферромагнетике [7].

Как легко видеть, основное состояние АФМ при $P=0$ и $H=0$ совпадает с собственным вектором $|1\rangle$ оператора $S_{n_i}^z$

$$\psi_{n_i}(1) = |1\rangle,$$

При увеличении давления, средней намагниченности выгодно повернуться вдоль оси "эффективной" анизотропии (ОУ). В этом случае основное состояние АФМ является суперпозицией собственных векторов $|1\rangle$ и $|-1\rangle$ оператора $S_{n_i}^z$, $\psi_{n_i}(1) = \cos \delta_i |1\rangle + \sin \delta_i |-1\rangle$, такая суперпозиция векторов $|1\rangle$ и $|-1\rangle$ приводит к "квантовому сокращению спина" [3]. Этот

эффект характерен для легкоосных магнетиков, находящихся в магнитном поле перпендикулярном легкой оси. В нашем случае причиной этого эффекта является наличие внешнего давления, играющего роль одноосной анизотропии.

В изучаемом нами антиферромагнетике два описанных квантовых эффекта обуславливают существование квадрупольной фазы. Оказывается, что квадрупольная фаза существует вплоть до давлений определяемых формулой

$$\frac{vP_c}{\eta} = \frac{\beta}{2} - l_0 - 2a_0 \quad (12)$$

где

$$a_0 = v^2/2\eta.$$

Эта формула получается при исследовании области существования фазы с отличной от нуля средней намагниченности. На рис.2 указаны какие фазы реализуется при $H=0$ на плоскости (P, β) . Поле перехода КФМ-КУ-фаза (H_{c_1}) определяется из стандартной теории среднего поля выражением:

$$H_{c_1} = \sqrt{\frac{\beta}{2} \left(\frac{\beta}{2} - d_0 - l_0 - 2a_0 \right)}$$

Поведение углов и намагниченности подрешеток, как функции внешнего магнитного поля приведены на рис.(3-4). На рис.3-4 приняты обозначения:

$$\psi_0 = \frac{D_0}{4l_0} + \sqrt{\frac{D_0}{16l_0} + \frac{d_0}{2l_0}}$$

На рис.5а, 5б приведена фазовая диаграмма исследуемого магнетика в координатах (P, β, H) . Как видно из рисунка 5б в плоскости (P, H) возможны переходы КФМ-ФМ1-фаза и ФМ1-ФМ2-фаза.

Однако, при давлении P_0 :

$$\tilde{d}_0 = \frac{P_0 v}{\eta} = |D_0| - 2l_0 \quad (13)$$

возможен переход КФМ-ФМ2-фаза, т.е. фаза ФМ1 исчезает (рис.5б). В плоскости (β, H) , как видно из рис.5а возможны следующие переходы: КУ-КФМ-фаза, КУ-ФМ1- фаза, а также ФМ1-ФМ2- фаза. В этом случае также возможна ситуация, при которой ФМ1-фаза исчезает, т.е. возможен переход КУ-ФМ2-фаза при величине константы анизотропии β_0 (рис.5б).

$$\beta_0 = l_0 + d_0 + 2a_0 + \sqrt{(l_0 + d_0 + 2a_0)^2 + 4(2l_0 - |D_0|)^2} \quad (14)$$

Горизонтально заштрихованная область на рис.5б определяет магнитные состояния системы при давлении, а на рис.5а - при произвольном давлении.

Как видно из рис.5 набор магнитных состояний сильно анизотропного легкоплоскостного антиферромагнетика значительно шире, чем для слабо анизотропного, в котором реализуются следующие фазовые переходы: КФМ-ФМ1-фаза и ФМ1-ФМ2-фаза [7].

3. Итак, как мы уже отмечали выше, большая одноионная анизотропия и наличие внешнего давления значительно расширяет класс возможных магнитных состояний легкоплоскостного антиферромагнетика. Необходимо отметить, что внешнее давление можно интерпретировать как наличие определенных механических условий, т.е. условий крепления исследуемого образца [12]. Такой подход крайне важен при интерпретации экспериментальных результатов, поскольку учет механических граничных условий — задача важная и достаточно сложная.

Проведение экспериментальных исследований фазовой диаграммы рассматриваемой системы, как нам кажется, было бы интересным и своевременным. Однако, к сожалению, такие исследования, как нам известно, не проводились.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. Е. Дикштейн, В. В. Тарасенко, В. Г. Шавров, ЖЭТФ, 67, 2, (1974)
2. В. Г. Борисенко, Ю. В. Переверзев ФНТ, 11, 730-736, (1985).
3. Bos W. G., Khassen T. O., Poulis N. J., Carlin R. L. Magn. Magn. Mater. 15-18, Pt1, 464-466, (1980).
4. Ю. Н. Мицай, Ю. А. Фридман УФЖ, 35, 2, 459-464. (1990).
5. Varret F. J. Phys. Chem. Solids, 37, 3, 257-263, (1976).
6. Э. А. Завадский, Тезисы доклада, Махачкала (1984), 131-132.
7. Ю. Н. Мицай, Ю. А. Фридман УФЖ, 35, 5, (1990).
8. Ф. П. Онуфриева ФТТ, 26, 11, 3435-3437 (1984).
9. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц Статистическая физика, часть 1, М.: Наука (1976), 583 с.
10. Р. О. Зайцев ЖЭТФ, 63, 1, 207-215 (1975).
11. А. И. Банщиков, В. Г. Барьяхтар, Б. А. Иванов, Ю. Н. Мицай СФХТ, 4, 3, (1991).

ОСОБЕННОСТИ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ В ЛЕГКОПЛОСКОСТНЫХ ФЕРРОМАГНЕТИКАХ ПРИ НАЛИЧИИ МЕХАНИЧЕСКИХ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ

Ю. Н. Мицай, доктор физ.-мат наук, профессор,

Ю. А. Фридман, кандидат физ.-мат. наук, доцент, О. В. Кожемяко

Учет механических граничных условий играет важную роль в термодинамике магнетиков. Это обстоятельство весьма важно при интерпретации экспериментальных исследований, поскольку учет механических граничных условий в реальном эксперименте есть ничто иное как учет того или иного способа крепления исследуемого образца. Несмотря на всю важность этого вопроса, он изучен крайне недостаточно [1,2].

Учет механических граничных условий прежде всего сказывается на поведении спонтанных деформаций кристалла. Исследование спонтанных деформаций кристалла проведем, как обычно, включая в рассмотрение магнитоупругое (МУ) взаимодействие в системе, наряду с другими релятивистскими взаимодействиями. Для адекватного описания системы недостаточно учета МУ взаимодействия в линейном приближении. Необходимо учитывать так называемую вращательную инвариантную теорию МУ связи [2,3]. Предсказание нового механизма МУ связи есть один из результатов этой теории.

Качественно суть этого механизма можно представить следующим образом. При прохождении упругой волны через кристалл, элементарная ячейка не только изменяет свой объем, но испытывает сдвиговые деформации. В результате изменяется положение локальных осей магнитной анизотропии, пространственная ориентация которых определяет равновесное направление магнитного момента.

Таким образом, даже в отсутствии стандартной магнитоупругой связи, описываемой слагаемыми вида $\nu M^i M^k U_{ik}$, связь между магнитной и упругой подсистемами будет обеспечиваться за счет энергии одноионной анизотропии $\frac{\beta}{2} (\vec{n}\vec{M})^2$. Здесь введены следующие обозначения:

ν - константа МУ связи,

U_{ik} - симметричная часть тензора дисторсии,

M_i - плотность магнитного момента,

$\beta > 0$ - константа одноионной анизотропии,

\vec{l} - вектор, определяющий положение локальной оси анизотропии.

Как уже отмечалось выше, механические граничные условия существенно влияют на структуру спонтанных деформаций в магнитоупорядоченном кристалле. Последние определяют основные характеристики спектров МУ волн и типы фазовых переходов между магнитоупорядоченными фазами.

СВОБОДНАЯ ЭНЕРГИЯ ЛЕГКОПЛОСКОСТНОГО ФЕРРОМАГНЕТИКА ПРИ НАЛИЧИИ МЕХАНИЧЕСКИХ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ

Рассмотрим простейшую ситуацию, в которой исследуемые эффекты проявляются наиболее наглядно, то есть область низких температур ($T \ll T_c$, где T_c - температура Кюри). Не теряя общности, для простоты вычислений будем считать спин магнитного иона $S=1$.

В качестве модельной системы рассмотрим легкоплоскостной ферромагнетик (ХОУ - базисная плоскость), помещенный в однородное магнитное поле H , параллельное оси ОZ.

Гамильтониан такой системы, с учетом вращательной инвариантности, можно представить в виде:

$$H = -H \sum_n S_n^z + \frac{\beta}{2} \sum_n (R_{ci}^{-1} S_n^i)^2 - \frac{1}{2} \sum_{n, n'} J(n - n') \hat{S}_n \hat{S}_{n'} + v \sum_n (R_{if}^{-1} S_n^f) (R_{jg}^{-1} S_n^g) F_{ij}(n) + \int dr \left\{ \frac{k+n}{2} (\varepsilon_{xx}^2 + \varepsilon_{yy}^2 + \varepsilon_{zz}^2) + 2\eta (\varepsilon_{xy}^2 + \varepsilon_{xz}^2 + \varepsilon_{yz}^2) + \lambda (\varepsilon_{xx} \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{xx} \varepsilon_{zz} + \varepsilon_{yy} \varepsilon_{zz}) \right\} \quad (1)$$

В (1) введены следующие обозначения:

$J(n - n')$ - обменный интеграл,

S_n^a - спиновый оператор в узле n ,

λ, η - упругие модули кристалла,

\hat{R}_{ij} - оператор локальных поворотов, который можно представить в

следующем виде: $\hat{R}_{ij}^{-1} = \delta_{ij} - \omega_{ij} + \frac{1}{2} \omega_{ij}^2 + \frac{1}{2} (U_{ik} \omega_{kj} - \omega_{ik} U_{kj}) + O(U_{ij}^3)$

$\varepsilon_{ij} = U_{ij} + \frac{1}{2} (U_{ik} - \omega_{ik}) (U_{kj} + \omega_{kj})$ - тензор конечных деформаций, а

$U_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)$, $\omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)$ - симметричная и антисимметричная

части тензора дисторсии $\frac{\partial U_i}{\partial x_j}$ соответственно.

Первые три слагаемые в (1) описывают магнитную подсистему, пятое - упругую, а четвертое - МУ связь. Предположим далее, что исследуемый образец жестко закреплен по плоскости ZOX

(см. рис 1). Такое закрепление образца соответствует следующим механическим граничным условиям:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx} = \varepsilon_{zz} = \varepsilon_{xz} = \varepsilon_{zx} = 0, \\ \varepsilon_{yy} = U_{yy} + \frac{1}{2} U_{yy}^2 + 2U_{yz}^2 \\ \varepsilon_{yz} = U_{yz}, U_{yz} = -\omega_{yz} \end{aligned} \quad (2)$$

Дальнейшие вычисления будем проводить в рамках формализма операторов Хаббарда [4,5]. В терминах хаббардовских операторов удастся точно учесть энергию одноионной анизотропии и энергию МУ связи.

Хаббардовские операторы строятся в базисе волновых функций, являющихся решением одноионной задачи:

$$\mathbf{H}_0(n)\psi_n(M) = E_M\psi_n(M) \quad (3)$$

и имеют вид $X_n^{MM'} \equiv |\psi_n(M')\rangle\langle\psi_n(M)|$.

Эти операторы описывают переход магнитного иона из состояния M в состояние M' ($M = -1, 0, 1$).

Одноионный гамильтониан имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_0(n) = & - (H\cos\Theta + J_0\langle S \rangle) S_n^z - \frac{1}{2} H(S_n^+ - S_n^-) \sin\Theta + \frac{\beta}{2} (S_n^z)^2 \cos^2\Theta - \\ & - \frac{\beta}{8} \left\{ (S_n^+)^2 + (S_n^-)^2 - S_n^+ S_n^- - S_n^- S_n^+ \right\} \sin^2\Theta + i \frac{\beta}{8} \left\{ S_n^+ S_n^+ + S_n^- S_n^- - S_n^+ S_n^- + S_n^- S_n^+ \right\} \sin 2\Theta \end{aligned}$$

В (4) приняты следующие обозначения:

J_0 - нулевая фурье-компонента обменного интеграла.

Θ - угол между направлением магнитного поля и направлением магнитного момента.

Этот угол может быть отличным от нуля по двум причинам (см. рис. 2). Во-первых, сдвиговые деформации отклоняют ось анизотропии от направления существующего в недеформированном кристалле. Во-вторых, при уменьшении магнитного поля магнитный момент отклоняется от направления H в сторону легкой плоскости. Появление отличного от нуля Θ в стандартной теории спин-переориентационных фазовых переходов трактуется как фазовый переход и (при $\Theta \ll 1$) играет роль параметра порядка.

Далее будем считать, что $\Theta \ll 1$, т.е. мы находимся вблизи точки перехода угловая ($\Theta \neq 0$) - ФМ ($\Theta = 0$) фаза.

Решение уравнения (3) приводит к следующим результатам. Уровни энергии магнитного иона определяются формулами:

$$E_1 = \frac{\beta}{2} - \bar{H} + \frac{J_0 \langle S \rangle}{2} \cdot \frac{\frac{\beta}{2} - \bar{H}}{\frac{\beta}{2} - \bar{H}} \Theta^2$$

$$E_0 = \frac{\beta J_0^2 \langle S \rangle^2}{2(\bar{H}^2 - \beta^2)} \Theta^2 \quad (4)$$

$$E_{-1} = \frac{\beta}{2} + \bar{H} - \frac{J_0 \langle S \rangle}{2} \cdot \frac{\frac{\beta}{2} + \bar{H}}{\frac{\beta}{2} + \bar{H}} \Theta^2$$

где $\bar{H} = H + J_0 \langle S \rangle$. С учетом вклада спонтанных деформаций в одноионный гамильтониан, перепишем модифицированную одноионную задачу следующим образом:

$$\tilde{H}_0(\mathbf{n}) \tilde{\psi}_n(M) = \tilde{E}_M \tilde{\psi}_n(M) \quad (5)$$

где:

$$\tilde{H}_0(\mathbf{n}) = \mathbf{H}_0(\mathbf{n}) + \mathbf{H}_{My}(\mathbf{n}) + \mathbf{H}_{AMy}(\mathbf{n}),$$

$\mathbf{H}_{My}(\mathbf{n})$ - четвертое слагаемое в гамильтониане (1), а

$$\mathbf{H}_{AMy}(\mathbf{n}) = \frac{\beta}{2} (R_{zi}^{-1} S_n^i)^2 - \frac{\beta}{2} (S_n^z)^2.$$

Последнее слагаемое описывает отклонение оси анизотропии от направления, существующего в недеформированном кристалле.

Окончательно, для уровней энергии магнитного иона с учетом спонтанных деформаций получены следующие результаты:

$$\tilde{E}_1 = \frac{\beta}{2} - \bar{H} + \frac{1}{2} \left(\nu U_{yy}^{(0)2} + \beta U_{yz}^{(0)2} + \frac{\bar{H} \beta}{\frac{\beta}{2} - \bar{H}} U_{yz}^{(0)2} \right) + \varepsilon_1^{(1)} + \varepsilon_2^{(1)} + \varepsilon_3^{(1)} + \varepsilon_4^{(1)};$$

$$\tilde{E}_0 = \nu U_{yy}^{(0)2} - \frac{\bar{H}^2 \beta}{\frac{\beta}{2} - \bar{H}^2} U_{yz}^{(0)2} + \varepsilon_1^{(0)} + \varepsilon_2^{(0)} + \varepsilon_3^{(0)} + \varepsilon_4^{(0)}; \quad (6)$$

$$\tilde{E}_{-1} = \frac{\beta}{2} + \bar{H} + \frac{1}{2} \left(\nu U_{yy}^{(0)2} + \beta U_{yz}^{(0)2} + \frac{\bar{H} \beta}{\bar{H} + \frac{\beta}{2}} U_{yz}^{(0)2} \right) + \varepsilon_1^{(-1)} + \varepsilon_2^{(-1)} + \varepsilon_3^{(-1)} + \varepsilon_4^{(-1)}$$

где:

$U_n^{(0)}$ - спонтанные деформации,

$\varepsilon_n^{(M)}$ - поправки к энергетическим уровням по степеням угла.

Эти величины имеют громоздкий вид, поэтому в качестве примера приведем лишь некоторые из них:

$$\varepsilon_1^{(1)} = \Theta \frac{J_0 \langle S \rangle}{\bar{H} - \frac{\beta}{2}} U_{yz}^{(0)} \left\{ -\frac{\beta}{2} + \frac{\beta}{4} (U_{yz}^{(0)} + U_{yy}^{(0)}) \right\},$$

$$\varepsilon_2^{(1)} = \Theta^2 \left\{ \frac{H - \frac{\beta}{2} J_0 \langle S \rangle - \frac{\beta}{2} H}{2\bar{H} - \beta} + \nu U_{yy}^{(0)} B_1 + \frac{\beta}{4} U_{yz}^{(0)2} C_1 \right\} \quad (7)$$

$B_1 \approx 0, C_1 \approx 0.$

Поскольку мы исследуем низкотемпературный предел, то можем ограничиться учетом лишь нижайшего энергетического уровня. Как видно из (6), нижайшим уровнем в данном случае будет \tilde{E}_1 . Дальнейшие вычисления будем проводить в приближении $J_0 \gg \beta, \nu, H$.

Спонтанные деформации и угол отклонения намагниченности от направления магнитного поля определим из условия минимума плотности свободной энергии:

$$F = F_{\text{отд}} - T \ln Z \quad (8)$$

где:

$$F_{\text{отд}} = \frac{\lambda + \eta}{2} \varepsilon_{yy}^{(0)2} + 2\eta \varepsilon_{yz}^{(0)2} - \text{плотность упругой энергии.}$$

$$Z = \sum_M e^{-\tilde{E}_M / T} - \text{статистическая сумма.}$$

Поскольку \tilde{E}_1 - нижайший энергетический уровень, то $Z \approx e^{-\tilde{E}_1 / T}$. а (8) принимает вид:

$$F = \frac{1}{2} (\lambda + \eta) \varepsilon_{yy}^{(0)2} + 2\eta \varepsilon_{yz}^{(0)2} + \tilde{E}_1 \quad (9)$$

Подставляя (6) в (9) и минимизируя последнее выражение по U_{yy} и U_{yz} , получим систему уравнений относительно спонтанных деформаций. Решение этих уравнений следующее:

$$U_{yy}^{(0)} = -\frac{\nu}{2\eta} - \Theta^2 \frac{J_0^2 \langle S \rangle^2}{2(\bar{H} - \frac{\beta}{2})^2} \cdot \frac{(\frac{\beta}{2} - \nu)(\frac{\beta}{4} - \nu)}{\eta^2} \quad (10)$$

$$U_{yz}^{(0)} = \frac{\Theta J_0 \langle S \rangle}{2(\bar{H} - \frac{\beta}{2})} \cdot \frac{\frac{\beta}{2} - \nu}{\eta}$$

Подставляя явный вид спонтанных деформаций в (9), получим плотность свободной энергии, как функцию параметра порядка :

$$\begin{aligned}
 F = & \frac{v^2}{8\eta} + \Theta^2 \frac{J_0^2 \langle S \rangle^2}{(2\bar{H} - \frac{\beta}{2})^2} \frac{\beta - v}{\eta} \left\{ \frac{\beta}{4} \frac{\beta - \bar{H}}{\beta - \bar{H}} \frac{\beta - v}{\eta} - \frac{\beta}{2} + v - \frac{v\beta}{2\eta} \right\} + \Theta^2 (A_1 - \frac{v^2}{2\eta} B_1) + \\
 & + \Theta^3 \frac{J_0^3 \langle S \rangle^3}{(2\bar{H} - \frac{\beta}{2})^3} \frac{\beta}{\eta^2} \frac{(\beta - v)^2}{2} + \Theta^4 (A_4 - \frac{v^2}{2\eta} B_4) + \Theta^4 \left\{ \frac{J_0 \langle S \rangle}{2\bar{H} - \beta} \frac{\beta - v}{\eta} \left(\frac{\beta}{4} C_1 - v B_1 \right) + \right. \\
 & \left. + v B_2 - \frac{\beta}{2} A_2 - \beta \frac{J_0^3 \langle S \rangle^3}{(2\bar{H} - \frac{\beta}{2})^3} \frac{(\beta - v)(\beta - 2v)}{\eta^2} \right\} \frac{J_0 \langle S \rangle}{2\bar{H} - \beta} \frac{\beta - v}{\eta}, \quad (11)
 \end{aligned}$$

где:

$$A_1 = \frac{H - \frac{\beta}{2}}{2}, \quad B_1 \approx 0, \quad C_1 \approx 0, \quad A_2 = B_2 \approx 1, \quad A_4 = \frac{\beta}{12}, \quad B_4 \approx 0$$

Как видно из (11) плотность свободной энергии отличается от стандартного вида наличием слагаемого, пропорционального Θ^3 . Это слагаемое появляется в связи с учетом вращательной инвариантности, а также наличием недиагональных спонтанных деформаций, являющихся следствием изучаемых нами механических граничных условий.

Если сравнить выражение (11) с соответствующим выражением для полностью свободного образца, или образца, зажатого со всех сторон [2], то легко заметить, что их принципиальное различие состоит в наличии этого слагаемого. Таким образом, очевидно, что учет соответствующих механических граничных условий приводит к изменению функциональной зависимости плотности свободной энергии.

Минимизируя (11) по Θ можно достаточно легко получить зависимость от величины магнитного поля H , константы анизотропии и других материальных констант:

$$\begin{aligned}
 \Theta = & \frac{1}{4} \left\{ \frac{3}{16} \frac{\beta (\frac{\beta - v}{2})^2}{\eta^2} - \left[8 \left(H - \frac{\beta}{2} \right) \frac{(\frac{\beta - v}{2})^2}{\eta} \left(1 + \frac{\beta}{8\eta} \left(1 + \frac{\beta - v}{\eta} \right) \right) - \frac{\beta}{6} \right] + \right. \\
 & \left. + \frac{\beta - v}{\eta} \left[\left(\left(\frac{\beta - v}{2} \right) \left(\frac{\beta}{4\eta} - 1 \right) - \frac{v\beta}{2\eta} \right) 4 \frac{(\frac{\beta - v}{2})^2}{\eta} \left(1 + \frac{\beta}{8\eta} \left(1 + \frac{\beta - 2v}{\eta} \right) \right) - \frac{\beta}{6} \right] + \right. \\
 & \left. + \frac{9}{256} \frac{\beta^2 (\frac{\beta - v}{2})^3}{\eta^3} \right\}^{1/2} \left\{ \frac{(\frac{\beta - v}{2})^2}{\eta} \left[1 + \frac{\beta}{8\eta} \left(1 + \frac{\beta - 2v}{\eta} \right) \right] - \frac{\beta}{6} \right\}^{-1}. \quad (12)
 \end{aligned}$$

Из условия $\Theta = 0$ можно определить поле ориентационного фазового перехода угловая - ФМ - фаза. Отметим, что этот фазовый переход одновременно является и структурным переходом.

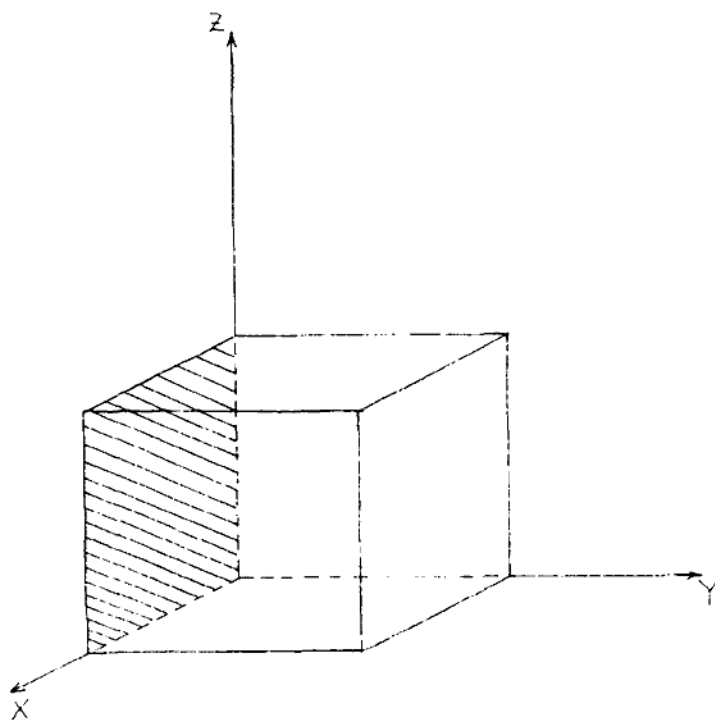


Рис.1. Способ крепления образца.

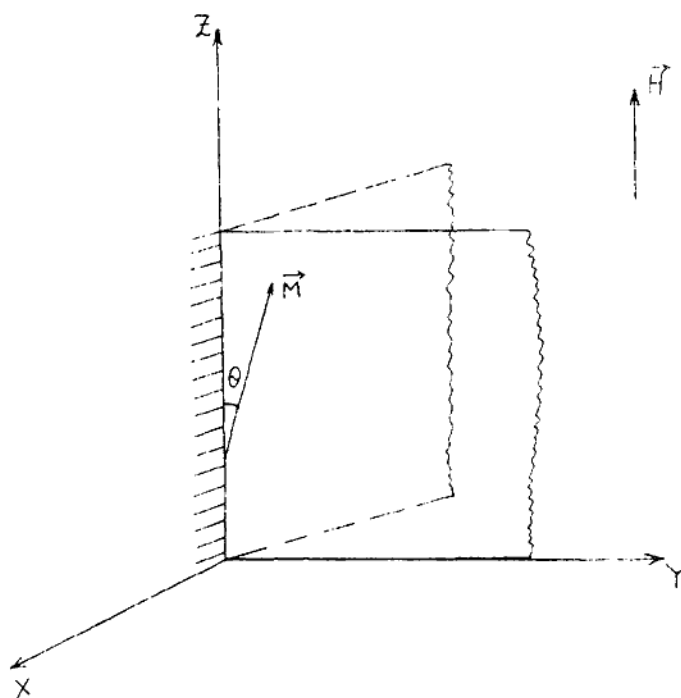


Рис.2. Ориентация средней намагниченности образца при наличии механических граничных условий.

В рассматриваемом случае поле перехода H_c имеет следующий вид:

$$H_c = \frac{\beta}{2} - \frac{\frac{\beta}{2} - \nu}{2\eta} \left\{ \frac{\frac{\beta}{2} - \nu}{4} \frac{\beta}{\eta} - \frac{\beta}{2} + \nu - \frac{\nu\beta}{2\eta} \right\} \quad (13)$$

Необходимо отметить, что для свободного образца (или равномерно зажатого со всех сторон) в теории без учета вращательной инвариантности, поле перехода $H_c = \frac{\beta}{2}$ [5], т.е. МУ связь не перенормирует поле перехода. Для такого же образца, но с учетом вращательной инвариантности [2]:

$$H_c = \frac{\beta}{2} + \frac{\left(\frac{\beta}{2} - \nu\right)^2}{2\eta} - \frac{\nu^2}{2\eta}.$$

В этом случае МУ связь перенормирует величину поля перехода.

Как видно из (12) и (13) при $\eta > \beta$ система испытывает фазовый переход второго рода. Однако ситуация может координально измениться при $\eta < 0.72\beta$. В этом случае поле $H = H_c$, описываемое формулой (13), также будет полем переориентационного фазового перехода. Но в этом случае фазовый переход будет являться фазовым переходом первого рода, поскольку при:

$$H_0 = H_c - \frac{9}{2048} \frac{\beta^2 \left(\frac{\beta}{2} - \nu\right)^4}{\eta^4} \cdot \frac{1}{\left(\frac{\beta}{2} - \nu\right)^2 \left[1 + \frac{\beta}{8\eta} \left(1 + \frac{\frac{\beta}{2} - 2\nu}{\eta} \right) \right]^{-\frac{\beta}{6}}} \quad (14)$$

угол Θ становится равным:

$$\Theta_0 = \frac{3}{64} \cdot \frac{\beta \left(\frac{\beta}{2} - \nu\right)^2}{\eta^2} \cdot \frac{1}{\left(\frac{\beta}{2} - \nu\right)^2 \left[1 + \frac{\beta}{8\eta} \left(1 + \frac{\frac{\beta}{2} - 2\nu}{\eta} \right) \right]^{-\frac{\beta}{6}}},$$

а при $H \leq H_0$ (и $\eta < 0.72\beta$) коэффициент при ν в выражении (11) меняет свой знак. Такое поведение коэффициентов в разложении (11) свидетельствует о том, что система претерпевает фазовый переход первого рода. Этот результат согласуется с известными результатами теории фазовых переходов [8].

Таким образом, закрепление образца, т.е. наложение механических граничных условий, может привести к изменению типа фазового перехода (при определенном соотношении материальных констант).

Необходимо отметить, что приведенное выше ограничение на упругий модуль η и константу одноионной анизотропии β не являются экзотическими, а вполне реально для целого ряда материалов. Так, например, для редкоземельных магнетиков Dy, Tb и т.п. константа одноионной анизотропии $\beta \approx 10^9$ эрг/см³ [6], кроме того, эти вещества обладают "гигантской" магнитострикцией $\frac{\Delta l}{l} \approx \frac{\nu}{\eta} \approx 10^{-2} \div 10^{-3}$ [6]. Отсюда можно легко оценить η . Так, например, для сплавов редкоземельных металлов $\nu \approx 10^6 \div 10^7$ эрг/см³ [7]. Отсюда следует, что $\eta \approx 10^8 \div 10^9$ эрг/см³, что вполне соответствует полученному нами условию $\eta < 0.72 \beta$.

Учет механических граничных условий существенно влияет на поведение в окрестности фазовых переходов. Прежде всего это влияние оказывается на изменение функциональной зависимости свободной энергии, как функции параметра порядка.

Как следствие этого может измениться тип фазового перехода при определенных соотношениях материальных констант магнетика. Если же тип фазового перехода не изменился, то в этом случае существенным образом перенормируется поле перехода.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Г. Барьяхтар, И. М. Витебский, И. М. Лавриненко, В. Л. Соболев ЖЭТФ, 90, 3, 1111-1117 (1986).
2. И. М. Витебский, И. М. Лавриненко, А. Н. Майорова, Ю. Н. Мицай, Ю. А. Фридман Препринт ИМК.- 93-8, Харьков. 21 с (1993).
3. В. Г. Барьяхтар, Е. А. Туров В сб. Электронная структура и электронные свойства металлов и сплавов. Киев (1988). 39-70.
4. Р.О. Зайцев ЖЭТФ, 63, 1, 207-215 (1975).
5. Ю. Н. Мицай, Ю. А. Фридман ТМФ, 81, 2, 263-270 (1989).
6. И. Е. Дикштейн, Е. А. Туров, В. Г. Шавров. В сб. Динамические и кинетические свойства магнетиков. Москва (1986), 69-103.
7. S. Yoshino, M. Masuda, H. Takahashi, S. Tsunashima, S.Uchiyama J. Appl. Phys. 64, 10, 5498-5500 (1988).
8. А. З. Паташинский, В. Л. Покровский Флуктуационная теория фазовых переходов. Москва (1982). 380.

ОПТИЧЕСКИЕ ВИХРИ ПОЛЯ МАЛОМОДОВОГО ВОЛОКНА И ИХ УГЛОВОЙ МОМЕНТ

А.В. Воляр, доктор физ.-мат наук, профессор

А.В. Фадеева, М.В. Абрамова

Введение

Исследования процесса лазерной генерации выявили удивительные свойства пучков Лагерра-Гаусса. На оси такого пучка выполняется требование равенства нулю действительных и мнимых частей напряженности электрического и магнитного полей:

$$\operatorname{Re} E_l(x, y, z) = 0; \operatorname{Im} E_l(x, y, z) = 0, \quad (1) \quad \operatorname{Re} H_l(x, y, z) = 0; \operatorname{Im} H_l(x, y, z) = 0 \quad (2)$$

(l – азимутальное число). Геометрический смысл этих уравнений заключается в том, что в поле лазерного излучения имеется линия узлов – пересечения двух поверхностей (1) и (2). По этой линии узлов перемещается точка поля с неопределенной фазой

$$\operatorname{tg} \phi = \operatorname{Im} E_l / \operatorname{Re} E_l = 0 \quad 0, \quad (3)$$

Такая сингулярность в математике называется точкой ветвления порядка l , а в физике получила название дислокации с топологическим зарядом l [2]. Если линия узлов и направление распространения поля совпадают, то такая сингулярность называется чисто винтовой дислокацией волнового фронта. Анализ структуры поля с чисто винтовой дислокацией показывает необычный вид фронта волны [3], который имеет вид прямого геликоида (поверхности винта). Расстояние между соседними одноименными лепестками геликоида равно длине волны. Обычно такую волну называют оптическим вихрем [2]. Вдали от оси эту волну можно считать почти плоской, в окрестности оси волна неоднородна и имеет как продольные E_z , так и поперечные E_l компоненты напряженности электрического поля. Такие необычные характеристики поля предполагают необычные свойства волны. В самом деле, поток энергии поля (1) можно определить как

$$\mathbf{P} = \frac{1}{2} [\mathbf{e} \times \mathbf{h}^* + \mathbf{e}^* \times \mathbf{h}] \quad (4)$$

А так как $e_z \neq 0$, $h_z \neq 0$, то в оптическом вихре свободного пространства присутствуют наряду с продольной компонентой и поперечные компоненты энергетического потока. Но в соответствии с определением момента импульса (углового момента) электромагнитного поля [4,1] имеем

$$\mathbf{M} = \mathbf{r} \times \mathbf{P}, \quad (5)$$

где \mathbf{r} – радиус-вектор некоторой точки поля. В общем случае оптический вихрь свободного пространства имеет M_z компоненту углового момента. Но тогда, если существует конкретный механизм преобразования электромагнитного углового момента в механический

момент импульса, оптический вихрь может захватывать микрочастицы, сообщать им вращательное движение при относительно низкой мощности излучения. Недавно авторы работ [5-8] сообщили о положительных результатах аналогичного эксперимента с микрочастицами эмульсий, диаметр которых составляет единицы микрон, а мощность лазерного излучения ~ 10 мВт.

Таким образом, отличительными чертами оптических вихрей в свободном пространстве от остальных полей являются: 1) наличие топологического заряда l , 2) отличные от нуля продольные компоненты E_z и H_z . Но поля маломодовых волокон также отвечают этим требованиям. Однако в оптических волокнах реализуются поля с абсолютными величинами E_z и H_z значительно большими, чем в оптических вихрях. Поэтому поля оптических волокон могут обладать свойствами, существенно отличающимися от оптических вихрей свободного пространства. Сразу оговорим, что проблема углового момента поля подразумевает три аспекта: 1) чисто электродинамическая задача об угловом моменте и его свойствах; 2) квантово-механическая задача о механизме преобразования электродинамического момента в механический момент; 3) технические и технологические проблемы использования свойств оптических вихрей волокон в оптоэлектронике, оптическом приборостроении и оптической связи.

В данной работе мы рассмотрим только некоторые свойства направляемых оптических вихрей маломодового волокна, связанные с электродинамическим проявлением углового момента поля.

1. Направляемые оптические вихри

Распространение света в неоднородной среде описывается векторным волновым уравнением, которое для осесимметричной неоднородной среды с показателем преломления $n=n(R)$ можно представить в виде:

$$\begin{aligned} \{\nabla_t^2 + n^2 k^2 - \beta^2\} \mathbf{e}_t &= -\nabla_t (\mathbf{e}_t \cdot \nabla_t \ln n^2), \\ \{\nabla_t^2 + n^2 k^2 - \beta^2\} e_z &= -i\beta \nabla_t \ln n^2, \end{aligned} \quad (6)$$

где $k=2\pi/\lambda_0$, β — постоянная распространения моды, \mathbf{e}_t , e_z — поперечное и продольное электрическое поле соответственно ($\mathbf{e} = \mathbf{e}_t + e_z \hat{\mathbf{z}}$).

Обычно решение неоднородной задачи проводится на основе теории возмущений. Сначала находят решение так называемой скалярной задачи, когда правые части уравнений (6) приравнивают нулю, а решения записывают как $\tilde{\mathbf{e}}_{tlm}$, \tilde{e}_{zlm} , $\tilde{\beta}_{lm}$, m — радиальное квантовое число. В первом приближении решение имеет вид

$$\tilde{\mathbf{e}}_t, \tilde{e}_z \approx \mathbf{e}_t, e_z; \beta_{lm} = \tilde{\beta}_{lm} + \delta\beta_{lm}, \quad (7)$$

$\delta\beta_{lm}$ — поляризационная поправка.

Остановимся на случае ступенчатого профиля волокна:

$$n(R) = \begin{cases} n_{co}, R \leq l \\ n_{cl}, R > l \end{cases}, \Delta = (n_{co}^2 - n_{cl}^2) / 2n_{co}^2, \quad (8)$$

где n_{co} и n_{cl} — показатели преломления сердцевины и оболочки. Если параметр $\Delta \ll 1$ (маломодовое волокно), то частные решения уравнений (6) для $l \leq 1$ в циркулярно поляризованном базисе можно представить в виде основной [9,10] моды HE_{1l}^{\pm} с полем

$$\mathbf{e}_1^{\pm} = \mathbf{e}^{\pm} F_0(R) e^{i\beta_0 z}, \quad e_z = i \sqrt{2\Delta} / V G_0(R) e^{\pm i\varphi} e^{i\beta_0 z}, \quad (9)$$

двух устойчивых направляемых CV вихрей:

$$e_1^{\pm} = \mathbf{e}^{\pm} e^{\pm i\varphi} F_1(R) e^{i\beta_1 z}, \quad e_z^{\pm} = i \sqrt{2\Delta} / V e^{\pm i2\varphi} G_1^{\pm}(R) e^{i\beta_1 z}. \quad (10)$$

и двух симметричных мод, как совокупности двух неустойчивых IV вихрей

$$TE_{0l} \Rightarrow (IV_{-l}^+ + IV_{-l}^-) / 2, \quad TM_{0l} \Rightarrow (IV_{-l}^+ - IV_{-l}^-) / 2. \quad (11)$$

где $e_1(IV_{-l}^{\pm}) = \{e^{\pm} e^{-i\varphi} \cos \Delta\beta z - i e^{\pm} e^{-i\varphi} \sin \Delta\beta z\} F_1^{\pm}(R) e^{i\beta_{\pm} z}$, $e_z(IV_{-l}^+) = i \sqrt{2\Delta} / V G_1^+(R) e^{i\beta_+ z}$,

$$e_1(IV_{-l}^-) = \{e^{\pm} e^{i\varphi} \cos \Delta\beta z - i e^{\pm} e^{i\varphi} \sin \Delta\beta z\} F_1^{\pm}(R) e^{i\beta_{\pm} z}, \quad e_z(IV_{-l}^-) = e_z(IV_{+l}^-)$$

$$F_l(R) = \frac{J_l(UR)}{J_l(U)}, R \leq 1, \quad F_l(R) = \frac{K_l(WR)}{K_l(W)}, R > 1, \quad G_l^{\pm}(R) = \frac{dF_l}{dR} \pm \frac{l}{R} F_l$$

$J_l(x)$ — функция Бесселя первого рода, l -го порядка, $R = \rho / \rho_0$, $K_l(x)$ — модифицированная функция Бесселя или функция Макдональда, поперечный волновдный параметр U находится из дисперсионного уравнения

$$\tilde{U} \frac{J_{l+1}(\tilde{U}R)}{J_l(\tilde{U})} = \tilde{W} \frac{K_{l+1}(\tilde{W}R)}{K_l(W)}; \quad V^2 = \tilde{U}^2 + \tilde{W}^2, \quad U = \tilde{U} + \delta U \quad (12)$$

δU — поляризационная поправка [11].

Из приведенных выражений следует, что в маломодовом волокне оптические вихри образуют поперечные и продольные поля, имеющие чисто винтовые дислокации волнового фронта. (В отличие от оптических вихрей свободного пространства, e_z и h_z компоненты которых могут не содержать дислокаций). Например, направляемый вихрь CV_{+l}^+ имеет чисто винтовую дислокацию поперечного поля с топологическим зарядом $l=+1$, а продольного поля — с топологическим зарядом $l=+2$.

Устойчивые вихри CV_l^\pm оптического волокна аналогичны пучкам Лагерра-Гаусса свободной среды (см. Введение). Однако для гладкого поля фундаментального гауссова пучка без сингулярностей уже нельзя провести такой простой аналогии с фундаментальной модой HE_{11}^\pm , поскольку продольная компонента этой моды имеет топологический заряд $l=+1$. Имеется ещё одно существенное различие оптических вихрей свободного пространства и маломодового волокна. Поля вихрей свободного пространства линейно поляризованы, и их распространение можно представить как поступательное движение геликоидального волнового фронта. В маломодовом волокне направляемые вихри циркулярно поляризованы, и их распространение в волокне представляется как ввинчивание поля вдоль оси z в среду волокна по часовой стрелке (для CV_{+l}^+ вихря) или против часовой стрелки (для CV_{-l}^- вихря). Такой принцип распространения вихрей в волокне позволяет управлять их затуханием (усилением) в среде, если вдоль направляющей “резьбы” в сердцевине волокна расположить активные поглощающие (излучающие) частицы.

2. Угловой момент вихрей

Уникальные свойства вихрей маломодовых волокон наиболее ярко проявляются в их электродинамическом угловом моменте поля. Циркулярно поляризованный вихрь имеет спиновый (поляризационный) угловой момент и орбитальный (топологический) угловой момент [1]. Кроме того, e_z компонента вихря также переносит топологический заряд, которому соответствует орбитальный момент. В невозмущенном устойчивом CV вихре эти угловые моменты суммируются, а различные участки поля остаются однородно поляризованными и имеют монотонно распределенный угловой момент.

Физическая ситуация меняется, если наряду с CV вихрем в волокне распространяется основная HE_{11} мода. Поперечное поле $e_t(HE_{11})$ моды не имеет сингулярностей и будет вытеснять с центра на периферию положение нуля $e_t(CV)$ поля, с которым связан топологический угловой момент. Кроме того $e_z(HE_{11}^+)$ поле имеет топологический заряд $l=+1$, а для $e_z(CV_{+l}^+)$ — $l=+2$. Возникает взаимодействие продольных e_z полей, в результате которого топологический заряд этой компоненты локализуется в двух точках с различными R . Проследим за этими процессами подробнее на примерах устойчивого CV и неустойчивого IV вихрей.

А. Возмущенный CV_{+l}^+ вихрь

Для построения структуры возмущенного CV_{+l}^+ вихря необходимо знать компоненты магнитного поля. В нашем случае

$$\mathbf{h} = -in_{co}(\epsilon_0 / \mu_0)^{1/2} \mathbf{e} . \quad (13)$$

Тогда, подставляя поля (9), (10) в (4) и (5), находим компоненты потока энергии вихря:

$$P_\varphi = -2K \{ F_1 G_1^- + a^2 F_0 G_0 + a(F_0 G_1^- + F_1 G_0) \cos(\Delta\beta_{01}z - \varphi) \} , \quad (14)$$

$$P_r = -2Ka(F_0 G_1^- - F_1 G_0) \sin(\Delta\beta_{01}z - \varphi) , \quad (15)$$

$$P_z = 2K \frac{V}{\sqrt{2\Delta}} \{ F_1^2 + a^2 F_0^2 + 2aF_1 F_0 \cos(\Delta\beta_{01}z - \varphi) \} , \quad (16)$$

где $K = \frac{I}{2c^2} (\epsilon_0 / \mu_0)^{1/2} n_{co} \sqrt{2\Delta} / V, \Delta\beta_{01} = \beta_0 - \beta_1$.

Очевидно, что линии уровня $|\mathbf{P}|$ находятся как

$$(P_\varphi^2 + P_r^2 + P_z^2)^{1/2} = const . \quad (17)$$

Линии тока, как линии, касательные к которым совпадают по направлению с вектором \mathbf{P} , находим из уравнений

$$dx / P_x = dy / P_y = dz / P_z \quad (18)$$

Для невозмущенного СВ вихря ($a=0$) $P_r = 0$ и линии тока представляют собой совокупность спиральных траекторий вида

$$z = -\frac{V\rho_0}{\sqrt{\Delta}} \frac{F_1(R)}{G_1^-(R)} R\varphi \quad (19) \text{ с шагом } h = \frac{2\pi V\rho_0}{\sqrt{\Delta}} \frac{F_1(R)}{G_1^-(R)} R \quad (20)$$

максимальная энергия распространяется по траектории

$$\begin{aligned} \varphi &= \Delta\beta_{01}z \\ F_1(R) &= -aF_0(R) \end{aligned} \quad (21)$$

Для возмущенных вихрей ($a \neq 0$) картина векторного поля существенно искажается.

Поперечный поток P_r имеет особые точки при

$$P_r = P_\varphi = 0 . \quad (22)$$

Совместное решение уравнений (14) и (15) при условии (22) дает три корня R_0, R_1, R_2

Корень $R_0 = 0$ соответствует особой точке типа центр основного поперечного потока P_r

Корень R_1 находится из уравнения $G_1^-(R_1) = aG_0(R_1)$, соответствует положению чистой винтовой дислокации продольной компоненты поля

описывается особой точкой типа центр индуцированного вихря. Третья точка с координатами $\varphi = \pi, R = R_2$ соответствует положению чистого винтовой дислокации поперечного е. поля и определяется из уравнения $F_r^-(R_2) = aF_r^+(R_2)$. Через эту особую точку типа седло проходит сепаратрисса. Линии тока определяются из дифференциального уравнения

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{d\varphi} = - \frac{a(F_0^+G_1^- - F_1^+G_0^-) \sin(\Delta\beta_{01}z - \phi)}{F_1^+G_1^- + a^2 F_0^+G_0^- + a(F_0^+G_1^- + F_1^+G_0^-) \cos(\Delta\beta_{01}z - \phi)} \quad (23)$$

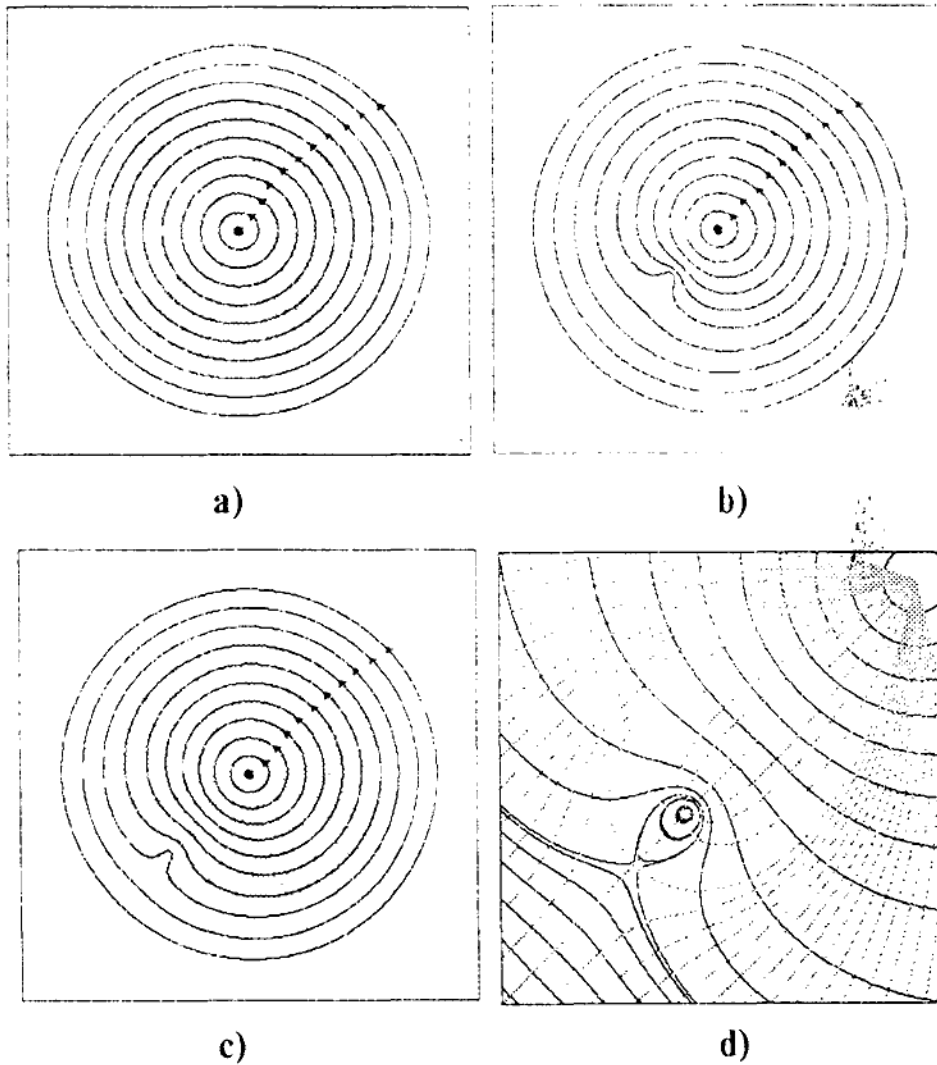


Рис.1. Линии тока поперечного вектора Пойнтинга для (V_{\perp}^*) вихря на длине волокна $\delta\beta_{21}z = \pi/4$: а) $a=0$, б) $a=0.5$, в) $a=0.7$, серым цветом обозначена сердцевина волокна; д) окрестность индуцированного вихря при $a=0.5$, более светлым тоном обозначены линии, ортогональные к линиям тока P_{\perp} .

Решение этого уравнения представлено на рис.1 для различных типов возмущений. Увеличенное изображение линий тока (рис.1.d) представляет стационарное поле линий тока и ортогональных кривых для индуцированного вихря. По своей структуре это поле идентично полю линий тока невязкой жидкости, обтекающей вращающийся цилиндр [12].

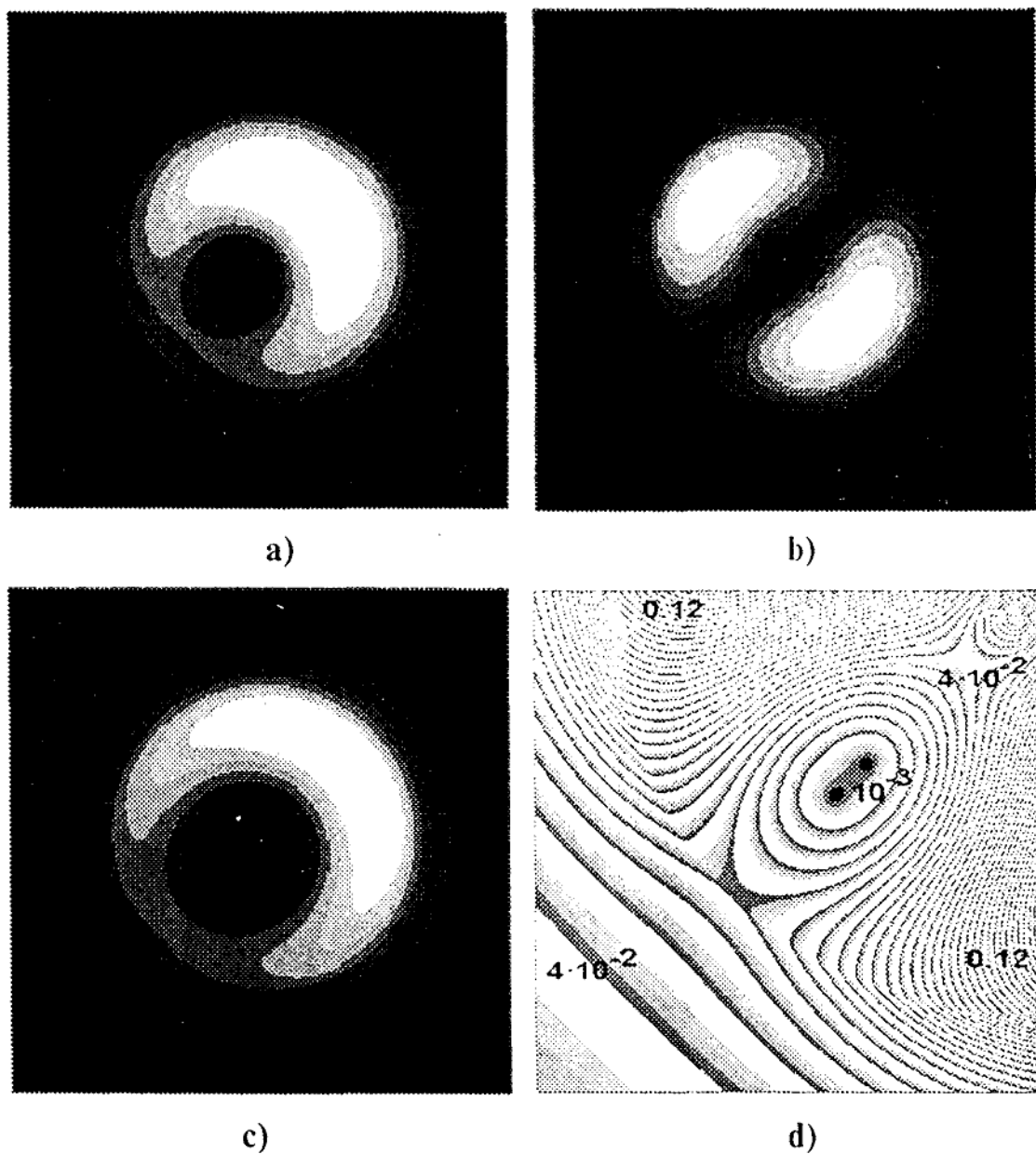


Рис.2. Распределение в поперечном сечении волокна $\delta\beta_{zj} z = \pi/4$: а) P_r , б) P_r , в) P_ϕ д) линии уровня модуля P_i в окрестности индуцированного вихря (приведена нормированная величина $P_i/P_{i(\max)}$) для (V_{*j}^*) вихря.

Оценка величин энергии, приходящейся на азимутальную компоненту вихря P_ϕ по отношению к z компоненте дает $|P_\phi|/|P_z|=4.32 \cdot 10^{-2}$. Доля энергии, сосредоточенная в индуцированном вихре по отношению к основному вихрю составляет $\approx 10^{-4}$. На рис.2 приведена карта линий уровня в поперечном сечении волокна для P_z и P_r компонент электрического поля CV_{+l}^+ вихря.

В. Возмущенный неустойчивый $IV_{\mp l}^\pm$ вихрь

Чтобы экспериментально возбудить в волокне устойчивый CV_{+l}^+ вихрь достаточно в лазерном излучении создать поля с чисто винтовой дислокацией $l=+1$ и круговой поляризацией \hat{e}^+ , знак циркуляции которой совпадает со знаком топологического заряда l . Такой лазерный пучок, произвольно направленный на торец волокна, возбудит возмущенный CV_{+l}^+ вихрь. Что произойдет со структурой поля направляемого CV_{+l}^+ вихря, если знак топологического заряда l не совпадает со знаком циркуляции поляризации (спина)?

В маломодовом волокне возбудится неустойчивый IV_{+l}^- (или IV_{-l}^+) вихрь, возмущенный HE_{11} модой. Поле этого вихря задано выражениями (11,a) и (11,b). Этот вихрь содержит два топологических заряда $l=+1$ и $l=-1$ с противоположными циркуляциями поляризации. В процессе распространения этого вихря возникает обмен энергией между полями с противоположными топологическими зарядами. Присутствие возмущающего поля HE_{11} вносит небольшие искажения в процесс этого энергетического обмена.

