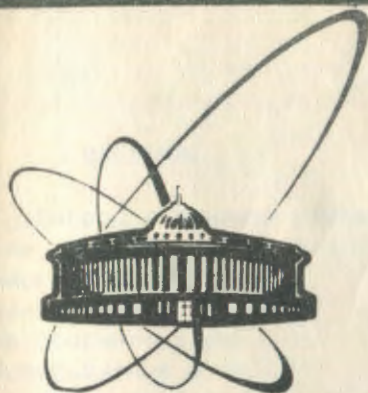


90-137



объединенный  
институт  
ядерных  
исследований  
дубна

Д 183

P19-90-137

В. И. Данилов

О ВОЗДЕЙСТВИИ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ  
НА БИОЛОГИЧЕСКИЕ ОБЪЕКТЫ

Примесные атомы как рецепторы магнитных полей

Направлено в журнал "Биофизика"

1990

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Вопрос о влиянии слабых магнитных полей /МП/ на биологические объекты дискутируется в научной литературе на протяжении многих лет <sup>/1-5/</sup>. Однако отношение к этому направлению исследований в среде научной общественности к настоящему времени еще не сформировалось. В значительной мере это связано с тем, что используемые в экспериментах МП были по своей энергии на много порядков меньше тепловой энергии атомов и молекул, составляющих биологические системы.

Незнание основных характеристик МП, которые могли бы быть ответственными за эффективное влияние на биологические объекты, как правило, приводило в различных лабораториях к плохой воспроизводимости экспериментов.

В этой ситуации выбор параметров и характера изменений МП во времени, ответственных за эффективное воздействие МП, является нетривиальной задачей. Для ее решения должна быть создана надежная экспериментальная база на современном научно-техническом уровне, необходимо понимание первичных механизмов воздействия МП на биологические объекты. Так, например, группой американских ученых /Либов и другие <sup>/6-7/</sup> / выдвинута гипотеза о влиянии комбинации постоянного и переменного МП на транспорт ионов через мембраны. Выбор частоты переменного во времени МП был не случайным, а базировался на частоте циклотронного резонанса, связанной с определенной величиной постоянного МП при движении в нем различных ионов. Успехи в решении задач, связанных с магнитобиологией, будут определяться в дальнейшем научной стратегией, основанной на представлениях о физических механизмах первичного взаимодействия МП с некоторыми элементарными структурами, выступающими в качестве биологических магниторецепторов, входящих в объем живых клеток.

## 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Из соображений физического характера следует, что необходимым условием, без выполнения которого невозможно осуществить какое-либо воздействие МП на биологические объекты, является отличие плотности мощности энергии МП от нуля.

Это условие в простейшем виде для сред, у которых  $\mu$ -магнитная проницаемость не зависит от МП, определяется выражением

$$\frac{dW^{Mn}}{dt} = \mu_0 \mu H \left[ \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial t} \right], \quad /1/$$

где  $W^{Mn} = \mu_0 \mu H^2 / 2$  - плотность энергии магнитного поля,  $\mu_0$  - магнитная постоянная,  $\mu$  - магнитная проницаемость биологических объектов, близкая по величине к 1.

$$H = \sqrt{H_x^2 + H_y^2 + H_z^2}, \quad H_x = H_x(x, y, z, t), \quad H_y = H_y(x, y, z, t),$$

$H_z = H_z(x, y, z, t)$  - соответствующие компоненты магнитного поля, зависящие как от координат  $x, y, z$ , так и от времени  $t$ .

Если теперь рассмотреть с этой точки зрения геомагнитное поле /ГМП/, а его напряженность состоит из постоянного  $H_0$  и зависящего от времени  $H(t)$  полей, то условие /1/ с учетом однородности магнитного поля Земли /МПЗ/ по пространственным координатам может быть представлено как

$$dW^{Mn} / dt = \mu_0 \mu H \partial H / \partial t = H \partial V / \partial t, \quad /2/$$

где  $V = \mu_0 \mu H$  определяет индукцию ГМП.

Из уравнения Максвелла

$$\text{rot } \vec{E} = - \partial \vec{V} / \partial t \quad /3/$$

с учетом /2/ следует, что внутри объема живых клеток в ее структурах разных геометрических размеров, не исключая размеров атома, возникает вихревое электрическое поле /ВЭП/, напряженность которого на окружности радиуса  $r$  определяется из /3/ как

$$E_\phi = - \frac{r}{2} \partial V / \partial t. \quad /4/$$

В этой работе будет рассматриваться один из возможных первичных механизмов влияния МП на биологические объекты, которые будем рассматривать как некоторые квантовые системы, состоящие из слабовзаимодействующих между собой атомов.