Изучим структуру энергетического потока неустойчивого IV_{-l}^+ вихря. На основе выше рассмотренного метода запишем выражения для компонент вектора Пойнтинга:

$$P_\phi = -K \left\{ F_l G_l^+ \cos 2\Delta\beta z + a^2 F_0 G_0 + a(F_0 G_l^+ + F_l G_0) \cos \Delta\beta z \cos(\Delta\beta_l z - \varphi) \right\} \quad (24)$$

$$P_r = 2Ka(F_0 G_l^+ - F_l G_0) \cos \Delta\beta z \sin(\Delta\beta_l z - \varphi), \quad (25) \quad \Delta\beta_l = \beta_{2l} - \beta_0$$

$$P_z = K \frac{V}{\sqrt{2\Delta}} \left\{ F_l^2 + a^2 F^2 + 2aF_l F_0 \cos \Delta\beta z \cos(\Delta\beta_l z - \varphi) \right\} \quad (26)$$

В неустойчивом возмущенном IV_{+l}^- вихре не возникает индуцированный вихрь. Это связано с тем, что продольная e_z компонента этого поля не содержит дислокаций. Положение чисто винтовой дислокации основного поля можно определить из условия $P_z = 0$ при

$$\Delta\beta z - \varphi = \pi, F_1^2 + a^2 F_0 - 2F_1 F_0 \cos \Delta\beta z = 0. \quad (27)$$

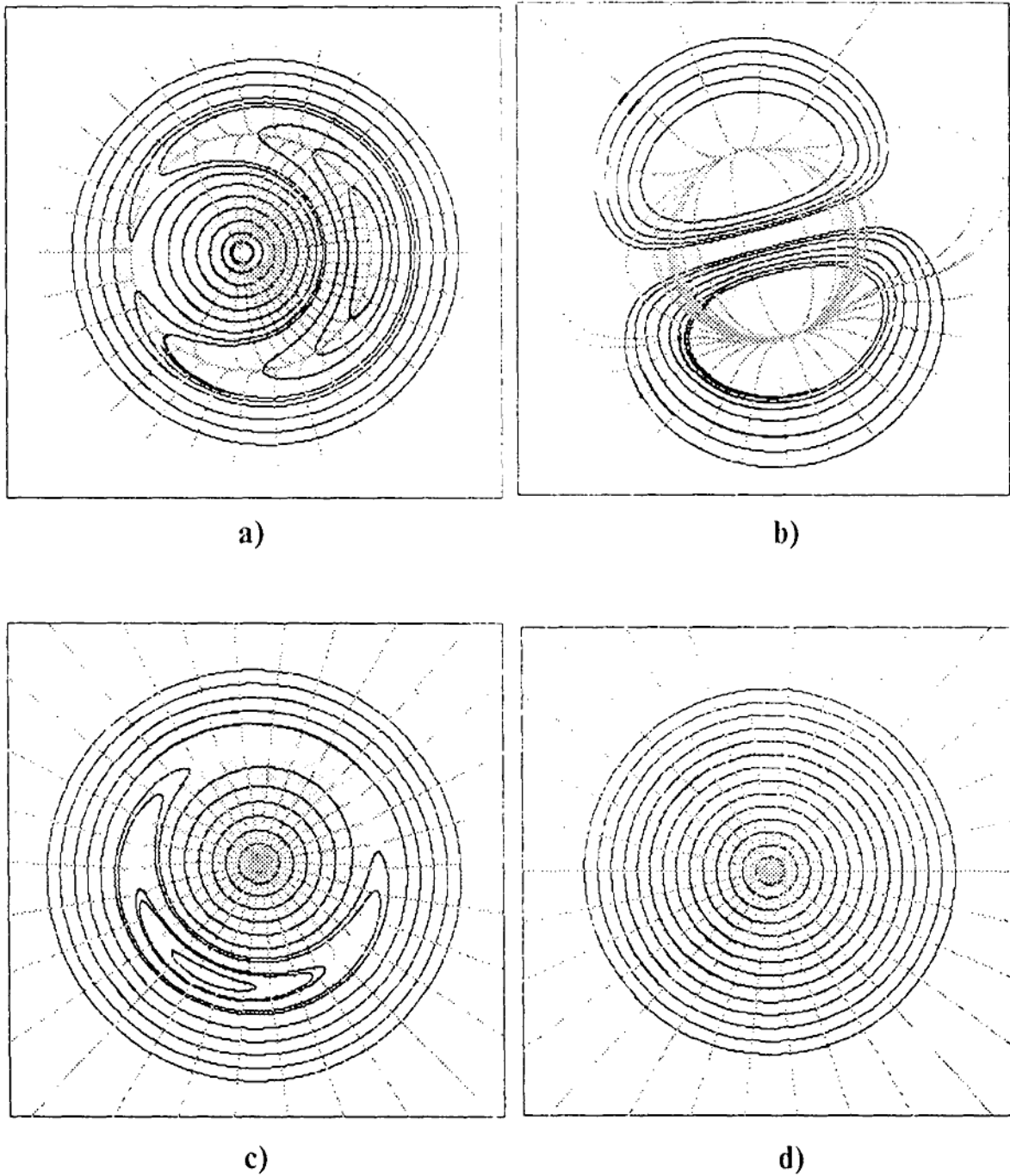


Рис.3. Линии тока F_1 и линии, ортогональные к ним для IV вихря, возмущенного HE_{11} модой ($a=0.3$): а) $\Delta\beta z=0$; б) $\Delta\beta z=\pi/4$; в) $\Delta\beta z=1.5\pi/4$; д) $\Delta\beta z=\pi/2$.

На длинах $z = 2\pi \cdot \Delta\beta$ дислокация вращается по окружности радиуса $R_0(aF_0(R_0) = F_1(R_0))$ со скоростью $w = \frac{d\varphi}{dz} \approx 10^4 \text{ c}^{-1}$. При $z < \pi \cdot 2\Delta\beta$ траектория дислокации сматывается с окружности радиуса R_0 и уходит на бесконечность, а топологический знак вихря изменяется на противоположный. При $z > \pi \cdot 2\Delta\beta > \pi \cdot \Delta\beta$ траектория дислокации наматывается на ту же окружность. На длине $z = \pi \cdot \Delta\beta$ вновь произойдет смена знака топологического заряда.

Таким образом, процесс распространения IV вихря сопровождается сматыванием или наматыванием на обыкновенный аттрактор его фазовой траектории. Представить вид линии тока аналитически не удастся. Однако результаты компьютерного расчета приведены на рис.3 в виде линий тока вектора P_i для различных длин волокна. Заметим, что при $a=0$ линии тока представляют собой концентрические окружности, направление вращения которых изменяется на противоположное при прохождении радиуса $R=0.83$. В окрестности сечения $z = \pi \cdot 2\Delta\beta$ картина линий может измениться и приобрести вид, приведенный на рис.3,в при любом сколь угодно малом возмущении $a \rightarrow 0$. В пространстве линии тока имеют вид спиралей с переменным шагом, закрутка которых изменяется при $z = \pi \cdot 2\Delta\beta$.

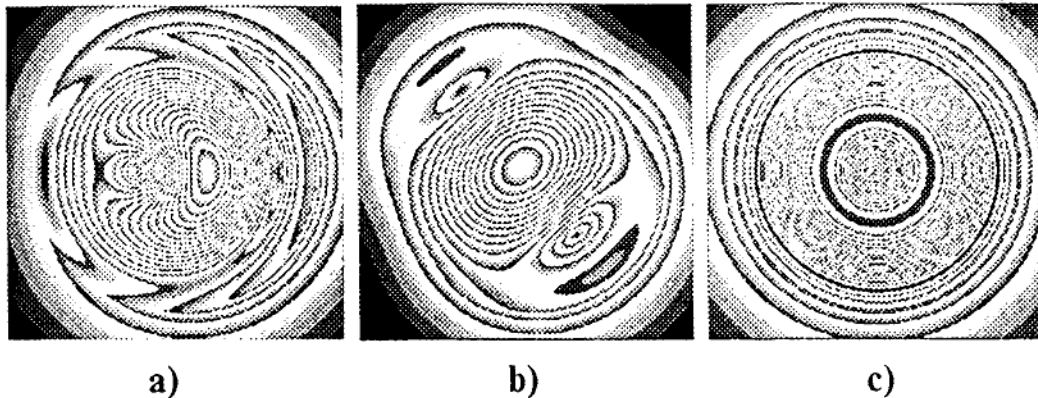


Рис.4. Линии уровня $|P_i|$ для IV вихря, возмущенного HE_{11} модой ($a=0.3$): а) $\Delta\beta z=0$; б) $\Delta\beta z=\pi/4$; в) $\Delta\beta z=\pi/2$.

Вид карт линий уровня приведен на рис.4. По своим формальным признакам линии тока возмущенного P_i векторного поля аналогичны линиям тока невязкой жидкости в двухвалковой мельнице с цилиндрическими валками, вращающимися в противоположные стороны [13,14].

ВЫВОДЫ

Результаты исследования энергетической структуры оптических вихрей маломодового волокна показали, что в отличие от оптических вихрей свободного пространства CV и IV поля несут значительно энергетически больший азимутальный момент импульса. Это указывает на широкие возможности их практического использования в молекулярной инженерии.

Аномальный характер углового момента вихрей волокна связан с тем, что они имеют кроме чисто винтовых дислокаций поперечного поля также винтовые дислокации продольного поля с отличным от нуля топологическим зарядом.

Компьютерное исследование линий тока и линий уровня этих вихрей показывает их формальное сходство с поведением линий тока невязкой жидкости. Для возмущенного устойчивого CV вихря имеет место картина, характерная для одновалковой мельницы. Для возмущенного неустойчивого IV вихря реализуется картина линий тока, характерная для двухвалковой мельницы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Allen L., Beijersbergen M.W., Spreeuw R.J.C., Woerdman J.P. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes// *Phys. Rev. A* 1992. V.45. No 11. P.8185-8189.
2. Berry M. *Physics of defects //Les Houches Session XXXV. Amsterdam North-Holland* 1980. P.453-543.
3. Basistiy I.V., Bazhenov IV. Yu., Soskin M.S., Vasnetsov M.V. Optics of light beams with screw dislocations// *Opt. Comm.* 1993. V.103. P.422-428.
4. Beijersbergen M.W., Allen L., van der Veen H.E.L.O., Woerdman J.P. Astigmatic laser mode converters and transfer of orbital angular momentum// *Opt. Comm.* 1993. V.96. P.123-132.
5. Simpson N.B., Dholakia K., Allen L., Padgil M.J. The mechanical equivalence of the spir and orbital angular momentum of light: optical spanners// *Opt. Lett.* 1997. V.22. N.1. P.52-54.
6. Friese M.E.J., He H., Heckenberg N.R., Rubinsztein-Dunlop H. Transfer of angular momentum to absorbing particles from laser beam with singularity// *SPIE proceeding.* 1995 V.2792. P.190-193.
7. Gahagan K.T., Swartzlander G.A. Optical vortex trapping of particles// *Opt. Lett.* 1996 V.21. N.11. P.827-829.
8. He H., Friese M.E., Heckenberg N.R., Rubinsztein-Dunlop H. Direct observation of transfer of angular momentum of absorptive particles from a laser beam with a phase singularity// *Phys Rev. Lett.* 1995. V.75. N.5. P.826-829.
9. Даршт М.Я., Зельдович Б.Я., Катаевская И.В., Кундикова Н.Д. Формирование единичной дислокации волнового фронта // *ЖЭТФ.* 1995. Т.107. В.5. С.1464-1472.

10. Воляр А.В., Фадеева Т.А. Вихревая природа мод оптического волокна: I. Структура собственных мод// Письма в ЖТФ. Т.22. В.8. С.57-62.
11. Снайдер А., Лав Дж. Теория оптических волноводов. М: Радио и связь. 1987. 656 с.
12. Жермен П. Механика сплошных сред. М: Мир. 1965. 253 с.
13. Постон Т., Стюарт И. Теория катастроф и ее приложения. М.: Мир. 1980. 607 с.
14. Волковыский Л.И., Лунц Г.Л., Араманович И.Г. Сборник задач по теории функций комплексного переменного М: Наука. 1975. 320 с.

ОРБИТАЛЬНЫЙ УГЛОВОЙ МОМЕНТ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В МНОГОМОДОВЫХ ВОЛОКНАХ

К. Н. Алексеев, А. Н. Алексеев, А. В. Воляр, доктор физико-математических наук, профессор, Ю. А. Фридман, кандидат физико-математических наук, доцент

1. Введение

Традиционно считается, что электромагнитные волны оптического диапазона переносят количество движения (электродинамический импульс), которое относительно просто можно преобразовать в механический импульс (давление света) [1].

Более сложно трактуется вопрос о переносе световым пучком момента количества движения. Так, спину фотона (поляризация света) приписывался собственный момент количества движения. Еще в работе [2] было показано, что циркулярно поляризованный световой пучок может закручивать образцы, изготовленные из поглощающих материалов. Однако величина такого потока момента импульса очень мала. Например, циркулярно поляризованное 10 мВт излучения He-Ne лазера имеет поток момента импульса порядка 10^{18} Нм.

Интерес к этому явлению резко возрос, когда в работе [3] была показана принципиальная возможность использования лазерных пучков в оптических ловушках микрочастиц, размером 1-3 мкм.

Вскоре [4] эти пучки были использованы в оптических пинцетах, способных перемещать частицы в трех направлениях (an optical tweezer) и сообщать этим частицам заданное вращательное движение (an optical spanner) [6].

Такие универсальные свойства лазерное излучение приобрело вследствие выделения из полного поля лазерного резонатора, так называемых пучков Лаггера-Гаусса. Эти пучки имеют на своей оси особенность типа ветвления, а их волновой фронт представляется в виде винтовой поверхности – прямого геликоида.

В работе [7] было показано, что момент импульса пучка Лаггера-Гаусса (в дальнейшем мы будем использовать общепринятое понятие – угловой момент) можно разделить на собственно орбитальную и зависящую от поляризации части. Собственно орбитальная часть углового момента определяется свойствами геликоидального волнового фронта пучка.

В отличие от пучков в свободном пространстве собственные моды оптических волокон в процессе распространения формируют поля, называемые оптическими вихрями [8,9], аналогичные по свойствам лазерным пучкам Лаггера-Гаусса. В многомодовых волокнах существует два типа оптических вихрей: устойчивые CV вихри (a circular vortex) и неустойчивые IV вихри (an instability vortex).

В этой работе мы не будем касаться электродинамических свойств оптических вихрей многомодового волокна.

Наша цель – изучить основные процессы преобразования углового момента оптических вихрей волокна в механический момент импульса микрочастиц на выходе волокна и оценить величину момента импульса излучения в волокне для устойчивых вихрей.

2. ПОТОК МОМЕНТА ИМПУЛЬСА CV-моды.

Плотность момента импульса электромагнитного поля в веществе [10] может быть представлена в виде:

$$\vec{M} = \vec{r} \times \vec{\ddot{A}} \times \vec{\dot{A}}. \quad (1)$$

Для монохроматических полей среднее по времени значение \vec{M} может вычисляться [11] по формуле:

$$\langle \vec{M} \rangle = \frac{1}{2} \text{Re} \vec{r} \times \vec{D}^* \times \vec{B}. \quad (2)$$

Непосредственное вычисление показывает, что для собственных мод уравнений Максвелла в цилиндрическом ступенчатом световоде [12] $\langle M_z \rangle \equiv 0$. Однако существуют линейные суперпозиции собственных мод, для которых $\langle M_z \rangle \neq 0$. В качестве примера такой суперпозиции мы рассмотрим моду

$$CV_{\pm 1}^{\pm} = HE_{im}^{od} \pm iHE_{im}^{ev},$$

индекс *od* и *ev* указывает на четную и нечетную HE_{im} моду соответственно.

При изучении возможности экспериментально доказать наличие у излучения в волокне *z*-компоненты момента импульса выясняется, что в зависимости от идеи экспериментальной проверки не всегда бывает достаточно знать локальный или интегральный момент импульса излучения.

Например, устойчивый CV вихрь волокна не изменяет величину *z*-компоненты момента импульса [14] в процессе распространения. Но из этого вовсе не следует, что для всех полей в волокне $M_z = \text{const}$.

Так, неустойчивый вихрь IV может изменять в процессе распространения нормированную величину M_z от +1 до -1. Из этого следует необходимость использования в качестве интеграла движения некоторую обобщенную характеристику светового поля [17].

В частности, важной характеристикой излучения в волокне является поток момента импульса через поперечное сечение световода. Как известно [10], тензор плотности потока момента импульса имеет вид:

$$\ddot{I}_{ik} = \varepsilon_{imn} \mathbf{r}_m T_{nk}, \quad (3)$$

где ε_{imn} - абсолютно асимметричный тензор, T_{nk} - максвелловский тензор натяжений

$$T_{nk} = E_n D_k + H_n B_k - \frac{1}{2} \delta_{nk} (\vec{E}\vec{D} + \vec{H}\vec{B}). \quad (4)$$

Поток момента импульса через поверхность можно интерпретировать в контексте как момент силы \vec{K} , действующий на эту поверхность:

$$K_i = \iint_S \ddot{I}_{ki} dS_k. \quad (4')$$

Следуя Пойнтингу [13], поместим на пути вышедшего из волокна излучения зеркальную пластинку или другой объект, изменяющий направление распространения излучения. Действующий на этот объект суммарный момент силы определим как разность потоков момента импульса падающего и отраженного излучения. Пусть полный поток момента импульса

вышедшего из волокна излучения есть \vec{K} (ось Oz направлена по оси волокна). Если на оси Oz на пути распространения излучения поставить зеркальную пластинку (или ее аналог) с единичным вектором внешней нормали \vec{n} , то момент силы \vec{R} , действующий на пластину со стороны излучения равен:

$$\vec{R} = 2(\vec{K}\vec{n})\vec{n}. \quad (5)$$

При этом мы считаем коэффициент отражения равным 1. При усреднении \vec{R} по времени мы должны пользоваться рецептурой (2) усреднения квадратичных слагаемых по полям. Средний поток момента импульса через поперечное сечение волокна $\langle K_z \rangle$ равен:

$$\langle K_z \rangle = \iint_S \langle \vec{i}_{13} \rangle dS_3,$$

где $dS_3 = dx dy$, S - поперечное сечение волокна.

Вычисления показывают, что для CV мод $\langle \vec{i}_{13} \rangle = \langle \vec{i}_{23} \rangle = 0$, поэтому отлична от нуля только z-компонента потока момента импульса $\langle K_z \rangle$. В выражение для P_{33} входят T_{13} и T_{23} , которые есть сумма произведений тангенциальных и нормальных компонент полей. Как известно [17] на границе раздела сред такие комбинации непрерывны, поэтому z-компонента потока момента импульса не изменяется при выходе излучения из волокна.

Из (5) для CV мод следует:

$$\langle \vec{R} \rangle = 2\langle K_z \rangle \cos\Theta \vec{n},$$

где Θ - угол между \vec{n} и Oz. Если в силу методики эксперимента удастся измерять только z-компоненту крутящего момента, для $\langle R_z \rangle$ получаем окончательно:

$$\langle R_z \rangle = 2\langle K_z \rangle \cos^2\Theta. \quad (6)$$

Для получения «транспортной» характеристики волокна по отношению к пропусканию момента импульса CV вихря надо разделить $\langle K_z \rangle$ на среднюю z-компоненту вектора потока энергии $\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$ через поперечное сечение волокна.

Вычисления дают:

$$\frac{\langle K_z \rangle}{\langle S_z \rangle} = \frac{\sqrt{2\Delta}}{vnc} (\epsilon + n^2\mu)(1+l)r_0, \quad (7)$$

где $\Delta, v, n, \epsilon, \mu$ - материальные константы, определенные структурой волокна [12], c - скорость света, r_0 - радиус сердцевины оптического волокна. При мощности излучения P величина $\langle R_z \rangle$ равна:

$$\langle R_z \rangle = 2P \frac{\langle K_z \rangle}{\langle S_z \rangle} \cos^2\Theta.$$

При получении (7) мы пренебрегли отличием материальных констант оболочки и сердцевины. Вычисления дают для P=10 мВт :

$$\frac{\langle K_z \rangle}{\langle S_z \rangle} = 9.8 \cdot 10^{-18} \text{ Нм.}$$

3. МЕХАНИЗМЫ НАВЕДЕНИЯ ВРАЩАТЕЛЬНОГО МОМЕНТА.

Любая экспериментальная схема обнаружения момента импульса излучения с неизбежностью основывается на взаимодействии излучения и вещества. В основном, как в предложенной выше схеме, о наличии орбитального углового момента излучения судят по создаваемому им механическому вращательному моменту, действующему на пробное тело [2]. Однако далеко не всегда подобное механическое воздействие излучения свидетельствует о наличии у излучения углового момента. Это связано с тем, что вращательный момент определяется как поток момента импульса через поверхность тела, а поток может быть отличен нуля и при тождественно равному векторе Пойнтинга \vec{S} !

В качестве примера рассмотрим классическую модель взаимодействия оптических электронов с излучением: осциллятор с затуханием в поле монохроматической волны [14].

Пусть напряженность электрического поля световой волны с частотой ω равна:

$\vec{E} = \vec{E}_0 e^{i\omega t}$, где $\vec{A}_0 = \vec{A}_1 + i\vec{A}_2$, \vec{A}_1 и \vec{A}_2 — постоянные действительные векторы. Запишем уравнение движения осциллятора в поле такой волны, пренебрегая пространственной дисперсией и силой Лоренца:

$$\ddot{\vec{r}} + 2\gamma \dot{\vec{r}} + \omega_0^2 \vec{r} = \frac{e}{m} \vec{E}_0 e^{i\omega t}, \quad (8)$$

где ω_0 - собственная частота осциллятора, γ - коэффициент затухания, e , m - заряд и масса электрона.

Определим средний по времени момент диссипативных сил как $\langle \vec{E} \rangle = \langle -2\gamma m \vec{r} \times \dot{\vec{r}} \rangle$, а среднюю мощность диссипативных потерь как $\langle N \rangle = \langle -2\gamma m \dot{\vec{r}}^2 \rangle$. Решая (8) получаем для

отношения $\frac{\langle \vec{E} \rangle}{\langle N \rangle}$:

$$\frac{\langle \vec{E} \rangle}{\langle N \rangle} = \pm \frac{2}{\omega} \frac{\vec{E}_1 \times \vec{E}_2}{E_1^2 + E_2^2}. \quad (9)$$

Если \vec{A} - циркулярно поляризованная волна с волновым вектором вдоль Oz, из (9) следует $\langle K_z \rangle = \pm \frac{1}{\omega} \langle N \rangle$, где знак зависит от поляризации. Таким образом, не обладающая орбитальным моментом бесконечная плоская циркулярно поляризованная волна передает веществу угловой момент $\langle \hat{I}_z \rangle$, пропорциональный рассеянной энергии $\langle W \rangle$.

В квантовой теории это связывается с наличием у циркулярно поляризованного фотона спина $\pm \hbar$.

В теории оптических переходов [16] показывается, что при облучении атома циркулярно поляризованным светом в нем в дипольном приближении индуцируются переходы с изменением

магнитного квантового числа m на ± 1 . А это отвечает изменению z -компоненты вектора момента импульса атома на $\pm \hbar$. Таким образом, при поглощении атомом кванта с частотой ω $\Delta M_z = \pm \frac{1}{\omega} \Delta W$, где $\Delta W = \hbar \omega$, т.е. поглощение энергии ΔW сопряжено с изменением M_z на $\pm \frac{1}{\omega} \Delta W$.

Покажем, что при классическом рассмотрении этот эффект можно связать со спиновым угловым моментом электромагнитного поля.

Как известно [15], пространственная плотность вектора спина S_i определяется по формуле:

$$S_i = \frac{1}{2} \varepsilon_{ijk} \left(A_k \frac{\partial A_j}{\partial t} - A_j \frac{\partial A_k}{\partial t} \right), \quad (10)$$

где \vec{A} - векторный потенциал.

Если $\vec{A}_0 = \vec{A}_1 + i\vec{A}_2$ и на \vec{A} наложена кулоновская калибровка из (10) следует выражение для вектора плотности спина \vec{S} суперпозиции бесконечных плоских линейно поляризованных волн:

$$\vec{S} = \pm \frac{1}{\omega} \vec{A}_1 \times \vec{A}_2. \quad (11)$$

Сравнивая (9) с (11) убеждаемся, что введенный такой волной момент силы пропорционален вектору плотности классического спинового момента поля:

$$\langle \vec{K} \rangle = \pm \frac{\vec{S}}{w} \langle N \rangle, \quad \text{где } w - \text{плотность энергии электромагнитной волны.}$$

Это, отнюдь, не означает в данном случае трансформацию спинового момента в орбитальный. Согласно общей теории [15] в классическом векторном поле спиновый и орбитальный моменты сохраняются по отдельности. То же справедливо для системы вещество+поле: суммарный орбитальный момент вещества и поля не может измениться за счет изменения спинового момента поля. В данном примере наличие трения приводит к отставанию по фазе вектора дипольного момента осциллятора \vec{d} от вектора \vec{E} . Иными словами, возникает постоянный механический момент $\vec{d} \times \vec{A}$, который по своей сути имеет электростатическую природу и не связан с наличием у волны орбитального углового момента.

Отметим, что конечная причина возникновения механического момента в этом случае та же, что и в опытах Бета [2]: в двулучепреломляющих пластинах механический момент возникает из-за неколлинеарности \vec{E} и вектора поляризации [7]. Однако из-за электростатической природы такого появления момента силы можно говорить о передаче момента импульса излучения веществу лишь в широком смысле. При этом передача момента импульса веществу происходит за счет убыли первоначально нулевого момента импульса поля.

Говоря об экспериментальном обнаружении передачи момента импульса веществу посредством оптических электронов следует отметить, что при этом определяющую роль играет электрон-решеточное взаимодействие. При рассмотрении уединенного атома обычно принято связывать коэффициент γ в (8) с наличием лучистого трения [14].

Однако само по себе лучистое трение, будучи проявлением рассеяния электромагнитной волны не может отвечать за изменение момента импульса образца. Поэтому основной вклад в формирование феноменологической константы γ должны давать эффекты взаимодействия оптических электронов с коллективными возбуждениями образца: фононами и т.п.

Роль механизмов передачи момента импульса электронов решетке тем более возрастает, если вспомнить, что в некоторых случаях момент импульса электронной подсистемы вообще не передается решетке (ср. объяснение диамагнетизма).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Световое поле вихрей оптического волокна переносит угловой момент импульса. В слабо направляющих волокнах оказывается невозможным выделить из общего углового момента импульса орбитальный и спиновый моменты. Однако по своему проявлению в процессе трансформации углового момента поля в механический момент можно говорить об изолированном действии, как орбитального, так и спинового моментов. Величина орбитального момента тем больше, чем выше величина топологического заряда вихря. В процессе передачи углового момента импульса веществу существенную роль играют поляризационные свойства света — спиновый момент импульса. Роль спинового момента повышается, если в процессе взаимодействия излучения и вещества доминируют диснационные механизмы. Заметим, что эллиптически поляризованные поля не имеющие орбитального момента (аналоги полей Эрмита-Гаусса в свободном пространстве) могут индуцировать вращательный механический момент вещества. Орбитальный момент импульса главным образом проявляется в измерительных схемах, связанных с отражением (с изменением направления вектора Пойнтинга).

Особо подчеркнем, что для оптических волокон в качестве интеграла движения нельзя использовать требования постоянства z-компоненты углового момента. В уравнении непрерывности для оптических полей волокон требуется оперировать с более общим понятием — потоком момента импульса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фабрикант УФН, 42,2 1950
2. R. Beth. Mechanical detection and measurement of the angular momentum of light. Pys. Rev. 1936, 50 (115) p. 115-125.
3. S. Chang, S.S. Zee. Optical torque exerted on homogeneous sphere levitated in the circular polarized fundamental-mode laser beam. J. Opt. Soc. Amer, B, 1985, 2(II), p. 1853-1857.
4. H. He, N.R. Heckenberg, H. Rubinsztein-Dunlop. Optical partial trapping with higher order doughnut beams produced using high efficiency computer generated phase holograms. J. Mod. Opt., 1994, 42(I), p 217-223.
5. M.E.S. Friese, H. He, N.R. Heckenberg, H. Rubinsztein-Dunlop. Transfer of angular momentum to absorbing particles from a laser beam with phase singularity. SPIE-proceeding, 1995, V.2792, p. 190-192.
6. N.B. Simpson, K. Dholakia, L. Allen, M.J. Padgett. Mechanical equivalence of the spin and orbital angular momentum of light: optical spanners. Physics UNISID 1996, 17/07.

7. L. Allen, M.W. Beijersbergen, R.J. Spreeuw, J.P. Woerdman. Orbital angular momentum of light and transformation of Laguerre-Gaussian laser mode. *Physical Rev. A.* v45, №11, 1992, p. 8185-8189.
8. А. В. Воляр, Е. А. Фадеева. Вихревая природа мод оптического волокна: I. Структура собственных мод. *Письма в ЖТФ*, т.22, в8. 1996, с. 57-62.
9. А. В. Воляр, Е. А. Фадеева. Вихревая природа мод оптического волокна: II. Распространение оптических вихрей. *Письма в ЖТФ*, т.22, в8. 1996, с. 63-67.
10. Ю. В. Новожилов, Ю. А. Яппа "Электродинамика", М., "Наука", 1978 г.
11. Л. Д. Ландау, Е. М. Лившиц "Теория поля", М., "Наука", 1973 г.
12. Снайдер А., Лав Дж. Теория оптических волноводов. М: радио и связь. 1987. 656 с.
13. J.N. Poynting, *Proc. R. Soc. London, ser. A*, 82, 560, 1909.
14. В. Гайтлер "Квантовая теория излучения", М., 1940 г.
15. Н. Н. Боголюбов, Д. В. Ширков "Введение в теорию квантовых полей", М., "Наука". 1984 г
16. Д. И. Блохинцев "Основы квантовой механики", М., "Наука". 1983 г.
17. Л. Д. Ландау, Е. М. Лившиц "Электродинамика сплошных сред", М., "Наука", 1982 г.

О МЕХАНИЗМЕ ЭЛЕКТРОКАТАЛИТИЧЕСКОЙ ДЕСТРУКЦИИ И ПЕРОКСИДОМ ВОДОРОДА

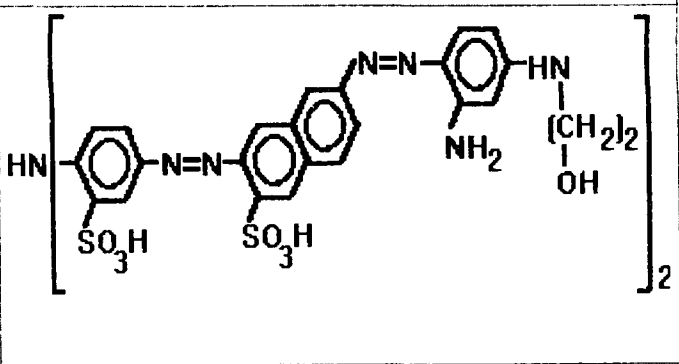
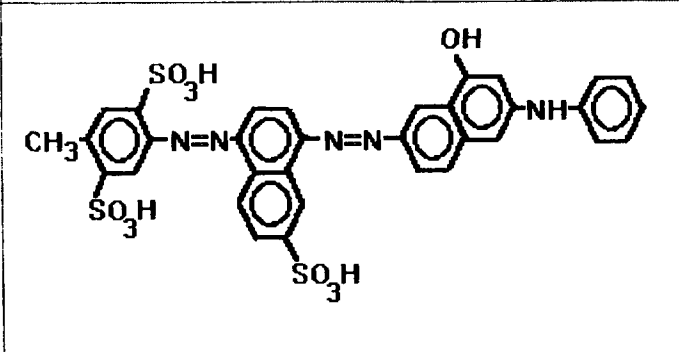
*Е. Д. Першина, кандидат химических наук, доцент, С. В. Костык,
Н. А. Грошенко, кандидат химических наук, профессор*

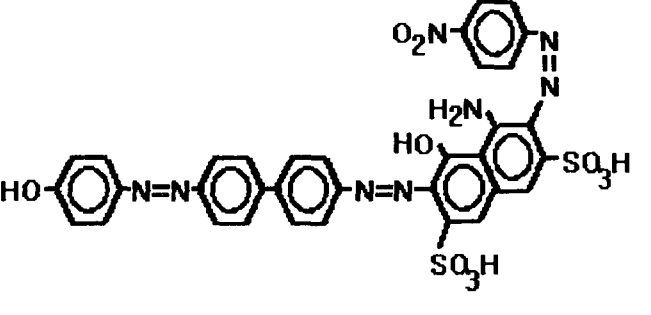
В настоящее время большое внимание уделяется вопросам устранения токсичных загрязнений питьевых и промышленных сточных вод, с проведением технологического процесса и разработкой стадий очистки в возможно более мягких условиях, селективно, при меньших энергетических затратах и достаточно быстро. В решении подобных задач перспективным является использование электрокаталитических процессов, в частности, связанных с окислительной деструкцией красителей в сточных водах анилинокрасочного производства. Очевидно, что одним из основополагающих моментов в данном случае является выход продуктов, обладающих минимальным токсическим действием. Поэтому значительный практический и теоретический интерес представляют процессы, протекающие в исследуемых системах.

Достаточно сложное строение молекул азокрасителей (табл.1) затрудняет выявление механизмов их электрокаталитической деструкции в водных растворах. При этом возможны различные варианты схем, приближающих к механизму, некоторые из которых приведены ниже.

Таблица 1

Исследуемые азокрасители

№	Структурная формула	Техническое название	Молекулярная масса
1		прямой черный 2С (ПЧ)	1185
2		прямой голубой (ПГ)	828

3		<p>прямой зеленый (ПЗ)</p>	768
---	-----------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------	-----

Целью работы являлось выяснение поведения азокрасителей при их электрокаталитической деструкции в щелочных водных растворах в присутствии хлорид-ионов, а также добавок пероксида водорода в систему, состоящую из платинированного графита (Pt/C) и красителя в условиях протекания электрохимической реакции (Pt/C — ток — краситель).

В качестве основного был использован метод дифференциальных кривых заряжения в потенциодинамическом режиме с использованием трехэлектродной импульсной ячейки с применением потенциостата ПИ-50-1, а также последующая ЯМР-спектроскопия продуктов реакции на приборе VARIAN-400.

Деструктивное окисление азокрасителей проводилось в области потенциалов 1,6-3,0 В по н.в.э. с использованием в качестве рабочего электрода платинированной платины (Pt/Pt) и графитов трех марок [АРВ, В₂Л₁₂ (модифицированный тефлоном), СУ-800] в щелочной среде (рН 8,6-10,0). В систему вводился хлорид натрия и пероксид водорода.

Пробы на ЯМР-спектроскопию отбирались из системы зондом, концентрировались при длительном накоплении продуктов электролиза, после чего анализировались с использованием компьютерных систем.

Полученные в работе данные свидетельствуют о том, что в области потенциала, предшествующей выделению молекулярного кислорода ($E < 1,6$ В по н.в.э.), анодное обесцвечивание растворов красителей выражено чрезвычайно слабо. Это подтверждается, в частности, дифференциальными кривыми заряжения, снятыми на платине в кислородной зоне потенциала, показавшими, что в присутствии всех использованных в работе модельных растворов красителей площадь под анодными участками кривых отличается от фоновых на относительно небольшую величину [1]. В то же время, в области потенциала, отвечающей кислородному перенапряжению ($E > 1,6$ В), отмечается резкое возрастание степени обесцвечивания. Как следует из табл.2, эффект электрохимического обесцвечивания щелочных растворов красителей велик и достигает 97-99 %. Из табл.2 видно также, что аналогичные эффекты могут быть достигнуты и на графитовых анодах. При этом степень осветления мало зависит от марки используемого графита и индивидуальных особенностей красителя.

Таблица 2

Электрохимическое обесцвечивание водных растворов азокрасителей

pH 10.0, [NaCl] = 1 г/л, I = 0.03 А/см²

(C_0 - цветность по бихроматной шкале, α - степень обесцвечивания)

Краситель	C_0 исх.	Pt/Pt		АРВ		$\text{В}_2\text{Л}_{12}$		СУ-800	
		C_0 кон. α ,%	α ,%	C_0 кон. α ,%	α ,%	C_0 кон. α ,%	α ,%	C_0 кон. α ,%	α ,%
ПЧ	60	0,6	99	0,9	98	1,9	97	4,7	92
ПГ	40	0,2	99	2,6	94	0,5	99	3,5	91
ПЗ	40	1,1	97	2,6	94	2,4	94	4,2	90
ПГ, ПЧ, ПЗ (смесь)	70	1,4	98	1,8	97	3,5	95	8,0	89

Обращает на себя внимание тот факт, что степень электрохимического обесцвечивания растворов в большинстве случаев близка к степени обесцвечивания, достигаемой при гетерогенно-каталитическом распаде H_2O_2 в модельной системе [2]. В этом плане представляют интерес варианты комбинированного электрокаталитического обесцвечивания. Надо отметить, что факт обесцвечивания растворов не указывает на деструктивные процессы, протекающие в растворах красителей, а может быть лишь вызван нарушением цепей конъюгации или разрушением хромофорных и ауксохромных группировок [3].

Было доказано, что обесцвечивание растворов сопровождается глубокой деструкцией молекул азокрасителей. Большая часть (более 96 %) молекул подвергается полной минерализации. В растворе также обнаруживаются незначительные количества низкомолекулярных органических соединений. В соответствии с данными ЯМР (табл.3), в результате деструктивного окисления красителя ПЧ в системе с хлорид-ионом хлорорганические соединения не образуются. Из таблицы видно, что процесс деструкции красителя на Pt/Pt в присутствии Cl^- -ионов протекает значительно глубже, чем в присутствии лишь H_2O_2 . Кроме того, замена Pt/Pt-электрода на графитовый приводит к изменению состава продуктов и снижению глубины деструкции красителя, что свидетельствует о принципиальной роли электрода-катализатора в данном процессе.

Приводимые ниже варианты схем к механизму электрокаталитической деструкции азокрасителей в водных растворах базируются в первую очередь на данных по их адсорбции [1,4] и на данных ЯМР по определению продуктов окисления (табл.3). Как известно, для азокрасителей характерна слабо выраженная адсорбция без хемосорбционного взаимодействия [4]. Отсутствие его признаков дает основание полагать, что окислительные процессы протекают, главным образом, в приэлектродном слое. При этом электрод-катализатор, в основном, необходим для каталитической и электрохимической генерации активных частиц, осуществляющих окислительный процесс.

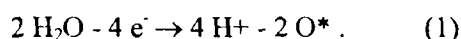
Таблица 3

Продукты деструктивного окисления азокрасителя ПЧ
в водных растворах. pH 9.0, [NaCl] = 1 г/л, [H₂O₂] = 0.5 г/л

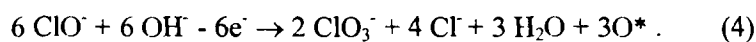
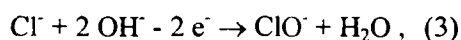
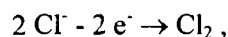
Групповая принадлежность	Система		
	Pt/Cl ⁻ /ток, мг/л	Pt/H ₂ O ₂ /ток, мг/л	C/Cl ⁻ /ток, мг/л
формиат	1 - 10	1 - 10	1 - 10
ацетонитрил	1 - 10	> 10	> 10
ацетат	<< 1	> 10	> 10
ацетон	<< 1	1 - 10	1 - 10
хинон	—	1 - 10	1 - 10
эфиры	—	1 - 10	1 - 10
гликоли	—	1 - 10	1 - 10

В системе Pt — H₂O₂ — краситель при гетерогенно-каталитическом распаде пероксида водорода образуются радикалы OH[•] (в кислой среде) или HO₂[•] (в щелочной) [5], окисляющие молекулы красителя в приэлектродном пространстве.

В системе Pt — ток — краситель в отсутствии Cl⁻ -ионов окисление идет за счет активных форм кислорода (АК), возникающих при анодных процессах с участием адсорбированных молекул воды [6], например, по схеме:



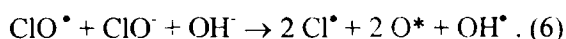
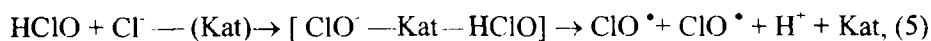
В системах Pt — ток — Cl⁻ — краситель в окислительном процессе дополнительно участвует активный хлор (АХ), возникающий в ряде анодных реакций, протекающих с участием адсорбированных на электроде хлорид-ионов:



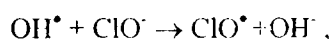
Интенсификация анодного окисления азокрасителей в присутствии Cl⁻ -ионов, равно как и процессов окисления вообще, связана с участием в них АХ. Однако имеются различные точки зрения относительно механизмов окислительного действия АХ. Согласно одной из них [3], решающую активность проявляет кислород. Предварительно переведенный в возбужденное состояние рекомбинацией АХ. Видимо, с этих позиций наиболее целесообразно рассматривать

схемы электрокаталитического окисления азокрасителей, поскольку в продуктах систем Pt — ток — Cl⁻ — краситель не удалось обнаружить хлорсодержащих фрагментов, наличие которых могло бы свидетельствовать о непосредственном участии хлора или его кислородных соединений в окислительном акте.

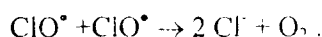
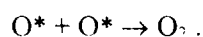
Имеются данные о том [7], что окислительная способность АХ проявляется сильнее всего в тех случаях, когда в растворе одновременно присутствуют HClO и ClO⁻. Известно также, что в зоне pH 7-9 обеспечивается их оптимальное соотношение для того, чтобы на катализаторе образовался активный комплекс, распад которого инициирует возникновение возбужденного АК:



При этом надо отметить, что интервал pH, обеспечивающий нужное соотношение HClO и ClO⁻ поддерживается за счет подкисления анодного пространства в соответствии с реакциями (1-5). Реакция (6) примечательна не только генерацией АК, но и возможностью многократного возвращения хлорид-ионов в цикл. Развитию же цепи способствует процесс формирования радикалов ClO[•] по схеме:



а медленному обрыву цепи — рекомбинационные процессы:



Факторы, способствующие накоплению АХ в системе, вызывают уменьшение концентрации хлорид-ионов, а следовательно, снижение образования АК [8]. Так, при высоких плотностях анодного тока, возможен побочный процесс — образование хлоратов, которые в обычных условиях в окислительном отношении мало активны (см. (4)). Обращает на себя внимание специфичность по каталитической активности материала анода. Результаты анализа свидетельствуют (табл.2,3), что в одинаковых условиях платина оказывает более глубокое деструктивное воздействие в процессе окисления по сравнению с графитом. При этом глубина деструкции в системах с хлорид-ионом намного выше, чем в системах с H₂O₂, что по-видимому, говорит в пользу образования АК, который по своей реакционной способности намного превосходит HO₂[•]-радикалы, образующиеся в процессе гетерогенно-каталитического распада H₂O₂.

В этой связи представляет интерес изучение системы Pt — ток — Cl⁻ — H₂O₂ — краситель. Как отмечалось выше, в такой комбинированной системе обесцвечивание красителя происходит наиболее интенсивно, причем H₂O₂ здесь выполняет не только дополнительные окислительные функции, но и функции восстановителя по отношению ClO₃⁻. Последнее, однако, в силу ряда причин трудно поддается учету и доказательству.

Итак, в основе схем, отражающих механизм электрокаталитического окисления азокрасителей, лежит экспериментально доказанное представление об отсутствии хемосорбционного взаимодействия красителя с поверхностью платины. В условиях реализации окислительного акта в приэлектродном слое, когда непосредственный контакт окисляемого вещества с поверхностью платины не обязателен, генерация активным хлором возбужденного кислорода, вероятно, предопределяет отсутствие хлорорганических структур в продуктах окисления. При хемосорбции органического компонента, когда окисление происходит непосредственно на поверхности катализатора, по крайней мере, на промежуточных стадиях не исключается возможность образования хлорорганических продуктов, что подтверждается данными по электрокаталитическому окислению фенолов в присутствии хлорид-ионов [9,10]. Анодное окисление фенолов, прочно хемосорбирующихся на поверхности Pt/Pt, согласно данным хроматографического анализа сопровождается появлением в системе моно-, ди-, и трихлорфенолов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Першина Е. Д., Видович Г. Л., Богдановский Г. А. // Вестн. МГУ. Сер. 2. Химия. - 1992. - Т.33. № 6. - С. 555.
2. Kitao Takane, Jahashi Ryosuke // Water Purif.a.Liquid Wastes Treat. - 1976. - V.17, № 8. - P.735.
3. Фрумкин А. Н., Тедорадзе Г.А. // Докл. АН СССР. - 1958. - Т.118, № 3. - С. 530.
4. Першина Е. Д. Автореф. дисс. ... канд. хим. наук. - М., 1993. - 21 с.
5. Василенко И. И., Нечипоренко Н. Н., Горбачев Л. К. // Сб. тр. Белгород. технол. ин-т строит. материалов. - 1974. - Вып.7. - С. 163.
6. Якименко Л. М. Электродные материалы в прикладной электрохимии. - М.: Химия, 1977. - 264 с.
7. Краснобородько И. Г. Деструктивная очистка сточных вод от красителей. - Л. Химия, 1988. - 192 с.
8. Никитин И.В. Химия кислородных соединений галогенов. - М.: Наука, 1986. - 104 с.
9. Семенова А. Д., Штыркова С. Ю., Богдановский Г. А., Камкин А. Н., Кириллов Е. А. // Вестн. МГУ. Сер.2. Химия. - 1992 - Т.33, № 6. - С.558.
10. Штыркова С. Ю., Семенова А. Д., Богдановский Г. А. // там же. - С. 560.

ГОМОГЕННО-ГЕТЕРОГЕННЫЕ ПЕРЕХОДЫ ПРИ РЕАКЦИИ KMnO_4 С H_2O_2 В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ. НАЧАЛЬНАЯ СТАДИЯ РЕАКЦИИ

С. В. Костык, Е. Д. Першина, кандидат химических наук, доцент, Г. Н. Шадрин, кандидат химических наук, доцент, Н. А. Грошенко, кандидат химических наук, профессор

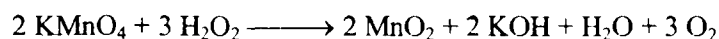
1. Введение.

Окислительные и каталитические свойства двуокиси марганца широко используются как в химическом эксперименте, так и в технологии очистки сточных вод. При исследовании известной реакции разложения H_2O_2 в водных растворах [1-3] обычно применяют твердые образцы MnO_2 или дисперсный порошок, приводя данные о пористости и удельной поверхности [4,5]. Считается, что именно поверхность обладает каталитически активными центрами, включающими ионы Mn^{4+} и Mn^{3+} [6], однако недостаточно внимания уделяется изучению состава поверхностного слоя MnO_2 и, соответственно, формированию адсорбционно и каталитически активных центров катализатора, что не всегда приводит к однозначным выводам о процессах, протекающих на его поверхности. В большинстве случаев [7,8] исследования ограничиваются получением кинетических параметров, которые указывают на первый или близкий к первому порядок реакции по H_2O_2 . Между тем, активность катализатора – это характеристика, зависящая от целого ряда факторов, в котором одно из важных мест занимают условия и механизм формирования самой каталитически активной фазы.

В данной работе при различных условиях изучен и смоделирован процесс начальной стадии образования дисперсной системы “ MnO_2 – вода”, более глубокое понимание которого позволит регулировать каталитическую активность по отношению к распаду пероксида водорода на частицах MnO_2 в разбавленных водных растворах.

2. Экспериментальная часть.

В работе использовались образцы дисперсной системы двуокиси марганца, полученной взаимодействием разбавленных водных растворов перманганата калия и пероксида водорода. Золи получали в результате реакции:



в термостатируемой реакционной ячейке. Рабочие растворы KMnO_4 и H_2O_2 готовились без использования стабилизирующих добавок из реактивов марки “х.ч.” и дважды перегнанной дистиллированной воды; стандартизировались по оксалатной методике [9]. Получение образцов вели смешением разбавленных растворов KMnO_4 и H_2O_2 в нейтральной среде преимущественно в эквивалентных концентрациях. Среду в дальнейшем варьировали с учетом разбавления добавками

стандартных растворов KOH и H₂SO₄ (0,1 н, "ч.д.а."), pH растворов измеряли стеклянным электродом на иономере ЭВ-74 с хлорсеребряным электродом сравнения.

В зависимости от условий приготовления (температура, концентрация и порядок введения реагентов) менялись свойства дисперсной системы: средний размер частиц, состав частиц и их поверхностного слоя, электроповерхностные, адсорбционные и каталитические свойства. В данной работе рассматриваются лишь некоторые.

Кинетические закономерности и равновесные системы в ред-окс превращениях $Mn^{7+} \rightarrow Mn^{4+}$ исследовались на автоматическом спектрофотометре СФ-18 (1 кювет 0,2 и 2,0 см) обзорно и при фиксированных длинах волн 525 нм, 340 нм и др. Восстановление перманганат-иона проводили при заданных температурах вначале количественно до Mn(IV) затем (при введении избытков H₂O₂) - до низших степеней окисления марганца (в данной работе не рассматривается). По виду спектров можно судить о коэффициентах экстинкции золей. Растворами сравнения служили в каждом случае растворы KOH и H₂SO₄ соответствующих pH и ионной силы. Детектирование Mn^{2+} -ионов проводилось на ЭПР-спектрометре Минск-8 после дополнительного концентрирования, Mn^{3+} -ионов – в некоторых случаях спектрофотометрически по поглощению комплекса ЭДТА [10] ($\lambda_{max} = 500$ нм, $lg \epsilon_{500} = 2,67$).

Размеры частиц золей определяли кинетическим методом, используя зависимость скорости взаимодействия коллоида MnO₂ с восстановителем [11], а также оценивали турбидиметрически.

3. Результаты и обсуждение.

3.1. Восстановление перманганат-иона пероксидом водорода.

При смешении растворов KMnO₄ и H₂O₂ в эквивалентных количествах (например, равных объемов $1 \cdot 10^{-3}$ и $1,5 \cdot 10^{-3}$ моль/л соответственно, H₂O₂ добавлялся постепенно при перемешивании, для подавления побочной в данном случае реакции каталитического разложения пероксида) раствор переходит через различные оттенки интенсивного вишневого цвета. На рис.1 представлены спектры поглощения систем с различным соотношением исходных реагентов. Предположение об образовании комплексных соединений не было подтверждено (отсутствие соответствующих пиков Mn^{2+} - и Mn^{3+} -ионов на спектрах ЭПР и поглощения). Чтобы доказать отсутствие иных продуктов при неполном протекании реакции в этих случаях, проводилась быстрая коагуляция золя сульфатом натрия с центрифугированием до расслоения двух фаз: геля MnO₂ и непрореагировавшего KMnO₄. Установлено, что при реакции из раствора выводится практически эквивалентное пероксиду количество KMnO₄. Ошибка измерения определяется погрешностью прибора и частичной адсорбцией ионов K⁺ и, соответственно, MnO₄⁻ поверхностью геля. Отстаивание избытка KMnO₄ над слоем геля в течение 3-х часов лишь незначительно снижало концентрацию раствора перманганата.

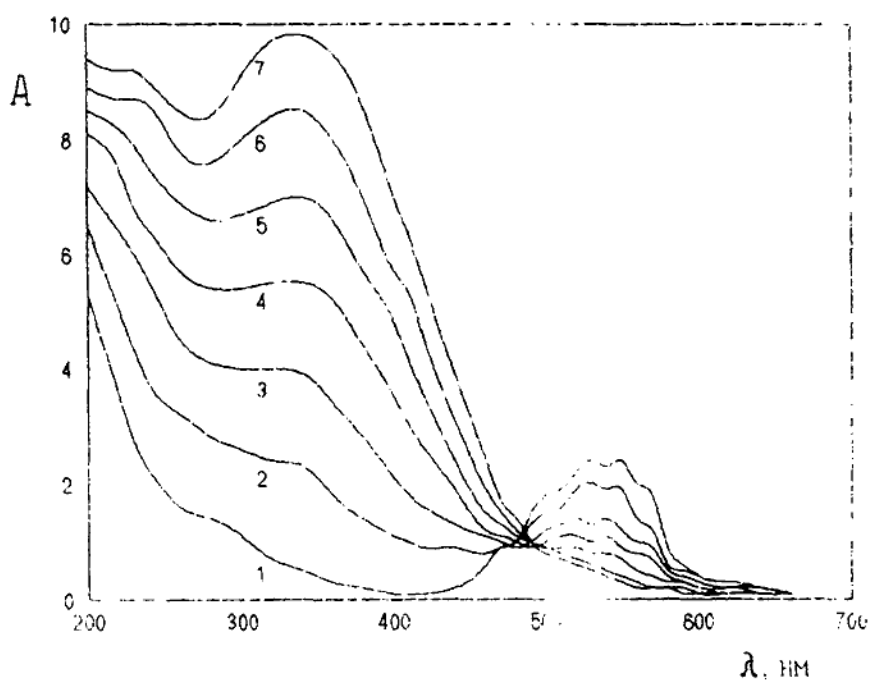


Рис.1. Спектры поглощения (0.2 см, 25 °С) смесей равных объемов растворов KMnO_4 и H_2O_2 . $[\text{KMnO}_4]$ (везде): 0.5 ммоль/л; $[\text{H}_2\text{O}_2]$ (ммоль/л): 1 - 0, 2 - 0.13, 3 - 0.25, 4 - 0.38, 5 - 0.5, 6 - 0.63, 7 - 0.75; рН нач. 8.0

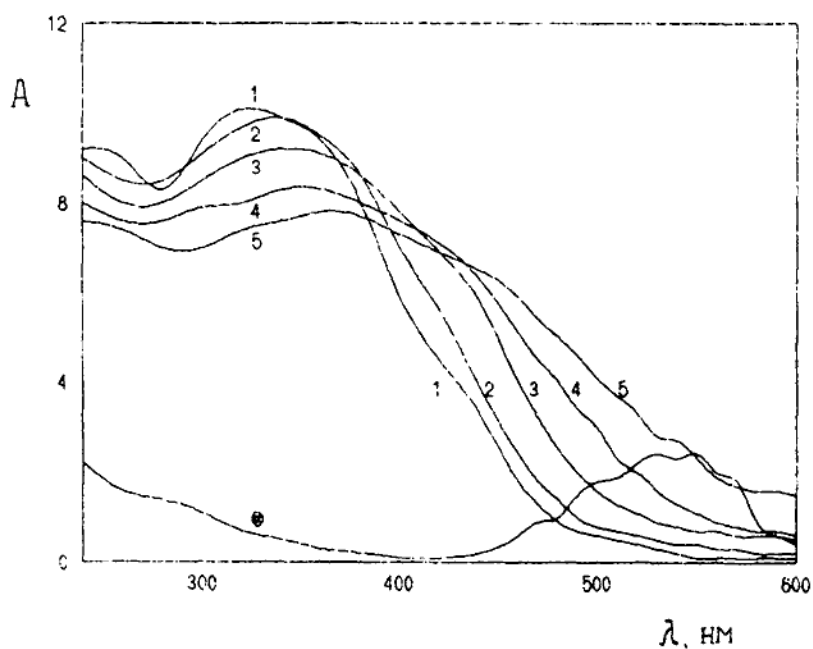


Рис.2. Спектры поглощения (0.2 см, 25 °С) дисперсных систем MnO_2 , полученных при различных температурах. $[\text{KMnO}_4]$ нач.: 0.5 ммоль/л (@ - исходный спектр); $[\text{H}_2\text{O}_2]$ нач.: 0.75 ммоль/л; рН нач. 8.0; 1 - 12 °С, 2 - 25 °С, 3 - 39 °С, 4 - 56 °С, 5 - 72 °С

Авторы [12,13], изучавшие процесс образования золя MnO_2 при γ -облучении раствора $KMnO_4$, отмечали, что повышение температуры приготовления коллоида приводит к незначительному смещению максимума полосы поглощения продукта в более длинноволновую область, что было отнесено ими к образованию более крупных частиц, однако дальнейших выводов авторами [12] не сделано. Нами была изучена зависимость свойств продукта реакции от температуры получения. Оптические свойства коллоидных растворов, полученных при разных температурах, представлены в табл.1. Спектры поглощения показаны на рис.2. Там же представлен спектр 0,5 ммоль/л раствора $KMnO_4$. Полученные коллоидные растворы практически не рассеивали свет, были стабильны неограниченно долго, особенно без доступа атмосферного CO_2 . Трехчасовое кипячение с обратным холодильником на вызывало заметной коагуляции золь и изменения спектра. Однако у раствора, полученного при $72^\circ C$ и обладавшего некоторой опалесценцией, после кипячения она усиливалась. В отличие от остальных растворов он обладал значительной нестабильностью оптических свойств. Растворы, полученные при $12^\circ C$, $25^\circ C$ и $39^\circ C$ практически не измененными пропускались трековой мембраной с диаметром пор 0,4-0,8 мкм.

На рис.3 даны кинетические кривые реакции $KMnO_4$ с H_2O_2 (СФ, режим заданной длины волны). Известно, что в области максимума коэффициента мольной экстинкции и при значениях оптической плотности, находящейся в центральной части шкалы измерений, наблюдается минимальное отклонение от закона Бугера-Ламберта-Бера, что позволяет привести значения оптической плотности в значения концентраций, в условиях известной толщины кюветы [12]. И мерение концентрации образующихся продуктов проводилось в соответствии с этим правилом.

Таблица 1

Оптические свойства золь MnO_2 полученных при разных температурах. $[KMnO_4] = 1 \cdot 10^{-3}$ моль/л, $[H_2O_2]_0 = 1,5 \cdot 10^{-3}$ моль/л, $[MnO_2] = 5 \cdot 10^{-4}$ моль/л; $pH_{исх} = 8,0$.

N ^o -	t, °C	λ_{max} , нм	A (λ_{max})	ϵ (λ_{max}), моль ⁻¹ · см ⁻¹	Примечание
1	12	329 ± 2	1,08	10800	коричневый
2	25	339 ± 3	0,99	9900	то же
3	39	346 ± 4	0,92	9200	то же
4	56	353 ± 5	0,83	8300	коричневый с опалесценцией
5	72	360 ± 9	0,78	7800	красно-коричневый с опалесценцией

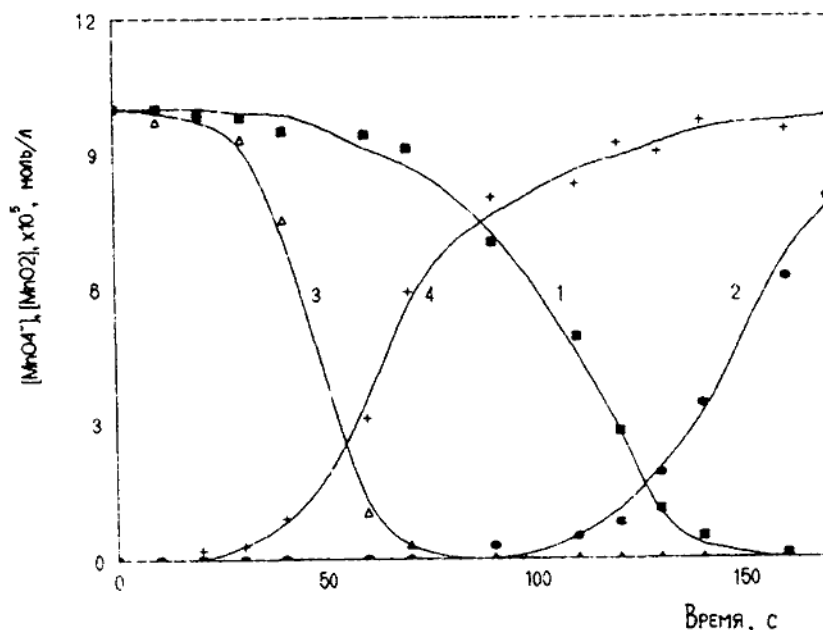


Рис.3. Кинетические кривые реакции $KMnO_4$ с H_2O_2 по MnO_4^- (1 и 3) и MnO_2 (2 и 4) (нач.концентрации соотв. $1 \cdot 10^{-5}$ и 0 моль/л) в зависимости от температуры: 1 и 2 - 25°C; 3 и 4-39°C; рН нач. 7.0

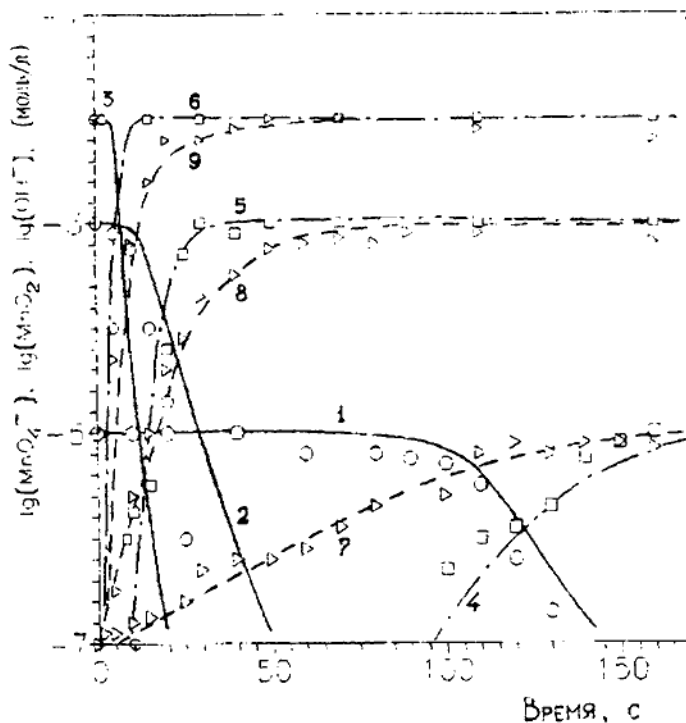
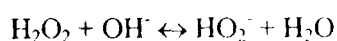
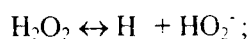
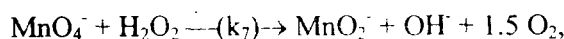


Рис.4. Расчетные (сплошные и пунктирные линии) и экспериментальные (точки, обозначенные фигурами) кинетические кривые (25 °С) реакции $KMnO_4$ с H_2O_2 (эквивалентное взаимодействие) по компонентам: MnO_4^- (1,2,3 - кружки), MnO_2 (4,5,6 - квадраты) и OH^- (7,8,9 - треугольники; для трех исходных систем: $[KMnO_4]$ нач. =0.01, 1 и 10 ммоль/л (кривые 1,4,7; 2,5,8; 3,6,9 соответственно); рН нач. 7.0

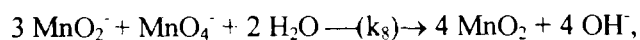
Реакция между KMnO_4 и H_2O_2 протекает со значительным периодом индукции, что дает основание предположить генерацию активных промежуточных частиц, которые могут вызывать протекание другой сопряженной реакции, на которую расходуются эти частицы. Исходя из этого можно предположить наличие сопряженной реакции, протекающей через общие активные промежуточные вещества, которыми в данном случае могут являться ионы MnO_2^- . Период индукции и крутизна кинетической кривой как по расходованию перманганата, так и по накоплению MnO_2^- зависят от температуры, что видно на рис.3. Если допустить, что на поверхности катализатора H_2O_2 адсорбируется в виде нейтральных молекул и после двумерной диссоциации поступает к активным центрам в виде HO_2^\bullet -радикала [14], то в разбавленном растворе предположительно HO_2^- ионы реагируют с MnO_4^- -ионами необратимо по ред-окс механизму. Период индукции может возникнуть именно из-за электростатических трудностей и низкой константы диссоциации H_2O_2 . Повышение pH, как и следует из эксперимента, сокращает период индукции путем ускорения суммарной реакции, способствуя диссоциации H_2O_2 :



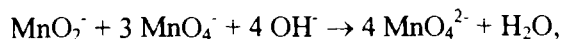
MnO_4^- и H_2O_2 реагируют по уравнению:



внося вклад в ускорение реакции гидроксид-ионами, а также генерируя малоустойчивый ион MnO_2^- содержащий Mn^{3+} , возможность присутствия которого доказана в работе [15]. Именно он, по нашему мнению, выступает индуктором расходования MnO_4^- по сопряженной реакции:



протекающей вплоть до pH 11,5-12. Видно, что данная реакция также является источником гидроксид-ионов. Проведение реакции в щелочной среде смещает последнюю стадию в сторону образования манганат-иона [15]:



с возможностью возвращения к предыдущей (k_8):



Пренебрегая этими двумя стадиями для нейтральной и слабо щелочной сред, можно записать кинетические уравнения для реагирующих веществ. Согласно предлагаемой схеме механизма в этих условиях в растворе H_2O_2 концентрацией 10^{-5} - 10^{-1} моль/л протекают следующие реакции (табл. 2):

Таблица 2

Константы скорости прямых и обратных обменных реакций
пероксида водорода в водных растворах

№ ур-я	Реакция	Константа скорости или равновесия	Источник
1	$\text{H}_2\text{O} \xrightarrow{(k_1)} \text{H}^+ + \text{OH}^-$	$2.6 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$	[16]
2	$\text{H}^+ + \text{OH}^- \xrightarrow{(k_2)} \text{H}_2\text{O}$	$1.3 \cdot 10^{11} \text{ л}/(\text{моль} \cdot \text{с})$	[16]
3	$\text{H}_2\text{O}_2 \xrightarrow{(k_3)} \text{H}^+ + \text{HO}_2^-$	$1.3 \cdot 10^{-1} \text{ с}^{-1}$	(расчет)
4	$\text{H}^+ + \text{HO}_2^- \xrightarrow{(k_4)} \text{H}_2\text{O}_2$	$2 \cdot 10^{11} \text{ л}/(\text{моль} \cdot \text{с})$	[16]
5	$\text{H}_2\text{O}_2 + \text{OH}^- \xrightarrow{(k_5)} \text{HO}_2^- + \text{H}_2\text{O}$	$1.4 \cdot 10^4 \text{ л}/(\text{моль} \cdot \text{с})$	[17]
6	$\text{HO}_2^- + \text{H}_2\text{O} \xrightarrow{(k_6)} \text{H}_2\text{O}_2 + \text{OH}^-$	$2.5 \cdot 10^2 \text{ л}/(\text{моль} \cdot \text{с})$	(расчет)
7	$\text{H}_2\text{O} \leftarrow [\text{K}(\text{H}_2\text{O})] \rightarrow \text{H}^+ + \text{OH}^-$	$2 \cdot 10^{-16}$	[16]
8	$\text{H}_2\text{O}_2 \leftarrow [\text{K}(\text{H}_2\text{O}_2)] \rightarrow \text{H}^+ + \text{HO}_2^-$	$2.6 \cdot 10^{-12}$	[18]

Из уравнений (1), (2), (5) и (6) выражаем $d[\text{OH}^-]/d\tau$:

$$d[\text{OH}^-]/d\tau = k_1 \cdot [\text{H}_2\text{O}] - k_2 \cdot [\text{H}^+] \cdot [\text{OH}^-] - k_5 \cdot [\text{H}_2\text{O}_2] \cdot [\text{OH}^-] + k_6 \cdot [\text{HO}_2^-] \cdot [\text{H}_2\text{O}_2]. \quad (9)$$

Принимая в условиях равновесия $d[\text{OH}^-]/dt = 0$, из (9) выражаем k_6 , подставляя в уравнение известные константы скорости из табл. 3, предварительно определяя концентрации компонентов из начальных условий (концентрации H_2O_2 задаем в пределах 10^{-6} - 10^{-2} моль/л). Значение k_3 находим из уравнений (4) и (8).

Составив систему дифференциальных уравнений, соответствующих кинетическим уравнениям относительно восьми компонентов, решали данную систему численно методом Рунге-Кутты-Мерсона с автоматическим выбором шага. В ходе решения отыскивались константы k_7 и k_8 , путем приведения расчетных кинетических кривых по компонентам MnO_4^- , MnO_2 и OH^- в соответствие с экспериментальными кривыми (рис. 4). Видно, что приближение представленной схемы удовлетворительно описывает реальный процесс восстановления перманганат-иона, предусматривающий период индукции и влияние на него OH^- ионов. Характерно, что увеличение скорости индукции наблюдается до pH 11,5-12, после чего среда перестает существенно влиять на скорость процесса (это не учитывалось в модели), что, вероятно, связано с протеканием побочных процессов восстановления перманганата до манганат-иона. Значения констант k_7 и k_8 найдены соответственно 10^4 и 10^1 .

3.2. Гомогенно-гетерогенные переходы.

Восстановление перманганат-иона в достаточно широком диапазоне pH среды, близких к нейтральной, осложняется образованием и развитием новой фазы, поверхность которой значительна и обладает адсорбционными свойствами. В этом случае основной вклад в свойства всего золя вносит поверхность частиц (доля поверхностных активных центров в общей массе твердого вещества), ослабляя вклад концентрационной составляющей, свойственной гомогенным системам. Очевидно, что немаловажную роль при формировании свойств гетерогенных систем приобретает количество жизнеспособных зародышей, развивающих частицу и ее поверхность, а также их форма роста. Классический (перманганатно-перхлоратный) способ получения коллоида MnO_2 в нейтральной среде описан в работе [8]. Данная реакция представляет определенную сложность для установления механизма зародышеобразования, ибо этот процесс определяется соотношением Mn^{7+} и Mn^{2+} , идущим на фоне изменения ионной силы и pH раствора. В результате процесс образования зародыша оказывается замаскирован широким распределением конечных частиц по размерам. Выявленная в нашем случае зависимость максимума в спектре поглощения от температуры получения золь (см. п. 3.1) и длительная стабильность оптических свойств свидетельствуют об относительно узком распределении по размерам частиц золь, полученных при низких температурах. Это связано, как представляется в развиваемом ниже подходе, с узкой областью метастабильности при зародышеобразовании в ходе химической конденсации данного вида дисперсной системы.

В работе [12] делается попытка определить размер частиц дисперсной фазы диоксида марганца с помощью электронной микроскопии, однако это затруднено вследствие необходимости подготовки сухого образца, что ведет к агломерации и перекристаллизации частиц. Авторы [11] предлагают кинетическую схему косвенного определения размеров дисперсных частиц, находящихся непосредственно в растворе, которую с известными ограничениями можно распространить на дисперсную систему MnO_2 в воде.

При допущении, что частицы имеют сферическую форму (в действительности доказано [19], что форма химически конденсированных частиц диоксида марганца близка к сферической) и реакция между ними и молекулами восстановителя в растворе диффузионно контролируема, то есть, ее скорость определяется диффузией молекул восстановителя к поверхности MnO_2 , то скорость процесса можно выразить двояко:

$$-dC_0/dt = k \cdot C_0 \cdot C_{red} = k_d \cdot [(MnO_2)_x] \cdot C_{red}.$$

где C_0 – аналитическая концентрация диоксида марганца, C_{red} – концентрация восстановителя, $[(MnO_2)_x]$ – концентрация частиц дисперсной фазы, x – число агломерации.

Так как $[(MnO_2)_x] = C_0/x$, можно записать: $k \cdot x = k_d$. В диффузионной области константа скорости процесса столкновения частиц и молекул:

$$k_d = 4 \cdot \pi \cdot Na \cdot R \cdot D/1000,$$

где D – коэффициент диффузии восстановителя и R – радиус коллоидных частиц (радиусом молекул реагента и коэффициентом диффузии частиц можно пренебречь); x соотносится с радиусом R следующим образом:

$$x = 4 \cdot \pi \cdot Na \cdot R^3 \cdot d/(3 \cdot M); \quad (10)$$

где M – молекулярная масса MnO_2 , d – плотность (87 г/моль и 5.0 г/см соответственно), откуда получаем:

$$R = (3 \cdot 10^{-3} M \cdot D/(k \cdot d))^{1/2}. \quad (11)$$

Применяя в качестве восстановителя сульфит натрия при рН 3.3, проводили измерения периода полупревращения MnO_2 в водных растворах при 25 °С. Константы скорости вычисляли по формуле: $1/\tau_{1/2} = k \cdot [MnO_2]$. Коэффициент диффузии рассчитывали по методу Нернста-Хаскелла [20]. В табл. 3 приведены результаты вычислений по формулам (10) и (11) и кинетические характеристики процессов для указанных растворов дисперсных частиц.

При повышении температуры реакции сульфита натрия с MnO_2 увеличение константы скорости превосходит эффект, определяемый лишь температурным коэффициентом вязкости, поэтому можно сказать, что реакция не вполне диффузионно контролируема; это особенно заметно для малых частиц. При переходе к более крупным частицам реакция заметнее смещается в диффузионную область, поэтому размеры последних определены точнее. При рассмотрении

Таблица 3

Размеры 2R дисперсных частиц MnO_2
в зависимости от температуры получения при pH 9.5

№	Температура получения, К	Константа скорости при анализе дисперсности, л/(моль · с)	Средний размер частиц, нм	Числа агломерации (x молекул)
1	345	$4.10 \cdot 10^3$	128	1520000
2	329	$1.73 \cdot 10^4$	62	173000
3	312	$4.92 \cdot 10^4$	32	23700
4	298	$1.095 \cdot 10^5$	18 (экстраполяция)	4200
5	285	$1.093 \cdot 10^5$	10 (экстраполяция)	750

экспериментальной корреляции "температура – константа скорости" и сравнении ее с расчетной зависимостью "радиус частиц – константа скорости" в области крупных частиц, можно заметить, что зависимость $\ln k(T)$ согласуется с представлениями о кинетике зародышеобразования при различных температурах, однако точка $k(12^\circ C)$ и отчасти $k(25^\circ C)$ выпадают из линейной зависимости $\ln k(T)$, распространенной на область низких температур. Это доказывает, что для таких частиц реакция с восстановителем лимитируется не взаимной диффузией реагентов, а самой скоростью взаимодействия. Поэтому, рассматривая зависимость "температура образования – радиус частиц", можно заметить, что радиусы частиц менее 20 нм данным методом можно оценить лишь экстраполяцией прямой $\ln k(T)$, построенной для высоких T , в область малых T , затем по линейной зависимости, связывающей $\ln k$ с $\ln R^{1/2}$, найти значения $R(12^\circ C)$ и $R(25^\circ C)$. Для более точной оценки необходимо либо использовать реагенты с большей константой скорости взаимодействия с (например, радикалы) и применять экспериментальную технику для исследования кинетики быстрых реакций, либо снижать коэффициент диффузии введением инертных загустителей, однако это может привести к изменению механизма структурирования MnO_2 .

Вообще, указанный метод вероятнее дает верхнюю границу частиц по размерам. Однако узкая область метастабильности при химической конденсации данной дисперсной системы наряду с высокой скоростью создания пересыщения (особенно при низких температурах) приводит к тому, что нижняя граница размеров частиц золя достаточно близка к верхней, что в данной

системе обусловлено единовременным образованием практически всех закритических зародышей и последующим их равномерным ростом. В работе [21] свойство образовывать монодисперсные системы отмечено для гидратированных оксидов большинства переходных металлов и, в частности, кобальта.

Для независимой проверки применимости кинетического метода определения размеров частиц золя MnO_2 был применен метод светорассеяния. Турбидиметрически ($\lambda = 670$ нм) определены размеры частиц мелких фракций (до 80 нм), полученных при температурах близких к комнатной. Расчет проводился по уравнению Рэлея при допущении о сферичности частиц. Метод дал значения размеров на 20-25 % ниже найденных кинетическим методом, что подтверждает вывод о возможности последнего определять лишь верхние границы распределения фракций дисперсных частиц по радиусам. Вместе с тем, косвенно было доказано предположение о том, что данное распределение для частиц золь MnO_2 , полученных при низких температурах, довольно узко. Для золь, полученных при высоких температурах, закон Рэлея не применим вследствие близости R к λ и низкой воспроизводимости, а вычисленные в соответствии с ним значения размеров частиц значительно отличаются от полученных кинетическим методом.

Химическая конденсация в данной системе могла бы быть формально рассмотрена как зарождение и рост твердой фазы в жидкости. Восстановление MnO_4^- -иона инициируется ионом HO_2^- (дающим активные радикалы) и проходит через возможное образование промежуточных ионов марганца (III); и, хотя до сих пор мы применяли понятие "концентрации" MnO_2 , из-за отсутствия данных о "растворимости" оксида нет возможности выйти на ключевой параметр "пересыщение" (C/C_0), характеризующий отклонение системы от равновесия; поэтому для данной системы нельзя корректно применить закономерности, характерные для зарождающегося и растущего кристалла. Отчасти это затруднение решается в случае ионизированных и гидратированных форм диоксида, для которых возможно спрогнозировать гидратную оболочку и рассчитать равновесную концентрацию молекул в растворе (растворимость). Но и при этом ошибка в определении может составлять несколько порядков при том, что сама "растворимость" MnO_2 находится между 10^{-10} - 10^{-10} моль/л, что нельзя признать удовлетворительным для дальнейших расчетов. Тем не менее, этот качественный результат доказывает узость области метастабильности системы при формировании закритического зародыша, высокую скорость создания пересыщения и роста зародышей, узость распределения конечных частиц по размерам и, следовательно, пренебрежимо малую вероятность изотермической перегонки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Broughton D. B., Wentworth R. L.// J. Am. Chem. Soc. - 1947. - V.69, №4. - P.741.
2. Роде Е. Я. Кислородные соединения марганца. Искусственные соединения, минералы и руды. - М., 1952. - 399 с.

3. Abd El-Salaam K. M.// Z. Phys. Chem (BRD). - 1975. - Bd.95. - S.139.
4. Razouk R. I., Habashy G. M., Kelada N. Ph.// J. Catal. - 1972. - V.25, N^o2. - P.183.
5. Parida K. M., Kanungo S. B., Sant B. R.// Electrochim. Acta. - 1981. - V.26, N^o3. - P.435.
6. Садыков В. А., Цырульников П. Г.// Кинет. и катализ. - 1976. - Т.27, N^o3. - С.618.
7. Kanungo S. B., Parida K. M., Sant B. R.// Electrochim. Acta. - 1981. - V.26, N^o8. - P.1157.
8. Morgan J. J., Stumm W.// J. Colloid. Sci. - 1964 - N^o19. - P.347.
9. Бабко А. К., Пятницкий И. В. Количественный анализ. - М., 1968. - 496 с.
10. Сычев А. Я., Исак В. Г., Чан Тхи Тхань Фыонг// Ж.физ.химии. - 1984. - Т.58, N^o9. - С.2331.
11. Henglein A., Lilie J.// J. Am. Chem. Soc. - 1981. - V.103, N^o5. - P.1059.
12. Lume-Pereira C., Baral S., Henglein A., Janata E.// J.Phys.Chem. - 1985. - V.89, N^o26. - P.5772.
13. Baral S., Lume-Pereira C., Janata E., Henglein A.// J.Phys.Chem. - 1985. - V.89, N^o26. - P.5778.
14. Садыков В. А., Цырульников П. Г.// Кинет. и катализ. - 1977. - Т.28, N^o1. - С.137.
15. Lee D. G., Moylan C. R., Takatoshi Hayashi, Brauman J.I.// J.Am.Chem.Soc. - 1987. - V.109, N^o10. - P.3003.
16. Краткий справочник физико-химических величин. - Л., 1983. - 232 с.
17. Казарновский И. А., Липихин Н. П.// Докл. АН СССР. - 1972. - Т.207, N^o1. - С.107.
18. Лурье Ю. Ю. Справочник по аналитической химии. - М., 1989. - 448 с.
19. Manganese dioxide symposium (Proceedings). - Cleveland (Ohio). - 1981. - 717 p.
20. Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей: Справочник. - Л., 1982. - 92 с.
21. Дяков В. Е., Пурмаль А. П., Травин С. О.// Хим.физика. - 1989. - Т.8, N^o5. - С.670.

ЗАЩИТНЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ СИСТЕМЫ МАГНИТООПТИЧЕСКИЙ МОДУЛЯТОР – МАГНИТНЫЙ НОСИТЕЛЬ

Н. И. Карпенко, кандидат технических наук, доцент

Основным элементом оперативных устройств ввода оптической информации с магнитного носителя, работающих в реальном масштабе времени, является пространственно-временной модулятор света (ПВМС). В настоящее время под пристальным вниманием исследователей и разработчиков такого типа систем находятся ПВМС на основе V_i -содержащих феррит-гранатовых пленок (ФГП) [1-3]. Однако широкое применение подобного рода устройств ограничено высоким износом ФГП магнитным носителем (МН), рабочая поверхность которого обладает, как известно, абразивными свойствами [4]. При движении МН относительно ФГП на поверхности последней появляются микроцарапины. Они способствуют возникновению нежелательных напряжений и, как следствие того, увеличению коэрцитивности ФГП, что ведет к ухудшению функциональных параметров всего устройства.

Целью настоящей работы было изучение влияния материала защитного слоя на оптические и функциональные параметры ПВМС с точки зрения увеличения его срока службы.

В качестве защитных покрытий использовались пленки Al_2O_3 , осажденные на рабочую поверхность ФГП методом высокочастотного триодного распыления в атмосфере аргона. Мишени представляли собой диски монокристаллического лейкосапфира. Перед напылением поверхность ФГП подвергалась химической очистке в щелочном травителе. В процессе напыления наблюдался значительный разогрев поверхности ФГП (до 523 К) в зависимости от мощности распыления и времени осаждения.

Испытания на надежность проводились на стандартном лентопротяжном механизме. Магнитная лента двигалась относительно ПВМС со скоростью 19,05 см/с. Величина избыточного давления в устройстве прижима МН к поверхности ФГП выбиралась в соответствии с известной методикой [3] и составляла 3,5 кПа. При исследовании устойчивости защитного покрытия к воздействию абразива МН в процессе наработки контролировался динамический диапазон (D) ПВМС по уровню нелинейности $L=3\%$. Величина динамического диапазона определялась в соответствии с соотношением $D=20 \lg(i_{\max}/i_{\min})$, где i_{\max} и i_{\min} – значения максимального и минимального токов записи синусоидального сигнала на МН, в пределах которых значение

нелинейности преобразования $L = \sqrt{\frac{1}{I_1} \cdot \sum_{j=3}^{\infty} I_j} \cdot 100\% \leq 3\%$, где I_1 – интенсивность первого порядка дифракции, I_j – интенсивность j -го порядка дифракции ($j=3, 5, 7, \dots$).

Для экспериментального исследования защитного покрытия были изготовлены образцы с толщинами 350 Å, 500 Å, 750 Å, 1500 Å, 2000 Å, 2500 Å. Схема расположения защитных покрытий на ФГП показана на рис. 1а. Наилучшие результаты с точки зрения оптических потерь и

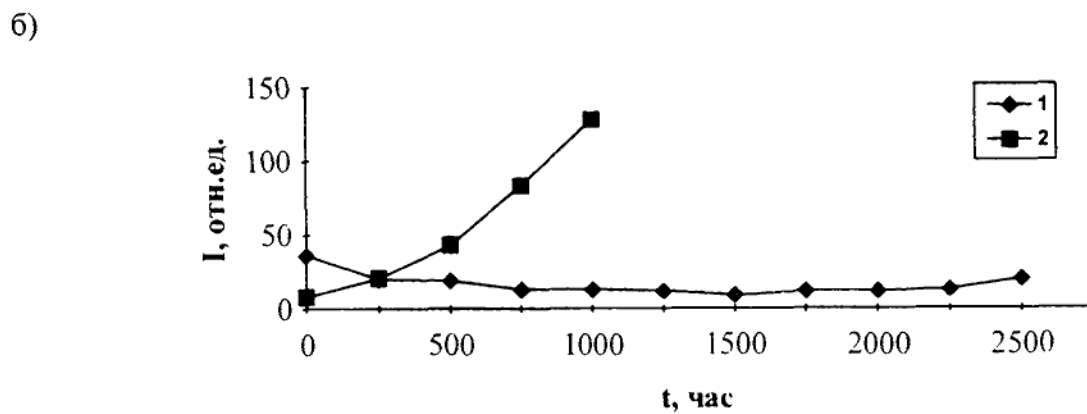
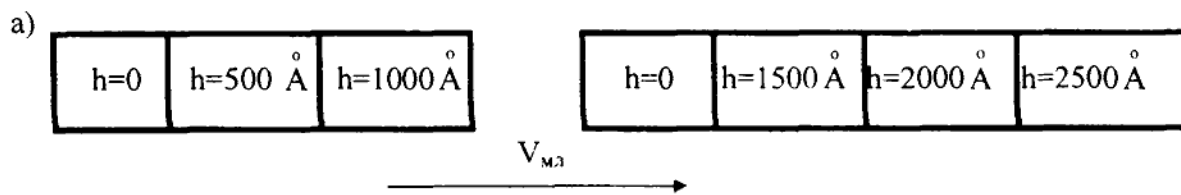


Рис.1

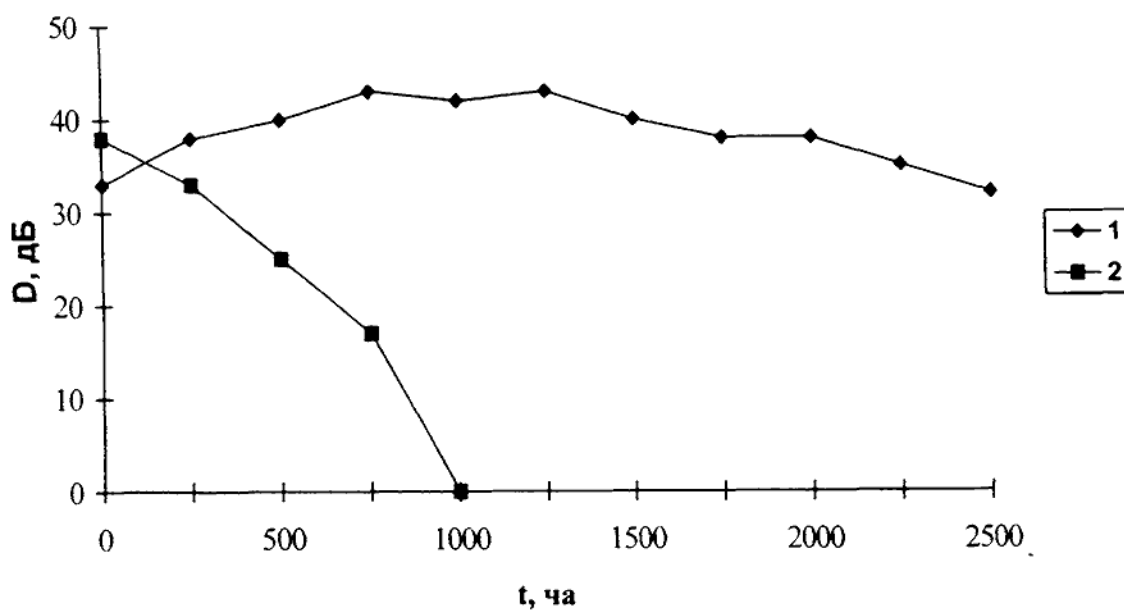


Рис.2

износостойкости были получены для покрытия толщиной 2000 \AA . Измерения проводились через каждые 250 часов наработки. Результаты измерения динамического диапазона (D , дБ) в процессе наработки представлены на рис.1б. Кривая 1 соответствует незащищенному участку ФГП, а кривая 2 – участку, покрытому слоем Al_2O_3 толщиной 2000 \AA . На рис.2 представлены соответствующие измерения минимального тока записи (i_{\min} , отн. ед.) от времени (t , час) наработки. После нанесения покрытия величина диапазона D снизилась на 6 дБ по сравнению с незащищенным участком (рис.1б). При этом произошло увеличение i_{\min} с 6,6 до 29 отн. ед. Это может быть связано с двумя факторами. Во-первых, уменьшается эффективность воздействия полей рассеяния МН на ФГП за счет толщины защитного покрытия (удаления МН от ФГП). Во-вторых, увеличивается коэрцитивность ФГП из-за разности коэффициентов термического расширения материалов ФГП и покрытия.

В процессе наработки величина динамического диапазона незащищенного участка (рис.1б, кривая 1) резко падает, что связано с возрастанием i_{\min} (рис.2, кривая 1) за счет появления микроцарапин на рабочей поверхности ФГП. Для защищенного участка эти изменения оказались незначительны даже при наработке 2500 ч. Некоторое возрастание D (рис.1б, кривая 2) на начальной стадии наработки (до 1000 ч) связано, вероятно, с истиранием слоя защитного покрытия, приближением МН к поверхности ФГП и освобождением напряжений в ФГП, возникших в результате напыления Al_2O_3 . Это подтверждает уменьшение i_{\min} (см. рис.2, кривая 2). Дальнейшее возрастание кривой 2 (рис.2) и снижение кривой 2 (рис.1б) говорит о том, что начинает сказываться напряжение в ФГП, вызванное износом покрытия.

Следует также отметить, что нанесение на ФГП защитного покрытия увеличивало срок службы ПВМС в 5 – 8 раз. При этом динамический диапазон ПВМС в процессе наработки изменялся незначительно (~ 10%).

ЛИТЕРАТУРА

1. А.с. 817661 СССР, МКИ G 03 H 1/10. Анализатор спектра сигналов.– Оpubл. 30.03.81, Бюл. № 12.
2. Варнавский В.А., Есиков О.С., Толокнов Н.А. Магнитооптический метод спектрального анализа электрических сигналов // Третья Всесоюзная школа по оптической обработке информации. Ч.2: Тез. докл.– Рига, 1980.– С.328–329.
3. Groshenko H.A., Dubinko C.B., Gusev C.M., Belov B.C., Karpenko H.I., Panchenko B.B. Магнитооптический модулятор как элемент считывания информации // I Всесоюзная конф. по оптической обработке информации. Ч.II: Тез. докл.– Ленинград, 1988.– С.32.
4. Сотников П., Никитина Е., Никонов Е. Абразивность магнитных лент для бытовой звукозаписи // Радио.– 1982.– № 9.– С.31–32.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОЛЬТАМПЕРОМЕТРИЧЕСКОЙ КОМПЬЮТЕРИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ АНАЛИЗА ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Н. А. Сурова, кандидат химических наук

Одной из наиболее важных проблем из решаемых на Земле является охрана окружающей среды и создание условий для ее улучшения экологически оптимальным путем в целях дальнейшего развития человечества. Химии принадлежит одна из главных ролей в охране окружающей среды и экологии, а аналитическая химия представляется в этом плане важнейшей из химических дисциплин, позволяющая выявить проблемы, на решении которых следует сконцентрировать усилия. В связи с этим необходима разработка новых аналитических методов и методик на их основе, отвечающих требованиям решения экологических задач: высокие точность, скорость определения, чувствительность, селективность при низких финансовых затратах, простота и доступность оборудования, возможность обработки результатов средствами вычислительной техники и создание на ее основе банка данных при проведении экологического мониторинга. За последние годы сформировалась новая область химического анализа, которую можно назвать "аналитическая химия окружающей среды", и которая включает в себя, как одно из важных направлений "электроаналитическую химию окружающей среды"[1].

Методы анализа, используемые в современных лабораториях, занимающихся контролем окружающей среды включают множество вариантов оптических методов анализа (например, спектрофотометрию в видимой, УФ-, ИК-областях), методов разделения на основе газовой, жидкостной и тонкослойной хроматографии, радиометрических методов, масс-спектрометрии и особенно электроаналитических методов, таких как вольтамперометрия и ионометрия. Ни один из перечисленных методов анализа не является универсальным, некоторые из них пригодны для определения только органических веществ, другие – неорганических.

Одним из самых сильных факторов загрязнения гидросферы и почвы Земли являются ионы металлов, которые попадают туда естественным путем с помощью природных явлений так и в результате деятельности людей, и при превышении ПДК действуют на живую природу и людей как яды. Поэтому в настоящее время становится особенно актуально проведение локального мониторинга экологических объектов на содержание ионов металлов с применением различных физико-химических методов, отличающихся высокой чувствительностью и экспрессностью.

Для определения микросодержаний ионов тяжелых металлов в экологических объектах целесообразно использовать методы инверсионного электрохимического анализа, в частности инверсионную вольтамперометрию (ИВА) на твердых электродах, в которых определяемые металлы предварительно осаждают на электроде и затем растворяют при анодной развертке

потенциала. Этим методом возможно определять большое количество ионов металлов таких как Cu, Pb, Bi, Sb, As, Sn, In, Ga, Ag, Tl, Cd, Zn, Hg, Ge, Te, Ni, Co и др. Важным отличием этого метода (например, от атомно-абсорбционного) является способность различать свободные ионы от их связанных химических форм, что позволяет селективно определять по несколько компонентов из одной пробы,

Для решения вышеизложенных проблем, стоящих перед аналитической химией окружающей среды необходимо создание вольтамперометрических компьютеризированных систем, позволяющих использовать высокоэффективные методики анализа, проводить экспрессный анализ в полевых условиях и создать и сохранить банк данных по экологическому мониторингу.

Разработанная в КБ "Домен" при Симферопольском госуниверситете компьютеризированная вольтамперометрическая система рассчитана на автоматическое управление всеми диапазонами работы и предусматривает программное тестирование, обработку и запоминание вольтамперных кривых с последующей их распечаткой на принтере. Система состоит из анализатора, который предназначен для анализа растворов, приготовленных из различных материалов, содержащих тяжелые металлы, – это пищевых продуктов, а также экологических объектов (природных, питьевых, бытовых и технологических сточных вод, почв, донных отложений, воздуха и др.), датчика с электродами и компьютера. Анализатор реализует высокочувствительные вольтамперометрические методы (переменно-токовую полярографию с прямоугольной формой поляризующего напряжения на ртутном капельном электроде и инверсионный режим с предварительным накоплением на твердых электродах различных конструкций). При съемке на мониторе компьютера наблюдается вольтамперная кривая, соответствующая проведенному процессу, параметры которой (потенциал восстановления и высота пика также определяются с помощью компьютера). После введения в программу полученных данных компьютер выдает результат, соответствующий содержанию компонента в растворе или в твердом материале, а также погрешность проведенного анализа, что значительно ускоряет процесс анализа. Система удобна для проведения экспресс-анализа при мониторинговых работах и создания банка данных по экологическим объектам.

Развитие инверсионной электроаналитической химии связано с использованием металлических электродов, главным образом ртутных (капельных и пленочных) и углеродсодержащих. Ртутные электроды широко описаны в литературе и претерпевают лишь конструктивные изменения. Преимуществом ртутных электродов перед электродами из других материалов является высокое перенапряжение водорода и хорошая воспроизводимость. К недостаткам можно отнести – токсичность ртути и низкий окислительно-восстановительный потенциал. Ртутные электроды используют для определения образующих амальгаму металлов. Что касается твердых электродов, то их усовершенствование идет по пути поисков и

использования новых электродных материалов, улучшения состояния поверхности, способов ее регенерации, поиска новых реакций, например, в интервале достаточно положительных потенциалов, не реализуемых на ртутных электродах. Требования к электродам предъявляются следующие: электрохимическая инертность в широкой области потенциалов, высокое перенапряжение выделения водорода и кислорода, низкий остаточный ток (отсутствие пор и сильно выраженной шероховатости поверхности), низкое омическое сопротивление, возможность достаточно точно воспроизводить поверхность. Все это должно обеспечить необходимые характеристики анализа: высокую чувствительность и воспроизводимость результатов, низкий предел обнаружения [2].

Наиболее широкое распространение в инверсионных электрохимических методах получили электроды из углеродных материалов: стеклоуглерода, пирографита, импрегнированного графита, углеродного волокна, углеситалла. Успешное применение углеродных электродов обусловлено высокой химической и электрохимической устойчивостью углеродистых материалов, сравнительно высоким перенапряжением на них водорода и кислорода, широкой рабочей областью потенциалов, а также простотой механического обновления поверхности электродов и доступностью материалов. В процессе электролиза углеродные электроды не взаимодействуют с выделяющимися металлами, что исключает опасность появления систематической погрешности.

Разработанная вольтамперометрическая компьютеризированная система может работать как с ртутными, так и с твердыми электродами.

Определение некоторых металлов, чаще всего встречающихся в экологических объектах, например в сточных водах и почвах, а именно свинца, кадмия, меди, цинка и железа было опробовано нами на графитовом электроде как наиболее простом, доступном, дешевом и удобном для использования в методе ИВА.

Для подготовки графитового электрода к работе кончик электрода обрезают лезвием, протерли фильтровальной бумагой, смоченной раствором уксусной кислоты, затем промыли водой. После чего рабочую поверхность отполировали фильтровальной бумагой.

Как показывают литературные данные [3–6] определение меди, цинка, свинца и кадмия возможно в различных вариациях на фонах, содержащих соляную, азотную, серную, хлорную, орто-фосфорную кислоты, соли – NaCl, KCl и др., а также буферные смеси – аммиачную и ацетатную.

Ионы железа восстанавливаются до металла на графитовом электроде из растворов, содержащих комплексные ионы элемента. Оптимальные потенциалы осаждения из 0,05 моль/дм³ раствора сульфосалицилата натрия (pH = 5) и раствора 1 моль/дм³ по KOH и 0,001 моль/дм³ по тартрату натрия, и составляют (-1,6) и (-1,4) В. При увеличении концентрации гидроксильных ионов в растворе потенциал электролиза следует выбирать более отрицательным. Удобнее

использовать в качестве фона раствор 1 моль/дм³ по КОН и 0,01 моль/дм³ по тартрату натрия, т.к. в этом случае в процессе концентрирования железа не разряжаются ионы водорода. Железо может быть осаждено на электроде из щелочных растворов (рН = 10), содержащих тартрат или цитрат-ионы. Однако при этом на анодных поляризационных кривых появляется второй максимум тока, что обусловлено, вероятно, промежуточным образованием пленки Fe(OH)₂. В широком диапазоне концентраций ионов железа (III) между максимальным током электрохимического окисления элемента и концентраций его ионов в растворе наблюдается прямо пропорциональная зависимость.

Определению железа сильно мешают медь и свинец, содержащиеся в растворе даже в соизмеримых количествах. Влияние тяжелых металлов устраняется введением в анализируемый раствор нескольких миллиграммов сульфида натрия. В присутствии тартрат- или цитрат-ионов тяжелые металлы осаждаются в виде сульфидов, а ионы Fe(III) остаются в растворе и в виде металла хорошо осаждаются на графитовом электроде [7].

Для определения кадмия, свинца, меди, цинка и железа был выбран наиболее универсальный фон, содержащий ацетат ионы, которые являются возможными лигандами для ряда металлов при образовании комплексных соединений, что в свою очередь позволяет разделить компоненты при электрохимическом анализе. Для повышения чувствительности метода при осаждении на графитовом электроде ряда металлов (медь, свинец, кадмий) в раствор добавляют азотнокислую ртуть(II). Восстановление ртути на графите создает эффект подложки. Этот прием используется для повышения чувствительности элементов, не образующих амальгам. Определяемый элемент должен быть более электроположительным [6].

Исследования проводили с помощью вольтамперометрической компьютеризированной системы (описание которой см. выше), проверку результатов осуществляли на полярографе ПУ-1. Электроды помещались в трехэлектродной ячейке: индикаторный электрод – графитовый, электрод сравнения – хлорсеребряный, вспомогательный – платиновый. Для работы использовали реактивы квалификации ос.ч. и ч.д.а. Определение элементов проводили на ацетатном фоне: 1 г ацетата натрия растворили в мерной колбе на 250 см³, добавляя 150 см³ воды и 4 см³ концентрированной уксусной кислоты и 5 см³ раствора ртути(II) концентрации $C = 2 \text{ мг/дм}^3$. Раствор довели до метки.

В колбено со вспомогательным электродом добавляли фоновый электролит, не содержащий ионы ртути. Измерения проводили в режиме переменноточковой полярографии с наложением прямоугольной развертки. Амплитуда развертки $A = 10 \text{ мВ}$, скорость развертки 20 мВ/с . Электролиз раствора проводили при потенциалах $E = (-0,6) - (-0,4) \text{ В}$ зависимости от элемента в течение 3 мин, включив одновременно секундомер и мешалку. Спустя 15–20 с после отключения перемешивания включали развертку потенциала и регистрировали вольтамперную анодную

кривую. При потенциале $E = 0,2$ В отключали развертку и включали перемешивание на 5–10 с. Определение проводили методом добавок.

Условия эксперимента приведены в таблице 1.

Таблица 1

Условия эксперимента

Элемент	Потенциал электролиза E_3 , В	Потенциал пика E_p , В	Концентрация элемента C , моль/дм ³
Pb	-0,8	-0,4	$10^{-5} - 10^{-9}$
Cd	-1,0	-0,6	$10^{-5} - 10^{-9}$
Cu	-0,6	0,05	$10^{-5} - 10^{-8}$
Zn	-1,4	-1,0	$10^{-5} - 10^{-9}$
Fe	-0,8	-0,39	$10^{-5} - 10^{-8}$

Было найдено, что линейная зависимость высоты пика от концентрации свинца, кадмия, меди, цинка и железа на ацетатном фоне ($pH = 5$) наблюдается для широких интервалов концентрации, см. табл. 2. Относительная погрешность определения для свинца, кадмия, меди, цинка и железа $S_r \leq 0,10$ в интервалах концентрации $10^{-5} - 10^{-9}$ моль/дм³. Измерения проводили для пяти стандартных растворов указанных концентрации.

Однако, как показали данные эксперимента, при $pH = 5$ потенциалы восстановления свинца и железа $E = -0,4$ В и $E = -0,39$ В, соответственно, что не позволяет определять эти компоненты при совместном присутствии без предварительного их разделения. Как уже отмечалось, железо возможно определять в присутствии свинца, если в раствор добавить порядка 0,05 г сульфида натрия. Раствор необходимо отфильтровать и можно определять железо. Мешающее влияние тяжелых металлов практически устраняется. Если в пробе экологического объекта не присутствует свинец, то возможно совместное определение меди, кадмия, цинка и железа без предварительного их разделения (потенциалы пиков окисления указаны в табл.1).

При проверке результатов, полученных с помощью компьютеризированной системы, установлена их сходимость с результатами, полученными на полярографе ПУ-1, однако съемка концентраций на полярографе проводилась при большей чувствительности, чем с помощью системы, что указывает на более широкие возможности системы при определении микроколичеств металлов. Также значительно ускорился процесс установления требуемых режимов работы и получения и обсчета вольтамперных кривых: для переменноточковой полярографии на ртутном электроде – 3 мин, для инверсионного режима на твердых электродах – не более 10 мин.

Таблица 2

Экспериментальные данные инверсионной вольтамперометрии
на ацетатном фоне pH=5 (n=5, P=0,95)

Элемент	Концентрация элемента С, моль/дм ³	S _r	Вид калибровочного графика
Pb	10 ⁻⁵	0,05	y=37,6+13,78·10 ⁵ x
	10 ⁻⁶	0,07	y=50,9+99,0·10 ⁶ x
	10 ⁻⁷	0,06	y=30,9+10,8·10 ⁷ x
	10 ⁻⁸	0,10	y=35,9+18,5·10 ⁸ x
	10 ⁻⁹	0,08	y=62,4+10,3·10 ⁹ x
Cd	10 ⁻⁵	0,05	y=78,3+7,5·10 ⁵ x
	10 ⁻⁶	0,06	y=58,0+13,0·10 ⁶ x
	10 ⁻⁷	0,08	y=58,9+48,1·10 ⁷ x
	10 ⁻⁸	0,08	y=65,6+8,7·10 ⁸ x
	10 ⁻⁹	0,06	y=43,7+14,3·10 ⁵ x
Cu	10 ⁻⁵	0,07	y=80,0+14,5·10 ⁵ x
	10 ⁻⁶	0,06	y=81,9+18,3·10 ⁶ x
	10 ⁻⁷	0,05	y=64,5+45,3·10 ⁷ x
	10 ⁻⁸	0,07	y=84,5+8,6·10 ⁵ x
Fe	10 ⁻⁵	0,09	y=15,4+9,4·10 ⁵ x
	10 ⁻⁶	0,10	y=2,9+5,4·10 ⁶ x
	10 ⁻⁷	0,08	y=75,1+4,5·10 ⁷ x
	10 ⁻⁸	0,10	y=30,5+4,9·10 ⁸ x
Zn	10 ⁻⁵	0,05	y=34,9+19,0·10 ⁵ x
	10 ⁻⁶	0,07	y=26,5+19,4·10 ⁶ x
	10 ⁻⁷	0,06	y=8,4+20,7·10 ⁷ x
	10 ⁻⁸	0,07	y=55,2+16,1·10 ⁸ x
	10 ⁻⁹	0,08	y=30,2+24,6·10 ⁹ x

Таким образом, полученные результаты показывают возможность определения концентраций до 10⁻⁹ моль/дм³ пяти металлов (кадмия, свинца, меди, цинка и железа), содержащихся в экологических объектах, а также в других материалах, практически из одной пробы при

совместном присутствии на фоне, содержащим комплексообразующие агенты, методом ИВА на графитовом электроде при использовании для этого вольтамперометрической компьютеризированной системы.

Разработанная вольтамперометрическая система и проводимые на ней исследования могут получить широкое применение для экологических и метрологических служб, металлургических и химических предприятий, для контроля пищевых и др. продуктов, а также для научных целей.

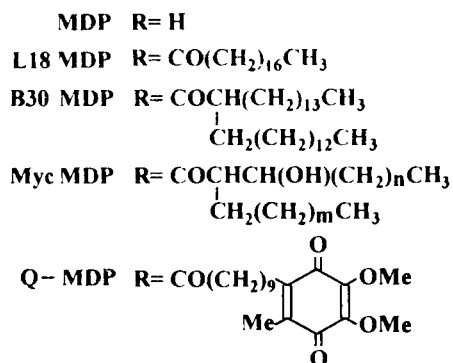
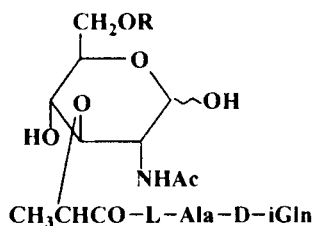
ЛИТЕРАТУРА

1. Электрохимические методы в контроле окружающей среды.– М.: Химия, 1990.– 238 с.
2. Брайнина Х.З., Нейман Е.Я., Слепушкин В.В. Инверсионные электроаналитические методы.– М.: Химия, 1988.– 239 с.
3. Справочник по электрохимии / Под ред. А.М. Сухотина.– Л.: Химия.–1981.– 485 с.
4. Waller P.A., Pickering W.F. Evaluation of "labil" metal in sediments by anodic stripping voltammetry // *Talanta*.– 1990.– V.37, N 10.– P. 981–993.
5. Вахобова Р.У., Рахманбердыев А.Д., Рачинская Г.Ф. и др. Вольтамперометрический анализ алюминия особой чистоты и сплавов на его основе // *Журн. аналит. химии*.– 1993.– Т. 48, N 6.– С. 1053–1059.
6. Ройзенблат Е.М., Крапивкина Т.А., Веретина Г.Н. О возможности чувствительности инверсионной вольтамперометрии металлов // *Заводская лаборатория*.– 1974.– Т. 40, N 4.– С. 370–373.
7. Брайнина Х.З. Инверсионная вольтамперометрия твердых фаз.– М.: Химия, 1972.– 192 с.

СИНТЕЗ, ИЗУЧЕНИЕ БИОЛОГИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОИЗВОДНЫХ N-АЦЕТИЛМУРАМОИЛ-L-АЛАНИЛ-D-ИЗОГЛУТАМИНА

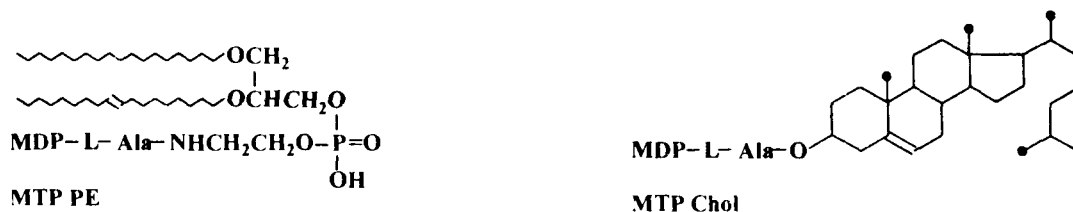
А. Е. Земляков, кандидат химических наук, доцент

Определение в 1974 г. N-ацетилмурамоил-L-аланил-D-изоглутамина (мурамоилдипептида, MDP) минимальной адьювантноактивной структурой пептидогликанов клеточных стенок бактерий, в том числе входящих в состав адьюванта Фрейнда [1], вызвало огромный интерес к этому гликопептиду. Простота структуры, широкие возможности для модификации и проявление аналогами MDP адьювантной, иммуностимулирующей, противоопухолевой активности подвигли химиков на синтез нескольких сотен производных мурамоилдипептида. Наиболее перспективными для применения в практической иммунологии и медицине в качестве адьювантов считаются бутиловый эфир N-ацетилмурамоил-L-аланил-D-глутамина (мурабутид) [2] и MDP-L-аланилфосфатидилэтаноламид (MTP-PE) [3]; в качестве стимуляторов антиинфекционной резистентности - 6-O-стеароил-MDP (L18-MDP) [4] и 6-O-(2-тетрадецилгексадеканоил)-MDP (B30-MDP) [5]; для противоопухолевой иммунотерапии - 6-O-хиноноил-MDP (Q-MDP) [6]. 6-O-миколоил-MDP (Myc-MDP) [7] и холестеринавый эфир MDP-L-аланина (MTP-Chol) [8].



Если производные мурамоилдипептида по аминогруппе и первичной гидроксильной группе были хорошо изучены, то аномерный гидроксил, как центр модификации, практически не заинтересовал исследователей. К началу наших работ в этой области были описаны синтезы α- и β-метил- [9] и α- и β-бензил- [10,11] гликозидов MDP, причем биологические испытания не дали однозначного ответа на вопрос о влиянии конфигурации аномерного центра и природы агликона гликозидных производных мурамоилдипептида на биологическую активность [12-14]. Рассмотренный в работе [15] β-метилгликозид фуранозного аналога MDP, оказался неактивным. В тоже время высокую адьювантность в тестах гиперчувствительности замедленного типа проявили

1-О-ацильные производные мурамоилдипептида (от ацетата до пальмиата) [16,17] и β-1-тиоацильные производные MDP [18,19]. Адьювантный эффект β-тиоалкилгликозидов мурамоилдипептида был незначительным [18]. Также мала адьювантность 1-N-ацетамида MDP [13], синтез которого не был описан.



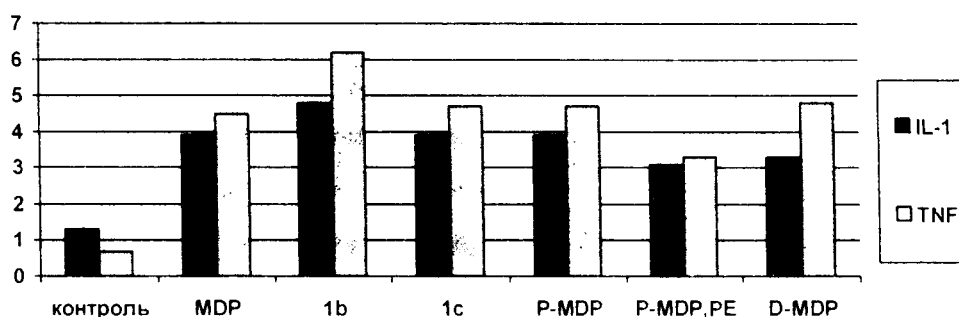
На фоне этих фактов нами было предложено использовать гликозидный центр в молекуле мурамоилдипептида для ее модификации в виде О-гликозидов. Такой подход обеспечивает большую экономность синтеза гликопептидов, так как исключается необходимость введения и удаления временных защитных групп по аномерному гидроксилу. Кроме того, таким образом придается большая устойчивость производным MDP в биологических средах по сравнению со сложными эфирами мурамоилдипептида.