Само же взаимодействие базируется на "связанных" зарядах, совершающих периодическое движение вокруг ядер атомов и взаимодействующих с ВЭП, которое индуцируется внутри объема живых клеток меняющимися во времени МП, в соответствии с соотношением /4/. При этом электроны некоторых атомных образований могут изменять свою энергию и совершать переходы между энергетическими уровнями вида

$$\Delta W_{ik} = W_i - W_k,$$

/5/

где индексы  $i$  и  $k$  характеризуют соответствующий набор квантовых чисел, определяющих положение энергетических уровней.

Такая постановка задачи соответствует рассмотрению в общем виде вероятности переходов под действием возмущения, зависящего от времени<sup>/10/</sup>.

Так как энергетические переходы в атомах пропорциональны их энергии ионизации ( $\Delta W_{ik} \sim W_{\text{иониз.}}$ ), то предполагаемыми рецепторами, воспринимающими изменения ГМП, могут быть примесные атомы. Их отличительной особенностью от других атомов является крайне малая энергия ионизации ( $W_{\text{иониз.}} \approx kT$ ) и большое время жизни.

Возможность переходов под действием ГМП с одного энергетического уровня на другой будем рассматривать для примесных атомов, которые находятся под действием ГМП, состоящего из постоянного поля  $B_0 \leq 10^{-4}$  Тл и переменного  $B = B(t)$ , не превышающего по величине нескольких процентов от  $B_0$ .

Колебания ГМП во времени  $B(t)$ , а только они, в принципе, могут быть ответственными за ввод энергии в какую-либо квантовую систему, наиболее подробно рассмотрены в работах<sup>/8,9/</sup>.

На основании наблюдений установлено, что верхней границей диапазона геомагнитных пульсаций является частота около 5 Гц.

### 3. ПРИМЕСНЫЕ АТОМЫ КАК РЕЦЕПТОРЫ МП

Примесные центры могут быть двух типов - донорные и акцепторные. Связанные с этими центрами электрон у донора или "дырка" у акцептора могут двигаться в поле с потенциалом  $V = \frac{e}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \frac{1}{r}$ , где  $\epsilon_0$  - электрическая постоянная,  $\epsilon$  - диэлектрическая проницаемость среды, а  $r$  - расстояние от ядра атома примеси.

При такой форме потенциала электрон или дырка находятся в водородоподобном состоянии. Основными параметрами, характеризующими примесные атомы, являются: радиус орбиты

$$r = r_B \cdot \epsilon m^*/m^*$$

и энергия ионизации

$$W_{\text{иониз.}} = W_{\text{иониз.}}^H \cdot \frac{1}{\epsilon^2} \frac{m}{m^*}, \quad /6/$$

где  $m^*$  - эффективная масса электрона,  $m$  - масса электрона.

Наличие примесных атомов в квазикристаллической структуре живых клеток приводит к тому, что в зоне запрета между основ-

ным состоянием донора и минимальным уровнем полосы проводимости, а также между основным состоянием акцептора и максимальным уровнем валентной полосы будет располагаться водородоподобный энергетический спектр.

Энергия примесных атомов в МП может быть определена из выражения

$$W_{\text{пр. ат.}}^{\text{МП}} = \frac{1}{2} \chi_{\text{пр. ат.}} B^2, \quad /7/$$

где  $B$  - индукция МП, например ГМП, а  $\chi_{\text{пр. ат.}}$  - объемная магнитная восприимчивость газа водородоподобных доноров или акцепторов.

Расчеты показывают, что в области слабых МП ( $\mu_B H \ll kT$ ) полная магнитная восприимчивость, например донорных примесей, будет равна <sup>/11/</sup>

$$\chi_{\text{пр. ат.}} = n_d \left( \frac{\mu_B}{kT} - \frac{e^2 \langle r^2 \rangle}{6m} \frac{m}{m^*} \epsilon^2 \right), \quad /8/$$

где  $n_d = n_+ + n_-$ ,  $n_+$  - концентрация донорных электронов с положительным спином,  $n_-$  - с отрицательным спином, а  $N_d = n_0 + n_+ + n_-$  - полная концентрация доноров,  $n_0$  - концентрация доноров, у которых нет электрона, а среднеквадратичный радиус определяется в соответствии с <sup>/12/</sup> как

$$\langle r^2 \rangle = r_B^2 \frac{5n^2 + 1 - 3\ell(\ell + 1)}{2}, \quad /9/$$

$r_B$  - радиус атома водорода по Бору,  $n$  - главное квантовое число,  $\ell$  - орбитальное квантовое число.