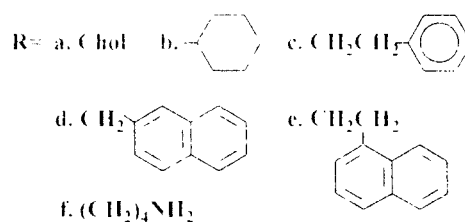
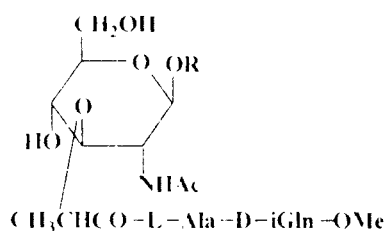
Первоначально были синтезированы β-гептил и β-гексадецилгликозиды MDP (1b,c) [20]. Ключевая стадия синтеза - получение сполна ацелированных β-алкилгликозидов N-ацетилглюкозамина (NAG), проводилась по оксазолиновому методу [21]. Последовательное дезацелирование этих веществ по Земплону, защита гликольной группировки у C-4 и C-6 в виде бензилиденовых производных и алкилирование свободной гидроксильной группы у C-3 α-L-хлорпропионовой кислотой в присутствии гидроксида натрия в условиях реакции S_N2 привело к защищенным D-мурамовым кислотам. Эти кислоты конденсировали с γ-бензиловым эфиром L-аланил-D-изоглутамина. Деблокирование гликопептидов включало два этапа: кислотный гидролиз ацетальной защиты и каталитический гидрогенолиз бензинового эфира в остатке изоглутамина.

Изучение биологической активности этих гликопептидов в частности показало, что β-гептил-MDP 1b стимулирует продукцию макрофагами таких важных медиаторов иммунного ответа как интерлейкин-1 и фактор некроза опухолей [22-24], дает четкий адьювантный эффект, а β-гексадецил-MDP 1c наряду с адьювантностью [25] проявляет радиопротекторные свойства [26].

Влияние гликопептидов на продукцию интерлейкина-1 (IL-1) и фактора некроза опухолей (TNF) перитонеальными макрофагами мышей [24].



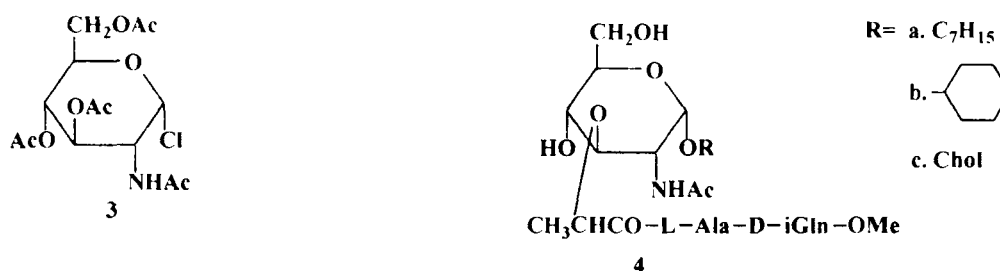
Высокая активность гликозидов **1b,c** побудила нас к синтезу новых гликозидов MDP с агликонами различного строения и липофильности - линейным и α -разветвленным алифатическими спиртами и диалкиловым эфиром глицерина. Выбор липофильных спиртов основывался на литературных данных, подтверждающих, что наиболее активные соединения содержат фрагменты двух длинноцепочечных молекул, образующих относительно жесткие гидрофобные стержнеобразные структуры, хорошо закрепляющиеся на липидных мембранах иммунных клеток (сер. **MTP-PE**, **Myc-MDP**, **B30-MDP**). Вторую группу полученных нами гликозидных аналогов MDP составили β -бутил-, β -(2-додецилтетрагенил)- и β -(2,3-дидодецилгексироил)- [28] гликозиды MDP (**1a,d,e**). Соответствующие гликозиды N-ацетилглюкозамина были синтезированы оксазолиновым способом, который обеспечивает высокую стереоспецифичность гликозирования.



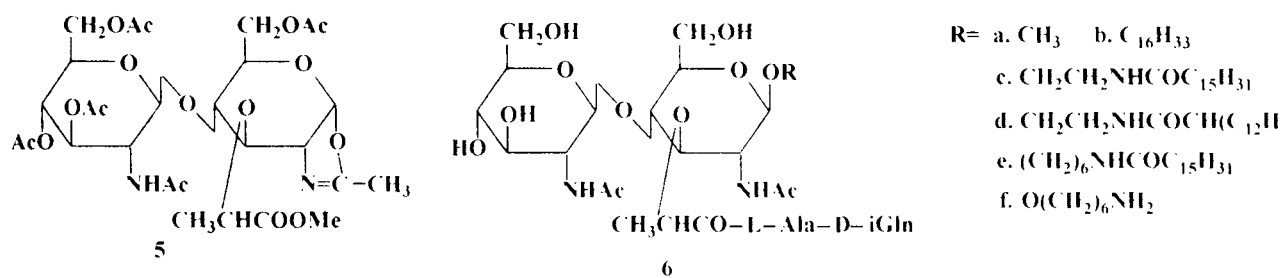
В то же время оксазолиновый метод не дает хороших результатов в случае менее реакционноспособных вторичных спиртов. Поэтому в синтезе β -холестерил-MDP **2a**, являющегося структурным аналогом **MTP-Chol**, для гликозирования холестерина в качестве гликозид-донора был использован перацетилированный α -глюкозаминилхлорид **3**. Реакцию проводили в дихлорэтане в присутствии катализатора гликозирования по Землену-Гельфериху - цианида ртути(II). После деацетилирования β -холестерилгликозид NAG был выделен с выходом 35% [29]. На его основе по стандартной схеме получили гликопептид **2a**, являющийся сильным адьювантом [26].

Решая задачу по разработке удобного способа получения гликозидов NAG, как ключевых соединений в синтезе гликозидов MDP, нами был предложен новый катализатор синтеза гликозидов N-ацетилглюкозамина по методу Земплена-Гельфериха - иодид ртути(II) [30]. Его применение позволило использовать в качестве гликозил-донора стабильный и легкодоступный α -хлорид **3** и обеспечило быстроту реакции, легкость получения и высокие выходы гликозидов в реакциях с различными первичными и вторичными спиртами (например, β -холестерилгликозид NAG был получен с выходом 57%). Этот метод дал возможность получить β -гликозиды мурамоилдипептида с агликонами карбоциклического строения, в том числе ароматическими. Такие гликопептиды являются альтернативой производным MDP с липофильными компонентами карбоцепного характера. Были синтезированы β -циклогексил-, β -фенэтил-, β -(2-нафтил)метил- и β -2-(1-нафтил)этилгликозиды метилового эфира N-ацетилмурамоил-L-аланил-D-изоглутамина (**2b-e**) [31]. Принципиальная схема синтеза этих соединений аналогична схеме получения гликозидов **1b,c**.

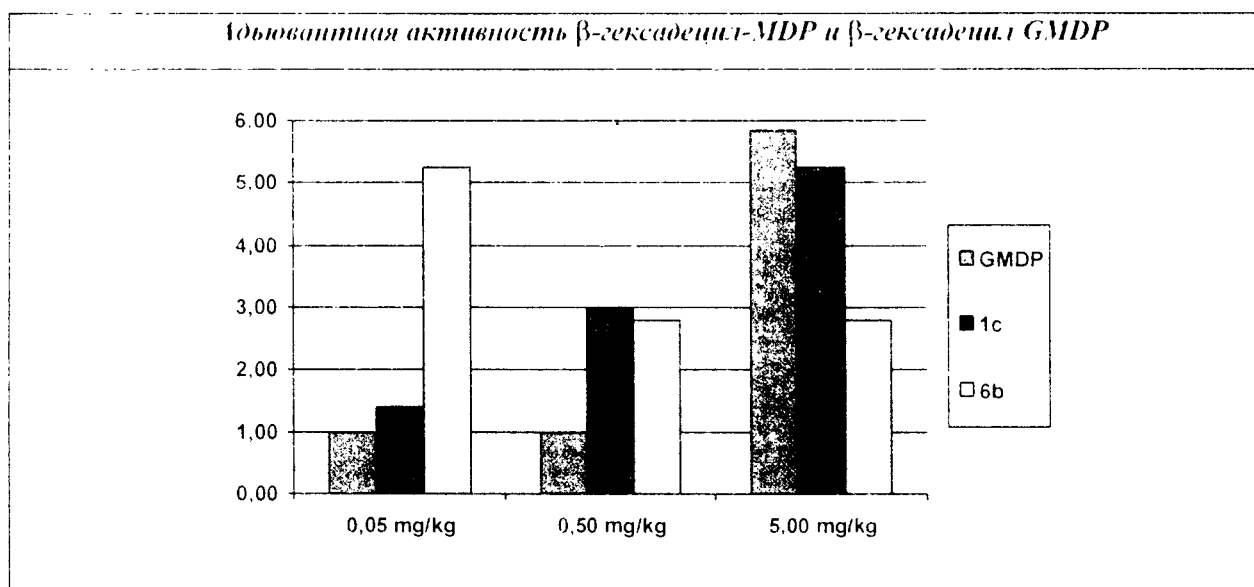
При проведении реакции гликозилирования в присутствии HgI_2 в дихлорэтаноле или нитрометаноле при высокой температуре образуется значительное количество α -гликозидов [32], что сделало доступными соответствующие гликозиды NAG. Использование этих гликозидов в качестве исходных соединений дало возможность синтезировать малоизученные α -гликозиды мурамоилдипептида. К настоящему времени получены α -гептил-, α -циклогексил- и α -холестерил-MDP (**4a-c**). Сравнение биологического действия этих гликопептидов с действием соответствующих β -изомеров позволит решить вопрос о влиянии конфигурации аномерного центра мурамоилдипептида на биологическую активность.



Наряду с гликозидами MDP нами были разработаны синтезы гликозидных производных дисахаридного аналога мурамоилдипептида - O-(N-ацетилглюкозаминил)-(β 1 \rightarrow 4)-MDP (GMDP), обладающего высокой биологической активностью, в том числе адъювантной и противоопухолевой. К моменту начала наших исследований были получены только пептидные [33] и 6-O-ацильные [34] модификации GMDP.



Исходным веществом в наших синтезах послужила глюкозаминилмурамовая кислота, которую этерифицировали диазметаном и ацетилировали. Последовательное 1-О-дезацетилирование, действие хлористым тионилом и обработка гликозилхлорида по методу Лемье привело к оксазолину **5**, которым гликозилировали метанол и гексадеканол-1. После удаления сложноэфирных защит дисахаридмурамовые кислоты конденсировали с дипептидом. Завершающий каталитический гидролиз бензильного эфира в дипептидном фрагменте дал целевые β-метил- и β-гексадецил-GMDP (**6a,b**) [35]. Последнее соединение имеет сравнимое с GMDP антивирусное действие при меньшей в 100 раз дозе [25].

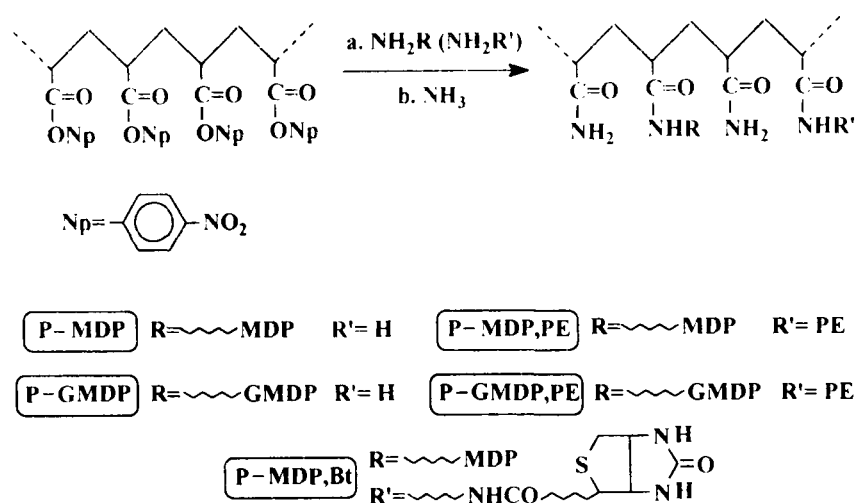


Эту же схему синтеза мы применили для получения липофильных β-(N-ацил-ω-аминоалкил)-гликозидов GMDP. Липофильные алкилоны для этой работы были получены действием N-гидроксисульфониловых эфиров линейной (гексадекановой) и α-разветвленной (2-додецилтетрадекановой) кислот на моноаминоламин и 6-аминогексанол-1. В результате были синтезированы β-(2-гексадеканоиламиноэтил)-, β-[2-(2- додецилтетрадеканоиламиноэтил)]- и β-(6-гексадеканоиламиноокси-1)-GMDP (**6c-e**) [36].

Гликозидный центр в молекулах мурамылдипептида и GMDP был нами также не использован для введения ω-аминоалкильного спейсера в виде азидного преспейсера. Такие соединения

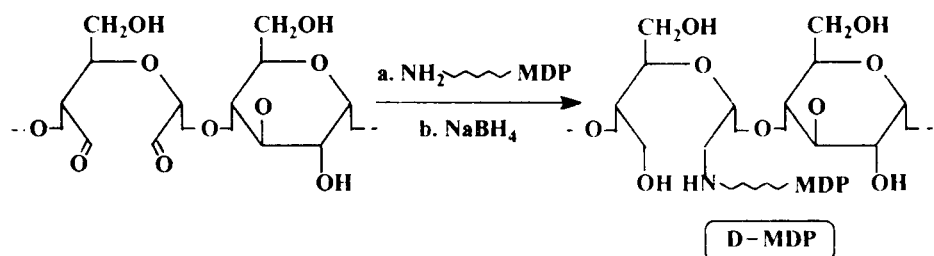
необходимы для получения “макромолекулярных” мурамоилдипептидов (конъюгаты MDP с природными или синтетическими полимерами), синтетических вакцин (совместная иммобилизация адъюванта и синтетического антигена на полимерной матрице), полимерных зондов с MDP специфичностью (к полимерному кору присоединены мурамоилдипептид и флюоресцентная метка) или для конъюгации с другими биологически активными соединениями. В литературе описано применение β -6-аминогексил- (**1f**) [37] и *n*-аминофенил- (**1g**) [9,38] гликозидов MDP.

В основе предложенного нами синтеза спейсерированного гликопептида **1f** лежит гликозилирование гександиола-1,6 оксазолином с последующим мезилированием свободного гидроксила и замещением мезилата на азидную функцию [39]. Использование азидного преспейсера позволило увеличить выход целевого гликопептида до 22% по сравнению с 7% в работе [37]. В дальнейшем схема была дополнительно упрощена применением в качестве стартового преспейсера 6-хлоргексанола-1 или 4-хлорбутанола-1, что дало возможность синтезировать соответственно гликопептид **1f** (с общим выходом 31%) и β -4-аминобутил-MDP (**2f**) [40]. На основе дисахаридного оксазолина **5** аналогично был получен β -6-аминогексил-GMDP (**6f**) [41].



Действием спейсерированных гликопептидов **1f** и **6f** на поли(4-нитрофенилакрилат) по методу Бовина [42] получили конъюгаты полиакриламида (ПАА) с MDP и GMDP. Одновременная обработка спейсерированными гликопептидами и фосфатидилэтаноламином (PE) дала липофильные конъюгаты **ПАА-MDP,PE** и **ПАА-GMDP,PE**. Применение ^{14}C -меченного PE или 6-аминогексиламида биотина (**Bt**) позволило создать изотопно- и флюоресцентномеченные конъюгаты **ПАА-MDP**, необходимые для изучения механизмов действия полимерных аналогов MDP [25,26].

В качестве альтернативной матрицы был взят биodeградируемый полимер - диальдегид декстран. Конденсация аминоспейсерированного мурамоилдипептида **1f** проводилась по имеющимся в полисахариде альдегидным группам с последующим исчерпывающим восстановлением NaBH_4 , что позволило получить конъюгат декстрана и MDP (**D-MDP**) [42]. Полимерные формы мурамоилдипептида **PAA-MDP**, **PAA-MDP,PE** и **D-MDP** показали высокую активность в ряде тестов противоопухолевого иммунитета [43].



Таким образом к настоящему времени стало очевидным, что гликозиды MDP перспективны для дальнейшего расширенного изучения, особенно в тестах *in vivo*. Особый интерес представляют гептил- и циклогексилгликозиды мурамоилдипептида, хорошо растворяющиеся в воде, агликон которых обеспечивает амфифильные свойства, а также гексадецил- и холестерилгликозиды MDP, относящиеся к высоколипофильным соединениям, что позволяет им встраиваться в эмульсии и липосомы. Наиболее вероятная область практического применения этих гликопептидов - иммунотерапия опухолей, где накоплено большое количество позитивных результатов биологических испытаний.

Несомненна перспективность спейсерированных мурамоилдипептидов и их конъюгатов с полимерами, относящихся к стимуляторам пролонгированного действия. В ближайшее время планируется получить спейсерированный гликопептид с α -конфигурацией гликозидной связи, мурамоилдипептид с олигоэтиленгликольным спейсером, обладающим меньшей гидрофобностью, и их конъюгаты с PAA и другими полимерами. Сравнение их биологической активности с ранее синтезированными конъюгатами позволит оценить влияние конфигурации гликозидного центра гликопептида, природы спейсера и полимера на иммуностимулирующий эффект. Полимерные гликопептиды найдут применение в качестве инструментов для изучения механизмов действия гликопептидов, а также вероятно создание на их основе синтетических вакцин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ellouz F., Adam A., Ciorbaru R., et al. // Biochem. Biophys. Res. Comm.-1974.-V.59.-№4.-P.1317-1325.
2. Lefrancier P., Derrien M., Jamet X., et al. // J. Med. Chem.-1982.-V.25.-№1.-P.87-90.
3. Sone S., Mutsuura S., Ogawara M., et al. // J. Immun.-1984.-V.132.-№4.-P.2105-2110.

4. Kusumoto S., Okada S., Yamamoto K., et al. // Bull. Chem. Soc. Jap.-1978.-V.51.-№7.-P.2122-2126.
5. Kusumoto S., Inage M., Shiba T., et al. // Tetrahedron Lett.-1978.-№49.-P.4899-4902.
6. Kobayashi S., Fukuda T., Imada I., et al. // Chem. Pharm. Bull. -1979.-V.27.-№12.-P.3193-3196.
7. Shiba T., Okada S., Kusumoto S., et al. // Bull. Chem. Soc. Jap.-1978.-V.51.-№11.-P.3307-3311.
8. Tenu J.P., Bernard I.M., Petit J.F., et al. Патент 2557758 Франция. // Chem. Abstr.-1986.-V.104.-19825k.
9. Lefrancier P., Derrien M., Lederman I., et al. // Int. J. Peptide Protein Res.-1978.-V.11.-P.289-290.
10. Hasegawa A., Kaneda Y., Amano M., et al. // Agric. Biol. Chem.-1978.-V.42.-№11.-P.2187-2189.
11. Merser C., Sinay P., Adam A. // Biochem. Biophys. Res. Comm.-1975.-V.66.-№4.-P.1316-1322.
12. Nagai Y., Akiyama K., Kotani S., et al. // Cell. Immun.-1978.-V.35.-P.168-172.
13. Durette P.L., Dorn C.P., Jr., Shen T.Y., et al. // Carbohydr. Res.-1982.-V.108.-№1.-P.139-147.
14. Azuma I., Okumura H., Saiki I., et al. // Infect. Immun.-1981.-V.53.-№1.-P.834-839.
15. Durette P.L., Dorn C.P., Jr., Friedman A., et al. // J. Med. Chem.-1982.-V.25.-№9.-P.1028-1033.
16. Hasegawa A., Hioki Y., Kiso M., et al. // Carbohydr. Res.-1983.-V.123.-№1.-P.63-71.
17. Hasegawa A., Kigawa K., Kiso M., et al. // Agric. Biol. Chem.-1980.-V.50.-№8.-P.2091-2094.
18. Hasegawa A., Hioki Y., Kiso M., et al. // J. Carbohydr. Chem.-1982-83.-V.1.-№3.-P.317-323.
19. Hasegawa A., Hioki Y., Yamamoto E., et al. // J. Carbohydr. Chem.-1986.-V.5.-№3.-P.359-369.
20. Земляков А.Е., Чирва В.Я. // Химия природн. соедин.-1987.-№5.-С.714-718.
21. Зурабян С.Э., Хорлин А.Я. // Успехи химии.-1974.-Т.43.-№10.-С.1865-1903.
22. Рахмилевич А.Л., Мигдал Т.Л., Рахимова М.С. и др. // Антибиотики и химиотерапия.-1989.-Т.-34.-№11.-С.836-839.
23. Медведев А.Э., Фукс Б.Б., Бовин Н.В. и др. // Бюлл. экспер. биологических-1992.-№12.-С.626-628.
24. Калюжин О.В., Фукс Б.Б., Бовин Н.В. и др. // Бюл. экспер. биологических-1994.-№5.-С.510-513.
25. Земляков А.Е. Синтез и биологическая активность производных N-ацетилмурамоил-L-аланил-D-изоглутамина и его дисахаридных аналогов. Автореф. диссерт... кандидат хим. наук. Одесса, 1989.-18с.
26. Кур'янов В.О. Синтез похідних мурамоїлдіпептиду: ліпоглікопептиди та кон'югаты. Автореф. диссерт... кандидат хим. наук. Одесса, 1995.-24с.
27. Курьянов В.О., Земляков А.Е., Чирва В.Я. // Укр. хим. журн.-1994.-Т.60.-№ 12.-С.858-861.
28. Курьянов В.О., Земляков А.Е., Чирва В.Я. // Биоорган. химия.-1994.-Т.20.-№4.-С.439-447.

29. Курьянов В.О., Земляков А.Е., Чирва В.Я. // Биоорг. химия.-1996.-Т.22.-№4.-С.287-290.
30. Земляков А.Е., Курьянов В.О., Чирва В.Я. // Химия природн. соедин.-1996.-№3.-С.367-371.
31. Zemlyakov A.E, Kur'yanov V.O., Tsikalov V.V., et al. // 2-nd International Symposium on the Chemistry of Natural Compounds. Abstracts. / Eskisehir (Turkey), 1996.-P.124.
32. Zemlyakov A.E, Kur'yanov V.O., Sidorova E.A., et al. // 2-nd International Symposium on the Chemistry of Natural Compounds. Abstracts. / Eskisehir (Turkey), 1996.-P.122.
33. Ростовцева Л.И., Андропова Т.М., Малькова В.П. и др. // Биоорг. химия.-1981.-Т.7.-№12.-С.1843-1858.
34. Inage M., Imato M., Kambayashi Y., et al. // Tetrahedron Lett.-1980.-№21.-P.3767-3770.
35. Земляков А.Е., Курьянов В.О., Чирва В.Я. и др. // Биоорг. химия.-1987.-Т.13.-№11.-С.1575-1578.
36. Земляков А.Е., Курьянов В.О., Пертель С.С. и др. // Биоорг. химия.-1990.-Т.16.-№10.-С.1393-1397.
37. Ponpipom M.M., Rupprecht K.M. // Carbohydr. Res.-1983.-V.113.- P.57-62.
38. Parant M., Damais C., Audibert F., et al. // J. Infect. Dis.-1978.-V.138.-№3.-P.378-386.
39. Земляков А.Е., Чирва В.Я., Бовин Н.В. Авт. св. СССР №440061.
40. Земляков А.Е., Какаян Е.С., Чирва В.Я. // Биоорг. химия.-1989.-Т.15.-№11.-С.1527-1533.
41. Земляков А.Е., Пертель С.С., Кобзарь В.А. и др. // III Совещание по хим. реактивам: Тез. докл. / Ашхабад, 1989.- С.5.
42. Bovin N.V., Korchagina E.Yu., Zemlyanukhina T.V., et al. // Glycoconjugate J.-1993.-V.10.-P.142-151.
43. Калюжин О.В. иммуномодулирующая активность новых производных мурамоилдипептида и ее корреляция с проникновением этих веществ через биомембраны. Автореф. диссерт... кандидат медицинских наук. М., 1995.-22с.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОБЛЕМЫ РАДИОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ В БИОЛОГИИ И МЕДИЦИНЕ

В. Г. Сидякин, А. М. Сташков

Обширный экспериментальный материал по радиочувствительности и радиорезистентности подробно освещается в ряде обобщающих работ [1-5].

Однако теоретическое толкование фактического материала по радиочувствительности в общебиологическом аспекте содержит определенные противоречия.

Еще в 60-е годы перед исследователями остро возник вопрос: что же такое радиочувствительность? Причина в том, что высокому уровню фактического материала современной радиобиологии не соответствовало понимание сути данного явления.

Не случайно Г. М. Франк [6] рекомендовал перейти к новой методологии лучевых эффектов в связи с наметившимся в радиобиологии признанием определяющей роли сложного ансамбля процессов взамен представления о решающей роли поражения уникальных молекул и аналогичных этому событий.

Анализ проблемы радиочувствительности с учетом влияния на организм природных факторов, сезонных и суточных колебаний функционального состояния нервной, эндокринной, кроветворной систем, витаминного баланса и других сторон обмена веществ послужил основанием для предложения о том, что радиочувствительность - есть проявление общей резистентности и реактивности организма [7]. Это первая важная попытка определения радиочувствительности с позиций общебиологических представлений.

Формулировка нового определения радиочувствительности в широком плане ее понимания натолкнулась на серьезные трудности, определяемые выбором наиболее существенных ее критериев, что дало основание [3] поднять этот вопрос до уровня проблемы [3].

Известные радиобиологи Г. Дертингер, Х. Юнг [8], рассматривая радиорезистентность с учетом степени сложности биологических систем, выделили специальный раздел работы под названием "Что такое радиочувствительность?" Они воздержались от конкретного четкого ответа на данный вопрос и подчеркнули, что молекулярная радиобиология занимается изучением элементарных физико-химических механизмов повреждения уникальных молекул на субклеточном уровне, что не может объяснить полностью суть радиочувствительности сложных систем. По мнению авторов, от решения данного вопроса зависит дальнейшее развитие общенаучной методологии и теоретического уровня обобщений в области радиобиологии.

П. С. Ярмоненко [5] в свете более узких представлений медицинской радиологии сформулировал положение о том, что единственным и самым существенным критерием радиочувствительности является радиопоражаемость. Иначе говоря, "по своей природе

радиочувствительность - есть не что иное, как радиопоражаемость". Такая формулировка сопровождается указанием на общебиологическое значение радиочувствительности, что вызывает необходимость обстоятельной дискуссии.

В интерпретации термина "радиочувствительность" существуют противоречия, которые встречаются в ряде работ [3, 9-12]. В частности, допускается, что одна и та же ткань, например нервная, одновременно радиочувствительна и радиорезистентна, или радиочувствительность и радиопоражаемость - это различные понятия, отражающие разные биологические явления.

По мнению С. П. Ярмоненко [5], радиочувствительность следует однозначно понимать как синоним поражаемости объектов.

Альтернативой к ним служит понятие радиоустойчивость или радиорезистентность. Такой вывод сам по себе нуждается в критической оценке. Вместе с тем представляет несомненную научно-методическую ценность заключение его о том, что при сравнительной оценке радиочувствительности (радиопоражаемости, радиорезистентности, радиоустойчивости) непреложным условием должно быть использование адекватных методов и критериев конкретно для каждой ткани, каждого органа или их структур. Далее, можно поставить знак равенства, например, между радиочувствительностью организма млекопитающих и радиочувствительностью костного мозга, ибо его повреждение уже в минимальной абсолютно летальной дозе тотального облучения является вполне достаточной для гибели организма [5]. В данном примере однозначность этих фактов очевидна, так как при указанной дозе радиации доминирует абсолютная поражаемость, при которой интенсивность и неизбежность ее развития несравнимы с возможностями естественной радиорезистентности.

Однако можно ли поставить знак равенства между критериями радиочувствительности и радиопоражаемости и распространять данный принцип их однозначности на все стороны развития лучевой реакции клеток, тканей и органов при действии крайне малых (назовем пороговых) для организменного уровня доз ионизирующей радиации? При указанных дозах радиации степень радиочувствительности и радиопоражаемости может оцениваться по соответствующим локальным пороговым эффектам на структурно-молекулярном уровне, а не величиной летальности организма в целом при минимальных абсолютно смертельных дозах облучения или, например при дозе ЛД 50/30. Заметим, что многократные ссылки на работу [5] обусловлены тем, что она рекомендуется в качестве основного учебного пособия для студентов биологических и медико-биологических специальностей высших учебных заведений, где формируется стиль научного мышления и научно-практическая подготовка врачей и научных сотрудников.

Чтобы устранить существующие противоречия во взглядах на оценку соотношений радиочувствительности и поражаемости, прежде всего следует рассмотреть вопрос о биологических основах чувствительности, как общего свойства живых систем.

В самом элементарном смысле чувствительность - это способность живых систем воспринимать действие разнообразных по природе раздражителей и, особо отметим, электромагнитных излучений и первично реагировать путем обмена веществ и структурно-функциональных изменений.

Отражением чувствительности к различным видам излучений являются элементарные первичные физические, химические, электрические, термические и метаболические изменения в клетках на атомно-молекулярном уровне. Особое место в диапазоне электромагнитных излучений занимает ионизирующая радиация, чувствительность к которой реализуется в различных проявлениях на основе атомно-молекулярных механизмов прямого и непрямого повреждающего ее действия на организм. Возможны и другие проявления радиочувствительности, которые будут отмечены ниже. В зависимости от особенностей биологических объектов и природы раздражителей, а так же способа их действия на организм существуют определенные пороги чувствительности, при которых не возникает нарушений структуры и функций или первично не появляются необратимые повреждения в связи с развитием восстановительных процессов.

В свете общих законов раздражения действие ионизирующей радиации при всех известных ее особенностях не может быть в таком смысле исключением.

Подводя итоги накопленным в радиобиологии данным, П. Д. Горизонтов [3] все реакции организма делит на три категории: радиочувствительность, радиопоражаемость и компенсаторные процессы. Показателем радиочувствительности, по его убеждению, "следует считать минимальную (пороговую) дозу (интенсивность излучения), на которую ткань способна отвечать обычной непродолжительной, не оставляющей каких-либо последствий физиологической реакцией. Критерием радиопоражаемости является минимальная доза радиации, которая вызывает нарушения функций органа, системы или целого организма и, как правило, вызывает структурные изменения". Сущность процессов восстановления и компенсации не нуждается в особых разъяснениях. Последнюю формулировку следовало бы уточнить в том смысле, что порогом радиопоражаемости следует считать некоторую минимальную дозу радиации, вызывающую первичные эффекты поражения на структурно-молекулярном уровне клеток и тканей.

Заслуга автора состоит в том, что он впервые четко разграничил сферу исследований в области радиопатологии и физиологического уровня лучевого воздействия (радиофизиологии). Можно было бы говорить о большем - радиационно-биохимическом, радиобиофизическом и других уровнях исходной стороны биологических реакций организма на облучение, не связанных с повреждением одних или необратимым поражением других структур и функций организма.

В связи с этим заслуживает внимание рассмотрение возможных подходов к общебиологическому пониманию критериев радиочувствительности, радиопоражаемости и радиорезистентности с той осторожностью и ожидаемой долей достоверности, которые ограничи-

вают изложение собственных теоретических взглядов при условии реагирования организма в диапазоне от предельно допустимых до крайне малых доз радиации, что в дальнейшем не исключает возможность глубоко осмыслить содержание фактов, полученных с применением несколько более широкой вариации малых доз облучения.

В зависимости от дозы радиации, накопления локальных и общих изменений и повреждений последовательный переход их на более высокую ступень структурно-функциональной организации осуществляется лишь при достижении порога в развитии повреждений на предыдущем, более низком уровне биологической интеграции при обязательном участии восстановительных процессов [13, 14].

Исходя из этого общего принципа реагирования сложных биологических систем на действие повреждающих агентов, необходимо расширить теоретический аспект проблем радиочувствительности и радиопоражаемости, чтобы вывести его из спланированной сугубо патогенетических представлений.

Одной из основных причин, препятствующих системному подходу к адекватному теоретическому обобщению результатов исследований по данной проблеме, следует считать изначально сложившаяся расплывчатая и двусмысленная трактовка характера биологического действия ионизирующей радиации, с одной стороны, как раздражителя, с другой - как патогенного агента с доминированием свойств последнего [15] и др.

Очевидно, исходным в этом вопросе следует принять непреложную истину, что все без исключения агенты внешней среды, в том числе и ионизирующая радиация, способные вызвать в организме изменения, являются раздражителем в общем их понимании.

В зависимости от силы, длительности, градиента раздражения и других условий реагирования действие их на организм может быть физиологическим или патогенетическим.

В соответствии с основными законами раздражения ионизирующая радиация, как раздражитель, характеризуется показателями интенсивности (дозы), продолжительности действия и градиента раздражения (скорости создания дозы во времени или мощности). В зависимости от величины этих показателей, структурно-функциональных особенностей объекта и его частей, способа, механизма и конечного результата действия на биосубстрат, биологический эффект ионизирующей радиации может быть как патогенетическим, так и физиологическим по тем или иным проявлениям ответных реакций.

С физико-химической и физиологической точек зрения такие варианты событий аналогичны действию общих законов раздражения. Например, в радиорезистентных тканях при определенных дозах радиации структурно-функциональные изменения могут предшествовать развитию повреждений или непосредственно не вызывать их возникновения. Вместе с тем энергия квантов излучения, превышая интенсивность межатомных и межмолекулярных связей в объеме мишени,

приводит к ее поражению, подобно тому как любое сверхмаксимальное раздражение, сила которого выше предела устойчивости определенных компонентов сложной биологической системы, вызывает патологический эффект. В рассматриваемом случае реагирования на структурно-молекулярном уровне клетки между параметрами и механизмами радиочувствительности и радиопоражаемости неизбежно тождество.

Поражение уникальной молекулы, такой критической мишени, как ДНК, может означать гибель самой клетки [1, 2, 4, 8].

Облучение повреждает не только уникальные, но и множественные молекулы клетки, например ферменты, обладающие высокой радиочувствительностью. Вместе с тем при поражении ферментов возможно замещение поврежденных молекул другими, в точности им подобными молекулами, синтезированными заново [16] и др.

Известно, что в норме определенная часть молекул также разрушается и восстанавливается в процессе метаболизма путем синтеза. Параметры этих функций изменяются в пределах минимального и максимального уровня активности клеток под влиянием любых причин эндогенного и экзогенного характера. Таким путем происходит нормальное обновление и поддержание структурно-молекулярного постоянства клеток. Таким же образом совершаются процессы замены множественных молекул, поврежденных радиацией, в частности в диапазоне естественных и предельно допустимых уровней.

Поэтому степень естественной радиочувствительности организма в форме необратимого повреждения уникальных и множественных молекул прежде всего определяется общим состоянием баланса процессов восстановления и радиационного повреждения на структурно-метаболическом уровне клеток и тканей.

За пределами возможностей клеток и тканей устранять путем метаболизма повреждения молекулярных структур значение эффектов радиационного поражения начинает возрастать в зависимости от дозы радиации и проявляться в необратимых изменениях жизнедеятельности и гибели клеток. Однако при определенной дозе облучения повреждение некоторого числа радиочувствительных уникальных множественных молекул еще не может быть поранением клетки в целом. В свою очередь радиационное поражение некоторого количества уникальных молекул и, следовательно, гибель определенного числа клеток в условиях естественного радиоактивного она и предельно допустимых доз радиации еще не означает гибели всей их популяции или ткани в целом как сложных биологических систем, что обусловлено тем, что в организме в состоянии нормы непрерывно совершаются процессы разрушения и замены поврежденных и закончивших жизненный цикл клеток другими, в точности им подобными, в результате деления неповрежденных клеток или осуществления защитных функций иммунной системы. Последняя обеспечивает генетическое постоянство внутренней среды организма,

обезвреживая и разрушая чужеродные и собственные клетки, не имеющие средства или утратившие генетическую индивидуальность.

Очевидно, не может быть исключением естественная замена определенного числа клеток, случайно подвергнутых повреждению радиацией в сравнительно малых дозах. В указанных вариантах морфо- и системогенеза радиочувствительность, как поражаемость всего организма, не может определяться и, следовательно, оцениваться элементарными актами поражения определенного (порогового) числа мишеней или клеток, так как естественное обновление и поддержание постоянства клеточного состава тканей не выходит за пределы нормы. Кроме того, выражением радиочувствительности при таком условии могут быть субпороговые и пороговые эффекты, не связанные с поражением радиочувствительных и уникальных молекул или клеток. Только за пределами указанного состояния нормы радиочувствительность будет проявляться в накоплении локальных необратимых повреждений на молекулярном, клеточном, тканевом и системном уровнях и оцениваться по величинам сублетальных и летальных доз ионизирующей радиации.

Известно, что до появления повреждений, которые регистрируются в субстрате клеток по биологическим показателям, возникает ряд последовательных стадий развития процессов, обусловленных действием радиации: физическая, физико-химическая и конечная биологическая [17] и др. Каждая из этих стадий характеризуется определенным порогом и максимумом энергии активации при которых возникают соответствующие для них радиационные эффекты и конечные продукты. Причем спектры поглощения электромагнитных излучений нарастают ступенеобразно при переходе от одной стадии к другой и между значениями начальной пороговой активации на первой физической, а затем химической стадиях, на которой происходит образование таких активных продуктов, как ионы и свободные радикалы, и последующей за этим биологической стадией, связанной с появлением обратимых и необратимых повреждений, существует определенный энергетический диапазон [17]. В связи с этим можно признать существование физического, химического и биологического уровней радиочувствительности, затрагивающие все уровни организации живых систем, начиная от молекулярного и кончая системным и организменным. Причем в каждом конкретном случае имеется определенный диапазон между порогом функциональной (физической, химической и биологической) чувствительности и порогом обратимой и необратимой поражаемости конкретных структур и функций. Именно в этом заключается гетерогенная природа радиочувствительности. Иначе говоря, организм "чувствует" действие ионизирующей радиации путем реагирования всего многообразия различных по природе компонентов во всем объеме живого вещества. Таким образом, между порогом функциональной радиочувствительности и радиопоражаемости в указанных выше проявлениях существует диапазон, характеризующий радиорезистентность конкретных компонентов живого вещества

клеток. Эта разница может быть больше, меньше или практически отсутствовать, например, при попадании в мишень частиц высокой энергии.

Можно заключить, что радиопоражаемость не может быть единственным критерием радиочувствительности. Признание не только тождества, но и различий между критериями радиочувствительности и радиопоражаемости с учетом особенностей и динамичности характера их проявлений и взаимоотношений в зависимости от дозы радиации, природы биологических объектов, уровней их интеграции, состояния реактивности и других причин может устранить сложившиеся в отечественной радиобиологии противоречия в теоретической разработке рассматриваемых проблем.

Патогенетическое, а не общее биологическое содержание представлений о радиочувствительности абсолютизирует данный принцип как единственный в реагировании организма на действия ионизирующих излучений. В таком смысле этот принцип по аналогии сходен с теорией мишени в его суммарном, интегральном виде применительно к целостному организму в условиях действия сублетальных и летальных доз радиации. Таким образом, невозможно объяснить прогрессивную эволюцию живых систем в отдаленные периоды истории Земли, когда естественный уровень радиации был значительно выше современного и неизбежным была суммация необратимых повреждений и их последствий на генетическом уровне. С этих позиций невозможно также строго последовательное теоретическое обоснование сути предельно допустимых доз радиации в условиях хронического облучения организма человека в особых естественных условиях при допустимых ее уровнях.

Итак, радиочувствительность - есть общее свойство живых систем первично воспринимать энергию ионизирующих излучений и трансформировать ее на всех структурно-функциональных уровнях в совокупности различных по механизму эффектов и состояний реактивности. При остром и особенно хроническом облучении в дозах, в той или иной мере превышающих предельно допустимую, а тем более в летальных дозах радиочувствительность проявляется в возникновении и суммации частично или полностью необратимых повреждений критических компонентов живого вещества с переходом их на более высокий уровень структурно-функциональных нарушений на системном и организменном уровнях. В условиях предельно допустимых доз радиации радиочувствительность обнаруживает себя в полной обратимости повреждений и их последствий на основе мобилизации защитно-приспособительных и восстановительных процессов на всех структурно-функциональных уровнях организма. И, наконец, в более общем первичном и начальном виде радиочувствительность проявляется в совокупности физических; химических, физико-химических биохимических и физиологических эффектов возбуждения и сверхвозбуждения атомов и молекул, случаев ионизации, образования свободных радикалов и

функциональных изменений на структурно-метаболическом уровне, которые не достигают порога повреждения.

Производство и использование атомной энергии поставило перед человечеством комплекс научных, экономических, социальных и политических проблем. В радиобиологии и медицине возникла проблема лучевой патологии. В связи с этим на передний план вышли проблемы патогенеза, профилактики и терапии лучевой болезни. Это определило методологическую сущность радиочувствительности. Вместе с тем в радиобиологии накопилось много фактов, дающих основание понимать радиочувствительность в более широком общебиологическом плане. Изложенные выше теоретические представления по обсуждаемой проблеме дополняют доминирующий в радиобиологии патогенетический подход к анализу и обобщению фактических данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бак З. М., Александер П. Основы радиобиологии. - М.:ИЛ, 1963, - 500 с.
2. Бонд В., Флиндер Т., Аршамбо Д. Радиационная гибель млекопитающих. -М.: Наука, 1973, - 302 с.
3. Горизонтов П. Д., Мороз Б. Б., Федотов В. П., Бибикова А. Ф., Евсеева Н. К. К вопросу о значении нейро-эндокринных изменений в отдаленных последствиях, вызванных воздействием ионизирующей радиации. // Радиобиология, 1965, т. 5, 12, - С. 221-226.
4. Эйдус Л. Х. Неспецифическая реакция клеток и радиочувствительность. - М.: Атомиздат, 1977.
5. Ярмопенко С. П. Радиобиология человека и животных. -М.: Высшая школа, 1988, - 375 с.
6. Воробьев Е. И., Фунштейн Л. В. Некоторые обоснования к разработке вопроса о радиочувствительности. -В кн: Вопросы тканевой радиочувствительности. // Наука, Казахской ССР, Алма-Ата, т. IV, 1967, С. 8-11.
7. Даренская Н.Г. Реактивность организма и радиочувствительность // В сб. Радиочувствительность и процессы восстановления у животных и растений. Тез. докл. -Ташкент: ФАН, 1979, - С.123-126.
8. Дертингер Г., Хонг Х. Молекулярная радиобиология. -М.: Атомиздат, 1973, - 248 с.
9. Горизонтов П. Д. Патогенез лучевой болезни, вызванной внешним ионизирующим излучением. // Патологическая физиология острой лучевой болезни. - М.: Медгиз, 1985, - С. 91-109.
10. Горизонтов П. Д. Вопросы патогенеза лучевой болезни // Вопросы патогенеза экспериментальной терапии и профилактики лучевой болезни. – М.: Медицина, 1960, - С. 121-139.
11. Григорьев Ю. Г. Материалы к изучению реакции центральной нервной системы человека на проникающее излучение. -М.: АН СССР, 1963, - 78 с.

12. Григорьев Ю. Г., Горлов В. Г. Суточные ритмы радиочувствительности организма. // Физические и радиобиологические исследования на искусственных спутниках земли. – М.: 1971, - С. 97-102.
13. Жестяников В. Д. Восстановление и радиорезистентность. // М.: Наука, 1968, - 351 с.
14. Жестяников В. Д. Предисловие к русскому изданию книги: Дертингер Г., Юнг Х. Молекулярная радиобиология. М.: Атомиздат, 1973, 2, 238 с.
15. Лебединский А. В., Нахильницкая З. Н. Влияние ионизирующей радиации на нервную систему. - М.: Ашотиздат, 1960, - 296 с.
16. Парибок В. П. Природа пострadiационного восстановления. Определение и общая характеристика процесса - В кн: Защита и восстановление при лучевых повреждениях // Наука, М., 1966., с. 20-31.
17. Platzman R. L. In. "Radiation Research". Proceedings of the third international congress of radiation research held at Cortina d' Ampezzo. Itali, 1966. Ed. By Silini., Amsterdam, 1967, p. 20-27.

ГЕМОСТАТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ НИЗКОИНТЕНСИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

*В. И. Малыгина, кандидат биологических наук,
В. Ф. Русяев, доктор биологических наук, профессор*

Появление новых типов оптических квантовых генераторов, а также - изучение процессов взаимодействия квантов света с тканями организма способствовало расширению области практического здравоохранения с использованием лазеров при лечении различных заболеваний.

В этой связи наибольший интерес представляет рассмотрение биологических эффектов, лежащих в основе практического, клинического применения лазеров.

В литературном обзоре В. И. Гордиенко и В. Н. Залесского (1989) дана классификация эффектов, вызываемых когерентным монохроматическим светом в тканях термические эффекты (фотокоагуляция): механические (фотоиспарение или фоторазрыв), фотохимические (фотоабляция), фотодинамические (с использованием фетосенсибилизаторов) и биостимуляция. Последний эффект достигается обработкой тканей лазерным излучением низкой интенсивности и малой мощности. Это и определило перспективность применения лазерного излучения в офтальмологии, дерматологии хирургии органов брюшной полости, гинекологии, нейрохирургии и т.д.

Особую актуальность приобретает применение достижений квантовой физики в гемостазиологии, которая является одной из центральных общепатологических проблем современной медицины, в терапии, в том числе сердечно-сосудистых заболеваний наиболее успешно применяется излучение низкоинтенсивных лазеров, таких, как гелий-неоновый (ГНЛ) (Хубутя и др. 1989, Швальб и др.1990).

Полагают, что клиническое применение низкоинтенсивного лазерного излучения связано с его способностью модифицировать физические и биологические свойства компонентов крови (Миненков, 1989г., Смольянинова, 1990).

В работах И. М. Корочкяна и др. (1983) демонстрируется успешное применение внутрисосудистого облучения крови ГНЛ (0,63 нм, 10-12 мВт) при лечении больных острым инфарктом миокарда. Положительное действие низкоинтенсивного излучения авторы связывают со снижением агрегационной способности тромбоцитов и эритроцитов, а также - с повышением фибринолитической активности крови. По мнению целого ряда исследователей, положительный терапевтический эффект лазеротерапии в значительной мере связан с влиянием низкоэнергетического когерентного излучения на состояние региональной гемодинамики. клинические наблюдения П. В. Спасиченко и др. (1990), свидетельствуют о том, что лазерное излучение может быть успешно применено для лечения различных форм гемостазиопатий у

больных с различной нейрохирургической патологией. Получены предварительные результаты применения внутрисосудистого лазерного облучения крови в сочетании с традиционными методами лечения у больных с острым нарушением мозгового кровообращения (Авраменко и др., 1990). Применение излучения ГНЛ (1 мВт на конце световода) способствовало улучшению церебральной гемодинамики и более быстрому восстановлению неврологической симптоматики.

Однако, несмотря на большое количество обнаруженных биоэффектов, а также - широкое клиническое применение лазеров, остается пока открытым вопрос о биологических механизмах взаимодействия когерентного излучения с биологическими структурами. Полагают, что в основе терапевтических эффектов низкоинтенсивного лазерного излучения лежат механизмы фотохимической природы (Кагу, 1988).

Выявление фотохимической природы действия лазерного излучения способствовало определению роли фотосенсибилизаторов (веществ, повышающих чувствительность ткани к свету) в данном процессе, это позволило избирательно воздействовать на те или иные фоточувствительные компоненты клетки (Мазина и др., 1986).

В связи с вышеизложенным, нами было исследовано влияние излучения ГИЛ в комплексе с фотосенсибилизаторами на агрегационную способность тромбоцитов. Форменные элементы крови являются удобным объектом для изучения механизма влияния низкоинтенсивного лазерного излучения на биологические структуры на клеточном уровне.

Ранее нами было установлено, что лазерное излучение оказывает стимулирующее действие на процесс образования первичного тромба (Малыгина, 1990). При этом скорость первой фазы агрегации тромбоцитов увеличивалась в 1,36 раза ($p < 0,05$), а второй - в 1,26 раза ($p < 0,05$). Вероятно, действие лазерного излучения способствовало снижению поверхностного заряда мембраны кровяных пластинок, ускоряя формирование тромбоцитарной пробки, подобная реакция поверхностной мембраны известна при действии ГНЛ на эритроциты и лимфоциты (Лаптева и др., 1989). Активирующее влияние низкоинтенсивного лазерного излучения на систему первичного гемостаза согласуется с данными, полученными в.н. Кожевниковым и др. (1988).

В настоящей работе нами исследовано влияние фотосенсибилизатора (метиленового голубого) на скорость агрегации тромбоцитов. Известно, что метиленовый голубой применяется в фотохимиотерапии (Данилова, 1987).

Облучение плазмы крови, взятой у 30 доноров в возрасте 18-25 лет осуществляли расфокусированным лучом лазера ЛНГ-208 Б (632,8 нм, 1,9 мВт). Длительность воздействия составила 1 минуту. Адреналин-индуцированную агрегацию тромбоцитов исследовали методом Вога (1962) в модификации В. Ф. Русяева (1931). Метиленовый голубой добавляли к плазме крови на 4-5 минут (концентрация красителя в плазме - 0,005%). Для регистрации процесса склеивания клеток использовали фотометр ЛМФ-72, напряжение с которого подавалось на пишущий прибор

КСП-4. Обработка агрегатограмм велась разностным статистическим методом с использованием t -критерия Стьюдента.

В результате проведенных исследований установлено, что краситель способствует увеличению скорости агрегации тромбоцитов в первой (до 130% относительно контроля, $p < 0,001$) и второй фазе (до 116%, $p < 0,01$) образования первичного тромба.

Облучение плазмы крови ГНЛ вызывало возрастание скорости агрегации кровяных пластинок до 150% относительно контрольного уровня ($p < 0,001$) в первой и второй фазах.

Комплексное воздействие лазерного излучения и фотосенсибилизатора способствовало увеличению скорости агрегации до 185,3% относительно контрольных величин ($P < 0,01$) в первой и 177,2% ($p < 0,01$) - во второй фазе, что, соответственно, в 1,23 и 1,18 раза выше, чем скорость агрегации тромбоцитов без предварительной инкубации с красителем.

По всей вероятности, такой значительный фотосенсибилизующий эффект данного красителя связан с хорошей поглощающей способностью лазерного излучения выданной области спектра (632,8 нм) по отношению к метиленовому голубому, адсорбированному кровяными пластинками.

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности использования фотосенсибилизаторов в процессе избирательного влияния лазерного излучения на определенные этапы гомеостаза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авраменко С. П., Толстоногов В. И., Степаненко Л. М. Внутривенная лазеротерапия в остром периоде мозгового инсульта. // Сб. тез. докл. научно-практической конференции. Низкоинтенсивное лазерное излучение в медицинской практике. - Хабаровск: Хабар. филиал ЦНИИТС, 1990. -С. 20-21
2. Гордиенко В. И., Залесский В. Н. Об использовании лазеров в медицине. // Врач. дело.- 1989, №10. - С.4-8.
3. Данилова Н. Н. Лекарственные вещества как фотостабилизаторы //Фармакол. и токсикол.- 1987.- №5.-С.99-110.
4. Инюшин В. М., Шабаев З. П. Биофизические и цитобиологические аспекты реактивности эритроцитов на лазерное воздействие. // Биологических действие лазерного излучения. Куйбышев, 1984.-С.23-29.
5. Кожевников В. Н., Полякова З.А. Механизмы гемокоагуляционных сдвигов при лазерном облучении. // Механизмы регуляции гемостаза на уровне молекулярных взаимодействий. - Свердловск: Св. мединститут, 1988.-С.93-97.
6. Корочкин И. М., Иоселиани Д. Г., Беркинбаев С. Ф. и др. Лечение острого инфаркта миокарда внутривенным облучением крови гелий-неоновым лазером. //Сов. медицина.-1983.-№ 4.- С.34-38.

7. Лаптева Р. М., Балмуханов Б. С., Гапшева С. А. Влияние излучения гелий-неонового лазера и ионной силы на процесс розеткособразования лимфоцитов. // Иммунология.-1989.-№1.-С.34-36.
8. Малыгина В. И. Влияние низкоинтенсивного лазерного излучения на процесс агрегации тромбоцитов. // Тез. докл. 17 Дальневосточной научно-практич. конф. Низкоинтенсивное лазерное излучение в медицинской практике. - Хабаровск, 1990.-С.106.
9. Миненков А. А. Применение лазерного излучения в физиотерапии. //Тез. докл. Всес. Съезда физиотерапевтов и курортол. Ташкент, 4-6 окт. 1989.-М. 1989.-Т.-1.-С.20-21.
10. Русяев В. Ф. Кинетический анализ агрегации тромбоцитов. // Пробл. гематологии и переливания крови.-1981.-№11.- С.51-54.
11. Смольянинова Н. К., Кару Т. И., Зеленин А. В. Активация синтеза РНК в лимфоцитах после облучения He-Ne лазером. // Радиология.-1990, №3.- С.424-426.
12. Спасиченко Г. В., Олейник Г. М., Пономарева О. Ф. Модулирующий эффект внутрисосудистого лазерного облучения крови на показатели гемостаза у нейрохирургических больных. //Тез. докл. науч.-практич. конф. Низкоинтенсивное лазерное излучение в медицинской практике. -Хабаровск, 1990.- С.203-204.
13. Хубутя Б. И., Хубутя З. Б., Фомина В. А. Новый способ лазеротерапии при ишемической болезни сердца и его клинко-экспериментальное состояние. //Современные методы лазерной терапии. -Рязань.- 1989.-С.12-16. .
14. Швальб П. Г., Катаев М. И., Захарченко А. Д. Низкоинтенсивное лазерное излучение в практической медицине (итоги и перспективы). // Современные методы лазерной терапии. - Рязань.- Медицинских ин-т.-1989.-С.5-11.
15. Born Y. V. R. // nature.- 1962.- 194. -P. 927.
16. Karu T. I. Molecula mechanism of the therapeutic effect of low-intensity laser radiation.// Laser life Sci.- 1988.- 2, № 1.- P. 53-74.

ИЗМЕНЕНИЕ ЦИТОХИМИЧЕСКОГО СТАТУСА ЛЕЙКОЦИТОВ КРОВИ КРЫС С РАЗЛИЧНЫМ УРОВНЕМ ДВИГАТЕЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ ПРИ ДЕЙСТВИИ ПЕМП СЧ

*Е. Ю. Грабовская, кандидат биологических наук, доцент,
Н. А. Темурьянц, доктор биологических наук, профессор,
А. М. Ефименко, доктор медицинских наук, профессор,
Б. В. Мельниченко, кандидат биологических наук, доцент,
В. В. Ширяев, кандидат медицинских наук, доцент, Б. И. Шанахин*

Под действием стресс-факторов различной природы у человека и животных с неодинаковыми конституционными особенностями развиваются неоднозначные по интенсивности и направленности изменения в деятельности центральной нервной системы, систем нейрогуморальной регуляции функций, внутренних органов [12,10,9]. Выяснение причин и физиологических механизмов изменчивости реакции организма на идентичные воздействия открывает возможности целенаправленного и эффективного управления многими процессами, обеспечивающими устойчивость в экстремальных ситуациях.