Предельное значение диэлектрической проницаемости определим из условия равенства энергии связи примесного атома при  $n = 1$  и  $m^*/m = 1$  тепловой энергии, по порядку величины равной  $kT$ :

$$\epsilon_{\text{пред.}} \approx \sqrt{\frac{W_{\text{ион.}}^H}{kT}} \approx 25. \quad /10/$$

В связи с последующим рассмотрением зеемановского расщепления энергетических уровней возникает важный с физической точки зрения вопрос о количестве атомов, образующих некоторую минимальную по размерам структуру, входящую в состав живых клеток, в которой возможно образование соответствующих энергетических зон с размещением в них примесных центров, обеспечивающих вокруг их ядер локализацию электронов и положительно заряженных дырок.

На этот вопрос можно найти ответ в работе <sup>/14/</sup>, в которой на основе экспериментальных и теоретических исследований по-

казано, что "... основные характеристики массивного тела почти полностью сформированы уже в агрегациях, содержащих менее  $10^3$  атомов...". Если предположить, что образование из  $10^3$  атомов является необходимым для получения зонной структуры энергетических спектров, то в нем на размерах  $\sim 10 \text{ \AA}$  можно разместить не более одного донорного или акцепторного атома. А так как в живых клетках согласно оценкам содержится около  $10^{12} - 10^{14}$  атомов, то внутри объема живых клеток может быть не менее  $10^9 - 10^{11}$  примесных центров.

Если теперь провести сравнительную оценку, то  $\chi_{\text{пара. пр. ат.}} \approx 10^{-26} \text{ Дж/Тл}^2$  и при  $\epsilon = 10$   $\chi_{\text{диа. пр. ат.}} = 10^{-27} \text{ Дж/Тл}^2$ , то есть диамагнитная часть магнитной восприимчивости может составлять до 10% от парамагнитной.

Для дальнейшего рассмотрения диамагнитной момент примесного атома среды представим с помощью /8/ в следующем виде:

$$M_{\text{диа. пр. ат.}} = -\chi_{\text{диа. пр. ат.}} B_0 = -J_{\phi} \cdot S_{\text{эф.}} = -e \frac{\omega_L}{2\pi} \pi r_{\text{эф.}}^2 \quad /11/$$

В соотношении /11/  $\omega_L = v_{\text{доб.}} / r_{\text{эф.}} = \frac{eB}{2m}$  является частотой Лармора,  $J_{\phi} = e\omega_L / 2\pi$  - орбитальный ток за счет добавочной скорости  $v_{\text{доб.}}$ ,  $r_{\text{эф.}}$  - эффективный радиус орбиты, который определяется как

$$r_{\text{эф.}} = \epsilon \sqrt{\frac{2}{3} \langle r^2 \rangle}$$

Физический смысл формулы /11/ состоит в том, что при наличии однородного поля  $B_0$  электрон или дырка примесного атома получает дополнительную скорость  $v_{\text{доб.}}$  к своей исходной  $v_0$ . При этом движение "связанного заряда" происходит при постоянных  $n, \ell$  и по неизменному радиусу  $r = r_{\text{эф.}}$ , а частота  $\omega_L$  не зависит ни от угла наклона орбиты по отношению к направлению поля, ни от радиуса орбиты, ни от начальной скорости. Это позволяет сделать оценку изменения кинетической энергии электрона или дырки примесного атома среды при вариациях магнитного поля от  $B_0$  до  $B_0 + \Delta B$  следующим образом:

$$\begin{aligned} \Delta W_{\text{кин.}} &= m \left[ v_0 + \frac{e(B_0 + \Delta B)}{2m} r_{\text{эф.}} \right]^2 / 2 - m \left[ v_0 + \frac{eB_0}{2m} r_{\text{эф.}} \right]^2 / 2 = \\ &= m v_0 \Delta v_{\text{доб.}} / 2 + e^2 r_{\text{эф.}}^2 [2B_0 \Delta B + (\Delta B)^2] / 8m, \end{aligned} \quad /12/$$