Поэтому, изучение индивидуальной чувствительности организма, и, следовательно, его реактивности к действию такого космофизического фактора как переменное магнитное поле (ПемП) сверхнизкой частоты (СНЧ) в наше время особенно актуально.

Многочисленными исследованиями установлено, что наиболее чувствительны к действию ПемП СНЧ нервная система и система крови [11]. Поэтому для определения индивидуальных особенностей реагирования крыс на действие ПемП СНЧ нами изучено функциональное состояние лейкоцитов крови.

Материалы и методы. Исследование выполнено на 150 беспородных белых крысах самцах массой 200-220 г, полученных из питомника "Рапполово". Для нормирования групп животных с различным уровнем двигательной активности и низкой эмоциональностью была применена методика "открытого поля" (ОП), позволяющая относительно быстро и с большой степенью достоверности выявить индивидуальные различия между животными [6,3]. На основе этой методики были выделены животные с низким (НДА), средним (СДА) и высоким (ВДА) уровнем двигательной активности. Как показали цитохимические исследования, у животных выделенных групп отмечались различия в исходном уровне сукцинатдегидрогеназы (СДГ) в лимфоцитах крови (таблица).

Р1-Р3 - достоверность различий при сравнении с данными групп, обозначенных в таблице 1-3 соответственно.

Во всех дальнейших экспериментах каждую из трёх описанных групп животных разбивали на две подгруппы. Крысы одной подгруппы находились в обычных условиях вивария и служили биологическим контролем. Крысы второй подгруппы подвергались воздействию ПемП частотой 8 Гц индукцией 5 мкТл по 3 часа ежедневно в течение 3 дней [11, 6].

Таблица.

Средняя активность СДГ в лимфоцитах и показатели поведения крыс с различной двигательной активностью в ОП ($\bar{x} \pm S_x$)

Группа	Частота встречаемости	Горизонтальная двигат. активность	Вертикальная двигательная активность	СДГ
НДА (1)	7 - 9	$7,2 \pm 1,5$	$2,4 \pm 0,5$	$27,3 \pm 0,7$
		$P2 < 0.01$	$P2 < 0.01$	$P2 < 0.01$
		$P3 < 0.001$	$P3 < 0.01$	$P3 < 0.01$
СДА (2)	28 - 30	$31,9 \pm 0,9$	$6,4 \pm 0,5$	$21,5 \pm 0,3$
		$P1 < 0.01$	$P1 < 0.01$	$P1 < 0.01$
		$P3 < 0.01$	$P3 < 0.01$	$P3 < 0.01$
ВДА (3)	6 - 10	$45,6 \pm 1,5$	$11,0 \pm 1,1$	$17,8 \pm 0,6$
		$P1 < 0.001$	$P1 < 0.01$	$P1 < 0.01$
		$P2 < 0.01$	$P2 < 0.01$	$P2 < 0.01$

Определение цитохимического статуса нейтрофилов и лимфоцитов крови производили до воздействия, а также на 1,3,5 и 9-е сутки воздействия ПеМП СНЧ. Кровь для исследования брали из хвостовой вены. Состояние защитно-приспособительных процессов системы крови оценивали по цитохимическому статусу лейкоцитов периферической крови. Цитохимический показатель содержания (ЦПС) пероксидазы (ПО) определяли с помощью реакции Грэхема [5], кислой фосфатазы (КФ) - методом азосочетания. Количественную оценку этих показателей осуществляли в соответствии с принципом Карлов (1995) [15].

Содержание сукцинат - (СДГ), α -глицерофосфат - (α -ГФДГ) лактатдегидрогеназа (ЛДГ) оценивали количественным цитохимическим методом по [8] с выведением их средней активности.

Обработку и анализ экспериментальных данных проводили с помощью параметрических статистических методов на ЭВМ БЗ-21 по стандартным программам [14]. Для оценки достоверности использован t-критерий Стьюдента [4].

Результаты и обсуждение. При изучении изменения цитохимического статуса лейкоцитов под действием ПеМП СНЧ у крыс с различными индивидуальными особенностями выявлены определенные различия. Так как преобладающими в популяции являются крысы со средним уровнем двигательной активности (до 30%) можно считать, что типичная реакция на воздействие ПеМП развивается у животных этой группы.

У крыс СДА однократное воздействие ПеМП приводит к снижению защитно-приспособительных процессов системы крови. Происходит снижение ЦПС ПО и КФ на 4% относительно контрольного уровня (Рис.1).

Средняя активность СДГ в нейтрофилах понизилась на 14%, а ЛДГ и α -ГФДГ повысилась на 22% и 13% соответственно (относительно контрольного уровня), в лимфоцитах наблюдалось снижение средней активности СДГ на 11% ($p < 0,05$) активность α -ГФДГ и ЛДГ изменялась незначительно.

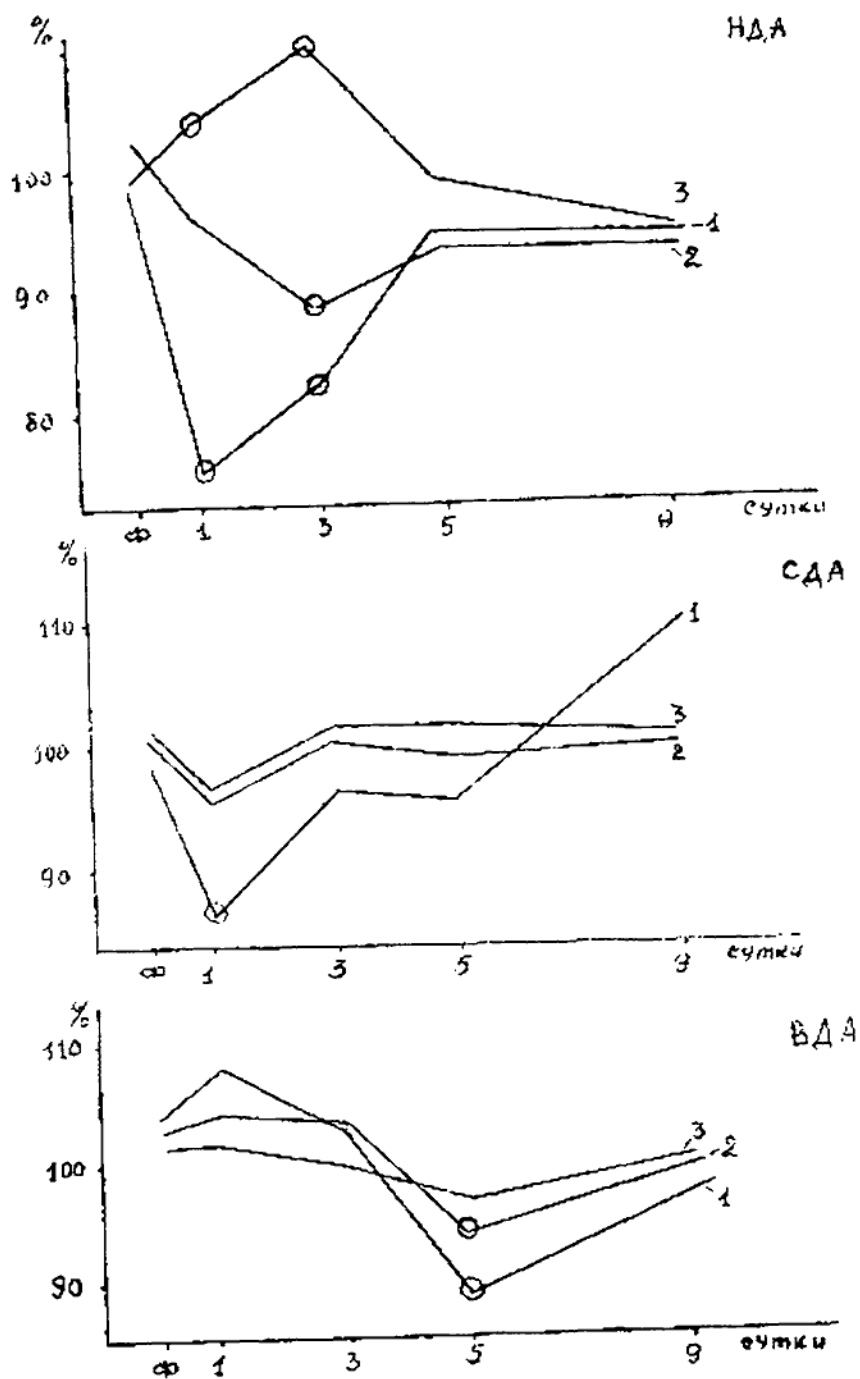


Рис. 1. Изменение активности СДГ (1), ЦПС КФ (2), ЦПС ПО (3) в нейтрофилах крови крыс с разным уровнем двигательной активности в ОП при действии ПеМП (% относительно контрольного уровня): о-различия достоверны при сравнении с данными контрольной группы

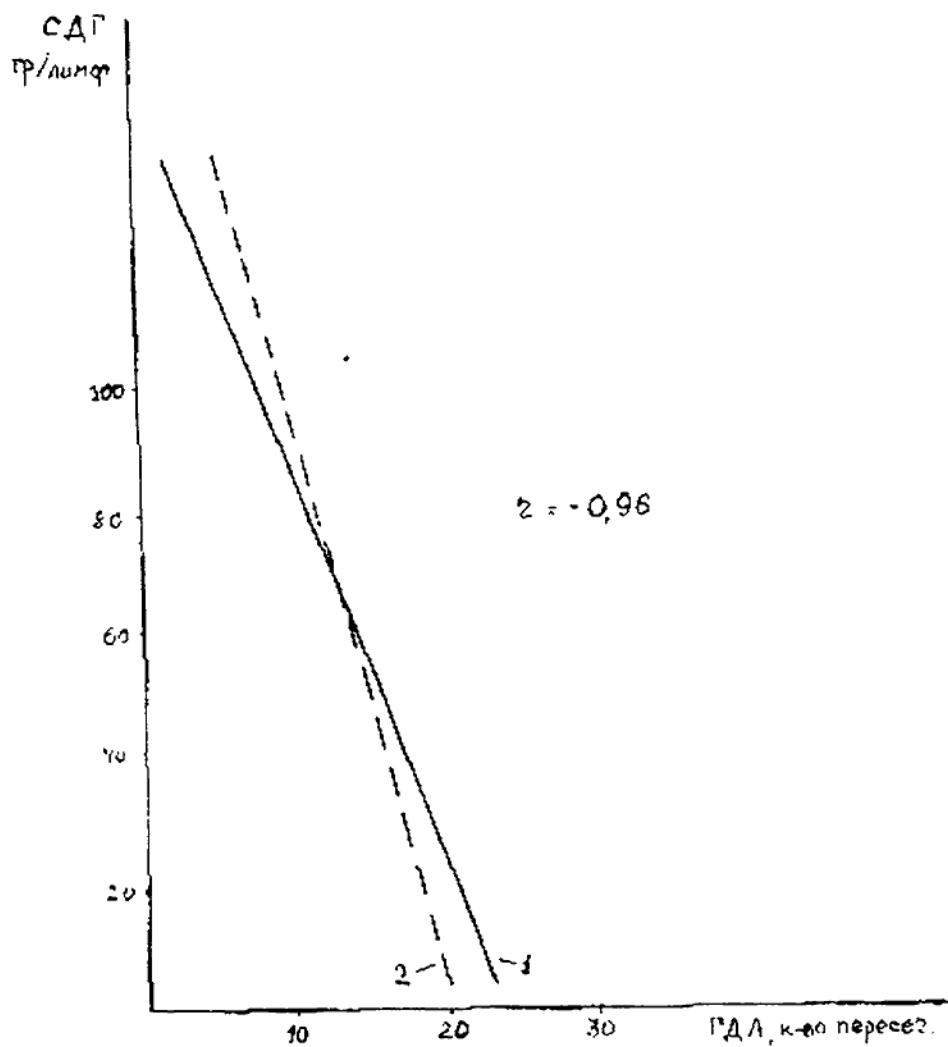


Рис.2. Взаимосвязь между уровнем дегидрогеназы (СДГ) в лимфоцитах крови и уровнем горизонтальной двигательной активности (ГДА). 1-СДГ/ГДА ; 2-ГДА/СДГ

После 5 воздействий исследованные цитохимические показатели достигали исходного уровня или даже несколько превышали его. Эти данные говорят о развитии адаптации к действию ПеМП СНЧ и согласуются с результатами исследования [7, 2, 13]. Оценка эффективности адаптации по морфологическому составу крови показала, что в условиях систематического воздействия ПеМП указанных параметров у животных СДА развивалась адаптационная реакция активации, описанная [1], которую выявляли к 6 дню наблюдения по относительному увеличению числа эозинофилов, снижению коэффициента лимф./нс.

У крыс ВДА реакция на действие ПеМП не отличалась от типичной, но развивалась гораздо позже - только после 5 воздействий (рис.1): уровень ЦПСПО и КФ снижался на 4% и 7% ($p < 0,05$) соответственно относительно контрольного уровня; уровень СДГ в нейтрофилах снизился на 27% ($p < 0,001$), α ГФДГ и ЛДГ - повысился на 13% относительно контрольного уровня (рис.1).

У крыс СДА и ВДА сравнение результатов динамики адаптационных процессов выявило одинаковую направленность и выраженность изменений. Однако у крыс ВДА первоначальная реакция и адаптация к действию ПеМП развивается значительно позже.

У крыс с НДА адаптационные процессы при действии ПеМП СНЧ протекают по-другому. Обнаружено не только угнетение, но и рассогласование механизмов обеспечения основных функций клеток крови. Так, после 1-3 воздействий наблюдалось снижение ЦПС КФ в нейтрофилах на 12% ($p < 0,05$), СДГ на 25% ($p < 0,01$), α -ГФДГ на 16% относительно контрольного уровня; активность ПО наоборот возросла на 10% ($p < 0,05$), по сравнению с контрольным уровнем (рис.1). В последующие сроки наблюдения отмечено медленное восстановление всех показателей. К 9 суткам наблюдения ни один из изученных цитохимических показателей не достигает исходного уровня и остается заниженным на 8-12%, т.е. адаптация не развивается.

При обработке полученных данных нами был проверен регрессионный анализ между двигательной активностью в ОП и уровнем дегидрогеназ в лимфоцитах крови (Рис.2).

Результаты свидетельствуют о наличии высокой отрицательной корреляционной связи ($r = -0,96$) между уровнем ГДА и средней активностью СДГ в лимфоцитах периферической крови.

Таким образом, результаты проведенных исследований говорят о неоднозначности изменений цитохимического статуса лейкоцитов крыс с различным уровнем двигательной активности на действие ПеМП СНЧ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гаркави Л. Х., Квакина Е. Р., Уколова М. А. Адаптационные реакции и резистентность организма.- Ростов-на-Дону: Изд-во Ростовского ун-та, 1977. -120с.
2. Евстафьева Е. В. Изменение показателей липидного обмена и системы крови крыс при адаптации к гипокинезии : Автореф. дис... кандидатбиологическихнаук. -Л., 1986. -24с.
3. Кулагин Д. А., Болондинский В. К. Нейрохимические аспекты эмоциональной

реактивности и двигательной активности крыс в новой обстановке //Успехи физиол.наук. -1986. - 17, №1.-С.92-108.

4. Лакин Г. Ф. Биометрия. -М.: Высшая школа, 1980. -293с.

5. Лилли Р. (Lillie P.). Патологическая техника и практическая гистохимия. -М.: Мир, 1969. - 648с.

6. Маркель А. Л. К оценке основных характеристик поведения крыс в тесте "открытого поля" //Журн. высш. нервн. деятельности. -1981. -31, № 2. -С. 301-307.

7. Михайлов А. В. Функциональная морфология нейтрофилов крови крыс в процессе адаптации к гипокинезии: Автореф. дис. ... кандидат медицинских наук. -Симферополь, 1986. -24 с.

8. Нарциссов Р. П. Применение п-нитротетразолия фиолетового для количественного цитохимического определения дегидрогеназ лимфоцитов человека //Арх. анат., гистол., эмбриол. - 1969. - № 8. -С.73.

9. Сантана-Вега Л. Роль индивидуальных особенностей двигательной активности в развитии гипокинетического стресса у крыс: Автореф. дис. ... кандидат биологических наук. -Симферополь. -1991. -21 с.

10. Семагин В. Н., Сухарь А. В., Куликов М. А. Тип нервной системы, стрессоустойчивость и репродуктивная функция. -М.: Наука, -1988. -134 с.

11. Сидякин В. Г., Темурьянц Н. А., Макеев В. Г., Владимирский Б. М. Космическая экология. -Киев: Наук. думка, 1985. -176 с.

12. Судаков К. В., Юматов Б. А., Ульянинский Л. С. Системные механизмы эмоционального стресса //Механизмы развития стресса. -Кишинев: Штиинца, 1987. -С. 52-79.

13. Темурьянц Н. А. Нервные и гуморальные механизмы адаптации к действию неионизирующих излучений: Автореф. дис. ... д-ра биологических наук. -М., 1939. -43 с.

14. Францевич Л. И. Обработка результатов биологических экспериментов на микро-ЭВМ "Электроника ВЗ-21. - Киев: Наукова думка, 1979. -91 с.

15. Kaplow L. S. A histochemical procedure for localizing and evaluation leukocyte alkaline phosphatase activity in smears of blood and marrow //Blood. -1955. -10. №10. -p.1023-1029.

16. Polk J., Fitchen F., Schumann W. o. Resonansed of the earth - ionosphere cavity - extremely low frequency reception at Kingston. R. L. //Radio Propagation. -1962. -3, №66D. -p.313.

АНАЛИЗ ПРОГНОСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЭЭГ ЧЕЛОВЕКА ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ОПЕРАТОРСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

И. М. Доровлёв, В. Г. Сидякин, А. В. Сухинин, П. В. Шинкаревский, Н. П. Янова

Одной из основных форм анализа пространственных взаимоотношений электрических процессов головного мозга человека является линейная, которая успешно используется для оценки общего функционального состояния мозга при выполнении экспериментальных заданий в условиях бодрствования (Гончарова, 1991), при изменении состояния на разных стадиях сна (Mann et. al., 1993), в условиях гипноза (De Pascalis, 1993), интенсивной терапии (Дудаева и соавт., 1990). Информативность ритмических компонентов ЭЭГ для выявления сдвигов в функциональном состоянии мозга продемонстрирована при разных видах стресса (Думбай, Кульба, 1994), экстремальных условиях космического полета (Quadens, et. al., 1990), напряженной операторской деятельности (Изнак, Чайнов, 1989), диагностики многих патологических состояний мозга (Moulton et. al., 1988), смене эмоциональных состояний (Доброхотова, Брагина, 1974).

Однако в последнее время возрастает интерес к применению методов нелинейной динамики для анализа поведения физиологических систем. Так, методы нелинейной динамики использованы для анализа ЭЭГ человека в биомедицинских исследованиях при воздействии на биологически активные точки (Lutzenberger, 1993), развитии эпилептического приступа (Saermark et. al., 1989).

Современная психофизиология активно использует показатели фоновой ЭЭГ в качестве индикаторов функционального состояния и типологических особенностей высшей нервной деятельности. Эти показатели отражают уровень активации, с которым связано осуществление психической деятельности, в том числе восприятие и субъективная оценка времени (Изнак, 1989). В то же время важное значение имеют исследования, направленные на выявление прогностических свойств функционального состояния головного мозга.

Нашей лабораторией была поставлена задача разработать методику прогнозирования успешности операторской деятельности, связанной с внутренним отсчетом времени. В случае успеха такая методика могла бы найти применение в системе профотборов. Для достижения указанной цели были намечены следующие задачи:

Провести анализ субъективной оценки времени человеком - оператором.

Выявить прямые или опосредованные биоэлектрические корреляты субъективной оценки времени.

Оценить особенности индивидуальных параметров ЭЭГ человека для выявления их прогностических свойств в субъективной оценке времени.

В качестве поисковой задачи исследовано влияние эмоционального знака вербальной информации на субъективную оценку времени.

Объект и методы исследования.

В эксперименте принимали участие 62 испытуемых обоего пола в возрасте 19-23 лет. Все испытуемые привлекались к участию в пяти экспериментах, которые носили поисковый характер с целью выявления корреляции между показателями ЭЭГ и результативностью последующей операторской деятельности. Каждый эксперимент строился по схеме:

1. Запись фоновой ЭЭГ в течение 10 минут.
2. Перерыв в течение 10 минут.
3. Выполнение операторской работы.

Во время выполнения операторской деятельности испытуемому предлагалось угадать и впоследствии удерживать заданный интервал времени в диапазоне 20-25 секунд. Длительность интервала выбиралась случайным образом. Для связи с ЭВМ использовалась кнопка, подключенная к логическому входу интерфейса. Первое нажатие запускало накопление и включало счетчик текущего интервала. Каждое последующее нажатие завершало текущий интервал и запускало отсчет нового. В качестве обратной связи использовалась светодиодная панель, подключенная к ЭВМ. Информация выдавалась через 2 секунды после завершения интервала. В случае раннего нажатия загорался знак "плюс", в случае позднего - "минус". Если интервал был угадан с требуемой точностью (5%), на панели появлялась вертикальная черта. Накопление велось до набора 25 интервалов.

Для определения степени успешности находили первый угаданный интервал, который в дальнейшем принимался за исходную точку. Далее все последующие интервалы делились на три категории: опережение (рано), запаздывание (поздно) и правильное воспроизведение (угадал). Для расчета бралось процентное отношение интервалов данной категории к числу интервалов после исходной точки (рис. 1).

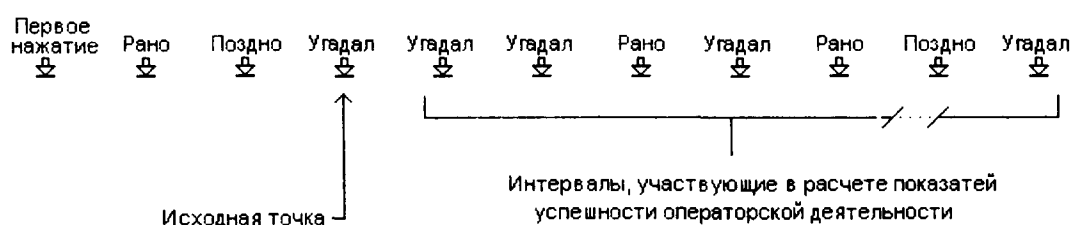


Рис. 1. Принцип расчета показателей успешности операторской деятельности

Оцифровка ЭЭГ осуществлялась по двум каналам электроэнцефалографа (левое и правое полушария головного мозга) с частотой опроса 100 Гц. Данные группировались отрезками по 256 значений. Все отрезки подвергались анализу на наличие артефактов и в случае обнаружения таковых отбрасывались. Запись велась до набора 60 свободных от артефактов отрезков.

Применяли стандартную схему наложения электродов: С3 - левый центральный (слева от макушки испытуемого, удален на 3-4 см от средней линии головы); С4 - правый центральный (симметричен С3); два объединенных индифферентных электрода над сосцевидной костью черепа; электрод-заземление крепился на запястье левой руки.

Испытуемый сидел в темной звукоизолированной и электрически экранированной камере в удобном кресле с подголовником. Перед лицом испытуемого на расстоянии 1.5 метра была размещена светодиодная панель обратной связи. Испытуемые предварительно получали инструкцию сидеть спокойно, расслабленно, не совершать лишних движений (даже глазами).

Анализировали: мощность спектра в заданных полосах, частоту пика мощности в заданных полосах и корреляционную размерность ЭЭГ в заданных полосах.

Для всех показателей вычислялись как средние значения, так и дисперсия значений за время опыта. Для обработки были выделены 9 спектральных полос: 1-2, 2-4, 4-8, 8-14, 14-20, 20-30, 30-36, 36-42 и 42-48 Гц. Значения рассчитывались для каждого полушария в отдельности.

Результаты исследования

Особенности воспроизведения эталонного времени человеком-оператором.

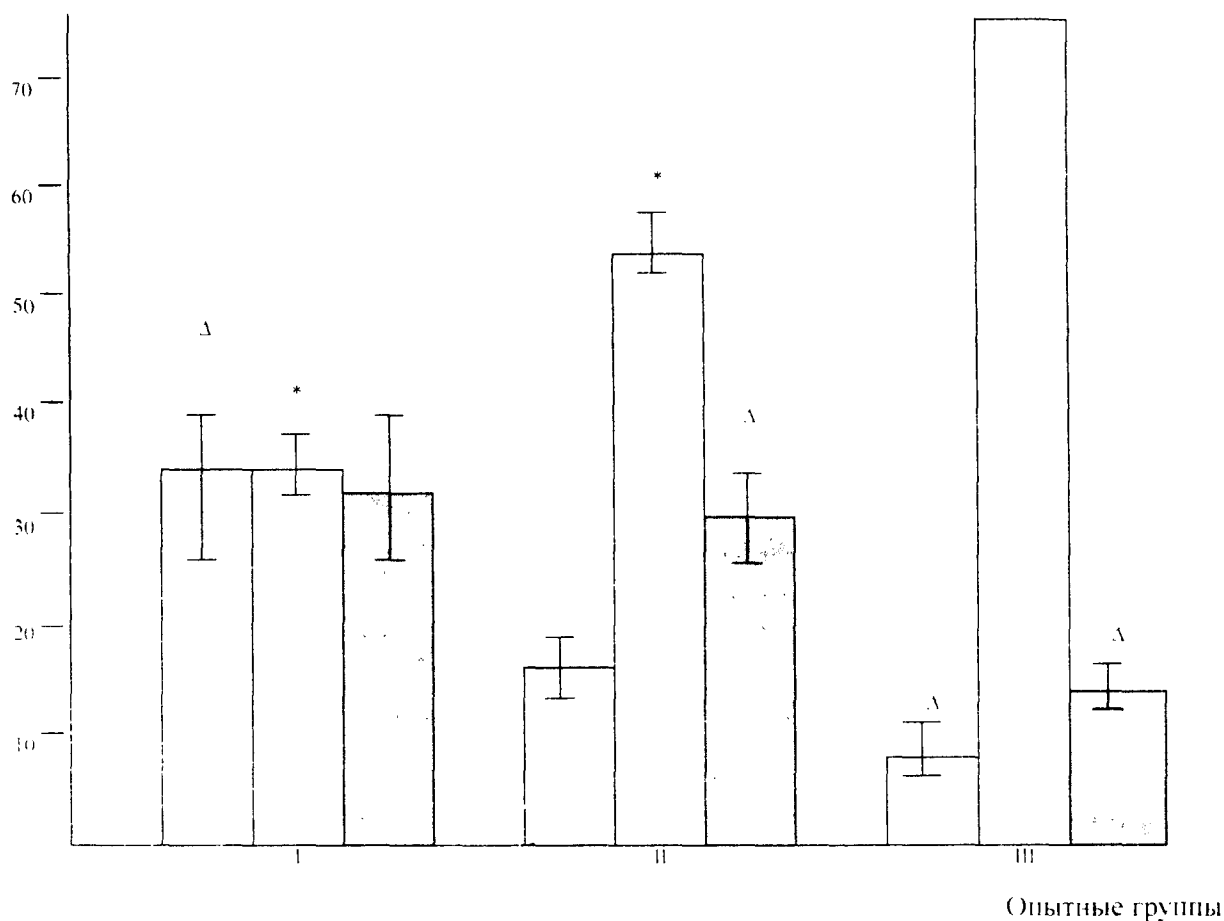
Воспроизведение эталонного времени испытуемыми проходило с разной степенью успешности. Количество правильных реализаций за весь опытный период и по всем испытуемым в среднем составило $55.6 \pm 7.8\%$.

С учетом числа правильно воспроизведенных временных интервалов испытуемые были разделены на 3 экспериментальные группы. В первую группу (низкий уровень, 35.5% испытуемых) вошли испытуемые, показавшие результат от 0% до 47.8% ($34.8 \pm 4.9\%$), вторую группу (средний уровень успешности реализации эталонного времени) составили испытуемые с процентом правильных реализаций, попавших в средний разброс по всем испытуемым ($55.6 \pm 7.8\%$), то есть показавшие результат от 47.8% до 63.4% (27.4% испытуемых); в третью (высокий уровень, 37.1% испытуемых) - испытуемые с результатами от 63.4% до 100% ($76.9 \pm 4.4\%$) (рис. 2).

Отмеченные уровни точности воспроизведения эталонного времени были достаточно стабильными и регистрировались у испытуемых как в течение одного опыта (25 реализаций), так и на протяжении всей экспериментальной серии (5 опытов). При анализе процента правильных воспроизведений у юношей и девушек в отдельности достоверных различий не установлено, что позволило не учитывать фактор половой принадлежности при формировании опытных групп.

При увеличении длительности тестирования у части испытуемых до 35 опытных серий не отмечено достоверных различий среднего количества правильных реализаций по сравнению с уровнем, сформированным после 5 опытных серий. Следовательно, фактор времени при данных условиях опыта большого значения не имел.

Количество реализаций



Примечание:

по оси абсцисс - опытные группы;

по оси ординат - общее число реализаций в %;

	опережающее воспроизведение
	правильное воспроизведение
	запаздывающее воспроизведение

Δ - достоверные различия показателя при межгрупповом сравнении однотипных ошибочных реализаций;

* - достоверные различия показателя при межгрупповом сравнении правильных реализаций.

Рис. 2. Среднее число правильных и ошибочных реализаций эталонного времени у испытуемых трех опытных групп

В то же время для динамики этого показателя была характерна определенная ритмичность, которая проявлялась периодически единичными увеличениями числа правильных испытуемыми эталонного времени. В зависимости от принадлежности испытуемого к определенной

экспериментальной группе наблюдалась тенденция к его увеличению ($p > 0.05$) от опыта к опыту (3-я группа) или двухфазное изменение с максимумом величины на 3-4 сутки опыта (1-я и 2-я группы).

Полученные данные в целом свидетельствуют об индивидуальных особенностях воспроизведения эталонного времени. Вместе с тем применительно к оценке групповых различий по параметрам данного показателя отмечаются особенности, имеющие типологический характер.

Особенности ЭЭГ испытуемых в зависимости от типа доминирующего ритма.

Как показали проведенные исследования, тип доминирующего ритма ЭЭГ у испытуемых не изменялся на протяжении всего опытного периода. Наличие такой стабильности позволило рассматривать этот показатель ЭЭГ в качестве индивидуальной характеристики испытуемых и, как следствие, в качестве критерия для разбиения на группы. Были выделены три группы испытуемых: первая - доминирование α -ритма (39.5 % испытуемых), вторая - равное соотношение мощности α - и θ -ритмов (21 % испытуемых), третья - доминирование θ -ритма (39.5 % испытуемых).

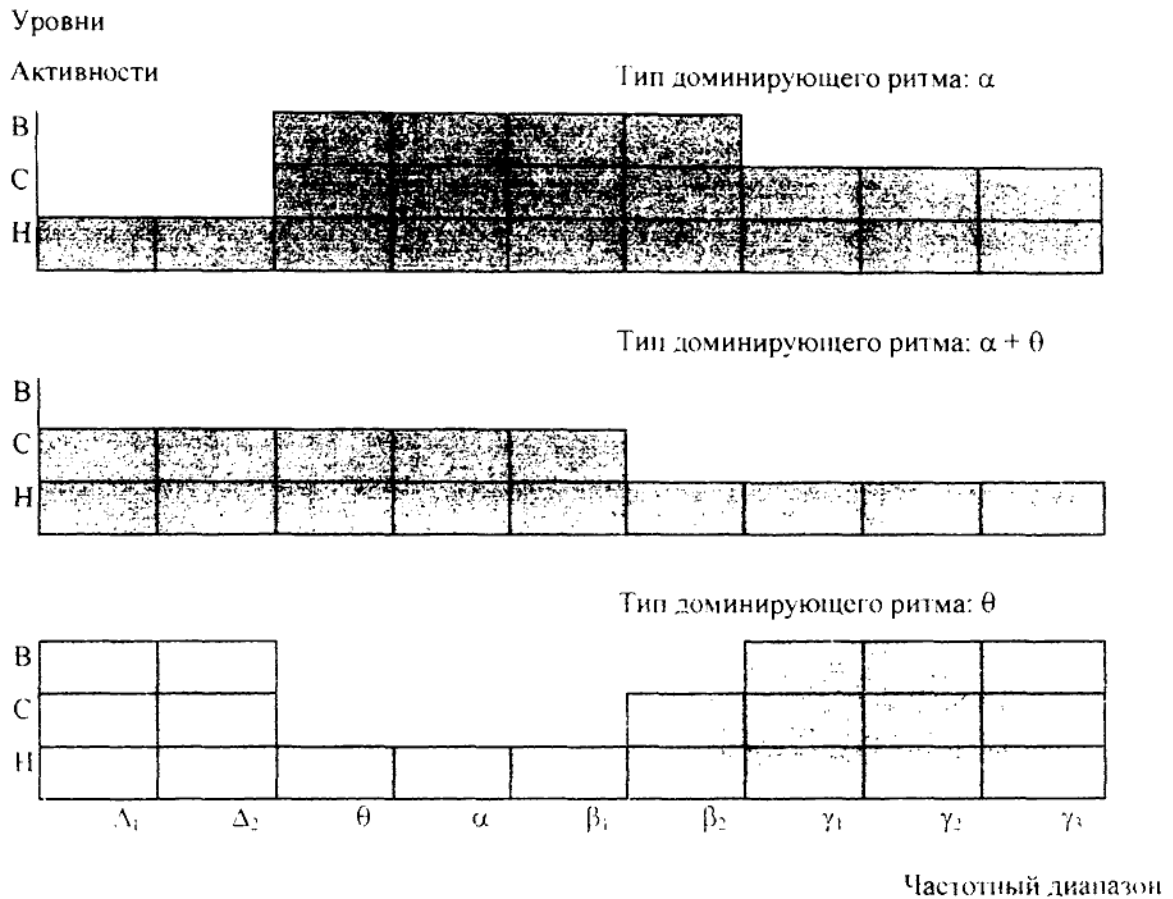
В зависимости от типа доминирующего ритма отмечены особенности ЭЭГ-активности испытуемых. Средние значения мощности спектра ЭЭГ в Δ -диапазоне были наибольшими у испытуемых с преобладающим θ -ритмом по сравнению с величиной этого показателя у испытуемых со смешанным типом активности ЭЭГ и с доминирующим α -ритмом. Превалирование обоих поддиапазонов β -ритма (14-30 Гц) в обоих полушариях головного мозга наблюдали у испытуемых с доминированием α -активности ($p > 0.05$), а при доминировании θ -ритма отмечены большие значения ($p > 0.05$) всех поддиапазонов высокочастотного γ -ритма (30-48 Гц).

Несмотря на отсутствие достоверных различий сравниваемых уровней мощности спектра ЭЭГ для каждого из них был характерен определенный диапазон проявлений (рис. 3).

Выявление биокоррелятов субъективной оценки времени.

С учетом двух вышеназванных критериев разбиения на группы был выбран следующий принцип формирования подгрупп. Сначала все испытуемые были разделены на группы по уровню успешности реализации эталонного времени. Затем каждая из трех полученных групп была разбита на 3 подгруппы с учетом типа доминирующего ритма ЭЭГ.

Для всех перечисленных подгрупп вычислялась корреляция между количеством правильных, ранних и поздних нажатий, с одной стороны, и показателями ЭЭГ - с другой. Результирующая сводная таблица (См. таблица) позволяет получить некоторое качественное представление о пригодности различных параметров ЭЭГ для прогнозирования успешности операторской деятельности.



Примечание:

В - высокий, С - средний, Н - низкий уровни мощности спектра.

Рис. 3. Соотношение разных уровней мощности спектра ЭЭГ
в зависимости от типа доминирующего ритма

У испытуемых с доминирующим α -ритмом наблюдали сильные коррелятивные связи частоты пика мощности Δ -ритма ЭЭГ с числом недооцененных и правильно воспроизведенных, а при доминировании θ -ритма - с числом переоцененных эталонных интервалов независимо от латерализации. При этом в первом случае в качестве коррелирующего признака выступала величина дисперсии, а во втором - средние значения.

При смешанном типе доминирования в зависимости от латерализации и анализируемого показателя отмечали сильные коррелятивные связи в низко- и высокочастотном диапазоне ЭЭГ.

При анализе коррелятивных связей между величиной КР ЭЭГ (корреляционная размерность) и уровнем успешности операторской деятельности отмечена следующая любопытная особенность: для левого полушария с уровнем ошибочных реализаций коррелируют в основном средние значения КР ЭЭГ, а для правого - дисперсии КР ЭЭГ. В качестве гипотезы можно высказать

предположение, что правое полушарие приводит генерацию «тактовых импульсов» для системы внутренних часов, причем длительность этих «тактовых импульсов» находится в прямой зависимости от величины КР ЭЭГ, а левое полушарие отвечает за их подсчет.

Следует отметить, что корреляционные связи между КР ЭЭГ и успешностью реализации эталонного времени проявляется во всех частотных диапазонах, нередко отличных от анализируемых традиционными методами.

Результаты предварительных исследований воспроизведения эталонного времени испытуемыми после прослушивания текстов с положительной и отрицательной эмоциональной окраской свидетельствуют о влиянии знака информации на субъективную оценку времени и взаимосвязь этого показателя с типом доминирующего ритма ЭЭГ.

Таблица

Значимая корреляция между параметрами ЭЭГ
и уровнями воспроизведения временных интервалов.

Параметр ЭЭГ	Экспериментальная группа	Доминирующий ритм	ТОЧНОСТЬ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ВРЕМЕННЫХ ИНТЕРВАЛОВ					
			ЛЕВОЕ ПОЛУШАРИЕ			ПРАВОЕ ПОЛУШАРИЕ		
			недооценка	переоценка	совпадение с эталоном	недооценка	переоценка	совпадение с эталоном
мощность спектра ЭЭГ	I	α						
	II	$\alpha + \theta$	$\theta (-с)$		$\theta (-л)$	$\theta (-с)$		
	III	θ		$\Lambda_1 (с)$ $\Lambda_2 (л)$ $\theta (с)$ $\alpha (сл)$	$\Delta_1 (-с)$ $\beta_2 (-л)$		$\Lambda_1 (с)$ $\Lambda_2 (л)$ $\theta (л)$ $\alpha (сл)$	
частота пика мощности спектра ЭЭГ	I	α	$\Delta_2 (-л)$		$\Delta_2 (л)$	$\Delta_2 (-л)$		$\Delta_2 (л)$
	II	$\alpha + \theta$	$\beta_1 (с)$ $\beta_2 (-с-л)$ $\gamma_3 (с)$	$\gamma_{2,3} (-л)$	$\gamma_3 (-с)$	$\beta_1 (сл)$ $\gamma_1 (сл)$		
	III	θ	$\gamma_3 (с)$	$\Delta_1 (-с)$			$\Delta_1 (-с)$	$\gamma_1 (-с)$
корреляционная размерность ЭЭГ	I	α	$\alpha (-с)$		$\theta (-с)$	$\beta_1 (л)$ $\gamma_{1,2} (-л)$		$\gamma (л)$
	II	$\alpha + \theta$	$\Delta_2 (с)$ $\theta (-с)$ $\alpha (с)$	$\Delta_2 (-с)$ $\alpha (-с)$ $\gamma (-с)$		$\Delta_{1,2} (л)$ $\beta_2 (-л)$ $\gamma_1 (л)$ $\gamma_2 (-с-л)$	$\Delta_{1,2} (-л)$ $\beta_1 (с)$ $\gamma_{2,3} (л)$	
	III	θ	$\beta_1 (л)$	$\theta (л)$ $\beta_1 (с)$ $\gamma_1 (с)$		$\beta_1 (-сл)$ $\gamma_1 (л)$	$\Delta_1 (л)$ $\theta (л)$	$\gamma_1 (-л)$

Примечание: (с) - значимая корреляция между средними величинами

(л) - значимая корреляция между дисперсиями

знак «-» перед буквой - отрицательная корреляция

ВЫВОДЫ:

1. Уровень точности воспроизведения эталонного времени является самостоятельной индивидуальной характеристикой психической деятельности человека.
2. Тип доминирующего ритма отражает функциональные особенности условий, при которых изменяются соотношения разных видов ошибочных реализаций, но не влияет на уровень точности воспроизведения эталонного времени.
3. Количество коррелятивных связей и частотный диапазон их проявления являются индивидуальными особенностями субъекта и зависят от типа доминирующего ритма, характера асимметрии и уровня точности воспроизведения заданного времени.
4. Наибольший частотный диапазон проявления и наиболее высокое число коррелятивных связей отмечены для показателя нелинейной динамики, представленного величиной корреляционной размерности. Эта величина является индивидуальной характеристикой и может служить тестом для оценки уровня успешности воспроизведения эталонного времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гончарова И. И. Факторная структура спектра ЭЭГ левого и правого полушарий головного мозга человека в норме и при обработке зрительной информации // Физиология человека. -1991. - Т. 17, № 1. - С. 18-29
2. Дудаева К. И., Михайлова Е. С., Поляков С. Э. Нейрофизиологическая динамика при лечении эндогенной депрессии методом рефлексотерапии // Журн. невропатол. психиатр. - 1990. - Т. 90, № 4. - С. 99-103.
3. Думбай В. Н., Кульба С. Н. Отражение в спектральных характеристиках ЭЭГ уровня нервно-эмоционального напряжения // Усп. физиол. наук. -1994. - Т.25, № 1. -С.130.
4. Изнак А. Ф. Модуляция сенсомоторной деятельности человека на фоне альфа-ритма ЭЭГ // Проблемы развития научных исследований в области психического здоровья. Тр. ВНЦПЗ АМН СССР. М. -1989. - С. 3.
5. Изнак А. Ф., Чаянов Н. В. Субъективные корреляты вспышек альфа-ритма в ЭЭГ человека при зрительно-моторной операторской деятельности // Труды Всес. Научн. Центра псих. здор. АМН СССР. -1989. -Т.5. -С. 24-30.
6. De Pascalis V. EEG Spectral analysis during hypnotic induction, hypnotic dream and age regression // Int. J. Psychophysiol. - 1993. - V. 15, № 2. - P. 153-166.

7. Lutzenberger W., Elbert T., Ray W. J, Rockstroh B., Flor H. Dimensional analysis of the human EEG and intelligence // *Neurosci. Lett.* - 1992. - № 5. - P. 27-34.
8. Mann K., Backer P., Roschke J. Dynamical properties of the sleep EEG and different frequency band // *Int. J. Neurosci.* - 1993. - V. 73, № 3-4. - P. 161-169.
9. Moulton R. J., Marmarou A., Rosen J. et al. Spectral analysis of the EEG in oraniocerebral trauma // *Can. J. Neurol. Sci.* -1988. V. 15, - № 1. -P. 82-86.
10. Quadens O., DeGraeve M., Semans E. Brain activity in space // *EEG Clin. Neurophysiol.* -1990. -V.75, № 1. -P. 123S.
11. Saermark K., Lebech J., Bak C. K. Sabers A. Magnetoencephalography and attractor dimension: normal subjects and epileptic patients // In: *Brain Dynamics: Progress and Perspectives.* - Heidelberg, Germany: Springer. - 1989. -P. 149-157.

ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАФИЧЕСКИХ И ПСИХОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЧЕЛОВЕКА С РАЗНЫМ ТИПОМ ЭЭГ

*И. М. Доровлёв, А. М. Куличенко, И. Н. Литвинчук,
В. Г. Сидякин, А. В. Сухинин, П. В. Шинкаревский*

Понимание мозговых механизмов реализации эмоциональных процессов и состояний является актуальной проблемой. Эмоциональные и речевые процессы тесно взаимосвязаны между собой (Симонов, 1981).

Задача настоящего исследования заключалась в анализе динамики электро- и психофизиологических показателей человека после прослушивания отрывков из литературных художественных произведений с различной эмоциональной окраской. Данная работа входит в качестве составной части в комплекс экспериментальных этологоэкологических исследований.

Объект и методы исследования.

В эксперименте принимали участие 58 студентов университета обоего пола в возрасте 18-22 лет. Проведено две серии экспериментов, в каждой из которых студентам для прослушивания предъявлялся один текст. Каждый эксперимент строился по следующей схеме:

- 1 – психологическое тестирование;
- 2 – запись фоновой ЭЭГ в течение 7-ми минут;
- 3 – запись ЭЭГ во время прослушивания эмоционально окрашенного текста - 7 минут; 4 – запись ЭЭГ после прослушивания текста в течение 7-минут;
- 5 – психологическое тестирование.

Отведение ЭЭГ выполнялось с помощью автоматизированного комплекса на базе IBM PC/AT и электроэнцефалографа BST1 (использовали 2 канала). Electroды для отведения ЭЭГ располагали в точках C3 и C4 (по международной системе 10-20%). Для обработки были выделены 5 спектральных полос в диапазоне 1-48 Гц. Анализировали максимальную амплитуду (Ам) и мощность спектра (МС) ЭЭГ (в у.е.) в каждой частотной полосе.

При психологическом тестировании использовались тесты САН и Люшер. Анализировали:

- 1 – интенсивность тревоги (ИТ), амбивалентность выбора (АВ), - тест Люшера;
- 2 – самочувствие (С), активность (А), настроение (Н) - тест САН.

Оценивали показатели по бальной системе (Собчик, 1990).

Чтение текста положительной (+ – 1 серия) и отрицательной (- – 2 серия опытов) эмоциональной окраски, тип которого определялся специалистом-лингвистом (Литвинчук, 1994), осуществлялось профессиональным актёром с соблюдением адекватных голосовых интонационно-модуляционных акцентов.

Полученный экспериментальный материал регистрировался и обрабатывался на IBM PC/AT с помощью оригинального программного обеспечения "Polygraph". Проверка распределений на

нормальность производилась с помощью критерия Колмогорова-Смирнова с использованием пакета "Statgraphics", корреляционный анализ проводился с помощью пакета "Statistica 5.0".

Результаты исследования и их обсуждение.

По мнению многочисленных авторов, установление типа ЭЭГ не требует знания всех деталей ЭЭГ, а только выделения небольшого числа некоторых, наиболее существенных признаков, которые являются общими для всех представителей типа, несмотря на их индивидуальное разнообразие (Жирмунская, Лосев, 1984).

В результате проведенных экспериментов отмечено, что у части испытуемых в общем спектре ЭЭГ-активности доминировал альфа-ритм (первая экспериментальная группа - 18% от общего числа испытуемых), у 48% (вторая группа) отмечен смешанный тип активности с равным соотношением низкочастотных (дельта- и тета-) и альфа-компонентов. Доминирование только низкочастотной активности наблюдали у 34% испытуемых (третья группа).

При анализе полученных результатов установлено, что особенности динамики исследуемых показателей ЭЭГ и психологических параметров, регистрируемых после предъявления текстов различной эмоциональной окраски, по сравнению с фоновой активностью ЭЭГ зависели от типа ЭЭГ (табл. 1).

Таблица 1.

Влияние типа ЭЭГ на характер динамики электрофизиологических и психологических показателей

Опытные группы	Эмотивность текста	Полушарии головного мозга										ПТ	
		Ритмы ЭЭГ											
		Левое					Правое						
		δ	θ	α	β	γ	δ	θ	α	β	γ	ИТ	АВ
I	+	∇	↓∇	-	↓∇	▲	∇	↓∇	∇	∇	-	∇	▲
	-	∇	∇	-	∇	↓∇	∇	∇	-	∇	↓∇	-	▲
II	+	-	-	-	-	▲	-	↓	-	-	↓▲	-	-
	-	▲	-	↓∇	∇	▲	∇	∇	↓∇	∇	-	-	▲
III	+	∇	∇	-	∇	▲	∇	-	∇	-	▲	-	-
	-	-	-	∇	-	-	-	-	-	-	-	-	▲

Примечание:

ПТ – показатели психологического тестирования; ИТ – интенсивность тревоги; АВ – амбивалентность выбора; ∇, ▲ – достоверное уменьшение, увеличение мощности ЭЭГ; ↓ – достоверное уменьшение средних значений максимальной амплитуды ЭЭГ в данном частотном диапазоне; +, – положительный (отрицательный) тексты.

У испытуемых I группы наблюдали достоверное увеличение МС ЭЭГ в диапазоне гамма-ритма в левом полушарии головного мозга и уменьшение этого параметра в обоих полушариях в дельта-, тета- и бета-диапазонах после прослушивания текста с положительной эмоциональной окраской. Уменьшение мощности спектра ЭЭГ отмечены у испытуемых с данным характером доминирующей активности ЭЭГ и после прослушивания текста отрицательной эмоциональности в тех же частотных диапазонах, а также в диапазоне гамма-ритма. Именно отличия в характере изменения мощности спектра в этом высокочастотном диапазоне обоих полушарий головного мозга испытуемых первой экспериментальной группы и явилось отличительной особенностью функционального состояния их головного мозга в реакции на прослушивание текстов с различной эмоциональной окраской. Изменение максимальной амплитуды в этой группе проходило однонаправленно в сторону снижения в отдельных частотных диапазонах.

Аналогичная тенденция динамики электрической активности головного мозга после прослушивания текста положительной эмотивности прослеживалась у испытуемых третьей группы с доминированием в общем спектре ЭЭГ низкочастотных составляющих. Некоторые отличия исследуемых параметров ЭЭГ у испытуемых третьей группы наблюдали в правом полушарии, что проявлялось в отсутствии снижения МС ЭЭГ в диапазоне бета-ритма и увеличении показателя в гамма-диапазоне. После прослушивания испытуемыми третьей группы отрицательного эмотивного текста уменьшение мощности спектра ЭЭГ наблюдали только в альфа-диапазоне левого полушария.

Характер динамики количественных параметров ЭЭГ у испытуемых со смешанным типом электрической активности центральных отделов коры головного мозга (вторая экспериментальная группа), так же как и у испытуемых с доминированием низкочастотной активности (третья экспериментальная группа) зависел от эмоциональной окраски предъявляемого текста. После предъявления текста положительной эмотивности отмечали увеличение мощности спектра ЭЭГ только в диапазоне гамма-ритма. После прослушивания текста с отрицательной эмоциональной окраской наблюдали разнонаправленный характер динамики анализируемого параметра ЭЭГ в правом и левом полушарии головного мозга в зависимости от частоты диапазона. Так, если в левом полушарии головного мозга происходило увеличение МС ЭЭГ в диапазоне дельта-ритма, то в правом полушарии этот показатель уменьшался. Отмечено уменьшение МС ЭЭГ и в диапазонах альфа- и бета-ритмов обоих полушарий и увеличение в диапазоне гамма-ритма головного мозга.

Отмечено достоверное изменение величины максимальной амплитуды у испытуемых первой экспериментальной группы после прослушивания текста положительной эмоциональной окраски в диапазоне тета-, альфа- и бета-ритмов левого и тета- и альфа-ритмов правого полушарий головного мозга, а у испытуемых второй группы - в диапазоне гамма-ритма только в левом полушарии. Влияние текста отрицательной эмотивности проявлялось в снижении Ам ЭЭГ в обоих

полушариях головного мозга в высокочастотном диапазоне (гамма-ритм) у испытуемых первой группы и в диапазоне альфа-ритма во второй группе.

Таким образом, особенности динамики анализируемых параметров электрической активности головного мозга испытуемых зависели от типа доминирующей активности ЭЭГ, характера эмотивности текста и проявлялись в увеличении или снижении спектральных характеристик ЭЭГ в отдельных частотных диапазонах, различных для каждого полушария.

Косвенные методы оценки эмоционального состояния (в том числе и тесты Люшера), активно используемые в различных психофизиологических экспериментах, показали высокий уровень их достоверности, что подтверждается данным исследованием.

Анализ субъективной оценки испытуемыми своего эмоционального статуса с помощью тестов Люшера показал, что у испытуемых первой группы после прослушивания текста положительной эмотивности происходило снижение интенсивности тревоги и увеличение амбивалентности, а после прослушивания текста с отрицательной эмоциональной окраской - увеличение амбивалентности во всех экспериментальных группах. Достоверные различия самооценки испытуемыми своего психологического состояния при помощи теста САН не установлены.

Особой формой самооценки является индуцирование собственного эмоционального состояния, которое осуществляется на двух уровнях: афферентном и когнитивном (осознанном). Возможность осознания собственного эмоционального состояния предполагает помимо сохранности самой способности осознать себя еще и знание социальных норм и эталонов (Рейковский, 1979).

Многочисленные исследования свидетельствуют о том, что уровни бодрствования закономерно отражаются в фоновой суммарной ЭЭГ (Русинов, 1960 и др.). Это подтверждается и результатами наших исследований. Так, повышение функционального состояния при переходе к активному вниманию и деятельности связано с нарастанием активирующих влияний, что отражается в снижении медленной активности в виде дельта- и тета-ритмов. В первой фазе перевозбуждения усиливаются частые ритмы, во второй обнаруживаются полиморфные высокоамплитудные медленные волны. Эти сдвиги характерны для развивающегося утомления (Павлова, Романенко, 1969), и их можно трактовать как результат чрезмерного повышения общего активирующего потока, приводящего к снижению функционального состояния нервных центров коры. Установлены межполушарные различия в проявлении фоновых изменений и значительная роль эмотивности вербальной информации в этих механизмах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жирмунская Е.А., Лосев В.С. Системы описания и классификация электроэнцефалограмм человека. - М.: Наука. - 1984.

2. Литвинчук И.Н. О некоторых типах эмотивных синтаксических конструкций // Когнитивные процессы в речевом общении. Материалы международной конференции. - Симферополь: КЦГИ. - 1994. - С.103-105.

3. Павлова Л.П., Романенко А.Ф. Системный подход к психофизиологическому исследованию мозга человека. - Л.: Наука. - 1988. - 213 с.

4. Рейковский Я. Экспериментальная психология эмоций. - М.: Наука. - 1974. - 254 с.

5. Русинов В.С. Вопросы теории электроэнцефалограммы // Вопросы электрофизиологии. - М. - Л. - 1960. - С. 21.

6. Симонов П.В. Эмоциональный мозг. - М.: Наука. - 1981. - 294 с.

7. Собчик Л.Н. Метод цветowych выборов. Модифицированный цветовой тест Люшера. // Методы психологической диагностики. - Вып. 2. - М.: Москва. - 1990. - 88 с.

ВОЗРАСТНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЭЭГ-ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭМОТИВНОГО ТЕКСТА

И. М. Доровлёв, А. М. Куличенко, И. Н. Литвинчук, В. Г. Сидякин, П. В. Шинкаревский

Успешность обучения ребенка в школе определяется множеством физиологических факторов, в ряду которых функциональное состояние ЦНС занимает особое место. Электрофизиологические исследования показали, что реализация существенных для обучения психических функций в значительной степени зависит от особенностей организации электрической активности мозга в покое и в процессе деятельности (Фабер, Кирпичев, 1985; Nahas, Krynski, 1987; Фишман, 1989; Мачинский, Мачинская, Труш, 1990).

В связи с этим диагностика функционального состояния мозга при различных видах психической деятельности является необходимым условием разработки адекватных методов индивидуальной коррекции процесса обучения.

Задачей настоящего исследования явилось изучение возрастной динамики спектральных характеристик ЭЭГ и показателей психологического гестирования при воздействии эмотивного текста.

Объект и методы исследования.

Работа проведена с участием студентов университета в возрасте 18-22 лет (58 человек) и школьников 12-летнего возраста (22 человека). Всем испытуемым предъявлялся текст с превалированием отрицательной эмотивности.

Каждый эксперимент строился по следующей схеме:

- 1 – психологическое тестирование;
- 2 – запись фоновой ЭЭГ в течение 7-ми минут;
- 3 – запись ЭЭГ во время прослушивания эмоционально окрашенного текста - 7 минут;
- 4 – запись ЭЭГ после прослушивания текста в течение 7-минут;
- 5 – психологическое тестирование.

Отведение ЭЭГ выполнялось с помощью автоматизированного комплекса на базе IBM PC/AT и электроэнцефалографа BST1 (использовали 2 канала). Electroды для отведения ЭЭГ располагали в точках C3 и C4 (по международной системе 10-20%). Для обработки были выделены 5 спектральных полос в диапазоне 1-48 Гц. Анализировали максимальную амплитуду (Ам) и мощность спектра (МС) ЭЭГ (в у.е.) в каждой частотной полосе.

Полученный экспериментальный материал регистрировался и обрабатывался на IBM PC/AT с помощью оригинального программного обеспечения "Polygraph". Проверка распределений на нормальность производилась с помощью критерия Колмогорова-Смирнова с использованием пакета "Statgraphics", корреляционный анализ проводился с помощью пакета "Statistica 5.0".

Результаты исследования и их обсуждение.

Известно, что в реакциях на внешние воздействия основное значение имеет функциональное состояние организма человека, в котором важная роль отводится типу доминирующей фоновой электрической активности коры больших полушарий и подкорковых структур.

Нами установлено, что доминирование альфа-ритма наблюдалось у большего числа школьников (у 27% от их общего числа), чем у студентов (18%), а преобладание низкочастотных составляющих в спектральных характеристиках ЭЭГ головного мозга отмечено у студентов (35%) по сравнению со школьниками (27%). Количество испытуемых со смешанным типом активности в обеих возрастных группах в среднем было одинаковым (48 и 46% для студентов и школьников соответственно).

Как показали полученные результаты, динамика мощности спектра ЭЭГ в отдельных частотных диапазонах после прослушивания текста отрицательной эмотивности у школьников и студентов была различной. У школьников это проявлялось в меньшем числе диапазонов, чем у студентов (см. таблицу).

Таблица

Возрастные особенности динамики МС ЭЭГ
при действии эмотивной вербальной информации.

Опытные группы	Полушария головного мозга										ПТ	
	Ритмы ЭЭГ											
	левое					правое					ИТ	АВ
	δ	θ	α	β	γ	δ	θ	α	β	γ		
I. Студенты	▲	-	∇	-	-	▲	-	∇	-	-	∇	▲
школьники	-	-	∇	-	▲	-	-	∇	-	-	∇	-
II. Студенты	▲	-	∇	∇	▲			∇	∇	-	-	▲
школьники	▲	-	∇	-	-	-	∇	-	-	-	∇	▲
III. Студенты	-	-	∇	-	-	-	-	-	-	-	-	▲
школьники	▲	-	-	-	-	-	-	-	-	▲	-	▲

Примечание: ПТ – показатели психологического тестирования; ИТ – интенсивность тревоги;

АВ – амбивалентность выбора; ∇, ▲ – достоверное уменьшение, увеличение мощности ЭЭГ; ↓ – достоверное уменьшение средних значений максимальной амплитуды ЭЭГ в данном частотном диапазоне; +, – положительный (отрицательный) тексты.

Как видно из представленных данных, в зависимости от типа доминирующей активности наблюдали увеличение МС в диапазоне высоких или низких частот у школьников второй и третьей групп и у студентов второй группы в одном из полушарий головного мозга. Снижение мощности спектра в диапазоне альфа-ритма отмечено у первой и второй групп школьников и во второй и третьей группах студентов. Следовательно, у школьников наблюдали снижение альфа-ритма после прослушивания текста в группе с доминирующей альфа-активностью, а у студентов эта тенденция отмечена в группе с первоначально низкими показателями МС в этом диапазоне частот.

Таким образом, характер динамики МС ЭЭГ в отдельных частотных диапазонах свидетельствует о возрастных особенностях мозговых механизмов, которые обеспечивают данный вид психической деятельности и зависят от типа доминирующего ритма. Отмечены межполушарные различия изменения анализируемого параметра ЭЭГ. Увеличение МС независимо от частотного диапазона регистрировали в основном в левом полушарии головного мозга, что совпадает с литературными данными об увеличении активации этого полушария при предъявлении эмоционально значимой информации (Harman, Ray, 1977).

Известно, что повышение активности определенного ритма связано с двумя факторами: увеличением числа унитарных единиц, продуцирующих данный ритм, и усилением синхронизации их работы (Гусельников, Изнак, 1983). Показано, что кратковременные флуктуации мозговых состояний бодрствования и внимания связаны с механизмами физической реакции активации в виде кратковременного локального блока альфа-ритма (Хомская, 1972).

Согласно гипотезы Г. Уолтера (Walter, 1966), снижение или исчезновение альфа-ритма связано с ростом тревожности. Получены убедительные данные, что альфа-ритм блокируется в зрительной коре не просто под влиянием афферентных воздействий среды, но при этом осуществляется психический акт восприятия - предметное зрение, так как структурированное поле зрения создает мозаичную картину возбуждения нервных клеток в зрительной системе и делает невозможной их синхронизацию, проявляющуюся в виде альфа-ритма (Adrian, Matthews, 1934). Это свидетельствует и том, что альфа-ритм отражает уровень психических процессов.

В противовес изложенным выше концепциям о функциональной роли альфа-ритма накапливаются факты, позволяющие рассматривать его как выражение недеятельного состояния мозга и даже как "холостой ход" (Гусельников, Изнак, 1983). Для различных сенсорных систем обнаружено, что возникновение серий альфа-ритма "не способствует адекватному восприятию, а, напротив, тем или иным способом нарушает, искажает и блокирует его" (Гусельников, Изнак, 1983).

Показано, что у человека оптимальное осуществление более сложных форм деятельности, связанных со зрительно-моторной интеграцией, не требует максимальной, но определенной

специфически организованной пространственной синхронизации разных полей коры (Гриндель, 1965; Сологуб, 1973), тогда как на фоне выраженного альфа-ритма восприятие и семантическая обработка сложной вербальной и зрительной информации резко затрудняются или прекращаются (Власкина и др., 1980). Умственная деятельность обычно сопровождается блокадой альфа-ритма и установлением пространственной синхронизации в тета- и дельта-диапазонах (Pollen, Trachterberg, 1972; Свидерская, Скориков, 1977).

Следовательно, влияние на ЭЭГ поступающего в кору сигнала (тип реакции активации) обусловлено исходным функциональным состоянием, отражающимся, по мнению Ухтомского, на частоте биоритмов: в зависимости от исходного уровня физиологической лабильности реакции активации выражается либо в блокаде медленного альфа-ритма с переходом к бета-ритму (в норме), либо во вспышке альфа-ритма (при исходно сниженном функциональном состоянии).

Можно отметить, что факты, полученные с помощью разных методических приёмов анализа, приводят к одному и тому же выводу: электроэнцефалографическими коррелятами психических состояний коры мозга в целом являются не отдельные частотные диапазоны ЭЭГ и не само по себе наличие корреляционных зависимостей между ними в разных областях мозга, но определенный тип кортикальной активации структур (Павлова, 1974, 1979).

ЛИТЕРАТУРА

1. Гриндель О.М. Значение корреляционного анализа для оценки ЭЭГ человека // Математический анализ электрических явлений головного мозга. - М.: Наука. - 1965. - С. 15-28.
2. Гусельников В.И., Изнак А.Ф. Ритмическая активность в сенсорных системах. - М.: Наука. - 1983. - 185 с.
3. Павлова Л.П. Мозговое обеспечение процесса формирования деятельности // Физиология человека. - 1979. - Т. 5, № 6. - С.976-983.
4. Сологуб Е.Б. Электрическая активность мозга человека в процессе двигательной активности. - Л.: Наука. - 1973. - 187 с.
5. Уолтер Г. Живой мозг. М.: Мир. - 1966. - 234 с.
6. Фарбер Д.А., Кирпичёв В.И. ЭЭГ-корреляты индивидуальных особенностей умственной работоспособности подростков // ЖВНД им. И.П. Павлова. - 1985. - Т. 18, № 5. - С. 649-657.
7. Хомская Е.Д. Мозг и эмоции. - М.: Изд. МГУ. - 1992. - 180 с.
8. Adrian E.D., Matthews V.H. The Berger rhythm: Potential changes from occipital lobes in man // Brain. - 1934. - Vol. 57, № 2. - P. 355-385.
9. Harman D.W., Ray W.J. Hemispheric activity during affective verbal stimuli in EEG study // Neuropsychol. - 1977, Vol. 15. - P. 23-35.

ПУТИ АДАПТАЦИИ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ К НАГРУЗКАМ АЭРОБНО-АНАЭРОБНОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ

Д. В. Сышко, В. Ф. Гружевская, кандидат биологических наук, доцент

Известно, что эффективность адаптации сердечно-сосудистой систем мы определяет во многом рост спортивных результатов в циклических видах спорта, особенно при нагрузках аэробно-анаэробной направленности [1; 2]. Ряд авторов [2; 3; 4] указывают на различные типы кровообращения у спортсменов в состоянии мышечного покоя. Как правило типология предлагается по величине сердечного индекса (СИ). Таким образом выделяют гипокинетический, гиперкинетический и эукинетический типы кровообращения. Однако до конца не выяснен вопрос, какова сопряженность типов кровообращения с результатами в спорте.

В наших исследованиях было выявлено, что гиперкинетический тип кровообращения обнаружен у спортсменов высокого класса ($n=8$) занимающихся марафоном, а эукинетический и гипокинетический типы кровообращения – у начинающих марафонцев ($n=12$). При дальнейших исследованиях показателем кровообращения при помощи реоанализатора РА5-01 в тетраполярном грудном отведении по методу Кубичека в модификации Пушкаря, при физических нагрузках аэробно-анаэробной направленности, выполняемая испытуемыми при помощи ступенчато-возрастающей велоэргометрической пробы до отказа, были обнаружены различные пути адаптации сердечно-сосудистой системы к данной нагрузке. Нами были выделены три типа кровообращения при физических нагрузках аэробно-анаэробной направленности.

Первый тип характеризуется плавным и равномерным возрастанием ЧСС (частоты сердечных сокращений) и УС (ударного объема сердца) в соответствии с возрастанием мощности нагрузки, далее при предельной нагрузке резкое падение УС и адаптация к нагрузке идет за счет увеличения ЧСС. После падения МО (минутного объема сердца), как правило такие спортсмены продолжают выполнять нагрузку 3-5 минут. Интересно отметить, что у данного типа адаптация сердечно-сосудистой системы к нагрузке происходит еще и значительной долей за счет резкого снижения ОПС (общего периферического сосудистого сопротивления). Данная реакция сердечно-сосудистой системы отмечена в основном у спортсменов высокого класса.

Второй тип характеризуется увеличением МО в основном за счет увеличения УО, достигая максимальных значений ЧСС и УО при максимальной мощности нагрузки. ОПС у данных спортсменов также резко снижается. Необходимо отметить, что данный тип мы разделили на два подтипа в зависимости от показателей ЧСС и УО при максимальной мощности. У одних как уже указывалось выше они достигают максимальных величин, после чего испытуемый отказывается от работы, а у других далее происходит падение МО и продолжение работы 2-3 минуты. Среди

спортсменов данного типа спортсменов высокого класса оказалось меньше и в основном за счёт второго подтипа.

Третий тип характеризуется резким увеличением ЧСС и незначительным увеличением УО уже при легкой нагрузке, далее при максимальной мощности происходит падение ЧСС и УО, причём падение УО происходит значительно раньше. Как правило у данных лиц относительно затруднены условия динамического движения крови по сосудам, что находит отражение в более высоких величинах ОПС. К данному типу относятся в основном начинающие спортсмены, либо спортсмены в состоянии утомления и напряжения функций сердечно-сосудистой системы.

По нашему мнению наиболее эффективный путь адаптации к физической нагрузке является путь определяемый у первого типа. Таким образом различные пути адаптации сердечно-сосудистой системы к физическим нагрузкам, по нашему мнению определяет различные пути учебно-тренировочного процесса спортсменов с применением различных тренировочных средств.

Так направленность тренировочного процесса для спортсменов первого типа, по нашему мнению должна носить характер увеличения мощности характеристик производительности сердечно-сосудистой системы, с применением средств тренировки позволяющих способствовать увеличению УО и увеличению реактивности сокращений миокарда.

Для спортсменов второго типа направленность тренировочного процесса должна носить характер позволяющий увеличивать реактивность сокращений миокарда. А также увеличению нагрузок анаэробного характера. Для спортсменов третьего типа целесообразным мы считаем применение средств тренировки обеспечивающих увеличение сократительной способности сердца.

Таким образом в ходе наших исследований нам удалось выделить три типа кровообращения у спортсменов при физических нагрузках аэробно-анаэробной направленности, которые и должны определять индивидуальное моделирование учебно-тренировочного процесса по функциональным параметрам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Амосов Н. М., Бендет Я. М. Физическая активность и сердце. Киев. "Здоровья". 1989.- С. 13-15.
2. Дембо А. Г., Земцовский Э. В. Спортивная кардиология. Ленинград "Медицина" 1989.- С. 100-103.
3. Дзизинский А. А., и др. Структура гемодинамики здоровых мужчин разного возраста. //Бюлетень Сибр. отд. АМН СССР.1989.- С.30-34.
4. Школьник Н. М. Тетраполярная грудная реография как метод оценки насосной функции сердца у спортсменов динамических видов спорта //Теория и практика физической культуры. 1987.- №5.- С. 50-51.

ХАРАКТЕРИСТИКА РЕАКЦИЙ НЕЙРОНОВ ТЕМЕННОЙ АССОЦИАТИВНОЙ КОРЫ КОШКИ НА ЭЛЕКТРОСТИМУЛЯЦИЮ НИЖНЕЧЕЛЮСТНОЙ ВЕТВИ ТРОЙНИЧНОГО НЕРВА

И. И. Коренюк, доктор биологических наук, профессор, Е. Ю. Бруннер, аспирант

Одной из задач, стоящих перед современной физиологией, является выяснение вопросов о закономерностях и особенностях деятельности коры больших полушарий мозга животных и человека. В настоящее время большое внимание уделяется изучению функциональной организации теменной ассоциативной области (ТАО), которая, согласно современным представлениям, является зоной конвергенции афферентных потоков, поступающих в эту область от различных рецепторных образований и отделов центральной нервной системы, осуществляет функции анализа, синтеза и коррекции поступающей разнообразной информации, а также принимает участие в формировании и запуске простых и сложных поведенческих реакций [2; 3; 4; 10; 13]. Достаточно детально изучены реакции Н при раздражении различных сенсорных модальностей [8; 9; 10; 22]. Отметим, что на сегодняшний день в литературе имеются сведения об особенностях вызванных потенциалов в ассоциативной коре на раздражение инфраорбитальной ветви тройничного нерва собак [23] и фрагментарные данные о реакциях отдельных нейронов (Н) ТАО кошки на стимуляцию пульпы зуба [20]. Данные о параметрах импульсной активности отдельных Н ТАО при раздражении тройничного нерва (ТН) в современной нейрофизиологической литературе нами не обнаружены. Этому вопросу и посвящается настоящее исследование.

Методика исследований

Эксперименты проведены на 68 кошках, наркотизированных тиопенталом натрия (в/б, 35-50 мг/кг). Трепанацию черепа осуществляли в проекции на поле 5 [21]. Для уменьшения колебаний мозга производили дренаж IV желудочка через большую затылочную цистерну. ТН препарировали контрлатерально по отношению к исследуемой области. На отпрепарированном нерве фиксировали раздражающие электроды. Для предотвращения высыхания его обкладывали ватными тампонами, пропитанными вазелиновым маслом или глицерином.

На раздражающие электроды подавали прямоугольные толчки тока длительностью 0.25 мс и частотой 0.5 Гц. Порог раздражения ТН для каждого животного подбирали индивидуально по появлению рефлекса открывания рта, что, согласно литературным данным [6; 19], является физиологическим коррелятом возникновения болевых ощущений. Индифферентный электрод располагали на мышцах головы. Импульсную активность Н регистрировали внеклеточно

стеклянными микроэлектродами сопротивлением 5-20 мОм, заполненными 4 молярным раствором NaCl.

Исследование нейронных реакций начинали через 6 часов после окончания операции. Характеристики импульсной активности Н выявляли путем анализа изменения средней частоты генерации импульсов (ЧГИ) в постстимуляционный период относительно престаимуляционного и методом построения перистимульных гистограмм (ПСТГ). Обработка полученных данных осуществлялась на IBM PC/AT с помощью разработанного нами пакета прикладных компьютерных статистических программ. Для оценки средних параметров, а также для вычисления коэффициента корреляции и достоверности между рассматриваемыми выборками использовали 5% ($P=0.95$) уровень значимости.

Результаты исследований

Исследовано 642 фоновоактивных Н поля 5 ТАО. Анализ распределения этих нервных клеток по глубине залегания в толще коры показал, что они встречаются во всех слоях, кроме I. Из рис. 1 (А) видно, что основная масса фоновоактивных нервных клеток (593 Н — 92.5%) была зарегистрирована на глубине 601-2300 мкм.

Сравнительный анализ значений ЧГИ в постстимуляционный период относительно престаимуляционного показал, что у значительного большинства (447 Н (69.6% от общего количества)) нервных клеток частота импульсации в постстимуляционный период достоверно не отличалась от уровня фона и только у 135 Н (21.0%) при раздражении ТН происходило ее достоверное увеличение, а у 60 (9.4%) Н — уменьшение. Таким образом, по показателям средних значений ЧГИ на стимуляцию ТН реакции выявлены лишь у 195 (30.4%) Н ТАО.

Анализ средних значений ЧГИ в пре- и постстимуляционные периоды у Н, залегающих на разных горизонтах ТАО, показал, что наибольшее значение этого показателя присуще Н, локализованным на глубинах 201-400, 1201-1400 и 1801-2300 мкм (рис. 1 (Б, В)). Необходимо отметить, что как в пре-, так и в постстимуляционные периоды для большинства Н ТАО характерна низкочастотная импульсация, причем стимуляция ТН у исследованных Н не приводит к существенным изменениям значений ЧГИ по поперечнику коры (рис. 1 (В)). Однако из рис. 2 (В) видно, что значений ЧГИ у Н верхних слоев ниже чем у нервных клеток глубоких.

Анализ функционального состояния Н с помощью метода построения ПСТГ показал, что большинство нервных клеток ТАО, не имевших достоверного изменения значений ЧГИ в постстимуляционный период относительно фона, проявляют реакцию на раздражение ТН. По характеру реакций Н были дифференцированы на три основных группы. К первой группе отнесены 492 (76.6% от общего числа зарегистрированных Н) нервные клетки, отвечавшие на стимуляцию ТН начальным возбуждением (рис. 2 (А)). При этом у 27 Н реакция носила

тонический и у 465 нервных клеток — фазический характер. Тоническая реакция на ПСТГ проявлялась в виде постепенного нарастания до определенного уровня количества импульсов в каждом последующем бине или ЧГИ на протяжении всего постстимуляционного периода была более высокой чем в фоне (рис. 2 (Б)) и определение момента начала и продолжительности реакции у таких клеток было крайне затруднено и поэтому статистические параметры компонентов реакции у Н данной группы нами не анализировались.

У 465 Н с фазическим начально-возбудительным типом реакции ответ развивался через 15-220 мс (45.9 ± 6.4 мс) после стимуляции ТН. При этом у 40.2% Н (от числа Н с начально-возбудительным типом реакции) ЛП реакции не превышал 20 мс, а у 22.6% — 40 мс (рис. 3 (А)). Анализ продолжительности ЛП у Н этой группы по глубине залегания показал, что нервные клетки с наибольшими значениями ЛП были локализованы преимущественно на глубине 1001-1200 мкм, 1601-1800 мкм и 2001-2300 мкм.

У большинства Н, как правило, за начально-возбудительным компонентом реакции развивалась фаза торможения. У некоторых Н на ПСТГ в ответе наблюдали две и более фаз активации, разделенных фазами торможения. Из 465 нервных клеток у 126 Н реакции были однофазными, у 159 Н — двухфазными и у 180 Н — полифазными. Из 339 нервных клеток, у которых ответ включал две и более возбудительные фазы у 165 Н мощность (отношение среднего значения ЧГИ компонента реакции к таковому в фоне) каждого последующего возбудительного компонента реакции превышала мощность предыдущего, у 126 Н наоборот — наблюдали последовательное уменьшение каждого последующего возбудительного компонента. У 48 Н возникающие в ответе повторные фазы активации по своей выраженности не превышали уровень начальной.

Анализ паттерна вторичного и последующих возбудительных компонентов ответа на ПСТГ показал, что у 87 Н они имеют такую же конфигурацию, как и у начального. При этом у 48 Н по мощности и продолжительности последующие компоненты были более, у 27 Н — менее выражены, у 12 Н существенно не отличались от начального компонента.

У всех Н с начально-возбудительным типом реакции уровень ЧГИ в фоне был низким и не превышал 8.0 имп/с, и даже в постстимуляционный период лишь у отдельных Н достигал 10.2 имп/с (рис. 4 (А)). Отметим, что достоверное изменение средних значений ЧГИ при стимуляции ТН выявлено у 177 Н (у 132 Н — достоверное увеличение относительно фона и у 45 Н — уменьшение), а у 315 нервных клеток среднее значение ЧГИ не отличалось от уровня фона. Однако при анализе средних значений ЧГИ только начального компонента реакции установлено, что у 117 Н значение ЧГИ этого компонента превышала таковое в фоне на 42-100%, у 222 Н — на 101-300%, у 81 Н — на 301-700%, у 36 Н — на 701-2000% и у девяти нервных клеток — на 2000-2318%. В целом средние показатели мощности начально-возбудительного компонента реакции у

Н этой группы составили $427.3 \pm 57.8\%$. Анализ средних значений мощности начально-возбудительного компонента реакции у Н по поперечнику коры показал, что максимальные значения этого показателя характерны для Н, залегающих на глубинах 201-400, 1801-2000 и 2201-2300 мкм (рис. 5 (I, Г)).

Анализ частотограмм соотношения распределения Н по уровню ЧГИ в пре- и постстимуляционный периоды показал, что в постстимуляционный период увеличивается число Н, среднее значение ЧГИ которых составляет 0.2, 0.8-1.0, 2.8-4.6 имп/с, а также происходит уменьшение количества Н с ЧГИ, равной 0.4, 1.2-2.2 имп/с (рис. 4 (А)). Однако, несмотря на перераспределение соотношения доли нервных клеток с определенной ЧГИ, среднее ее значение у всех Н с начально-возбудительным типом реакции в постстимуляционный период было равно таковому в пре- и стимуляционный и составляло 1.6 ± 0.2 имп/с.

Нами также установлено, что наибольшие средние значения ЧГИ в пре- и постстимуляционный периоды у Н с физическим начально-возбудительным типом реакции имеют Н, залегающие на глубинах 201-400, 1201-1400 и 1801-2300 мкм от поверхности коры (рис. 5 (I, А, Б)). При этом, достоверное увеличение среднего значения уровня ЧГИ в постстимуляционный период относительно фона наблюдается у Н, локализованных на уровнях 201-400 мкм (на 9.2%) и 1801-2000 мкм (на 16.2%), а достоверное ее уменьшение на глубинах 1201-1400 мкм (на 4.3%) и 2201-2300 мкм (на 9.8%) от поверхности коры.

Продолжительность начально-возбудительного компонента реакции у различных Н варьировала от 10 до 240 мс (43.7 ± 7.2 мс). При этом у 270 Н продолжительность этой фазы не превышала 20 мс, у 60 нервных клеток она колебалась в пределах — 21-60, у 24 нервных клеток — 61-80, у 42 Н — 81-100 и у 51 Н была более 100 мс. Продолжительность периода угнетения, развивающегося вслед за начально-возбудительной фазой реакции, у разных Н варьировала от 20 до 180 мс (44.3 ± 9.1 мс).

Корреляционный анализ между значениями ЛП и мощностью начально-возбудительного компонента реакции среди Н, проявивших на раздражение ТН фазные реакции, показал, что указанные параметры связаны между собой обратной зависимостью ($r = -0.9$), т.е. уменьшение значения ЛП реакции связано с увеличением мощности возбудительной фазы ответа и наоборот. Обращает на себя внимание тот факт, что максимальные значения показателя мощности возбудительного компонента наблюдаются у Н, локализованных на глубине 201-400, 1801-2000 и 2201-2300 мкм, и совпадают с минимальными значениями ЛП, а также с максимальными значениями средних показателей ЧГИ в фоне и после стимуляции (рис. 5 (I, В, Г)).

Н, отвечавшие начальным возбуждением, были в основном зарегистрированы на глубинах 801-1200, 1401-1800 и 2001-2200 мкм. При этом Н с физическим типом реагирования

преимущественно локализовались на глубинах 801-1200 и 2001-2200 мкм, а с тоническим — 1401-1800 мкм (рис. 6).

Ко второй группе были отнесены 90 Н (14.0% от общего количества исследованных), у которых при стимуляции ТН развивалась реакция начального торможения в виде угнетения фоновой импульсной активности вплоть до полного ее исчезновения (рис. 2 (В)). Продолжительность периода угнетения импульсной активности у различных Н варьировала от 100 до 420 мс (182.0 ± 25.9 мс). При этом у 24 Н тормозная пауза имела значения в пределах от 100 до 120 мс, у 18 Н — 121-140 мс, у 30 Н — 180-220 мс и у 18 Н — превышала 220 мс.

Среди нервных клеток с реакцией начального торможения у 42 Н выявлена одна фаза торможения, у 27 Н — две, а у 21 Н паттерн ПСТГ имел сложный характер, включавший три и более тормозных компонентов ответа, разделенных периодами повышения ЧГИ. Продолжительность фаз активации, следующих за начально-тормозным компонентом реакции, варьировала от 20 до 100 мс (36.9 ± 9.0 мс). При этом у 48 нервных клеток она не превышала 20 мс, у 18 Н лежала в пределах 21-40 мс и у 24 Н — была более 40 мс. У 72 Н с начально-тормозным типом реакции среднее значение ЧГИ в постстимуляционный период достоверно не отличалось от таковых в фоне, у девяти нервных клеток наблюдали его достоверное увеличение, а у девяти других — уменьшение. У этих Н среднее значение ЧГИ в фоне не превышало 7.5 имп/с (0.9 ± 0.5), а в постстимуляционный период — 4.4 имп/с (0.6 ± 0.3) (рис. 4). Анализ частотограмм соотношения количества нервных клеток, отвечавших начальным торможением с определенной ЧГИ в постстимуляционный период относительно фона показал, что стимуляция ТН приводит к значительному увеличению числа Н с ЧГИ которых составляет 0.2-0.4 и 0.8 имп/с и уменьшению количества нервных клеток с ЧГИ, равной 0.6 и 1.4-1.6 имп/с (рис. 4 (Б)).

Корреляционный анализ между показателями продолжительности начально-тормозного компонента и мощностью следующей за ним фазы активации у Н данной группы показал, что между ними существует обратнопропорциональная связь ($r = -0.87$), говорящая о том, что с увеличением продолжительности фазы начального торможения уменьшается мощность следующего за ним возбуждательного компонента ответа и наоборот.

Анализ средних значений ЧГИ в пре- и постстимуляционные периоды у Н по глубине залегания показал, что наибольшее значение этого показателя присуще Н, залегающим на глубинах 201-400, 1201-1400 и 1801-2300 мкм от пиальной поверхности (рис. 5 (II)). При этом стимуляция ТН приводит к уменьшению среднего значения импульсной активности в постстимуляционный период относительно ЧГИ в фоне на глубинах 201-400 мкм (на 78.9%), 1201-1400 мкм (на 63.8%) и 2201-2300 мкм (на 31.3%) от поверхности коры. Наибольшее количество Н с реакцией начального торможения зарегистрировано на глубине 1001-1800 мкм (рис. 6).

К третьей группе нами отнесены 60 Н (9.3% от общего числа исследованных) у которых реакции на раздражение ТН не были обнаружены как методом ПСТГ, так и по отсутствию достоверного изменения ЧГИ в постстимуляционный период относительно престаимуляционного (рис. 4). Неразгагующие Н зарегистрированы во всех, за исключением I, слоях ТАО с максимумом локализации на глубине 1401-2200 (рис. 6).

Обсуждение результатов исследований

Как установлено в нашем исследовании лишь 30.4% Н ТАО от числа исследованных при стимуляции ТН достоверно изменяли относительно фона среднее значение ЧГИ (у 21% Н происходило увеличение, а у 9.4% Н — ее уменьшение). Однако по результатам анализа методом построения ПСТГ реакции на применяемое раздражение обнаружены у 90.6% Н. При этом у 60.3% этих Н ответ носил полифазный характер, среди которых преобладали нервные клетки с начальновозбудительным типом реакции. Н ТАО как правило имели малую продолжительность начальновозбудительного компонента реакции, и это обусловлено, по-видимому, тем, что при одиночном раздражении нервных волокон ТН в них наблюдается кратковременный залп импульсации [11]. Вероятно, такая афферентная волна поступает достаточно синхронно, что обуславливает у большинства Н кратковременное и нередко значительное по плотности возрастание числа генерируемых импульсов, вслед за которым развивается фаза угнетения. Таким образом, у Н ТАО в условиях синхронного поступления к ним посылок из тригеминальной системы средние значения не ЧГИ существенно не изменяются, а происходит перестройка паттерна импульсации.

Возникновение у Н ТАО на раздражение ТН нескольких фаз активации и угнетения импульсной активности может быть связано с асинхронным поступлением импульсов по различным афферентным путям [9; 12] как по прямым сенсорным путям (через ядра вентробазального комплекса), так и через другие таламические и всталамические структуры головного мозга [5; 13-18]. Фазический тип реакции может быть также следствием попеременной активации возбуждающих и тормозящих Н во внутрикорковых или корково-подкорково-корковых нейронных цепях анализируемой информации поступающей из системы ТН. Учитывая, что при раздражении ТН возникал рефлекс открывания рта, то можно предположить, что повторные фазы активации могут быть связаны с запуском двигательных реакций [10; 14; 15; 17]

Обращает на себя внимание, что среди фазических Н ТАО с реакцией начального возбуждения у 126 Н зарегистрированы ответы с последовательно затухающими вторичными компонентами. Это может быть связано с тем, что в группе нервных клеток благодаря наличию взаимно-тормозящих связей посредством активации тормозных интернейронов ядер таламуса возникает тормозно-постсинаптический потенциал, действие которого заканчивается также синхронно. Это приводит к повторной активации тормозных интернейронов, в результате чего в

реакцию вовлекается все большее количество нервных клеток [7]. В то же время, у 165 нервных клеток мощность каждого последующего возбуждательного компонента была более выражена относительно предыдущего. Мы считаем, что последовательное уменьшение либо нарастание мощности повторных фаз активации может быть также связано с локализацией поступившего сигнала в отдельные ансамбли нервных клеток, в которых происходит нарастание либо уменьшение процессов торможения. Таким образом можно предположить о том, что в ТАО замыкается два (или более) типа нервных цепей, в которых происходит усиление или угашение поступивших сигналов. Исходя из того, что паттерн повторяющихся на ПСТГ фаз активации и торможения у части Н совпадает по конфигурации с начальным компонентом реакции можно предположить, что повторные однотипные фазы активации возникают в следствии реверберации сигналов по замкнутым нейронным сетям. Такие процессы могут лежать в основе памяти [16].

Наши данные свидетельствуют о том, что ЛП реакции на раздражение ТН у большинства Н составляют 20 мс. Такого же порядка ЛП выявлены у Н ТАО при электрокожном раздражении [1]. Из этого следует, что время поступления афферентации из различных соматических входов практически одинаковая и следовательно, таким образом обеспечивать взаимодействия и интеграции сигналов из разных соматических входов на Н ТАО.

Наибольшее количество Н ТАО с коротколатентными реакциями встречается на глубине 201-400, 1801-2000 и 2201-2300 мкм от пиальной поверхности и реакции этих Н протекают с наибольшей мощностью. Таким образом, информация от системы ТН первично адресуется к Н трех различных уровней ТАО.

Поскольку большинство Н проявляли начально-возбуждательную реакцию, то с их выходов информация поступает к другим Н ТАО или же в другие структуры ЦНС. Если информация первоначально поступает в глубокие слои, где находится основное количество Н выхода [10], то таким образом обеспечивается организация запуска двигательных реакции.

Проведенный анализ показал, что в ТАО при раздражении ТН соотношение Н, отвечавших начальным возбуждением и торможением, составило 5.4:1. Это согласуется с результатами других исследований [8; 9; 10; 22], где указывается на то, что в различных условиях проведения эксперимента и в зависимости от модальности раздражения такое соотношение может варьировать от 3:1 до 10:1.

Итак, наши данные показывают, что сигналы из системы ТН вызывают существенное изменение функционального состояния не только Н соматосенсорной и моторной областей коры [11; 16], но и Н ТАО. Поскольку, применяемые нами параметры раздражения согласно данным литературы [6; 19] являются болевыми, и также учитывая тот факт, что на раздражения ТН значительная часть Н исследуемой области неокортекса проявляет реакции, можно полагать, что

ТАО наряду с другими зонами коры принимает непосредственное участие в обработке ноцицептивной информации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Артеменко Д. П., Мамонец Т. М. Реакции нейронов задней супрасильвиевой извилины на раздражение заднего латерального ядра таламуса// *Нейрофизиология*.— 1972.— 4, N 4.— С. 375-383.
2. Адрианов О. С., Молодкина Л. Н., Ямщикова М. Г. Ассоциативные системы мозга и экстраполяционное поведение.— М.: Медицина, 1987.— 192 с.
3. Батуев А. С. Высшие интегративные системы мозга.— М.: Наука, 1981.— 255 с.
4. Батуев А. С. Высшие интегративные системы мозга// *Частная физиология нервной системы. Руководство по физиологии*.— Л.: Наука, 1983.— С. 558-585.
5. Бусель Б. И., Молдаван М. Г., Книга А. П. Тормозящее влияние посттормозных раздражителей на импульсные реакции нейронов теменной коры кошки при условном рефлекс // *Нейрофизиология*.— 1990.— 22, N 2.— С. 147-155.
6. Гура Е. В. Влияние стимуляции центрального серого вещества на ответы нейронов тройничного нерва // *Мозжечок и структура ствола мозга: 6 симп. по пробл. структур. и функц. орг. мозжечка*. Ереван, 1988: тез. докл.— Ереван.— 1988.— С. 51.
7. Гусельников В. И., Супин А. Я. Ритмическая активность головного мозга.— М.: МГУ, 1968.— 256 с.
8. Измestьев В. А. Нейронная организация афферентных входов теменной ассоциативной области коры головного мозга кошки: Автореф. дис. ... канд. мед. наук.— Донецк, 1975.— 22 с.
9. Казаков В. Н., Измestьев В. А. Реакции нейронов теменной ассоциативной области на раздражение первичных сенсорных зон// *Нейрофизиология*.— 4, N5.— 1972.— С. 524-530.
10. Коренюк И. И. Нейронные механизмы афферентной и эфферентной функций теменной ассоциативной области коры мозга. Автореф. дис. ... докт. биол. наук.— Л., 1990.— 44 с.
11. Лиманский Ю. П. Структура и функции системы тройничного нерва.-Киев: Наукова думка, 1976.— 256 с.
12. Мамонец Т. М. О процессах возбуждения и торможения в нейронах ассоциативной коры// *Современные проблемы общей физиологии возбудимых образований*.— Киев, 1978.— С. 139-144.
12. Полякова А. Г. Функциональная организация ассоциативной коры головного мозга.— М.: Наука, 1977.— 186 с.
13. Раева С. Н., Лукашев А. О., Лапшин А. П., Васин Н. Я., Кадин А. Л., Шабалов В. А., Гроховский Н. П. Реакции нейронов ретикулярного ядра таламуса мозга человека при речевых и сенсорных воздействиях различной сигнальной значимости// *Нейрофизиология*.— 1990, а.— 22, N 4.— С. 441-451.

14. Раева С. Н., Лукашев А. О., Лапшин А. П., Васин Н. Я., Кадин А. Л., Шабалов В. А., Гроховский Н. П. Динамика нейронных взаимодействий в ретикулярном ядре таламуса мозга человека при речевых стимулах разной сигнальной значимости// *Нейрофизиология*.— 1990, б.— 22, N 4.— С. 451-464.
15. Серков Ф. Н. Корковое торможение.— Киев: Наук. думка.— 1986.—248с.
16. Старожук В. М. Нейронные механизмы обучения.— Киев: Наукова Думка, 1986.— 264 с.
17. Шумихина С. И., Майский В. А. Соотношения таламических проекций в различные части теменной ассоциативной коры кошек// *Нейрофизиология*.-1991.— 23, N2.— С. 135-142.
18. Iriki A., Toda K. Quantitative relation between the intensity of tooth pulp stimulation and the magnitude of jaw opening reflex in the rat// *Physiol. and Behav.*— 1980.— 24, N6.— P. 1173-1175.
19. Olausson B., Shyu B.-C., Rydenhad B. Properties of single neurons in the cat midsuprasylvian gyrus// *Exp. Brain Res.*— 1990.— 79, N 3.— P. 515-529.
20. Reinoso-Suares F. Topographisher Hirnatlas der Katze fur experimental-physiologische Untersuchungen. — Darmstadt, 1961.— 48s.
21. Robertson R. T., Mayers K.S., Teylor T. J. et al. Unit fctivity in posterior association cortex of cat// *J. Neurophysiol.*— 1975.— 38, N4.— P. 780-794.
22. Whalen L. R., Spurgeon T. L. Trigeminal nerve-evoked potentials in the dog// *Amer. J. Vet. Res.*— 1986. — 47, N 11.— С. 2435-2440.

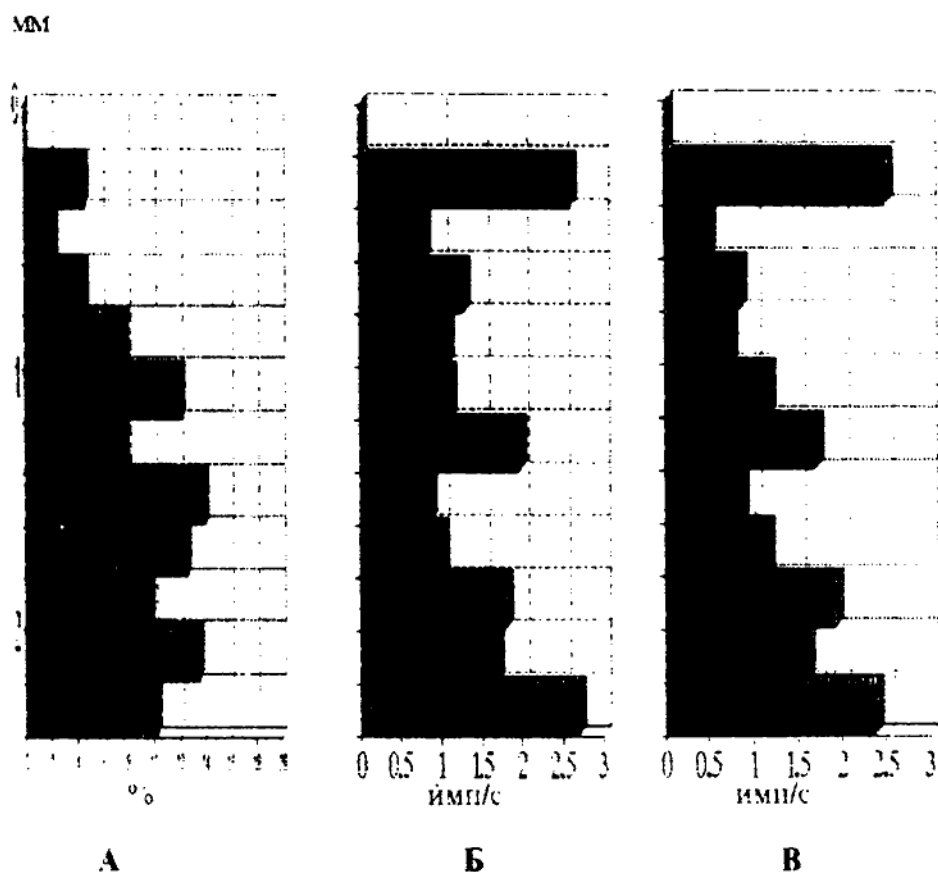


Рис. 1. Распределение 642 фоновоактивных нейронов теменной ассоциативной коры по глубине залегания (А), а также изменение соотношения этих нейронов по средней частоте импульсной активности на разных уровнях коры в пре— (Б) и постстимуляционный (В) периоды.

По оси абсцисс:

На А — относительное количество нейронов, %.

На Б, В — средняя частота генерации импульсов, имп/с.

По оси ординат — глубина, мм.

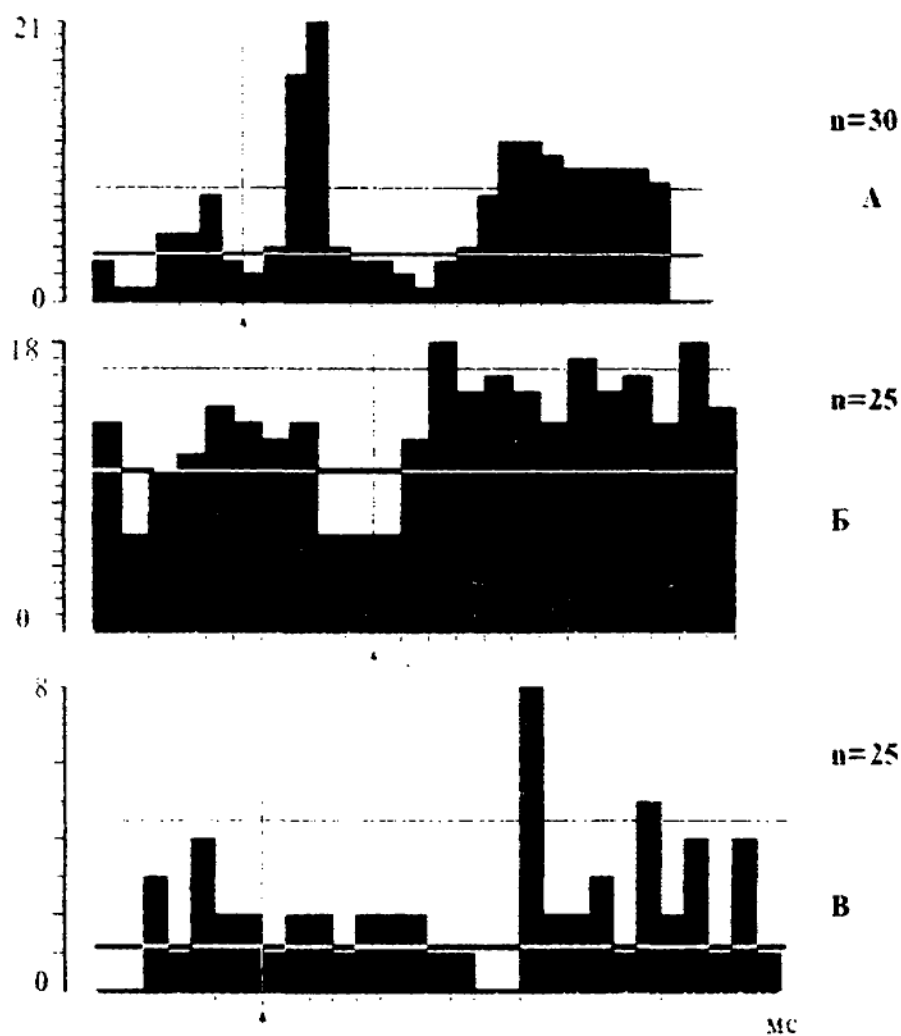


Рис. 2. Перистимульные гистограммы нейронов ассоциативной коры с физическим (А) и тоническим (Б) начально-возбудительным, а также начально-гормозным (В) типами реакций. По оси абсцисс — время, мс. По оси ординат — количество импульсов. На гистограммах обозначены: средний уровень фоновой импульсной активности (толстая горизонтальная линия) и уровень активности нейрона, превышающий средний уровень фоновой импульсной активности на удвоенное квадратичное отклонение (тонкая горизонтальная линия). Продолжительность одного бина гистограммы — 20 мс. n — количество раздражений. Момент нанесения раздражения обозначен стрелкой.

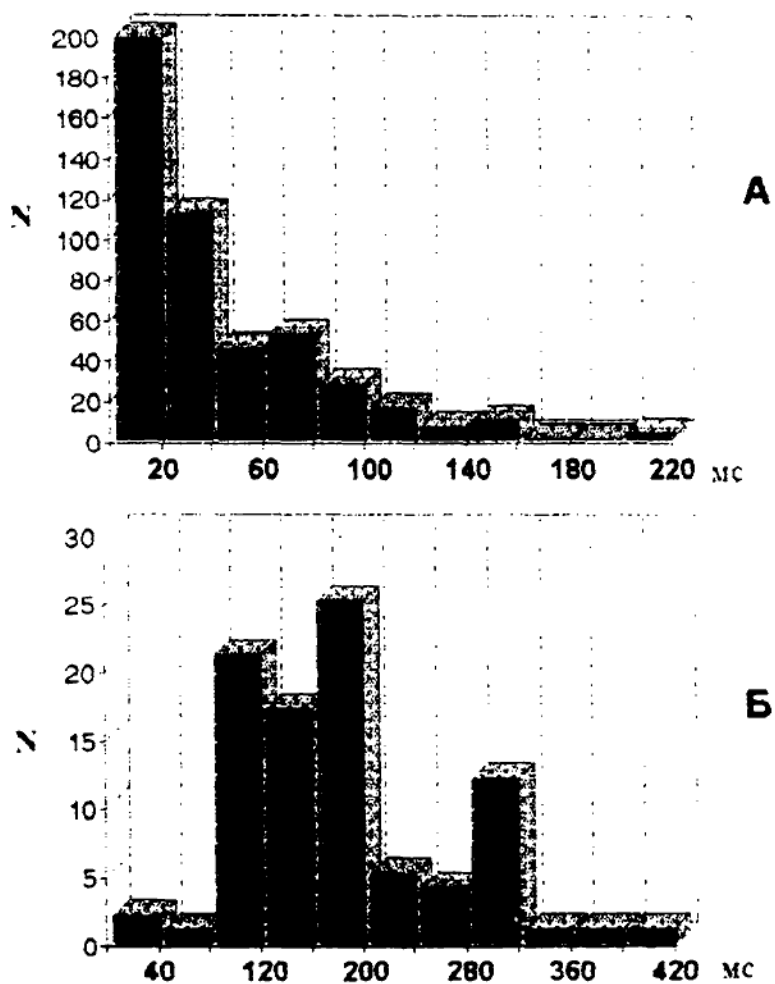


Рис. 3. Гистограммы распределения латентных периодов ответов 465 нейронов с фазическим начально-возбудительным (А) и 90 нейронов с начально-тормозным (Б) типами реакции по их латентным периодам. По оси ординат — количество нейронов; по оси абсцисс — время, мс.

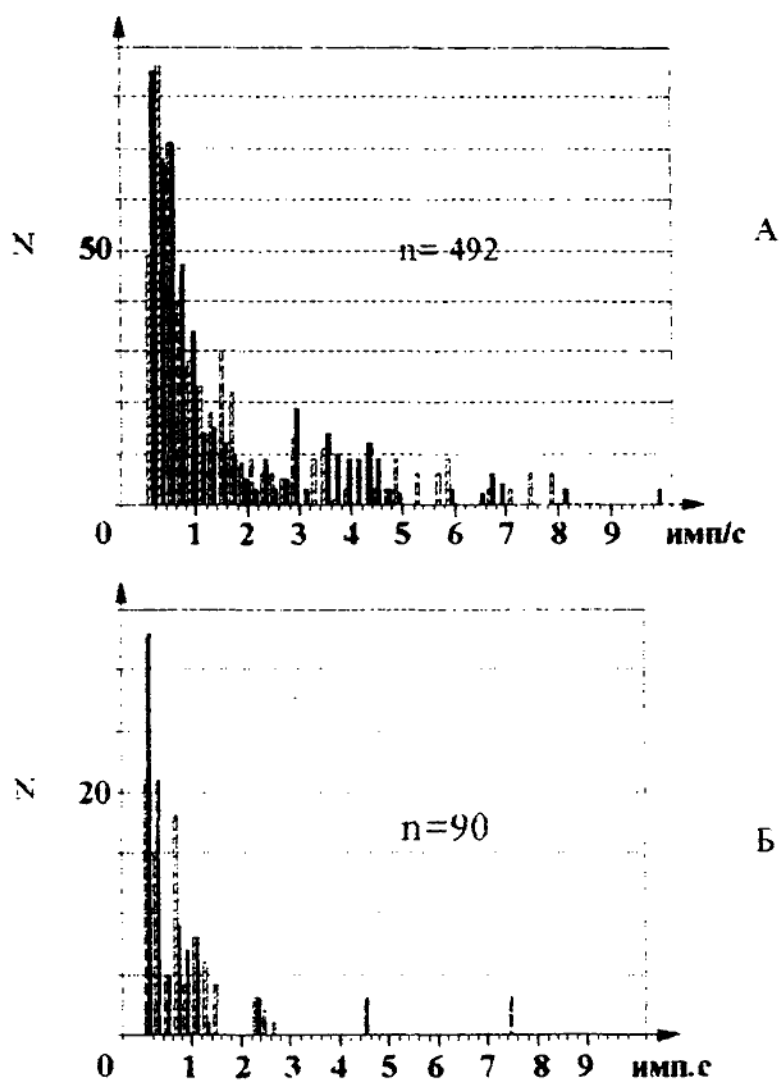
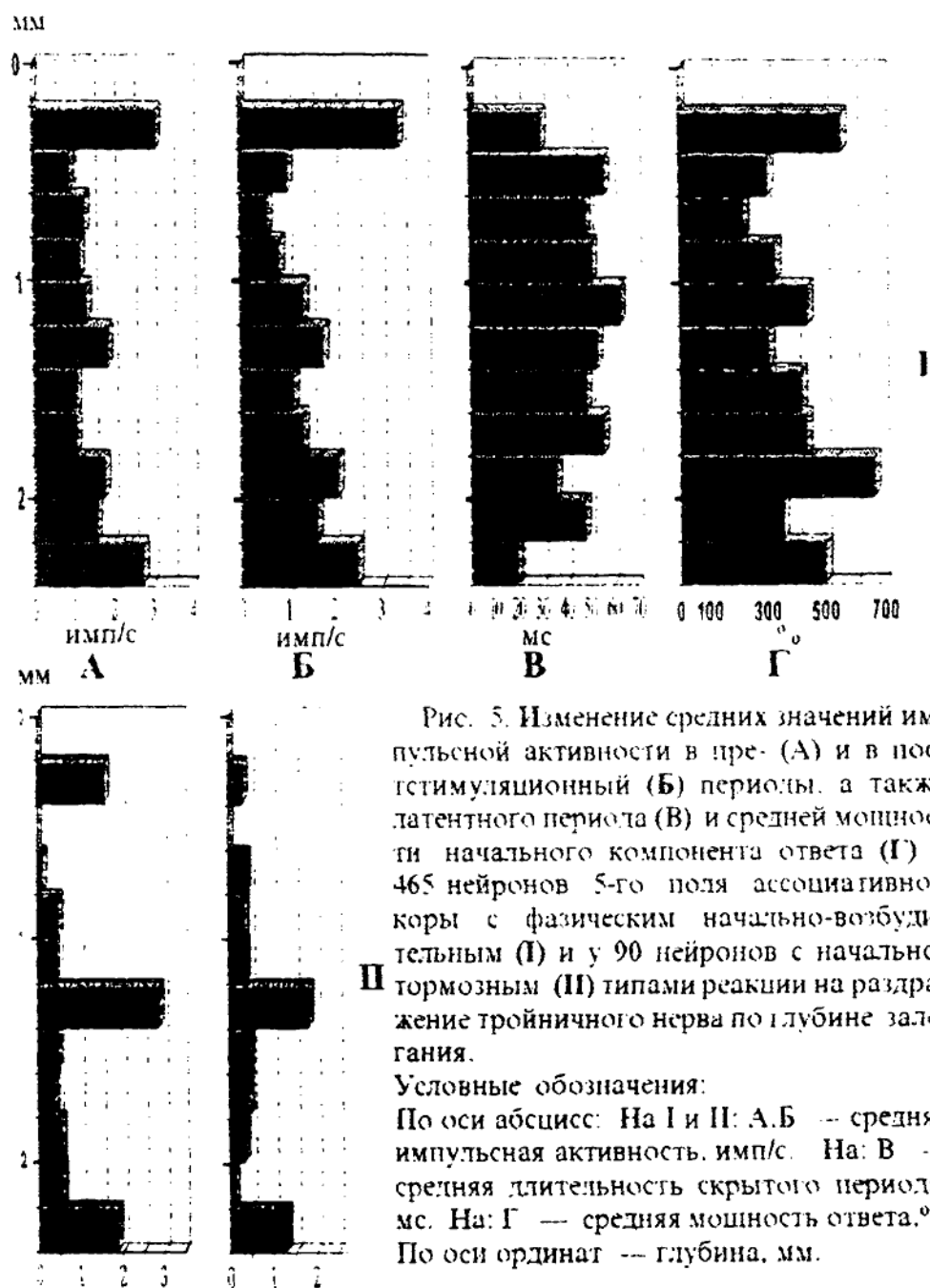


Рис. 4. Изменение соотношения количества нейронов теменной ассоциативной области коры с реакцией начального возбуждения (А) и торможения (Б) по средней частоте фоновой и вызванной импульсной активности.

Условные обозначения:

▨ фоновая и ▤ вызванная импульсная активность.
 По оси абсцисс — импульсная активность, имп/с;
 по оси ординат — количество нейронов(N);
 n — общее количество нейронов.





ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ ПАРАМЕТРОВ РЕАКЦИИ НЕЙРОНОВ ПОЛЯ 5 В УСЛОВИЯХ МНОГОКРАТНОЙ РИТМИЧЕСКОЙ СТИМУЛЯЦИИ НИЖНЕЧЕЛЮСТНОЙ ВЕТВИ ТРОЙНИЧНОГО НЕРВА

И. И. Коренюк, доктор биологических наук, профессор,

Е. Ю. Бруннер, аспирант

Как известно, фоновая импульсная активность, а также реакции нейронов (Н) при действии многократно предъявляемых стимулов различных отделов ЦНС не всегда остаются постоянными. К настоящему времени это доказано как для Н подкорковых образований, так и нервных элементов новой коры [1; 3; 5; 7; 8]. В то же время в литературе имеются фрагментарные данные о пластических перестройках, происходящих у Н теменной ассоциативной коры (ТАО) в условиях многократной ритмической стимуляции (МРС) периферических входов и структур ЦНС [4; 6]. В связи с этим, представляется интересным изучение характеристик функционального состояния Н в процессе МРС тройничного нерва (ТН).

Методика исследований

Исследования проведены в условиях острого эксперимента на 11 кошках, наркотизированных тиопенталом натрия (в/б, 35-50 мг/кг), по описанной ранее методике [2].

На раздражающие электроды подавали 100-300 раздражений длительностью 0.25 мс и частотой 0.5 Гц. Для выявления особенностей динамики функционального состояния каждого из исследованных Н ТАО в процессе МРС ТН пофракционно строились перистимульные гистограммы (ПСТГ) по каждой 10 реализациям и суммарная ПСТГ, включающая все предъявления стимулов на ТН. Методом корреляционного анализа исследовали также взаимную зависимость между различными параметрами реакции. Обработка полученных данных осуществлялась на IBM PC AT с помощью разработанного нами пакета прикладных компьютерных статистических программ. Для оценки средних параметров, а также для вычисления коэффициента корреляции и достоверности между рассматриваемыми выборками использовали 5% ($P=0.95$) уровень значимости.