где изменение скорости электрона определено как

$$\Delta v_{\text{доб.}} = e \Delta B r_{\text{эф.}} / 2m.$$

Соотношение /12/ после простых преобразований первого члена, который больше второго на несколько порядков, можно переписать в следующем виде:

$$\Delta W_{\text{кин.}} = \mu_B \Delta B \sqrt{\frac{5\pi^2 + 1 - 3\ell(\ell + 1)}{3}}, \quad /13/$$

где  $\mu_B$  - магнетон Бора, а знак " $\pm$ " отражает равновероятность вращения электрона или дырки примесного атома среды по и против часовой стрелки, то есть  $v_0 = \pm v_0$ .

Эти выводы справедливы для  $\Delta B/B_0 \ll 1$ , что имеет место в биосфере нашей планеты.

Достаточно наглядное физическое представление о характере движения по круговой орбите электрона примесного атома можно получить из классического рассмотрения возникновения диамагнетизма одноэлектронного атома при учете изменения МП во времени, когда  $\partial B/\partial t \neq 0$  /13/.

В этом случае в пространстве возникает вихревое электрическое поле с азимутальной составляющей  $E_\phi$ , определяемой соотношением /4/. Тогда при движении по орбите постоянного радиуса  $r = r_{\text{эф}}$  будет меняться азимутальный импульс электрона  $p_\phi$  как

$$dp_\phi/dt = \frac{er_{\text{эф}}}{2} \frac{\partial B}{\partial t}, \quad /14/$$

где  $B = B_z$ . А после интегрирования по  $t$  имеем

$$p_\phi = p_0 + \frac{er_{\text{эф}} \Delta B}{2} = m(v_0 + \Delta v), \quad /15/$$

где

$$\Delta v = \frac{er_{\text{эф}} \Delta B}{2m}.$$

Тогда для изменения энергии при вариации МП на  $\Delta B$  найдем при пренебрежении квадратичными членами по  $\Delta v/v_0$ , что

$$\Delta W_{\text{кин.}} = \frac{p_\phi^2 - p_{0\phi}^2}{2m} \approx mv_0 \Delta v/2, \quad /16/$$

то есть полученное уже ранее выражение для основной части энергии в /12/.

Для этого движения характерно то, что поперечный импульс и радиус орбиты остаются неизменными, так как изменение центростремительной силы компенсируется такой же добавкой от силы Лоренца с точностью до поперечного порядка по  $\Delta v/v_0$ . При этом

кулоновская сила  $F_K = e^2 / r_{эф.}^2$ , определяющая притяжение электрона или дырки к ядру, или любая другая электрическая сила, сложным образом зависящая от расстояния, остается неизменной.

Однако между определением магнитной энергии примесного атома среды квантовой механикой и одиночного атома классической физикой имеется принципиальная разница. Она состоит, во-первых, в том, что только квантовая механика позволила определить наиболее вероятное значение среднеквадратичного радиуса электронов или дырок, движущихся по различным орбитам, но приведенных к круговой с эффективным радиусом, описываемым соотношением /11/. Во-вторых, - в определениях кинетической энергии электрона или дырки примесного атома среды, когда он находится в нормальном или возбужденном состояниях.

#### 4. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МП С ПРИМЕСНЫМИ АТОМАМИ В НОРМАЛЬНОМ И ВОЗБУЖДЕННОМ СОСТОЯНИЯХ

Пусть примесные атомы находятся в равновесном или нормальном состоянии / $n = 1$ ,  $\ell = 0$ /. Тогда энергия примесных атомов в МП согласно /7/ и /8/ пропорциональна концентрации  $n_d$  и состоит из парамагнитной и диамагнитной частей. Однако необходимо иметь в виду, что каждый электрон или дырка из  $n_d$  атомов будет обладать своей дополнительной кинетической энергией  $\Delta W_{кин.}^{(i)}$  и будет описываться соотношением типа /13/.

При учете, что вращение электронов или дырок примесных атомов по и против часовой стрелки равновероятно, средняя по объему дополнительная кинетическая энергия обратится в нуль, то есть  $\sum_i (\Delta W_{кин.}^{(i)}) = 0$ . Наглядное представление для этого случая схематически приведено на рис.1. В верхней части рисунка условно показаны орбиты двух акцепторных атомов, у которых орбитальные моменты  $m_l$  направлены в разные стороны. При помещении этих атомов в меняющееся во времени МП  $B = B(t)$  благодаря взаимодействию ВЭП с зарядом  $q$  происходит изменение его кинетической энергии в соответствии с увеличением или уменьшением исходной скорости заряда на величину  $\Delta v$ .

В итоге общий диамагнитный момент будет пропорционален  $n_d \Delta m_{див.}$ , а суммарный орбитальный момент обратится в нуль, что соответствует орбитальному квантовому числу  $\ell = 0$ . Эти качественные рассуждения справедливы для равновесного состояния при  $n = 1$  и  $\ell = 0$ .

Если примесные атомы находятся в возбужденном или неравновесном состоянии, то они будут распределены по различным энергетическим состояниям, будут иметь отличные от нуля орбитальные моменты и обладать разными временами жизни в соответствии



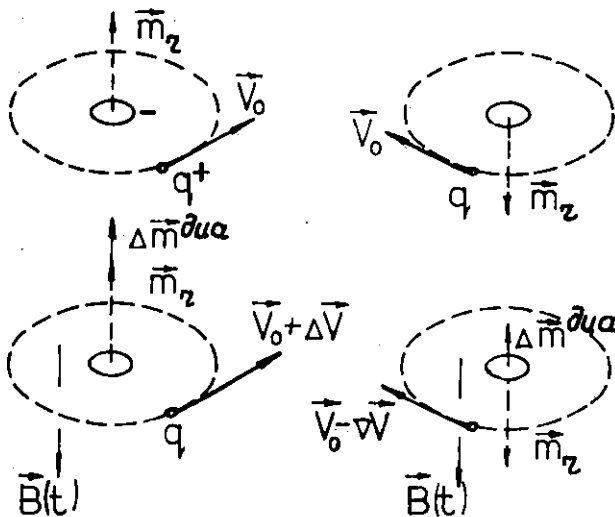


Рис. 1. Индуцирование диамагнитного момента атома среды, находящегося в нормальном состоянии  $n = 1$ ,  $\ell = 0$ , с обращением орбитального момента в нуль.

с соотношением неопределенности

$$\Gamma_n \tau_n \geq \hbar,$$

/17/

где  $\Gamma_n$  характеризует ширину  $n$ -го энергетического уровня,  $\tau_n$  - среднее время его жизни.

Так, для равновесного состояния  $n = 1$ ,  $\ell = 0$   $\Gamma_1 \rightarrow 0$ , а  $\tau_1 \rightarrow \infty$ . В этом случае из соотношения /13/ следует, что  $\Delta W_{\text{кин.}} = 0$ , ибо при неограниченном времени жизни любых атомов, которые могут выступать в качестве рецепторов МП,  $\Delta B = 0$ , так как в лабораторных условиях изменения поля по времени всегда конечны.

При  $n \geq 2$  энергетическая ширина уровня  $\Gamma_{n \geq 2}$  и время жизни  $\tau_{n \geq 2}$  конечны по величине. С физической точки зрения разумно принять значение  $n = 2$  как наиболее устойчивого возбужденного состояния из всех возможных.

В этом случае примесные атомы будут находиться в трех энергетических состояниях: 1/  $2S_{1/2}$  ( $\ell = 0$ ,  $m_j = 1/2$ ), 2/  $2P_{1/2}$  ( $\ell = 1$ ,  $m_j = 1/2$ ), 3/  $2P_{3/2}$  ( $\ell = 1$ ,  $m_j = 3/2$ ), где  $m_j$  - магнитное квантовое число, характеризующее полный момент количества движения. Из указанных состояний только у атомов в  $2P_{1/2}$ - и  $2P_{3/2}$ -состояниях могут быть выделенные в пространстве орбиты электронов и дырок. При взаимодействии "связанных зарядов" примесных ато-

мов с ВЭП возможно как их увеличение, так и уменьшение их кинетической энергии на величину  $\Delta W_{\text{кин}}$ , при вариации МП на величину  $\Delta B$ .