Результаты исследований и их обсуждение

В данной работе анализу подвергнута активность 48 нервных клеток ТАО. По данным суммарных ПСТГ 46 Н ТАО имели начально-возбудительный и два Н — начально-тормозный типы реакции.

В связи с тем, что Н ТАО обладают низкочастотной импульсацией, выявление реакции в некоторых фракциях ПСТГ было затруднено, однако сопоставление ПСТГ каждой фракции друг с другом и с суммарной гистограммой показало, что практически во всех фракциях можно выявить определенные компоненты ответа. Особое внимание при выявлении фаз реакции мы уделяли таким параметрам, как латентный период (ЛП), продолжительность и паттерн начального компонента реакции. Такой методический подход в оценке наличия ответа позволял выявлять

искомые компоненты реакции даже в тех фракциях, в которых уровень импульсной активности в постстимуляционный период существенно не отличался от среднего значения фона.

Динамика изменения функционального состояния одного из Н ТАО в процессе МРС ТН показана на рис. 1. (Б), где видно, что на определенных этапах стимуляции параметры реакции существенно изменялись. Так, на ПСТГ, построенной по первым 10 раздражениям (I фракция), выявлена четкая начально-возбудительная реакция, а после 20 и 30 раздражений (II и III фракции) происходит существенная пространственно-временная перестройка паттерна импульсной активности, и, в связи с этим, на ПСТГ этих фракции начально-возбудительный компонент не проявляется. Сопоставление ЛП и паттерна импульсации в постстимуляционный период на ПСТГ в III фракции с таковым в остальных фракциях все же позволяет с достаточной степенью уверенности считать, что начально-возбудительный компонент реакции в данной фракции также имеет место. В последующих фракциях, как это видно из рис. 1 (Б), происходит периодическое изменение выраженности отдельных компонентов реакции. В частности, наблюдается изменение средних значений частоты генерации импульсов (ЧГИ), значений ЛП, мощности и продолжительности отдельных компонентов ответа, а также моды реакции. Обращает на себя внимание, что у некоторых Н ТАО, в том числе и у нейрона, изменение импульсной активности которого показано на рис. 1. (Б), в процессе МРС ТН наблюдается сходство паттернов начально-возбудительных (фракции XV, XVIII, XXII и XXIV) и вторично-возбудительных (фракции III, XII, XV) компонентов реакции, хотя мощность (выраженность) и ЛП исследуемых компонентов ответа могли различаться. Наряду с описанными динамическими перестройками у некоторых Н в отдельных фракциях могли появляться новые компоненты реакции (рис. 1. Б, фракция III).

Поскольку при оценке реакции по данным суммарных и пофракционных ПСТГ характер реакции у определенного числа Н был противоположного знака, мы сочли необходимым проанализировать, как в процессе МРС ТН изменяются характеристики ЧГИ в пре— и постстимуляционный периоды, а также значения ЛП, мощности и продолжительности начального компонента ответа и времени появления моды реакции в каждой отдельной фракции. Анализ показал, что средняя ЧГИ в постстимуляционный период в процессе МРС у всех Н ТАО могла существенно изменяться.

По характеру первоначального изменения ЧГИ в постстимуляционный период все Н с начально-возбудительной реакцией были разделены на три группы. В первую группу из 46 Н ТАО отнесены 23 нервные клетки, у которых на ПСТГ нескольких первых фракций по данным последовательных наблюдалось увеличение средней ЧГИ относительно ее уровня в I фракции по II, по III, по IV или по V фракции (далее изменения параметров реакции рассматриваются относительно I фракции). На рис. 2 (А) показан график изменения средней ЧГИ одного из Н ТАО данной группы. Из этого рисунка видно, что с I по III фракцию импульсная активность в постстимуляционный период увеличивается с 0.9 до 1.3 имп/с, а затем уменьшается до 0.82 имп/с с последующими флуктуациями.

Во вторую группу отнесены 17 Н, у которых по мере нанесения раздражений наблюдали угнетение средней ЧГИ. При этом угнетение во II, во II и III, во II-IV, во II-V и во II-VII фракциях (рис. 2, Б, I-III фракции) с последующими ее флуктуациями.

К третьей группе отнесены пять Н, у которых на ПСТГ с I по II или с I по III фракции среднее значение ЧГИ могло находиться на одном уровне, а затем либо повышалось (у трех Н), либо уменьшалось (у двух Н) с последующими периодическими колебаниями.

У большинства исследованных Н в отдельных фракциях выявлены и периодические изменения значения ЛП реакции. Анализ показал, что у 12 Н наблюдали увеличение значения ЛП по II, по III или по V фракции на 10-100 мс (48.0 ± 19.0 мс). Среди этих Н, у двух после увеличения значения ЛП (у одного по II и у другого по V фракцию) наступала его стабилизация, а у остальных наблюдали последующие флуктуации (рис. 3, А). У 25 Н с начально-возбудительной реакцией наблюдали уменьшение значения ЛП во II, во II-III, во II-IV и во II-V фракциях на 20-160 мс (49.1 ± 15.6 мс) с последующими периодическими колебаниями (рис. 3, Б). У одного нейрона с I по VII фракции значение ЛП не изменялось, однако в дальнейшем наблюдали его увеличение с последующим уменьшением. У восьми Н в процессе МРС ТН не происходило изменение значения ЛП.

Судя по ПСТГ следующих друг за другом фракций, в процессе МРС ТН у нервных клеток ТАО происходит также и периодическое изменение продолжительности начального компонента реакции. Так, у 14 Н наблюдали увеличение продолжительности начального компонента реакции по II, по III, по IV или по VI фракции на 20-140 мс (35.7 ± 19.6 мс) с последующими флуктуациями, а у 11 Н — уменьшение на 20-60 мс (32.7 ± 12.2 мс) с последующими флуктуациями (рис. 4). У 17 Н с I по II, по III, по IV, по V или по VI, а у одного нейрона вплоть до XVII фракции продолжительность начального компонента реакции находилась на одном уровне, после чего наступало ее увеличение с последующими флуктуациями. У трех Н стабильная в первых II (два Н) и IV (один нейрон) фракциях продолжительность начального компонента реакции сменялась ее уменьшением с последующим увеличением и колебаниями.

По данным анализа последовательных ПСТГ также установлено, что в процессе МРС ТН у Н ТАО изменяется и мощность начального компонента реакции. Так, у 24 Н наблюдали первоначальное увеличение мощности начального компонента реакции (рис. 5, А) во II, во II и III, во II-IV и во II-VI фракциях (относительно I) на 76.9-600.0% ($197.6 \pm 52.7\%$), а 19 Н по II, по III или по V фракции — уменьшение (рис. 5, Б) на 12.6-240.0% ($79.1 \pm 33.4\%$) с последующими флуктуациями. У трех Н стабильная мощность начального компонента реакции на протяжении нескольких первых фракций (у одного — II, другого — III и третьего — XVI фракций) сменялась ее увеличением и последующими колебаниями.

Изучение динамики времени проявления на ПСТГ моды реакции (наибольшей плотности генерируемых импульсов) при МРС показало, что у 28 Н ТАО ее значение реакции увеличивалось по II, по III, по IV или по VI фракции на 20-360 мс (114.1 ± 39.6 мс) с последующими флуктуациями (рис. 6, А). У 19 Н наблюдали уменьшение значения моды реакции во II, во II и III, во II-IV

фракциях на 20-200 мс (58.8 ± 29.6 мс) с последующим ее увеличением и периодическими колебаниями (рис. 6, Б). У двух Н из этого числа после первоначального уменьшения значения моды реакции (во II фракции) ее значение находилось на одном уровне. У одного нейрона стабильное (с I по VI фракции) значение моды реакции сменялось ее увеличением.

Для выяснения существования определенной связи между ЛП, мощностью и продолжительностью начального компонента ответа, а также временем появления моды реакции нами проведен корреляционный анализ. В результате такого анализа у 12 Н выявлена прямопропорциональная зависимость между мощностью и продолжительностью начального компонента реакции. В то же время прямо— или обратнопропорциональная зависимость между ЛП и мощностью реакции, ЛП и продолжительностью начального компонента реакции, ЛП и временем появления моды реакции и т.д. была выявлена у незначительного количества Н.

Наряду с изменением характеристик начально-возбудительного компонента реакции в процессе МРС ТН в постстимуляционный период у Н ТАО также происходят периодические изменения вторичных компонентов реакции. Как видно из рис. 1 (Б), фаза угнетения импульсной активности, следующей за начально-возбудительным компонентом реакции, и характеристики вторично-возбудительного компонента постоянно изменяются.

В результате пофракционного анализа ПСТГ было также установлено, что в процессе МРС ТН у Н ТАО происходят периодические изменения характера импульсной активности не только в постстимуляционный период, но и в престаимуляционный (рис. 1, Б). При этом у 21 Н во II, III и IV, во II-V или во II-VII фракциях (относительно I) происходило увеличение ЧГИ в престаимуляционный период с последующими колебаниями (рис. 2, А). У 20 нервных клеток уменьшение уровня импульсной активности в фоне происходило по II, по III, по IV или по VI фракции с последующим ее увеличением и флуктуациями. У пяти Н на протяжении первых двух фракций импульсная активность находилась на одном уровне. При этом у одного нейрона она сменилась увеличением, а у четырех — уменьшением (рис. 2, Б) с последующими периодическими колебаниями.

Анализ изменения импульсной активности по данным ПСТГ в пре— и постстимуляционный периоды, ЛП, мощности и продолжительности начально-возбудительного компонента, а также времени появления моды реакции показало, что у значительного большинства Н ТАО при МРС ТН первоначальное изменение (увеличение или уменьшение указанных параметров) заканчивается уже во II фракции. Следует отметить, что первоначальное изменение средней ЧГИ в пре— и постстимуляционный периоды носило у 31 Н как одно (например, одновременное увеличение средней ЧГИ в фоне и в постстимуляционный период и т.п.), так и у 15 Н — разнонаправленный (например, увеличение средней ЧГИ в фоне и ее уменьшение в постстимуляционный период) характер. При этом из 15 Н, у которых первоначальное изменение средней ЧГИ в пре— и постстимуляционный периоды носило разнонаправленный характер, у шести Н в постстимуляционный период в первых нескольких фракциях наблюдали увеличение среднего уровня ЧГИ, в то время как в постстимуляционный период — ее уменьшение. На ПСТГ

девяти других Н наблюдали обратную картину: в первых нескольких фракциях уменьшение средней ЧГИ в фоне сопровождалось ее увеличением в постстимуляционный период.

Сравнительный анализ динамики средних значений фоновой и вызванной импульсной активности у Н ТАО с реакцией начального возбуждения в процессе МРС ТН показывает, что на определенном этапе стимуляции разница между этими показателями достигает достовернозначимого уровня (рис. 2), причем у 21 Н она выявляется уже в I фракции, у 18 нервных клеток — во II-VII фракциях и у трех Н — в XI-XVII фракциях. В то же время, у четырех Н ни в одной из фракций достоверная разница между импульсной активностью в постстимуляционный период относительно престимуляционного не выявлена.

У двух Н теменной коры, имевших начально-тормозный тип реакции, в процессе МРС ТН все параметры, характеризующие функциональное состояние нервной клетки, также претерпевали периодические изменения. Следует отметить, что продолжительность тормозного компонента у этих Н в процессе МРС ТН изменялась незначительно (на 20-40 мс), в то время как глубина торможения практически не изменялась, а следующий за начальным торможением возбудительный компонент реакции претерпевал существенные периодические изменения (рис. 7, Б).

Таким образом, наши исследования показали, что Н ТАО, в процессе МРС так же как и различные структуры головного мозга [1; 3; 5; 7; 8] претерпевают существенные периодические изменения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Батуев А.С., Куликов Г.А. Введение в физиологию сенсорных систем.— М: Высшая школа, 1983.— 248 с.
2. Коренюк И.И., Бруннер Е.Ю. Характеристика реакций нейронов теменной ассоциативной коры кошки на стимуляцию нижнечелюстной ветви тройничного нерва // Наст. сборник
3. Казаков В.Н., Шевченко Н.И., Пронькин В.Г., Колонки в коре головного мозга (морфо-функциональный аспект)// Успехи физиологической науки.— 1979.— 10.— 4.— С. 96-115.
4. Серков Ф.Н. Корковое торможение.— Киев: Наук. думка.— 1986.— 248с.
5. Старожук В.М. Нейронные механизмы обучения.— Киев: Наукова Думка, 1986.— 264 с.
6. Шевко Г.Н., Баканова Н.Ф. Динамика импульсной активности нейронов ассоциативной коры бодрствующей кошки при выработке и упрочинен оборонительного условного рефлекса // Нейрофизиология.— 1978.— 10, N 6.— С. 536-572.
7. Чиженкова Р.А. Структурно-функциональная организация сенсомоторной коры.— М.: Наука, 1986.— 241 с.
8. Чиженкова Р.А. Циклические процессы в нейронных популяциях коры при раздражении структур мозга // Циклы природы и общества.— Вып. 3-4, 1995.— С. 213-214.

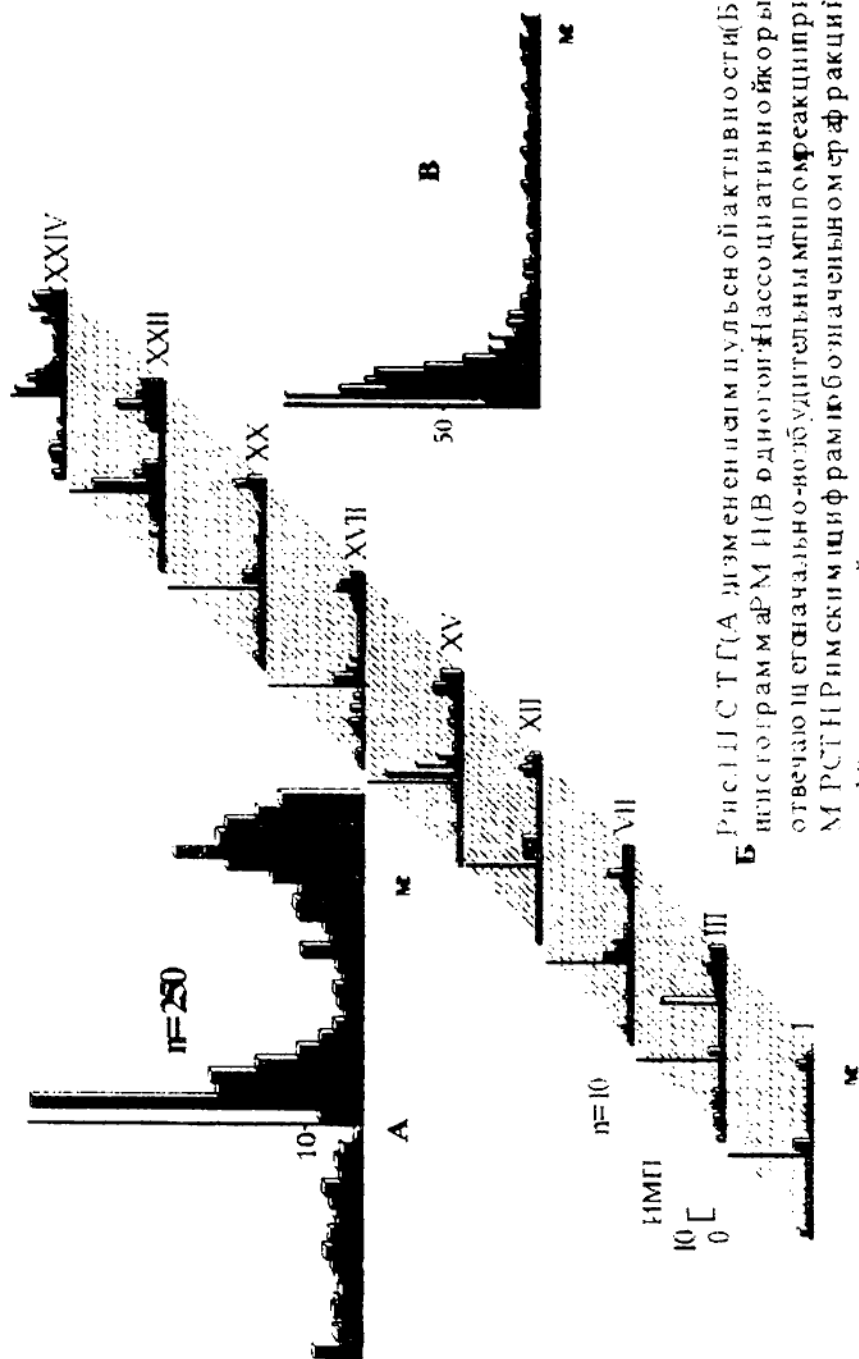


Рис. 1. С ТГА изменение импульсной активности (Б) или спектра МНЧ (В) одного из ассоциативных коры, отвечающих изначально возбужденным группам реакций МРСТН Римским цифрами обозначены средние значения (разражений).
 П — ось абсцисс.
 На А В — время продолжительности дуга — 20 мс.
 На а в — время продолжительности дуга — 2 мс.

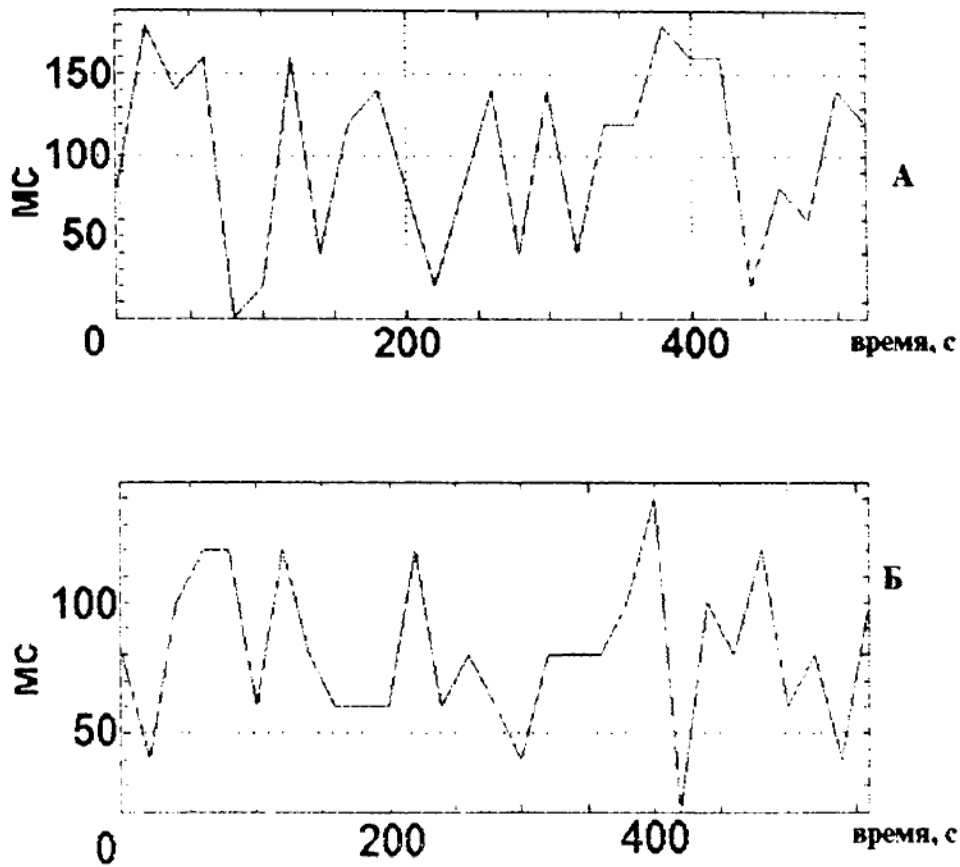


Рис. 3. Графики колебания значения латентного периода реакции двух нейронов ассоциативной коры с начально-возбудительным типом реакции, при многократной ритмической стимуляции тройничного нерва.

По оси абсцисс — время стимуляции, с.

По оси ординат — латентный период, мс.

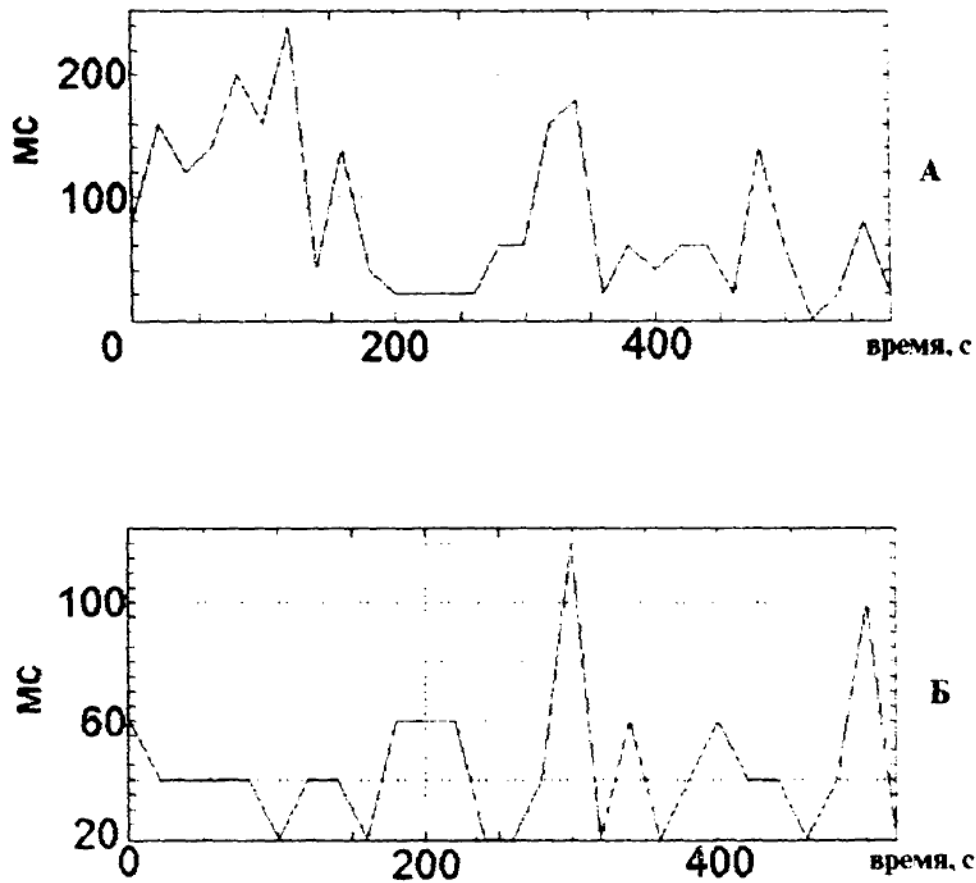


Рис. 4. Графики колебания продолжительности реакции двух нейронов ассоциативной коры с начально-возбудительным типом реакции при многократной ритмической стимуляции тройничного нерва.

По оси абсцисс — время стимуляции, с.

По оси ординат -- продолжительность реакции, мс.

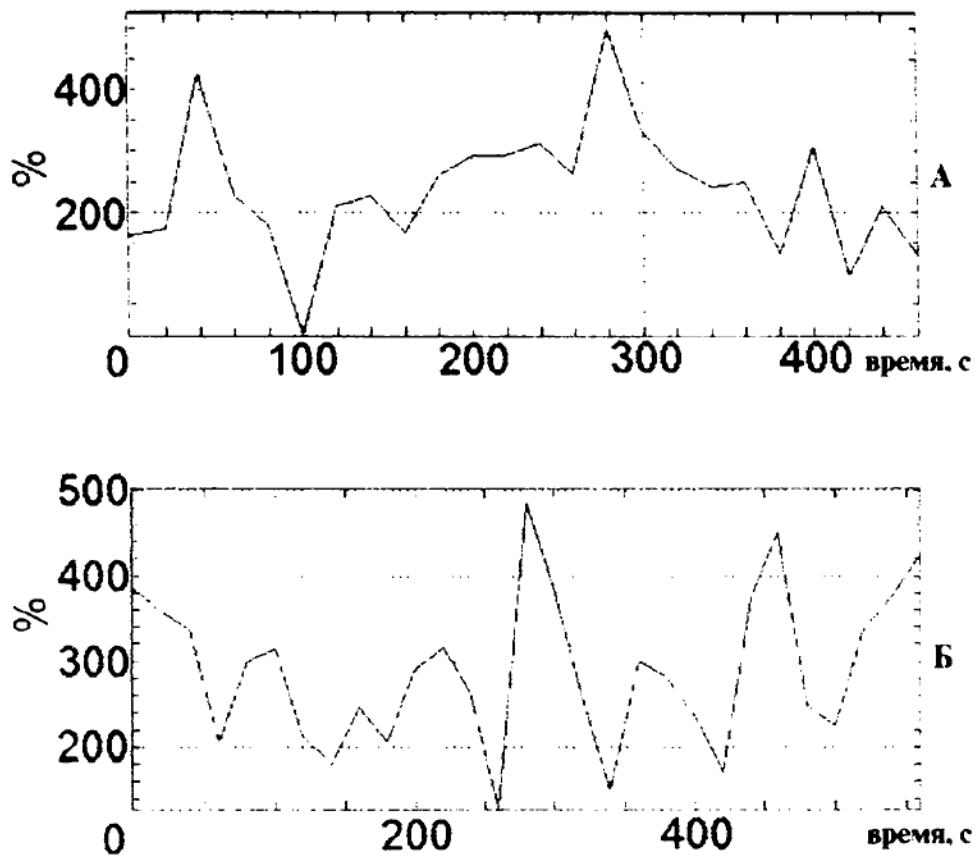


Рис. 5. Графики колебания мощности реакции двух нейронов ассоциативной коры с начально-возбудительным типом реакции при многократной ритмической стимуляции тройничного нерва.

По оси абсцисс — время стимуляции, с.

По оси ординат — мощность реакции, %.

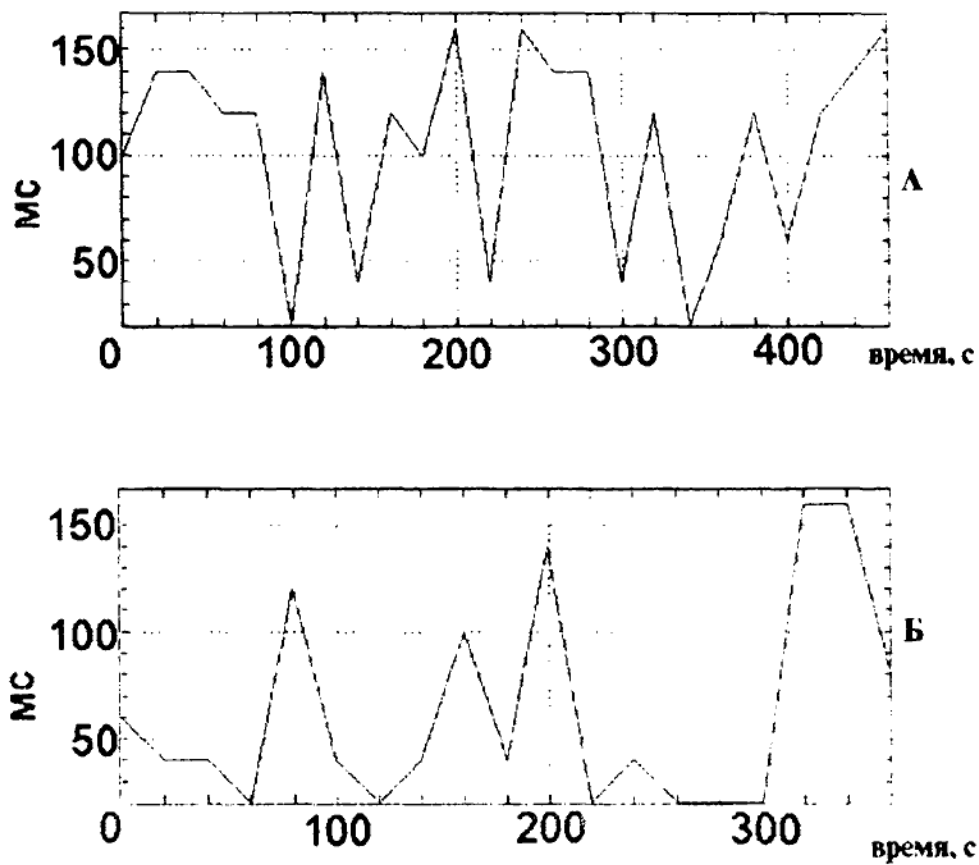


Рис. 6. Графики колебания моды реакции двух нейронов ассоциативной коры с начально-возбудительным типом реакции при многократной ритмической стимуляции тройничного нерва.

По оси абсцисс — время стимуляции, с.

По оси ординат — мода реакции, мс.

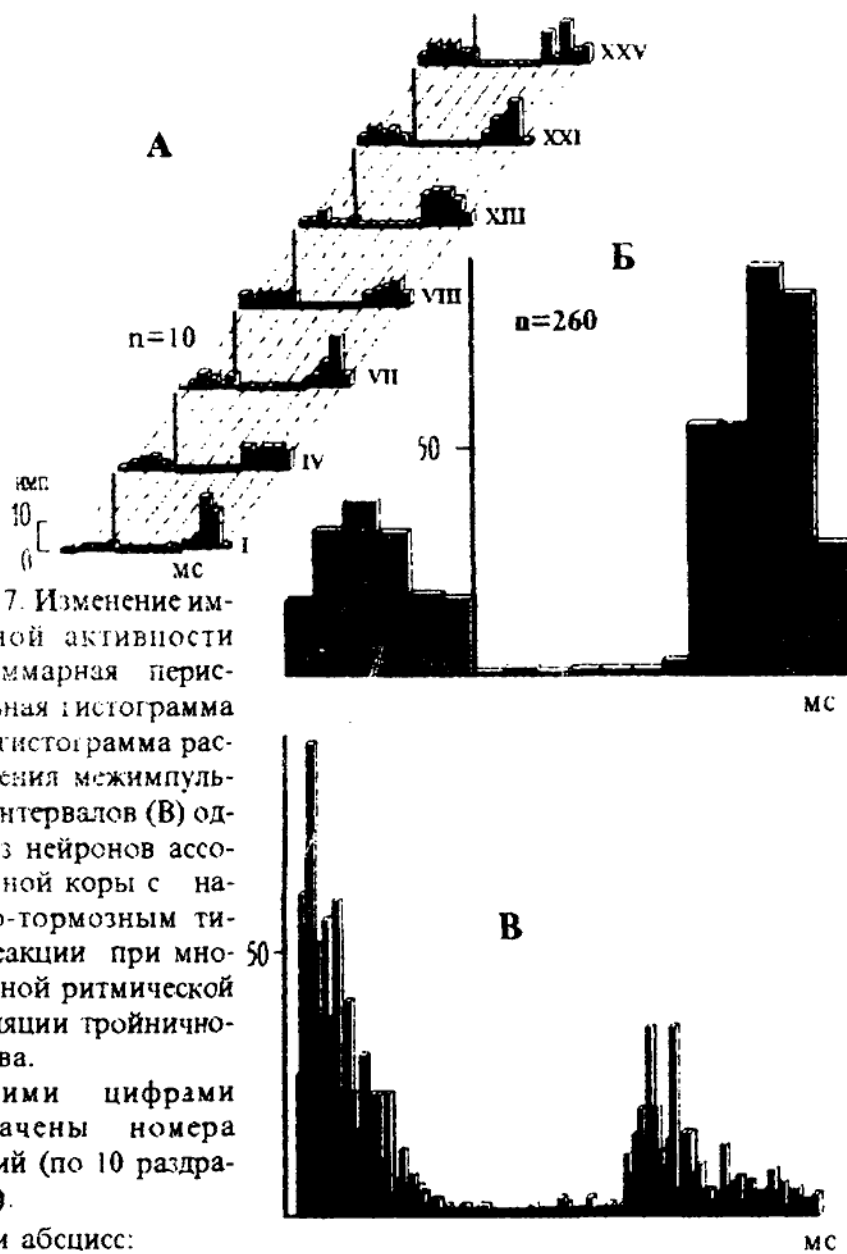


Рис. 7. Изменение импульсной активности (А), суммарная перистимульная гистограмма (Б), и гистограмма распределения межимпульсных интервалов (В) одного из нейронов ассоциативной коры с начально-тормозным типом реакции при многократной ритмической стимуляции тройничного нерва.

Римскими цифрами обозначены номера фракций (по 10 раздражений).

По оси абсцисс:

На А, Б — время, мс: продолжительность одного бина — 20 мс.

На В — время, мс: продолжительность одного бина — 2 мс.

По оси ординат — количество импульсов в бине.

ФИЛОСОФСКИЕ И ИНЖЕНЕРНЫЕ АСПЕКТЫ ПЕДАГОГИКИ СПОРТА

*Лейкин М. Г., доктор философии в технических науках,
доктор педагогических наук, профессор*

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ. Подготовка спортсмена - это прежде всего педагогический процесс [3, 8], обеспечиваемый и совершенствуемый на основе привлечения знаний из смежных и многих на первый взгляд не близких отраслей науки и техники (физиология, механика, анатомия, робототехника, моделирование, эргономика, кибернетика и пр.).

В педагогике спорта (если подходить к ней творчески и научно) не обойтись без философии и "технизации". При анализе диалектических противоречий, присущих учебно-тренировочному процессу, неизбежен взгляд с позиции, дающей более широкий обзор, актуализирующий и проблему инженерного обеспечения педагогики спорта.

Такой мировоззренческий подход к спортивной тренировке реализован во многих публикациях И. П. Ратова [19,20], который считает, что тренировочный процесс настоящего времени во многих случаях еще весьма далек от научно обоснованного и скорее может рассматриваться как некий ритуал, построенный без учета возможных противоречий двигательного совершенствования инструментального и тренажерного обеспечения, на основе лишь общепринятых взглядов. и ... "что только через поиск противоречий в установившихся мнениях и через раскрытие и преодоление их может осуществляться дальнейшее серьезное развитие и обогащение спортивной науки" [20, с. 35].

В основе спортивной тренировки как специфичном педагогическом процессе лежат и определяют ее эффективность как биологические, так и дидактические принципы, рассмотрение сегодняшних представлений о диалектических противоречиях внутри которых и между которыми определяют содержание основных принципов обучения и тренировки.

Одна из основных категорий диалектического материализма - противоречие (равно как и другие категории: материя, движение, пространство и время, качество и количество, причинность, необходимость и случайность, содержание и форма, возможность и действительность, сущность и явление и пр.) - образовалась как результат обобщения исторического развития познания и общественной практики.

Противоречия - как взаимодействие противоположных, взаимоисключающих фрагментов системы, которые вместе с тем находятся во внутреннем единстве и взаимопроникновении, - являются источником самодвижения и развития объективного мира и познания. Сущность закона единства и борьбы противоположностей выражается рассматриваемой категорией [6].

ПРОТИВОРЕЧИЕ В ПРИНЦИПЕ АДАПТАЦИИ. Одной из самых фундаментальных закономерностей природы является способность живых существ приспосабливаться к различным условиям существования и раздражителям.

В биологии и медицине адаптация живых существ занимает особо важное место как необходимый атрибут существования и взаимодействия со средой. В социологии и психологии рассматривается как процесс установления определенных взаимоотношений между личностью и

социальной средой. В кибернетике под адаптацией понимают самонастройку различных технических систем.

В спорте на принципе адаптации ко все увеличивающимся тренировочным нагрузкам основаны повышение тренированности организма и рост спортивных результатов. В СПОРТЕ ПРИНЦИП АДАПТАЦИИ ЯВЛЯЕТСЯ ОСНОВОПОЛАГАЮЩИМ.

Ж. Б. Ламарк [9] был склонен наделять живые существа "стремлением их к совершенствованию", к достижению идеальной формы организации. Однако не все факты, особенно связанные с адаптацией организма к некоторым условиям окружающей среды, укладывались в его концепцию. Ламарк вынужден был прибегнуть к формулировке дополнительных принципов: упражнения и неупражнения органов внутренними и психологическими воздействиями и прямого приспособления.

Именно принцип упражнения и неупражнения органов до сих пор - один из основных принципов в спортивной тренировке.

Как известно, Ж. Б. Ламарк считал, что частое упражнение организма ведет к его развитию, а "неупотребление органа не приметно ослабляет его, приводит в упадок, последовательно сокращает его способность и, наконец, вызывает исчезновение" [9, с. 13].

Мысль Ламарка о значении работы для органа развил немецкий эмбриолог и морфолог В. Ру, который считал, что функция не только развивает и оформляет орган, но и специализирует его в зависимости от характера воздействия на него. Способность живых существ к перестраиванию в связи с их функцией В. Ру назвал функциональной адаптацией.

Эта закономерность очень четко проявляется в спортивной тренировке. Организм спортсмена приспособляется к постоянно возрастающим нагрузкам и сложно-координационным нервно-мышечным и вестибуло-кортикальным реализациям. Это касается как организма в целом, так и его отдельных органов, систем, функций и клеток.

Принципам адаптации подчиняется деятельность и клетки, и органов, и в целом организма.

Мышечная деятельность организма есть тоже не что иное, как приспособление к условиям существования.

И. М. Сеченов в "Рефлексах головного мозга" писал: "Все бесконечное разнообразие внешних проявлений мозговой деятельности сводится окончательно к одному лишь явлению - мышечному движению" [21, с. 71].

Организму свойственны два вида реакций адаптации на раздражители, и в частности на спортивную тренировку: первый - срочно возникающие реакции (интенсификация систем кровообращения, дыхания, обмена веществ и как следствие - увеличение теплопродукции и др.); второй - морфо-функциональные реакции. Они заключаются в упреждающем развитии организма, т.е. в отражении определенных условий воздействия внешней среды в материальных структурах живых систем. Отражение есть способность различных материальных объектов принимать определенные воздействия внешней среды, "перерабатывать", "сохранять" и "использовать" их в последующих взаимодействиях с окружающей действительностью.

Адаптацию следует рассматривать и как диалектическую закономерность, связанную с процессом отражения. Считается, что любая отражательная деятельность в живой природе - прежде всего приспособительная деятельность [1,2].

На принципах адаптации и опережающего отражения развития организма строится спортивная тренировка.

Адаптация затрагивает все виды обмена веществ и ее направленность зависит от величины, интенсивности и характера раздражителя, а для спортивной деятельности - от тренировочной и соревновательной нагрузки. В связи с этим при рассмотрении воздействия на организм любого фактора тренировочной нагрузки убеждаемся в необходимости их вариативности, поскольку организм относительно быстро адаптируется к определенному раздражителю.

Если раздражитель достаточной силы действует на протяжении длительного срока и мало изменяется, то реакция живого организма на него со временем уменьшается.

Этот общебиологический принцип лежит и в основе реагирования организма спортсмена на регулярные спортивные тренировки.

Именно адаптация организма, проявляющаяся в его ответной реакции на неоднократно применяемый раздражитель, играет ведущую роль.

Тренировочная нагрузка вызывает ряд сдвигов в различных органах и системах, организм стремится к уравниванию своих переменных, адаптируясь к интенсивной мышечной работе вначале за счет срочных функциональных, а затем долговременных морфо-функциональных изменений.

Организм тем лучше адаптирован к выполнению тренировочной нагрузки, чем экономичнее движения, чем больший объем работы выполняется и чем меньше сдвиги в показателях кровообращения, дыхания и других функций.

В то же время наблюдается и снижение темпа роста спортивных результатов при использовании строго определенной нагрузки, определенных упражнений.

Как было отмечено, адаптация живой системы к раздражителям происходит тем быстрее, чем более постоянен и длительнее действует раздражитель. В связи с этим понятна большая вариативность нагрузки в современной тренировке (коэффициент вариации в годовом объеме нагрузки равен 34,9%).

Однако это относится не только к объему нагрузки, но и к интенсивности, подбору упражнений, их числу, последовательности, темпу выполнения движения, количеству повторений.

Таким образом, для получения внешней ответной реакции на воздействие тренировки нельзя создавать стандартные условия, к которым организм быстро адаптируется. Прежде всего это относится к тренировочной нагрузке - она не должна быть одинаковой по объему, интенсивности, количеству и последовательности выполнения упражнений. Вариативность же раздражителя по

силе, качеству, продолжительности его воздействия на живую систему обуславливает более выраженную реакцию организма, так как уменьшает возможность адаптации.

Изложенное свидетельствует о том, что адаптация - это процесс и результат, т.е. в самом этом явлении заключено противоречие. В связи с противоречивым характером явления адаптации - в его относительности и абсолютности, дискретности и инкретности. статичности и динамичности, - исследователи отмечают необходимость его глубокого философского осмысления.

ТАКИМ ОБРАЗОМ, ВОЗНИКАЕТ ДИАЛЕКТИЧЕСКОЕ ПРОТИВОРЕЧИЕ: С ОДНОЙ СТОРОНЫ, АДАПТАЦИЯ ОРГАНИЗМА К РАЗДРАЖИТЕЛЮ - НЕОБХОДИМОЕ УСЛОВИЕ ДЛЯ РАЗВИТИЯ, ВЫПОЛНЕНИЯ БОЛЬШЕЙ ИНТЕНСИВНОСТИ И, КАК ПРАВИЛО, ПО ОБЪЕМУ НАГРУЗКИ; С ДРУГОЙ СТОРОНЫ, С ПРИСПОСОБЛЕНИЕМ ПРОИСХОДИТ ОСЛАБЛЕНИЕ ОТВЕТНОЙ РЕАКЦИИ ОРГАНИЗМА И ВОЗНИКАЕТ НЕОБХОДИМОСТЬ В ВАРИАТИВНОСТИ ТРЕНИРОВОЧНОЙ НАГРУЗКИ. ЕЕ ПОВЫШЕНИИ.

Как известно, постепенное повышение нагрузки - один из важнейших принципов построения тренировочного процесса. Однако постепенное повышение нагрузки и сложности тренировочных упражнений целесообразно в определенных условиях и соответствующей мере. И жесткое следование этому принципу вступает в противоречие с другой закономерностью, а именно - адаптацией организма к нагрузке, к существующему раздражителю.

При строгом соблюдении принципа постепенного повышения нагрузки мы добиваемся приспособления организма к мало изменяющейся нагрузке. В связи с незначительными изменениями нагрузки организм относительно быстро приспосабливается к постоянному (ставшему как бы стационарным) раздражителю. Поэтому реакция его на такую нагрузку почти не изменяется, т.е. происходит адаптация. Поскольку адаптация произошла очень быстро, не возникло нужной реакции, не произошло необходимого развития. **ТАКИМ ОБРАЗОМ, ПРИНЦИП ПОСТЕПЕННОСТИ, ОЧЕНЬ ВАЖНЫЙ ДЛЯ ПРИСПОСОБЛЕНИЯ, В ДАННОМ СЛУЧАЕ ИГРАЕТ ОТРИЦАТЕЛЬНУЮ РОЛЬ.** Он невыгоден еще и потому, что после большой нагрузки для восстановления и сверхвосстановления организма требуется снижение ее в 2-3 раза.

Вариативное построение нагрузок не исключает полностью принципа постепенности как такового, однако его реализация происходит через адекватные нагрузки в соответствии с квалификацией, тренированностью спортсмена и его индивидуальными особенностями. И этот принцип построения нагрузки приемлем для любого вида спорта и спортсменов любой квалификации, что вполне объяснимо теоретически и подтверждается практикой.

В вариативном применении нагрузки формируются условия для меньшей адаптации организма спортсмена к раздражителю - тренировке, т.е. условиям для полного восстановления и сверхвосстановления организма, обеспечивающих лучшее развитие необходимых двигательных качеств. **ИТАК, ПРИНЦИП ПОСТЕПЕННОСТИ В ПОВЫШЕНИИ НАГРУЗКИ НИ В КОЕМ**

СЛУЧАЕ НЕЛЬЗЯ ИГНОРИРОВАТЬ. НО ЕГО СЛЕДУЕТ ПРИМЕНЯТЬ В СООТВЕТСТВИИ С ПРИНЦИПОМ АДАПТАЦИИ.

ПРОТИВОРЕЧИЯ В ПРОЦЕССЕ ОБУЧЕНИЯ ДВИЖЕНИЯМ И РЕАЛИЗАЦИЯ ДИДАКТИЧЕСКИХ ПРИНЦИПОВ. "Великая дидактика" Яна Амоса Каменского, 327 лет назад систематизировавшая его представления о наглядности, последовательности и природосообразности, а также его классноурочная система до сего времени выполняют упорядочивающие функции в образовании, обучении и воспитании.

Развившаяся из трудов Я. А. Каменского совокупность принятых ныне дидактических принципов научности обучения, доступности, систематичности, сознательности, наглядности и прочности усвоения знаний действует не только в сфере предметного обучения [18].

Дидактические принципы составляют методический базис спортивной педагогики. В их использовании при решении педагогических задач обучения движениям и при их совершенствовании есть весьма своеобразная специфичность, основные истоки которой в том, что педагогический процесс управления совершенствованием движений зависит от многих факторов. Успешность этого процесса обеспечивается сочетанием умений и навыков спортивного педагога со знанием механизмов становления и совершенствования двигательного навыка, с пониманием сложных взаимосвязей изменений, происходивших в различных функциональных системах организма занимающегося. В связи с этим возможности спортивного педагога в использовании общедидактических положений обуславливаются целой системой требований, связанных с необходимостью учета данных, накопленных представлениями других отраслей спортивной науки. Эта обусловленность практики спортивного педагога данными других научных дисциплин, нередко перерастающая у специалистов, занимающихся подготовкой высококвалифицированных спортсменов, в прямую зависимость, не могла не сказаться на определенном ослаблении позиций спортивной педагогики в решении теоретических проблем, связанных с управлением процесса обучения движениям и их совершенствованием.

По мнению И. П. Ратова [20] наименьшая прочность теоретической базы спортивной педагогики ощущается в проблемах обучения движениями, и прежде всего в вопросах, которые кажутся предельно ясными, а именно в вопросах специфики действия дидактических принципов при их приложении к совершенствованию движений. Теоретическая недоработанность состоит в том, что анализ условий действия принципов дидактики при решении специфических задач обучения движениями не содержит ни в одной из работ указаний на какую-либо специфичность, изложение теории ограничено почти текстуальным переносом положений о значимости принципов наглядности, сознательности, доступности, систематичности и последовательности из сферы предметного обучения в педагогику спорта.

Недоработанность проблем обучения движениям и их совершенствования состоит в том, что и в работах по спортивной педагогике процессы обучения и совершенствования рассматриваются слишком прямолинейно - без учета присущих им глубинных противоречий.

ПРОТИВОРЕЧИЯ, возникающие в процессе совершенствования движений, не учитываются и при разработке проблем теории физического воспитания и спортивной тренировки, хотя именно проблематика этой научной дисциплины при обобщении феноменологии процессов, обуславливающих совершенствование движений, составляющих внутреннее содержание и являющихся следствием двигательной деятельности, казалось бы, не может не поставить на обсуждение как саму обязательность этих **ПРОТИВОРЕЧИЙ**, так и условия их **ВОЗНИКНОВЕНИЯ И ПРЕОДОЛЕНИЯ**.

Констатация противоречий совершенствования движений, порождаемых самим развитием этого процесса [20], указала на необходимость прогнозирования не только положительных, но и, возможно, отрицательных последствий применения практически любых средств.

Вероятность перераспределения положительных эффектов в отрицательные требует более гибкого творческого подхода к оценке перспектив как различных методических приемов и технических средств, так и диапазонов их рационального применения. А из этого следует необходимость планирования путей преодоления **ПРОТИВОРЕЧИЙ** совершенствования в движениях и выработки для этого новых методических приемов и технических средств. Однако в этих работах не было показано ограничений, вызванных противоречиями, свойственными процессу обучения движениям и совершенствования их, сужающими диапазон использования дидактических принципов в физическом воспитании и спортивной тренировке.

В обстоятельной работе И. П. Ратова наряду с причинами, порождающими эти противоречия, рассматриваются и пути их преодоления [20]. При этом особый акцент делается на использовании новых, нетрадиционных методических путей, обусловленных проникновением в спортивную практику достижений научно-технической революции в первую очередь - тренажеров.

При этом предполагается, что управление изменениями компонентов внешней среды должно закономерно приводить к формированию спортивных движений с заданным комплексом свойств и требуемым результатом, а также к необходимым изменениям в деятельности функциональных систем организма.

НАПРАВЛЕНИЯ ПРЕОДОЛЕНИЯ ПРОТИВОРЕЧИЙ В ОБУЧЕНИИ ДВИЖЕНИЯМ. Использование специально созданных искусственных условий - решающий фактор и для преодоления закономерно возникающих отрицательных последствий от положительных в целом адаптационных реакций, связанных с повторением осваиваемых упражнений. Если в настоящее время тренирующие воздействия упражнений, лимитируемые этими адаптационными реакциями, обеспечиваются лишь на основе произвольно создаваемых вариаций режимов выполнения

упражнений, то использование спортивных снарядов, покрытий и тренажеров с переменными свойствами должно стать в будущем главным решающим фактором совершенствования движений.

Из изложенного следует, что поскольку количество тренировочных упражнений, выполняемых в искусственно созданных условиях управляемых вариаций (по отношению к естественным тренировочным попыткам) должно непрерывно возрастать в процессе спортобучения и тренировки, необходимо рассмотреть основные принципы построения тренировочного процесса, основанные на управляемых вариациях.

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ТРЕНИРОВОЧНОГО ПРОЦЕССА. Рассмотрим краткую характеристику основных принципов построения тренировочного процесса, определяющих основы тренажерного воспитания силы в процессе обучения и тренировки.

ПРИНЦИП ПОСТЕПЕННОГО ПОВЫШЕНИЯ НАГРУЗКИ - предусматривает постепенное увеличение нагрузки. Однако он имеет свои пределы целесообразности, ограниченные тем обстоятельством, что гимнаст не в состоянии много раз подряд выполнять тренировочное упражнение с большим напряжением мышц. В какой-то мере это компенсируется увеличением числа повторений "до отказа". При этом на заключительной фазе повторений степень мышечных напряжений будет максимальной как в субъективном восприятии, так и по объективным показателям [8,15], поскольку некоторые физиологические параметры функционирования мышц становятся такими же, как и при выполнении упражнений с максимальной нагрузкой (в работу вовлекается большое число двигательных единиц, увеличивается чистота нервно-эффektorной импульсации и пр.).

ПРИНЦИП ВАРИАТИВНОСТИ НАГРУЗКИ - предусматривает вариацию объемов, интенсивности, количества подходов, повторений и последовательности выполнения тренировочных упражнений.

А. Н. Воробьев [5] в вариативном применении нагрузки видит условия для меньшей адаптации организма спортсмена к раздражителю - тренировке, т.е. условия для полного восстановления и сверхвосстановления организма, обеспечивающих лучшее развитие необходимых двигательных качеств. При этом принцип постепенности в повышении нагрузки нельзя игнорировать, но применять его надо в соответствии с принципом адаптации.

ПРИНЦИП СОПРЯЖЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ - предусматривает тренировку с учетом функционального соответствия тренировочных упражнений осваиваемым движениям спортсмена [7, 14, 16], т.е. по принципу структурного сходства с гимнастическим элементом, запланированным для изучения, и поэтому она создает модель той межмышечной координации, которая в дальнейшем становится основой специализированного двигательного навыка [14, с. 22].

Система тренировки с использованием метода сопряженного воздействия предусматривает широкое применение технических средств и тренажеров, т.е. создание искусственных условий выполнения упражнений.

Требования к уровню и темпам развития двигательных качеств гимнастов сегодня столь высоки, а прогрессивность и перспективность метода сопряженного воздействия применительно к освоению статических упражнений в гимнастике столь очевидны, что вопросы реализации принципа сопряженного воздействия уже ряд лет исследуются в гимнастике, как в теоретическом, так и в практическом плане [10, 13, 14, 17].

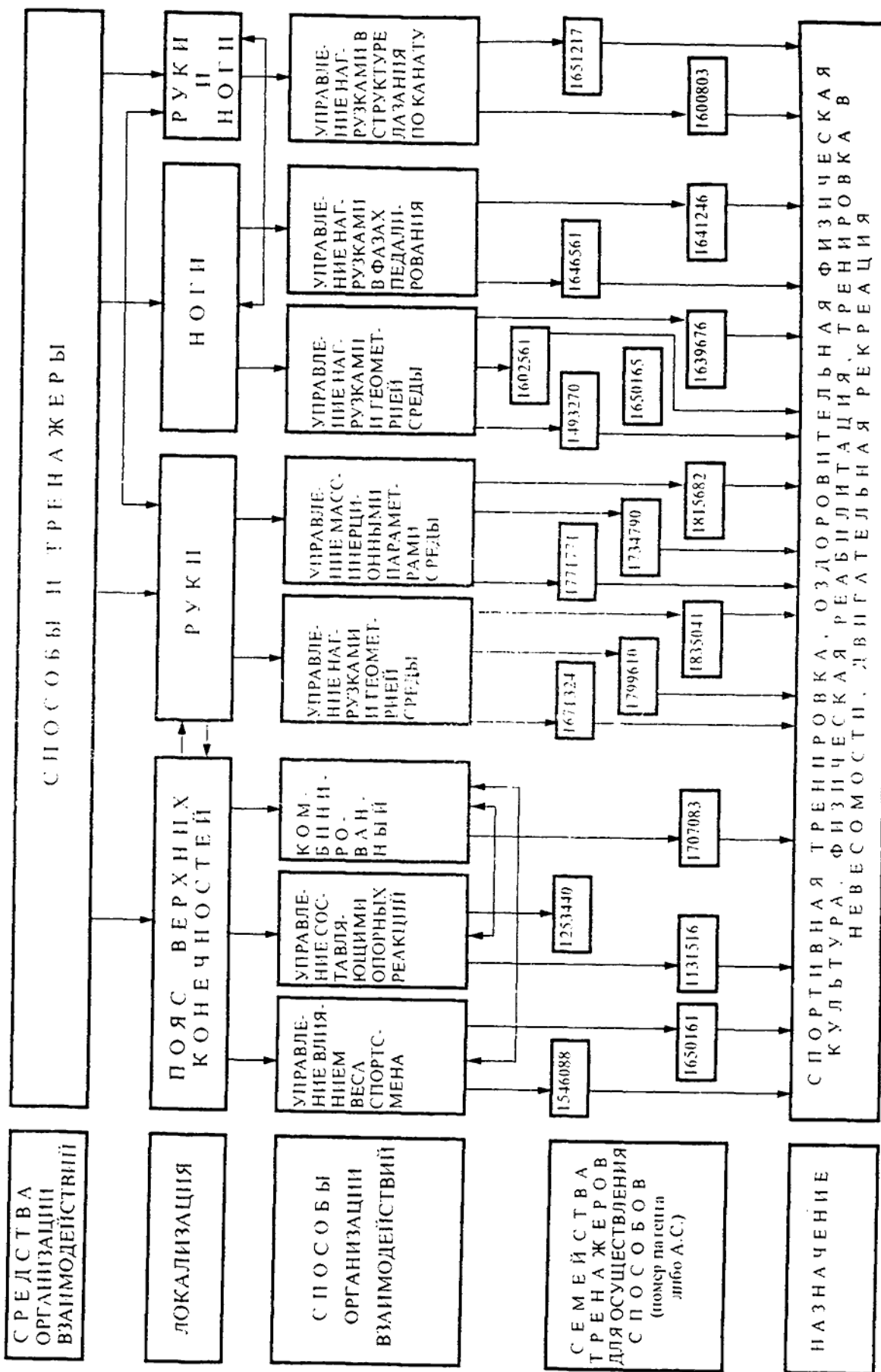
Сегодня процесс совершенствования методов специальной физической подготовки (как единственного действенного направления сокращения сроков ликвидации несоответствия между двигательными задачами, стоящими перед гимнастами, и их двигательным потенциалом, строится с учетом и принципа сопряженного воздействия. Реализация принципа в специальной физической подготовке гимнастов [14], обуславливая "интенсивную проработку мышц в структуре специального упражнения на всем диапазоне движения с учетом биомеханических условий их работы, составляет один из резервов интенсификации тренировочного процесса" [19, с. 63; 5, 8, 11].

ПРИНЦИП СОЧЕТАНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ МЫШЦ -основывается на эффективности смешанного (сочетание статического и динамических) режима силовой тренировки [4, 5, 7, 8, 12, 16].

Представление о позитивности этого принципа сложилось на основе данных специальных исследований, выполненных в период активного поиска путей сокращения сроков воспитания силы спортсменов, т.е. сокращение сроков достижения соответствия физических способностей спортсмена двигательным задачам, стоящим перед ними.

Работы отечественных исследователей, вскрывшие положительные и отрицательные стороны всех режимов работы мышц, объективно показали целесообразность оптимального сочетания изометрического, преодолевающего и уступающего режимов работы мышц в процессе воспитания специальной силы. Реализация принципа сочетания режимов работы мышц привела к разработке комбинированных "...динамо-статических упражнений, служащих в настоящее время одним из дополнительных факторов силовой подготовки спортсменов" [15, с. 168]. Использование таких упражнений обуславливает более длительное поддержание состояния активности нервно-мышечных единиц, что стимулирует процесс структурно-функциональной приспособительной перестройки и составляет основу воспитания силы. Эффективность принципа сочетания режимов работы мышц проявляется и в более длительном и устойчивом последствии тренировочной работы.

СИСТЕМНАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ТРЕНАЖЕРОВ



ПРИНЦИП ВАРИАТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ - основывается на положении и том, что для обеспечения условий получения максимальной ответной реакции на воздействие тренировочной нагрузки нельзя создавать стандартные условия, к которым организм быстро адаптируется.

Помимо этого, принцип вариативности подбора и использования технических средств создает позитивный психологический настрой, улучшает эмоциональное состояние занимающихся [12, с. 82]. Нами биомеханически обоснованы [17], на уровне изобретений созданы, системно классифицированы (см. рис.) и внедрены в спортивную, физкультурно-оздоровительную и практику физической реабилитации, а также в учебный процесс факультета физической культуры Симферопольского университета и ряда других вузов.

Особо следует отметить, что все 19 созданных тренажеров обеспечивают реализацию в спортивной тренировке рассмотренных принципов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Выполненный анализ философских и технических аспектов учебно-тренировочного процесса и их учет должны постоянно углубляться в системе спортивной педагогики. для чего должна и постоянно адаптироваться сама система вузовской и послевузовской подготовки специалистов спорта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анохин П. К. Биология и нейрофизиология условного рефлекса.- М.: Наука. 1968, - 50 с.
2. Анохин П. К. Философские проблемы биологии. - М.: Наука, 1967
3. Боген М. М. Методологические основы теории обучения двигательным действиям. - Теория и практика физической культуры, 1985, № 3. - С. 48-51
4. Верлошанский Ю. В. Основы специальной силовой подготовки в спорте. - М.: Физкультура и спорт, 1977. - 300 с.
5. Воробьев А. Н. Очерки по физиологии движений и спортивной тренировке. - М.: ФиС, 1977. - 40 с.
6. Друяной Л. А. Место закона в системе категорий материалистической диалектики. - М.: Высш. шк. - 1981. -160 с.
7. Дьячков В. М. Совершенствование технического мастерства спортсмена. - М.: ФиС, 1972. - 260 с.
8. Зациорский В. М. Физические качества спортсмена. - М.: ФиС, 1970. -260 с.
9. Ламарк Е. Б. Философия зоологии. - М.: 1937.
10. Лейкин М. Г. и др. Приспособление для развития силы.- Гимнастика, 1979, №2. - С. 40-45
11. Лейкин М. Г., Ефименко А. М. Управление структурой физиологических механизмов адаптации к мышечной деятельности с помощью специальных тренажеров // Труды Всесоюзной

конференции "Физиологические механизмы адаптации к мышечной деятельности". - Ленинград, 1984. -С. 103-105

12. Лейкин М. Г. Эргономическая биомеханика спорта и медицины (монография) - Симферополь: СГУ, 1991.- 208 с.

13. Лейкин М. Г. Избранные разделы гимнастики (учебник для ВУЗов). - Киев: УМК Минобразования Украины, 1992.- 208 с.

14. Менхин Ю. В. О главном принципе специальной физической подготовки гимнастов. - Теория и практика физической культуры, 1977, №4. - С. 20-24

15. Матвеев Л. П. Основы спортивной тренировки. - М.: ФиС, 1977. - 80 с.

16. Озолин Н. Г. Проблема практической реализации современной системы спортивной тренировки. - Теория и практика физической культуры, 1970, №11.- С. 45-46.

17. Научное обоснование и создание спортивно-оздоровительных тренажеров: докт. дисс. / М. Г. Лейкин. - Москва: РГАФК, 1994. -120 с.

18. Пономарев Н. И. К вопросу о законах функционирования и развития физической культуры. - Теория и практика физической культуры. 1985. № 1. - С. 5-8.

19. Ратов И. П. Перспективы преобразования системы подготовки спортсменов на основе использования технических средств и тренажеров.- Теория и практика физической культуры. 1976. № 19.- С. 60-70.

20. Ратов И. П. О противоречиях спортивного совершенствования.- Теория и практика физической культуры, 1970, № 4. - С. 30-38

21. Сеченов И. М. Рефлексы головного мозга.- М.: АН СССР, 1961. -350 с.

ВОЗРАСТНЫЕ ОСОБЕННОСТИ БИОДИНАМИЧЕСКИХ СТРУКТУР В ОНТОГЕНЕЗЕ

Л. К. Сакун, А. Г. Сорокина, В. И. Семин

Пластические процессы и энергетические резервы организма в 17-25 летнем возрасте более мобильны чем у людей с инволюционными преобразованиями, однако только молекулярные взаимоотношения на клеточном и субклеточном уровне определяют истинный физиологический возраст и возможности всего организма. Как известно, главной задачей физической активности человека в периоде от 60 до 75 лет является создание устойчивых взаимосвязей, так называемой "двигательной потребности" и закрепление их в "подсознательном уровне", именно на Д-кортикальном уровне построения движения (Бальсевич В. К., Запорожанов В. А., 1987). [1] Известно что "сознание" способно высвечивать только один из уровней от А до Е групп нервных клеток при формировании координационной структуры двигательного навыка (Бернштейн Н. А., 1947, 1966, 1990 и др.). Вынужденное переключение с уровня на уровень (при разнообразных пограничных состояниях, патофизиологических, экстремальных и др.) повышает эффективность аналитико-синтетической способности мозга в контроле двигательного навыка и одновременно одерживает творческую активность работы с символами (Дурья А. Р., 1957, Милнер П., 1973 и др.). Структуры нервных клеток регулируют гуморальные показатели, но также тонко зависят от продуктов метаболических реакций. Отмечено, что поддержание тонуса скелетных мышц и функциональных систем организма необходимо на верхних границах возрастных норм (Карпман В. М., 1987). Перенапряжение любого характера не безобидны и безвредны, в связи с истощением арсенала компенсаций в физиологически пограничном возрасте (Бальсевич В. К., Запорожанов В. А., 1987). [1] Использование естественных механизмов сенсомоторной коррекции позволяет обеспечить реализацию "двигательного навыка", отличающегося от патологической избыточной кинезии - достаточной осмысленностью (Галушко Г. И., 1968; Бернштейн Н. А., 1991 и др.).

Общепризнанно, что постнатальное умственное развитие ребенка до 1 года находится в прямой зависимости от скорости освоения двигательных навыков (физического развития). Сформированный к 3-х летнему возрасту сенсомоторный профиль совершенствуется на протяжении жизни, причем, его качественные переходы зависят от молекулярных взаимодействий гипоталамо-гипофизарной системы с периферическими органами и тканями. Скорость утраты двигательных навыков от уровня Е (символических координаций) к уровню А (палеокинетических регуляций) может быть пропорциональна разрушению "двигательной потребности" с одной стороны на основе "молекулярных издержек" с другой. Таким образом, анализ и коррекция должны иметь качественную индивидуальную базу данных онтогенеза, в филогенезе резервы столь значительны, что полная их реализация не наступает. Творческую активность человека сдерживает вынужденное переключение ЦНС (центральной нервной системы) с уровня на уровень (сверху-вниз) только в связи с нарушением тех или иных функций. Например, гиподинамия может

проявляться болями различной локализации, чаще вызывая нарушения незаметно для молодого возраста и выраженный регресс в постинфарктном, постгипертоническом - ишемическом поражении ЦНС и других состояниях у человека. На современном уровне контроля межмолекулярных взаимодействий удастся проводить соответствующую фармакотерапию [12], однако использование даже биологически активных добавок в питании не заменяет движения. Необходимо своевременно зафиксировать скорость параметаболических реакций (Голубев А. Г., 1996), исследовать индивидуальные темпы развития и накопления различных веществ этого ряда, чередуя экспресс-анализы с более трудоемкими, но высокоинформативными научными методами исследования (Сидякин В. Г., 1986) [11]. Поэтому актуальна ранняя диагностика на молекулярном уровне в комплексе с оценкой координационных взаимосвязей в нервно-мышечном аппарате всего организма. Способность к самостоятельной реализации потенциальных возможностей людей взаимосвязана с уровнем образования и культурной традицией.

Формирование знаний о факторах и условиях жизни ведущих к продлению активного участия во всех сферах творческого труда человека актуально в связи с появлением проблемы пенсионеров и пожилых людей, оставленных без помощи. Посредством овладения методикой физической культуры, противоречие высокого уровня развития ЦНС в филогенезе с нарушениями на "фоновых", не высвечиваемых "сознанием" уровнях в онтогенезе, является преодолимым.

В экспериментальных исследованиях НИИ общей патологии и патофизиологии РАМН обнаружено, что цена адаптации к физической нагрузке выше в скелетной мышце по сравнению с миокардом, резервы защиты которого позволяют сохранить функцию на исходно высоком уровне [13]. У человека становится очевидной индивидуализация физических упражнений или средств повышения уровня тренированности.

Волнообразно возникающие инерционные и реактивные силы превращаются в ЦНС человека из помех в полезные. Постепенно высшие отделы центральной нервной системы становятся более концентрированными и число ошибочных ответов значительно уменьшается (Сидякин В. Г., 1986) [11].

ЛИТЕРАТУРА

1. Бальсевич В. К., Запорожанов В. А. Физическая активность человека. -К. "Здоровье", 1987. - 224с.
2. Бернштейн Н. А. О построении движений. -М. Медгид, 1947.
3. Бернштейн Н. А. Физиология движений и активности. -М. Наука, 1990.- 494 с.
4. Бернштейн Н. А. О ловкости и ее развитии. -М. ФиС., 1991. -28с.
5. Лурия А. Р. Двигательный анализатор и проблемы корковой организации движений. //Вопросы психологии, 1957. -№2.
6. Милнер П. Физиологическая психология. -М.: Мир, 1973. -647с.
7. Спортивная медицина. / Уч-к для институтов ФК. Под ред. Карпмана В. М., М. ФиС., 1987.- 305 с.

8. Галунько Г. И. К вопросу управления движениями в легкоатлетических метаниях. Материалы III съезда общества психологии СССР., т. III, АПН СССР, Москва, 1968.
9. Голубев А. В. Биохимия пространства и времени (теломеры, теломеризы и длительность существования клеточных популяций и многоклеточных организмов). //Биохимия, 1996. -т.61. - С.2045.
10. Голубев А. В. Случайность необходимости, инициация транскрипции, индукция дифференцировки и необходимость случайности. //Биохимия, 1996. -т.61. -С.1303.
11. Сидякин В. Г. Влияние глобальных экологических факторов на нервную систему. /Киев.: Наукова думка, 1986. -159с.
12. Ершов Ю. А., Плетнева Т. В. Механизмы токсического действия неорганических соединений. -М.: Медицина, 1989. -15с.
13. Сазонтова Т. Г., Голанцова Н. Е., Меерсон Ф. З., Архипенко Ю. В. Противоположное влияние адаптации к физической нагрузке на миокард и скелетную мышцу. Са-транспортирующая система саркоплазматического ретикулума и ферменты антиоксидантной защиты. // Бюлл. экспериментальной биологии и медицины, 1996. –№6. –С.623-628.

**СРОДСТВО ГЕМОГЛОБИНА К КИСЛОРОДУ И СОСТОЯНИЕ
НЕКОТОРЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВНУТРИЭРИТРОЦИТАРНОГО
МЕТАБОЛИЗМА У СПОРТСМЕНОВ-ВОЛЕЙБОЛИСТОВ
ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИНТЕНСИВНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ НАГРУЗОК**

М. И. Попичев

В последние годы значительно возрос интерес исследователей к изучению влияния метаболических процессов в тканях на их функционирование при различных состояниях организма, в том числе под воздействием интенсивных физических нагрузок [5,6]. В литературе имеются сообщения о том, что у спортсменов наблюдаются изменения в показателях липидного обмена плазмы крови в зависимости от характера физических нагрузок [7]. Вместе с тем, практически не изученным остается вопрос о состоянии эритроцитарного метаболизма и кислород-транспортной функции гемоглобина под воздействием интенсивных физических нагрузок в зависимости от уровня квалификации спортсменов.

В связи с этим, целью настоящей работы явилось изучение сродства гемоглобина к кислороду, содержания гликозилированной формы гемоглобина, глюкозы и активности гексокиназы в эритроцитах спортсменов различной квалификации при воздействии интенсивных физических нагрузок.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Материалом для исследований служили гемолизаты эритроцитов спортсменов-волейболистов высокой квалификации (МС и КМС) и низкой квалификации в возрасте 21-22 лет в соревновательном периоде тренировочного годового цикла. Кровь брали из локтевой вены до и после физической нагрузки. Контрольную по возрасту и полу группу составили 9 человек, не занимающихся спортом.

Гемолизаты эритроцитов получали по методу Драбкина [9]. Концентрацию гемоглобина в гемолизатах определяли унифицированным гемоглобинцианидным методом. Концентрацию глюкозы определяли арсено-молибдатным методом [3]. Уровень содержания гликозилированного гемоглобина определяли спектрофотометрически по реакции с тиобарбитуровой кислотой [1]. Активность гексокиназы изучали спектрофотометрически, используя в качестве индикатора крезоловый-красный [4]. Сродство гемоглобина к кислороду изучали путем построения кривых кислородной диссоциации оксигемоглобином [8]. Во всех опытах использовали свежeweделенный гемоглобин.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ. Результаты исследований свидетельствуют о том, что у спортсменов высокой квалификации концентрация гемоглобина в эритроцитах на 7,3 % выше по сравнению с контрольной группой. У спортсменов низкой

квалификации концентрация гемоглобина практически не меняется и остается на том же уровне под воздействием тренировочной нагрузки.

При определении уровня содержания в эритроцитах глюкозы и гликозилированного гемоглобина были получены данные, представленные в таблице 1.

Таблица 1.

Содержание глюкозы и гликозилированного гемоглобина в эритроцитах у спортсменов различной квалификации до и после физической нагрузки

Обследуемые группы	Глюкоза ммоль/л	Гликозилированный гемоглобин, %
Контрольная группа	5,1 + 0,07	3,98 + 0,46
Спортсмены низкой квалификации		
До нагрузки	6,52 + 0,47 *	6,26 + 0,06 *
После нагрузки	10,05 + 0,54 *,**	7,13 + 0,14 *,**
Спортсмены высокой квалификации		
До нагрузки	7,9 + 0,33 *	6,30 + 0,33 *
После нагрузки	9,34 + 0,36 *,**	9,87 + 0,24 *,***

Примечание:

* - достоверность различий показателей контрольной группы и группы спортсменов

** - достоверность различий показателей под влиянием физической нагрузки

*** - достоверность различий показателей у спортсменов высокой и низкой квалификации

Установлено, что у спортсменов низкой квалификации до нагрузки уровень глюкозы в эритроцитах на 28% выше по сравнению с контрольной группой. После воздействия однократной тренировочной нагрузки наблюдается повышение уровня глюкозы в эритроцитах в 1,5 раза относительно исходного состояния. У спортсменов высокой квалификации также прослеживается достоверное увеличение уровня глюкозы в эритроцитах как до тренировочной нагрузки, так и после ее воздействия.

При изучении показателя эритроцитарной гексокиназы выявлено достоверное повышение ее активности независимо от уровня квалификации спортсменов. Так после однократной тренировочной нагрузки у низкоквалифицированных спортсменов активность фермента становится в 3,4 раза выше по сравнению с исходным состоянием. У высокотренированных спортсменов до нагрузки активность внутриэритроцитарной гексокиназы в 2,5 раза выше по сравнению с контрольной группой, а после тренировочной нагрузки становится в 1,8 раза выше по сравнению с исходным состоянием (табл.2).

Таблица 2

Уровень эритроцитарной гексокиназы и сродство гемоглобина к кислороду (P50) у спортсменов различной квалификации до и после физической нагрузки

Обследуемые группы	Активность гексокиназы	P50, мм рт.ст.
Контрольная группа	5,1 + 0,07	3,98 + 0,46
Спортсмены низкой квалификации		
До нагрузки	0,89 + 0,015 *	26 + 0,7
После нагрузки	3,03 + 0,07 *,**	29 + 0,8 *,**
Спортсмены высокой квалификации		
До нагрузки	1,64 + 0,06 *,***	28 + 0,7 *,**,***
После нагрузки	2,9 + 0,08 *,**	30 + 0,7 *,**

Примечание: обозначения те же, что в таблице 1.

Увеличение активности гексокиназы свидетельствуют об интенсификации гликолитических реакций в эритроцитах спортсменов как низкой, так и высокой квалификации. У спортсменов высокой квалификации отмечено заметное преобладание в интенсивности пусковой реакции гликолиза до воздействия нагрузки по сравнению со спортсменами низкой квалификации.

Сродство гемоглобина к кислороду изучали путем построения кривых кислородной диссоциации, определяя величину полунасыщения гемоглобина кислородом (P50, мм рт.ст). В таблице 2 представлены данные, свидетельствующие о снижении сродства гемоглобина к кислороду у спортсменов под воздействием тренировочной нагрузки. До воздействия нагрузки сродство гемоглобина к кислороду у спортсменов низкой квалификации находится на том же уровне, что и в контрольной группе. И только у спортсменов высокой квалификации наблюдается достоверно меньшее сродство гемоглобина к кислороду по сравнению с контрольной группой.

Из этих данных следует, что у спортсменов высокой квалификации в исходном состоянии изменения функционального показателя гемоглобина являются более устойчивыми и становятся еще более выраженными после воздействия тренировочной нагрузки, тогда как у спортсменов низкой квалификации изменения сродства гемоглобина к кислороду происходят только под воздействием нагрузки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Данилова Л. А., Лопатина Н. И. Колориметрический метод определения гликозилированных гемоглобинов // Лаб. дело - 1986, N5, С.28.
2. Иржак Л. И. Гемоглобин и их свойства. - 1975.
3. Колб В. Г., Камышников В.С. Клиническая биохимия. - 1976.

4. Кочетов Г. А. Практическое руководство по энзимологии. - 1980.
5. Толкачева Н. В. Альбумин-зависимый транспорт липидов при различных состояниях организма. Дисс. ... д-р биол.наук. - 1991.
6. Толкачева Н. В., Левачев М. М., Медведев Ф. А. и др. Особенности связывания сывороточным альбумином жирных кислот и продуктов их перекисного окисления при интенсивной мышечной работе // Косм. биол. и авиакосм. медицина. - 1989, N5, С.55.
7. Толкачева Н. В., Левачев М. М., Лупинович В. Л., Николенко О. В. Липидный состав эритроцитарных мембран и плазмы крови у спортсменов // Физиология человека. - 1992. - Т.18. - N3. - С.104-108.
8. Шорохов Ю. А. Спектрофотометрический метод определения кривой диссоциации оксигемоглобина в кювете десатуратора // Физиол. журн. - 1974. Т. IX, N4. - С.654-657.
9. Drabkin D. A simplified technique for large scale cristallisation of myoglobin and haemoglobin in the crystalline // Arch. Biochem. - 1949, v.21. - P.224.

ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЬНЫХ СПОСОБНОСТЕЙ ШКОЛЬНИКОВ

В. И. Беликов, кандидат педагогических наук, доцент

Гармоническое развитие подрастающего поколения возможно при условии развития физических качеств, которые в различных жизненных ситуациях проявляются в процессе выполнения разнообразных двигательных действий. Эффективность выполнения двигательных действий находится в тесной взаимосвязи с техническими возможностями человека.

Наряду с общими биологическими закономерностями, обуславливающими развитие человека в онтогенезе, важное значение имеют условия его деятельности, социальная среда и методы воспитания. Поэтому весьма перспективны исследования, в которых рассматривается формирование двигательных функций человека в связи с условиями его трудовой и спортивной деятельности.

Одной из главных задач физического воспитания школьников является гармоническое развитие выносливости, быстроты, силы, гибкости и ловкости. В последние годы взгляды специалистов и ученых на динамику развития этих качеств, а также формы, методы и средства их совершенствования пересмотрены и значительно изменились. Решение поставленных задач осложняется тем, что все дети имеют разные способности к двигательной деятельности. В связи с этим возникает необходимость объективной оценки двигательных способностей школьников с целью выбора адекватных средств для их развития и разработка научно-обоснованных рекомендаций по этим вопросам является одной из важных задач.

Исследования показали, например, что в детском и подростковом возрасте имеются благоприятные предпосылки для воспитания быстроты движений, что объясняется возрастными особенностями организма детей и высокой возбудимостью у них иннервационных механизмов, регулирующих деятельность анализатора, а также значительной интенсивностью обменных процессов. На этапе предварительной и начальной многолетней подготовки юных спортсменов особенно важно решить вопрос комплексного совершенствования способностей, необходимых для конкретного вида спорта. Основным подходом в разработке комплекса средств, направленных на всестороннюю физическую подготовку юных спортсменов, считают педагогический эксперимент, организованный в различных вариантах. Для юных легкоатлетов 13-14 лет предлагаются следующие варианты соотношения средств тренировочного воздействия, которые апробировались в эксперименте:

1. 50% времени основной части занятия использовались для воспитания быстроты, по 25% - силы и выносливости;
2. 50% - воспитание силы, по 25% - быстроты и выносливости,

3. 50% - выносливости, по 25% - быстроты и силы.

В первой группе, где отдается предпочтение воспитанию быстроты, используются средства скоростного характера: бег на короткие отрезки с ходу, по инерции, по ступенькам, семенящий бег, в упоре, через барьеры на месте, а также прыжки с разбега и т.п.

Контрольные испытания показали, что тренировка с преимущественной направленностью на воспитание быстроты у юных спортсменов 13-14 лет создавала положительные предпосылки для развития силы и выносливости, т.е. оказывала более разносторонний эффект.

У детей 7-11 лет имеются более благоприятные возможности для воспитания скорости движений, особенно увеличения частоты движений и темпа бега, чем у детей 12-15 лет. Это обусловлено естественным ростом быстроты движений, а у детей 12-15 лет увеличением скорости бега, главным образом, в результате развития скоростно-силовых качеств и мышечной силы. На занятиях с детьми 8-11 лет быстроту целесообразно воспитывать преимущественно путем использования тренировочных средств, направленных на повышение частоты и скорости движений. У детей 12-15 лет быстроту следует воспитывать с помощью тренировочных средств, направленных на повышение скоростно-силовых качеств и мышечной силы занимающихся. Эффективными средствами воспитания быстроты, на этапе предварительной спортивной подготовки, являются подвижные и спортивные игры по упрощенным правилам, бег на коротких отрезках дистанций, эстафеты, прыжки, гимнастические и акробатические упражнения. Основным методом воспитания быстроты является комплексный метод, сущность которого состоит в систематическом использовании подвижных и спортивных игр, игровых упражнений, разнообразных упражнений скоростного и скоростно-силового характера. Необходимо стремиться к максимальному увеличению темпа движений, не требующих проявления больших мышечных усилий, при сохранении по возможности оптимальной амплитуды движений и максимального расслабления мышц, не участвующих в работе.

На этом этапе наибольший темп естественного прироста наблюдается у юных спортсменов в показателях, характеризующих скоростно-силовые способности. За три года эта способность увеличивается у мальчиков на 44, у девочек - на 34%. Упражнения скоростно-силовой направленности занимают одно из главных мест в учебно-тренировочном процессе. По объему они могут быть большими как у мальчиков, так и у девочек.

Другой объем нагрузки планируется при воспитании скоростных способностей. Темп прироста за три года составляет у мальчиков 10%, у девочек 15%. Объем физических упражнений для девочек 8-9 лет будет значительно больше, чем для мальчиков. В это время у мальчиков наблюдается значительное уменьшение показателей, характеризующих скоростные способности, а, следовательно, объем нагрузок этой направленности снижается. Однако, это снижение

незначительное и временное. Уже в возрасте 9-10 лет объем нагрузок для мальчиков и девочек может быть одинаковым.

В 10-11 лет мальчики в темпах развития быстроты значительно опережают девочек. Таким образом, воспитание быстроты движений является для них одной из основных задач учебно-тренировочного занятия на этапе предварительной подготовки.

Для воспитания быстроты применяется комплексный метод тренировки, включающий подвижные и спортивные игры, игровые упражнения, а также комплексы специальных подготовительных упражнений, направленных на воспитание физических качеств, играющих важную роль при специализации в избранном виде спорта.

Примером может служить следующий комплекс специальных подготовительных упражнений, способствующих воспитанию быстроты: бег с высоким подниманием бедра (темп средний или высокий) - 2-3 серии по 10-25 раз; бег из различных стартовых положений; старт из упора с отставлением ноги назад или в сторону; бег после доставания подвешенного мяча; бег приставными шагами, продвигаясь боком; бег скоростным шагом, бег по малому кругу с наклоном туловища внутрь круга.

На этапе начальной спортивной подготовки у мальчиков прирост скоростных способностей равен 26%, у девочек - 11%. Эти способности, как видно из показателей, проявляют свою активность несколько больше у мальчиков, что и позволяет применять для них большее количество упражнений скоростного характера. Исключение составляет возраст 12-13 лет, когда используется средний объем нагрузок, так как темп прироста составляет всего 2%. У девочек большой объем физических упражнений данной направленности допускается в 12-13 лет. Чтобы избежать стабилизации уровня быстроты, возникновения "скоростного барьера" и повысить эффективность тренировочного процесса на этапе углубленной тренировки, целесообразно использовать следующие методы воспитания скоростных качеств: метод повторного применения скоростно-силовых упражнений, структурно-тождественных соревновательному упражнению (метод повторных динамических усилий), при котором предельное силовое напряжения выполняется путем перемещения относительно легкого груза с максимальной скоростью; метод повторного выполнения основного скоростного упражнения, в котором специализируется юный спортсмен, в максимально быстром темпе, с сохранением оптимальной амплитуды движения (в стандартных условиях); метод выполнения скоростного упражнения в облегченных условиях.

На этом этапе у юношей, кроме большого объема скоростно-силовых упражнений, допускается такой же объем упражнений для воспитания скоростных способностей. В последующие годы развитие скоростных способностей стабилизируется, что свидетельствует о завершении формирования нервных центров, обеспечивающих быстроту движений. У девочек этот период наступает несколько раньше - в 15-16 лет, на протяжении последующих лет темп прироста с каждым годом уменьшается (табл. 1).

Таблица 1

Темп развития физических способностей у юных спортсменов на этапе углубленной тренировки, % (по Л. В. Волкову, 1984).

Развиваемые	Возраст, лет			
	15-16		16-17	
	юноши	девушки	Юноши	девушки
скоростно-силовые	7.0	5.0	-2.0	0
быстрота	9.0	-2.0	0	-2.0
гибкость	0	-3.0	-3.0	-3.0
ловкость	1.0	1.0	4.0	-3.0
выносливость	-5.0	-5.8	5.0	-1.6

Особый интерес представляют закономерности проявления и развития взаимосвязи физических качеств, антропометрических показателей и технической подготовленности в беге с максимальной скоростью у детей школьного возраста. Учет этих закономерностей (количественная и качественная оценки) позволяет осуществить дифференцированный подход к выбору и распределению средств тренировки в рамках школьной программы и внеклассной работы.

Исследованиями установлено следующее: максимальная скорость бега на 20 м. со старта и 20 м. с хода (результат в спринтерском беге определяется, в основном, двумя факторами: способностью достичь высоких величин максимальной скорости и способностью к стартовому ускорению) с возрастом повышается за счет длины беговых шагов. Длина беговых шагов на всех возрастных этапах как у мальчиков, так и у девочек увеличивается за счет удлинения нижних конечностей. Темпы роста результатов в беге со старта и с хода - у мальчиков значительно выше (97,3 и 95,3%), чем у девочек (84,4 и 75,6%). Наибольшие темпы прироста показателей наблюдаются в возрастной группе 16-17 лет как у мальчиков, так и у девочек. Способность к ускорению в беге у мальчиков характеризуется волнообразной динамикой. Более высокие показатели имеют мальчики в 10-11 и 14-15 лет. У девочек способность к ускорению практически стабильна при некотором ухудшении ее в 16-17 лет.

Двигательные навыки в беге на 20 м со старта у мальчиков, по сравнению с девочками, в большей мере зависят от уровня развития физических качеств.

Взаимосвязь между двигательными навыками и физическими качествами, проявленными в беге на 20 м с хода, носит иной характер: у девочек эта взаимосвязь более выражена, чем у мальчиков. Факторный анализ показал наибольшую значимость показателей силы для всех школьников обоего пола. Этот фактор доминирует во всех возрастных группах, кроме группы девочек 10-11 лет, где большой процентный вклад имеет фактор роста и веса (табл.2).

Ритмовой коэффициент в беге на 20 м с хода и 20 м со старта увеличивается неравномерно как у мальчиков, так и у девочек до 14-15 лет.

Таблица 2.

Распределение доминирующей факторной нагрузки (по В.И.Беликову, 1985).

Возраст, лет	Доминирующий фактор	Наименование признака
10-11	Росто-весовой	Рост
12-13	Весо-ростовой	Абсолютная сила мышц
14-15	Весо-силовой	Абсолютная сила мышц
16-17	Весо-силовой	Относительная сила бедра

В возрасте 16-17 лет у детей обоего пола наблюдается достоверное уменьшение показателя ритмового коэффициента ($P < 0,05$). Темпы роста этого показателя у девочек 14-15 лет выше, чем у мальчиков того же возраста.

По результатам исследования изменчивости движений при соответствующей соразмерности выполнения упражнений в беге составлена таблица, характеризующая специфические двигательные данные для занятий бегом (табл.3).

Таблица 3.

Нормативы, характеризующие специфические двигательные показатели детей (по В.И.Беликову, 1985).

№ п/п	Характеристика движений	Нормативы
1.	Длина шага, см	157 и выше
2.	Частота бегового шага шаг/см	4,0 и выше
3.	Бег 30м. с высокого старта	5,4 и лучше
4.	Прыжок в длину с места, см	165 и выше

Предлагается вариант подготовки с соразмерным включением в урок физической культуры дополнительных упражнений, способствующих развитию физических качеств и техники (15-18%) от всего урока, что позволит улучшить результаты по показателям физической и технической подготовленности до уровня, установленного в таблицах нормативов, и положительно сказывается на результатах в беге в рамках учебной программы средней школы.

К ВОПРОСУ О ПРОФЕССИОГРАММЕ УЧИТЕЛЯ ФИЗИЧЕСКОГО ВОСПИТАНИЯ

В. В. Шишлаков, канд. пед. наук

Современная общеобразовательная школа постоянно повышает требования к разносторонности знаний и гармоничному развитию подрастающего поколения. А это значит, что прежде всего этим требованиям должен отвечать сам учитель. Перед соответствующими учебными заведениями стоит задача не только подготовить специалиста-предметника, но и человека своего времени, который всем складом своих интересов, увлечений, умений сможет быть для учащихся образцом для подражания и иметь моральное основание призывать их к физическому и духовному совершенству.

Разработка и уточнение профессиограммы учителя физического воспитания имеет своей целью создание научно обоснованной структурной схемы процесса формирования профессионально значимых качеств личности учителя, педагогических умений и навыков на факультетах физической культуры в системе высшего педагогического образования.

В соответствии с задачами и функциями деятельности школьного учителя физического воспитания в профессиограмме рассматриваются личностные, теоретические, методические и организационные требования, предъявляемые к учителю физического воспитания на современном этапе функционирования средней школы. Одной из основных обязанностей современного учителя является совершенное владение проблемным обучением. Поэтому главный акцент в подготовке учителя переносится на формирование его научного мышления, на пробуждение интереса к новым идеям, знаниям, открытиям, проявляющим основные закономерности развития умственной и физической деятельности ребенка, помогающие целенаправленно вмешиваться в формирование его личности.

Активизация познавательной деятельности студентов, обучение их умению пользоваться полученными знаниями на практике, воспитание самостоятельности в получении новых знаний и в решении педагогических задач должно найти отражение как в определении содержания, так и при разработке форм и методов учебной работы в высшей школе.

Структурный анализ педагогической деятельности учителя, проводимый в последние годы рядом психологов, педагогов и методистов показывает, что она складывается из набора тесно взаимосвязанных между собой функций, условно разделяемых на функции, выполнение которых обеспечивает образование и воспитание учащихся, формирование их личности, и функции, связанные с осуществлением учебно-воспитательного процесса. В первой группе основной является **информационная** функция, обеспечивающая вооружение учеников знаниями, приобщение их к научной информации, привитие им социальных и специальных умений. Эта функция передачи знаний тесно связана с целым рядом других функций учителя, и прежде всего с **развивающей**,

направленной на формирование умственных способностей школьников, их познавательной активности и самостоятельности. Как информационная, так и развивающая функции осуществляются учителем не только с образовательной, но и с воспитательной целью.

Обучая, учитель осуществляет идейное воспитание, формирует у школьников отношение к природе, обществу, труду, к физическому воспитанию. Там, где вырабатываются те или иные мотивы и складываются те или иные отношения, там, как правило, обеспечивается ориентировка в окружающем мире. Поэтому этот аспект деятельности логичнее всего назвать ориентационной функцией. В процессе осуществления информационной, развивающей и **ориентационной** функций учитель физического воспитания опирается на ранее полученные знания, умения и навыки своих учеников, мобилизуя их жизненный опыт, познавательные и двигательные способности, то есть осуществляет еще одну, так называемую, **мобилизационную** функцию. Осуществление мобилизационной функции тесным образом связано с осуществлением единства теории и практики.

Исходя из этого, знание и понимание перечисленных выше функций позволяет учителю научно обоснованно осуществлять функции второй группы — конструктивную, организаторскую, коммуникативную и гностическую.

Конструктивная функция включает в себя способность учителя физического воспитания конструировать содержание предмета, создавать учебно-материальную базу для преподавания, проектировать свою деятельность и деятельность учащихся в процессе обучения и воспитания.

Организаторская функция — организацию учителем своей собственной деятельности и деятельности ученического коллектива.

Коммуникативная функция предполагает установление отношений с коллективами и людьми, а так же связей с другими предметами.

Современная школа требует от учителя творческого подхода к своему труду. Это возможно лишь при условии постоянного пополнения научного и методического багажа при умении анализировать процесс и результат собственной работы, опыт коллег по профессии. Эта **гностическая** функция пронизывает всю деятельность современного учителя.

Содержание перечисленных функций учительской деятельности раскрывается в системе знаний и умений, которыми обязан владеть учитель и которые должны составлять основу его работы и основу учебного материала программы обучения студентов факультетов физической культуры.

КОНСТРУКТИВНАЯ функция требует от учителя следующих знаний, умений и навыков:

- глубокого и четкого понимания содержания предмета, его идейной основы, знаний возрастных особенностей учащихся;

- умение осуществлять дидактическую переработку материала наук по физической культуре в материал учебного предмета в соответствии возрастных особенностей учащихся, с учетом требований школьной программы и материальных условий школы;

- знание и умение осуществлять тематическое поурочное планирование с определением частных задач, содержания и образовательно-воспитательной цели каждого урока, умения использовать разнообразные упражнения, подобрать к урокам разнообразный дидактический материал (наглядные пособия, инвентарь и т.д.);

- умение конструировать уроки разных типов по содержанию и структуре, а также внеклассные и внешкольные мероприятия;

- умение выбрать рациональную структуру занятий и определить их композиционное построение;

- умение программировать собственную структуру действий, а также структуру действий ученика при подаче новой информации и подобрать систему упражнений для обучения новым двигательным умениям, навыкам, умение предупредить возможные затруднения у школьников при выполнении упражнений, обеспечить страховку и помощь, объективно оценить выполняемые упражнения;

- умение оборудовать спортивный зал, площадку и т.д.;

- умение оптимально выбрать место проведения урока и свое место в процессе его проведения;

- умение научить школьников составлять комплекс утренней гимнастики, самостоятельно работать над элементами техники, тактики, развития двигательных качеств.

КОММУНИКАТИВНАЯ функция:

- знание и умение рационально использовать приемы управления как классным коллективом, так и отдельными учениками;

- умение быстро устанавливать деловые взаимоотношения в различных ситуациях деятельности;

- владение агитационными, лекторскими умениями и навыками и т.д.

Таким образом, профессиограмма учителя физического воспитания отражает особенности педагогического процесса в данной области. Построенная на основе четырехкомпонентной структуры педагогической деятельности (конструктивный, организаторский, коммуникативный и гностический компоненты), она отражает специфическую для учителя физического воспитания функцию — реализацию знаний и педагогических умений учителя через его личную двигательную активность. Оптимальный уровень физической подготовленности учителя обеспечивает полноценную реализацию его методической подготовки. Характер последней

создает условия для сохранения качества учебно-воспитательного процесса при естественном возрастном снижении физических данных педагога.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аргунов А. С. О требованиях к учителю физической культуры и его профессиональной подготовке. - Тез. докл. Всесоюз. науч. конф. "Основы профессионального мастерства учителя физической культуры". - Ульяновск, 1976.- С. 7-9.

2. Балбенко С. Ю. Личность учителя физической культуры и условия его формирования в высшей школе: Автореф. дис. ... канд. пед. наук. - Одесса, 1973. - 19 с.

3. Выдрин В. М. Модель специалиста широкого профиля. - Ж. "Теор. и практ. физ. культуры", 1974, № 8.- С. 58-61.

4. Ильин Е. П. Методические указания к контролю и самооценке уровня профессионального мастерства учителя физической культуры. - Л.: ЛГПИ, 1983. - 18 с.

5. Лупандина Н. А. Требования к квалификационной подготовленности учителя физической культуры. - Ж. "Физ. культура в школе", 1978, № 9.- С. 19-21.

6. Моторин В. М. О структуре профессиональной деятельности учителя физической культуры. - Ж. "Теор. и практ. физ. культуры", 1980, № 5 - С. 45-47.

7. Рыков Н. А., Щербаков А. И. Профессиограмма учителя биологии средней общеобразовательной школы. Методическая разработка. - Л.: ЛГПИ 1971.

8. Щербаков А. И., Барашник В. П., Рабинович В. А. Профессиограмма учителя химии средней общеобразовательной школы. - М., 1981.

СИСТЕМНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ПОДГОТОВКИ В ДЕТСКО-ЮНОШЕСКОМ СПОРТЕ

В. А. Бекетов, кандидат педагогических наук, профессор; С. В. Погодина

Спорт как социальное явление, возникший на заре развития человеческого общества, в своей многовековой истории наглядно демонстрировал эффективность процесса воспроизводства жизнедеятельности в условиях всех общественно-экономических формаций. Особую значимость он приобретает в наше время. По сути дела, спорт в современном обществе призван восполнить порожденный цивилизацией дефицит двигательной активности каждого из нас.

Специфической особенностью спорта является его выраженное соревновательное начало, в частности, результат в предстоящих соревнованиях, который необходимо достичь. Следовательно, соревнование представляет собой социальный феномен, без которого не может быть и речи о спорте.

Современный спорт отличается исключительно высокими спортивными достижениями, бурным ростом рекордов, постоянным ужесточением конкуренции в условиях соревновательной борьбы. Следует отметить, что путь к высшему спортивному мастерству доступен лишь избранным. В то же время систематическими тренировками в том или ином виде спорта охватываются все желающие.

Следовательно, в спортивной деятельности реализуются две взаимосвязанные цели. Во-первых, собственно спортивная цель, содержанием которой является достижение индивидуально возможных высоких спортивных результатов. Во-вторых, социально значимая цель. Для большинства занимающихся спорт следует рассматривать с позиций главных человеческих ценностей, а именно: подготовку к плодотворной трудовой деятельности за счет укрепления здоровья, духовного и физического совершенствования в естественных условиях многолетней спортивной тренировки. Что касается спортивных результатов, то они выступают как стимулирующий ориентир, без которого спорт потерял бы свою деятельностную сущность.

Многосложность и многофункциональность современного спорта в организационном плане определяет представление спортивной деятельности на четырех основных уровнях - массовый, резервный, высших достижений, коммерческий (в том числе и профессиональный), каждый из которых несет определенную функцию и решает спектр как общих, так и сугубо специфических задач.

Анализ уровня высшего спортивного мастерства во многих видах спорта свидетельствует о том, что успехов на международной арене могут достигнуть лишь те спортсмены, которым была обеспечена планомерная и всесторонняя подготовка в детском, подростковом и юношеском возрасте. Следовательно, многолетний путь спортсмена от новичка до зрелого атлета, способного

успешно решать самые сложные задачи в спорте высших достижений, представляет собой два больших, последовательно осуществляемых этапа: детско-юношескую и взрослую подготовку. Первый этап призван обеспечить надежную базу резервов в сборную команду страны и региональные коллективы.

Проблемы, связанные с повышением эффективности подготовки спортивных резервов, приобретают в настоящее время особую остроту и актуальность в связи с негативными тенденциями, имеющими место в практической деятельности тренеров, работающих с детьми, подростками, юношами, девушками. От того, насколько качественно и бережно осуществляется подготовка юных спортсменов, во многом зависит полноценное пополнение сборных команд. Следует также дополнить, что отличительной чертой деятельности тренера в детско-юношеском спорте является тот неоспоримый факт, что он, реализуя главную цель - подготовку надежного резерва, принимает самое активное участие в формировании и становлении юного спортсмена, а также в его всестороннем физическом развитии.

Из многих факторов, существенно влияющих на эффективность работы в резервном спорте, следует выделить главные: системная организация учебно-тренировочного процесса, широкое внедрение научных разработок в практику подготовки юных спортсменов, объективный контроль за учебно-тренировочным процессом, должная исполнительная дисциплина тренера.

Следует отметить, что в детско-юношеском спорте, где непосредственно приходится иметь дело с целостным растущим организмом, необходимо прежде всего знание основных свойств, закономерностей функционирования и развития, присущих именно ему как целостному образованию. Это обусловлено широким внедрением системных воззрений и рассмотрение организма как биосоциальной системы определенного уровня, а в двигательном аспекте - как двигательной функциональной системы.

Для системной организации важно правильно сформулировать главную цель детско-юношеской подготовки, построить четкую модель спортсмена-резервиста, определить преимущественную направленность подготовки юных спортсменов на различных этапах многолетней спортивной тренировки, выявить оптимальную совокупность средств, методов, организационных форм и условий тренировки на этапах, определить основные методические положения для построения учебно-тренировочного процесса.

Главной целью резервного спорта является достижение юными спортсменами такого оптимального уровня подготовленности, который позволил бы им успешно решать задачи в спорте высших достижений в наиболее благоприятных возрастных границах для конкретного вида специализации.

Основными критериями, определяющими целостную модельную характеристику спортсмена-резервиста, являются следующие:

1. крепкое здоровье;
2. природные задатки, способности, неординарные решения, самобытность, индивидуальность;
3. сильная, выраженная и устойчивая мотивация;
4. высокий уровень разносторонней технической подготовленности;
5. нравственная устойчивость личности.

На различных этапах многолетней детско-юношеской подготовки решаются специфические для каждого этапа стратегические задачи.

На этапе начальной подготовки (3 года) следует выделить такие направления:

1. формирование мотивов спортивной деятельности, воспитание у юных спортсменов любви и преданности к избранному виду спорта;
2. всесторонняя физическая подготовка, направленная на укрепление здоровья занимающихся;
3. обучение элементарным основам техники избранного вида спорта.

На этапе специализированной подготовки (4-5 лет) направленность учебно-тренировочного процесса носит относительно иной характер. Здесь следует решать следующие задачи:

- становление технического мастерства;
- разносторонняя физическая подготовка;
- формирование у юных спортсменов положительных свойств личности.

Преимущественная направленность подготовки юных спортсменов на этапе спортивного совершенствования (3 года) определяется следующими критериями:

1. технико-тактическое совершенствование, углубленная специализация и индивидуализация;
2. специальная физическая подготовка;
3. формирование у юных спортсменов устойчивых черт спортивного характера.

Исходя из главной цели и преимущественной направленности подготовки юных спортсменов на различных этапах многолетнего учебно-тренировочного процесса, необходимо четко представить структурное построение соревнований. Путь здесь один: построение системы соревнований юных спортсменов должно осуществляться в строгом соответствии с системой целей их многолетней подготовки.

В свою очередь, система соревнований обуславливает направленность, характер и содержание учебно-тренировочного процесса. Никакие внеплановые соревнования, включая международные, не могут послужить поводом для изменений в учебно-тренировочном процессе, для иного нормирования соревновательных и тренировочных нагрузок, для отхода от главного стратегического направления детско-юношеской подготовки. При соблюдении таких условий мы

не будем иметь "скороспелых" юных чемпионов высокомасштабных соревнований, которые, как часто бывает в практике, становятся непригодными для спорта высших достижений.

В процессе многолетней спортивной тренировки следует четко реализовывать ее принципы, которые приобретают большую жизненную силу при правильной разработке методических требований с учетом особенностей возрастного развития детей, подростков, юношей, девушек. Методические требования к подготовке юных спортсменов, вытекающие из принципов спортивной тренировки, удачно раскрыты профессором М. Я. Набатниковой (1982). К ним относятся: целевая направленность по отношению к высшему спортивному мастерству; эффект утилизации качеств в зависимости от возрастных особенностей юных спортсменов; соразмерность развития физических качеств юных спортсменов; ведущие факторы на различных этапах многолетней подготовки; перспективное опережение в формировании и становлении технического мастерства. Тренеру следует строго руководствоваться принципами, реализуемыми в работе с юными спортсменами при постановке задач, выяснении средств и методов их успешного решения.

Следует обратить внимание на объективный контроль в процессе подготовки юных спортсменов, а также определить критерии оценки педагогического труда тренера.

В группах начальной подготовки основным критерием оценки является сохранение контингента занимающихся. На этапе специализированной подготовки - уровень технического мастерства юных спортсменов. На этапе спортивного совершенствования - результат выступления в ответственных юношеских соревнованиях.

Ключевой проблемой учебно-тренировочного процесса является воспитательная работа с юными спортсменами. Осуществляя воспитательную работу, тренер должен отчетливо представлять, что его деятельность включает в себя систему целенаправленных педагогических мероприятий по подготовке учащихся к жизни. Эти мероприятия предусматривают не только передачу занимающимся знаний, накопленного опыта, но и воспитание определенных отношений к окружающей действительности в ее самых разнообразных сферах проявления. Важное место занимает формирование у юных спортсменов устойчивых навыков здорового образа жизни, что является немаловажным для воспитания у них положительных черт характера современного человека.

Спорт по праву можно назвать школой мужества, а спортивные площадки, залы, стадионы - полигонами морально-волевой закалки и здорового образа жизни занимающихся. Систематическое посещение занятий, постоянное преодоление трудностей тренировочных будней и напряженной соревновательной борьбы, упорная и самоотверженная работа над совершенствованием технико-тактических действий, неукоснительное подчинение распоряжениям тренера - все это способствует воспитанию у юных спортсменов лучших человеческих качеств.

СОДЕРЖАНИЕ

О ДОСТАТОЧНЫХ УСЛОВИЯХ СУЩЕСТВОВАНИЯ НЕНУЛЕВОГО ПРЕДЕЛА ДЛЯ РЕШЕНИЯ БЕСКОНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ ЛИНЕЙНЫХ АЛГЕБРАИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ В. Н. Чехов, С. О. Папков	3
ОБ ОДНОМ СВОЙСТВЕ ПАРЫ ВЗАИМНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ В. И. Мягков	10
О ВПИСЫВАНИИ ПРАВИЛЬНОГО n -СИМПЛЕКСА В ОБОБЩЕННЫЙ n -КУБ О. И. Рудницкий	13
ПРОСТРАНСТВО ГРАНИЧНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ДЛЯ ЭРМИТОВЫХ ОПЕРАТОРОВ С РАЗЛИЧНЫМИ ДЕФЕКТНЫМИ ЧИСЛАМИ. А. Ю. Поречнов, И. И. Карпенко	16
О БАЗИСНЫХ ИНВАРИАНТАХ ШЕСТОЙ СТЕПЕНИ ГРУПП F_4 И B_N А. А. Кобец	24
ДАТЧИКИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ОСНОВЕ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЕНОК ФЕРРИТ-ГРАНАТОВ С. В. Дубинко	30
МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ОБМЕННО СВЯЗАННОЙ СИСТЕМЕ МАГНИТНЫХ МОМЕНТОВ С. Н. Полулях	41
ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ НА МАГНИТНЫЕ СОСТОЯНИЯ ЛЕГКОПЛОСКОСТНЫХ АНТИФЕРРОМАГНЕТИКОВ Ю. Н. Мицай, Ю. А. Фридман, Г. Э. Байрамалиева	53
ОСОБЕННОСТИ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ В ЛЕГКОПЛОСКОСТНЫХ ФЕРРОМАГНЕТИКАХ ПРИ НАЛИЧИИ МЕХАНИЧЕСКИХ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ Ю. Н. Мицай, Ю. А. Фридман, О. В. Кожемяко	63
ОПТИЧЕСКИЕ ВИХРИ ПОЛЯ МАЛОМОДОВОГО ВОЛОКНА И ИХ УГЛОВОЙ МОМЕНТ А.В. Воляр, А.В. Фадеева, М.В. Абрамова	72
ОРБИТАЛЬНЫЙ УГЛОВОЙ МОМЕНТ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В МНОГОМОДОВЫХ ВОЛОКНАХ К. Н. Алексеев, А. Н. Алексеев, А. В. Воляр, Ю. А. Фридман	84

О МЕХАНИЗМЕ ЭЛЕКТРОКАТАЛИТИЧЕСКОЙ ДЕСТРУКЦИИ И ПЕРОКСИДОМ ВОДОРОДА	91
Е. Д. Першина, С. В. Костык, Н. А. Грошенко	
ГОМОГЕННО-ГЕТЕРОГЕННЫЕ ПЕРЕХОДЫ ПРИ РЕАКЦИИ $KMnO_4$ С H_2O_2 В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ. НАЧАЛЬНАЯ СТАДИЯ РЕАКЦИИ	97
С. В. Костык, Е. Д. Першина, Г. Н. Шадрин, Н. А. Грошенко	
ЗАЩИТНЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ СИСТЕМЫ МАГНИТООПТИЧЕСКИЙ МОДУЛЯТОР – МАГНИТНЫЙ НОСИТЕЛЬ	109
Н. И. Карпенко	
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОЛЬТАМПЕРОМЕТРИЧЕСКОЙ КОМПЬЮТЕРИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ АНАЛИЗА ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ	112
Н. А. Сурова	
СИНТЕЗ, ИЗУЧЕНИЕ БИОЛОГИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОИЗВОДНЫХ N-АЦЕТИЛМУРАМОИЛ-L-АЛАНИЛ-D-ИЗОГЛУТАМИНА	119
А. Е. Земляков	
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОБЛЕМЫ РАДИОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ В БИОЛОГИИ И МЕДИЦИНЕ	128
В. Г. Сидякин, А. М. Сташков	
ГЕМОСТАТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ НИЗКОИНТЕНСИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	137
В. И. Малыгина, В. Ф. Русяев	
ИЗМЕНЕНИЕ ЦИТОХИМИЧЕСКОГО СТАТУСА ЛЕЙКОЦИТОВ КРОВИ КРЫС С РАЗЛИЧНЫМ УРОВНЕМ ДВИГАТЕЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ ПРИ ДЕЙСТВИИ ПемП СНЧ	141
Е. Ю. Грабовская, Н. А. Темуриянц, А. М. Ефименко, Е. В. Мельниченко, В. В. Ширяев, Б. И. Шанахин	
АНАЛИЗ ПРОГНОСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЭЭГ ЧЕЛОВЕКА ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ОПЕРАТОРСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ	147
И. М. Доровлёв, В. Г. Сидякин, А. В. Сухинин, П. В. Шинкаревский, Н. П. Янова	
ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАФИЧЕСКИХ И ПСИХОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЧЕЛОВЕКА С РАЗНЫМ ТИПОМ ЭЭГ	156
И. М. Доровлёв, А. М. Куличенко, И. Н. Литвинчук, В. Г. Сидякин, А. В. Сухинин, П. В. Шинкаревский	
ВОЗРАСТНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЭЭГ-ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭМОТИВНОГО ТЕКСТА	161
И. М. Доровлёв, А. М. Куличенко, И. Н. Литвинчук, В. Г. Сидякин, П. В. Шинкаревский	

ПУТИ АДАПТАЦИИ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ К НАГРУЗКАМ АЭРОБНО-АНАЭРОБНОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ Д. В. Сышко, В. Ф. Гружевская	165
ХАРАКТЕРИСТИКА РЕАКЦИЙ НЕЙРОНОВ ТЕМЕННОЙ АССОЦИАТИВНОЙ КОРЫ КОШКИ НА ЭЛЕКТРОСТИМУЛЯЦИЮ НИЖНЕЧЕЛЮСТНОЙ ВЕТВИ ТРОЙНИЧНОГО НЕРВА И. И. Коренюк, Е. Ю. Бруннер	167
ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ ПАРАМЕТРОВ РЕАКЦИИ НЕЙРОНОВ ПОЛЯ 5 В УСЛОВИЯХ МНОГОКРАТНОЙ РИТМИЧЕСКОЙ СТИМУЛЯЦИИ НИЖНЕЧЕЛЮСТНОЙ ВЕТВИ ТРОЙНИЧНОГО НЕРВА И. И. Коренюк, Е. Ю. Бруннер	182
ФИЛОСОФСКИЕ И ИНЖЕНЕРНЫЕ АСПЕКТЫ ПЕДАГОГИКИ СПОРТА М. Г. Лейкин	193
ВОЗРАСТНЫЕ ОСОБЕННОСТИ БИОДИНАМИЧЕСКИХ СТРУКТУР В ОНТОГЕНЕЗЕ Л. К. Сакун, А. Г. Сорокина, В. И. Семин	204
СРОДСТВО ГЕМОГЛОБИНА К КИСЛОРОДУ И СОСТОЯНИЕ НЕКОТОРЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВНУТРИЭРИТРОЦИТАРНОГО МЕТАБОЛИЗМА У СПОРТСМЕНОВ-ВОЛЕЙБОЛИСТОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИНТЕНСИВНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ НАГРУЗОК М. И. Попичев	207
ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЬНЫХ СПОСОБНОСТЕЙ ШКОЛЬНИКОВ В. И. Беликов	211
К ВОПРОСУ О ПРОФЕССИОГРАММЕ УЧИТЕЛЯ ФИЗИЧЕСКОГО ВОСПИТАНИЯ В. В. Шишлаков	216
СИСТЕМНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ПОДГОТОВКИ В ДЕТСКО-ЮНОШЕСКОМ СПОРТЕ В. А. Бекетов, С. В. Погодина	220