Тогда резонансные переходы с одного энергетического уровня или подуровня на другой, то есть из  $2P_{1/2}$ - или  $2P_{3/2}$ -состояний в  $2S_{1/2}$ -состояние, описываются согласно /13/ формулой

$$\Delta W_{\text{кин}}^{\text{рез.}} \pm \mu_B \Delta B_{\text{рез.}} \sqrt{b} = W_i - W_k. \quad /18/$$

Так как такое взаимодействие с МП возможно, когда примесные атомы находятся в возбужденном состоянии, то время нарастания или спада  $\Delta t$  одного из фронтов импульса МП должно быть ограничено следующим неравенством:

$$\Delta t = \Delta B_{\text{рез.}} / \frac{\partial B}{\partial t} \leq \tau_{n \geq 2} \geq \hbar / \Gamma_2. \quad /19/$$

Как известно /12/, для водородоподобных атомов с зарядом ядра  $z$  энергетическая ширина уровня  $\Gamma$  имеет порядок  $\alpha(z\alpha)^2 W_{\text{иониз.}}$ , где  $W_{\text{иониз.}}$  является энергией ионизации. В приложении к примесным центрам  $z = 1$  при диэлектрической постоянной среды  $\epsilon$  ширина  $\Gamma$  имеет порядок  $\alpha^3 W_{\text{иониз.}}^H / \epsilon^5$ , так как  $\alpha_\epsilon = \alpha / \epsilon$  и  $W_{\text{иониз.}} = W_{\text{иониз.}}^H / \epsilon^2$ . Отсюда время жизни одиночного примесного атома при отсутствии возмущений возрастет, например, для  $2P_{1/2}$ -состояния как

$$\tau_{2P_{1/2}} = \frac{\hbar}{\Gamma_\epsilon} = \frac{\hbar}{\Gamma} \cdot \epsilon^5. \quad /20/$$

Наиболее интересно положение при  $n = 2$ , когда  $2S$ -состояние метастабильно.

Наибольшая вероятность перехода  $2S \rightarrow 1S$  обусловлена одновременным испусканием двух фотонов, общая энергия которых равна разности двух атомных состояний. Эта вероятность составляет около  $7 \text{ с}^{-1}$ . Поэтому среднее время жизни  $2S$ -состояния чрезвычайно велико, что представляет особый интерес при исследовании возможности накопления энергии атомов, которые с помощью МП могут совершать вынужденные переходы из  $2P_{1/2}$ - и  $2P_{3/2}$ -состояний в  $2S_{1/2}$ -состояния с последующим переходом через длительное время /при  $\epsilon = 10$   $\tau_{2S_{1/2}} \sim 10^4 \text{ с}$ / в основное состояние.

Произведем оценки энергии примесных атомов в ГМП с индукцией  $B_0 = 10^{-4} \text{ Тл}$  при условии, что максимальные и минимальные вариации ГМП составляют  $\Delta B_{\text{макс.}} \leq 3 \text{ мкТл}$ , а  $\Delta B_{\text{мин.}} \geq 1 \text{ нТл}$ . В этом случае изменение энергии примесного атома в среде может по порядку величины оцениваться с помощью /7/. Эти оценки дают, что  $\Delta W_{\text{пр.ат.}}^{\text{пар.}} \sim 10^{-36} \text{ Дж} / 10^{-17} \text{ эВ}$ ,  $\Delta W_{\text{пр.ат.}}^{\text{диа.}} \sim 10^{-37} \text{ Дж} / 10^{-18} \text{ эВ}$ .

Эти величины столь малы, что с их помощью пытаться обосновать какое-либо влияние МП на биологические объекты невозможно.

Однако "связанные" заряды при круговом движении вокруг своих ядер в соответствии с /18/ получают при тех же изменениях  $\Delta B$  в ГМП энергию  $\Delta W_{кин.} \sim 10^{-32}$  Дж /  $10^{-13}$  эВ /  $\div 3 \cdot 10^{-29}$  Дж /  $10^{-10}$  эВ /, которая несопоставима с парамагнитной и диамагнитной энергией примесных атомов, то есть

$$|\Delta W_{кин.}| \gg W_{пр.ат.}^{пара.} \quad и \quad \Delta W_{пр.ат.}^{пара.}, \quad а \quad также \quad W_{пр.ат.}^{диа.} \quad и \quad \Delta W_{пр.ат.}^{диа.}$$

Таким образом, приращение энергии электроном при индуцировании и изменениях диамагнитного момента возбужденных атомов может быть тем энергетическим каналом, который может определять влияние МП на биологические системы.

Следует особо отметить, что энергия, приобретаемая электронами или дырками в этом случае, как диамагнитные моменты атомов и молекул не зависит от температуры.

Несмотря на столь малую энергию, которую может приобретать при вариациях МПЗ электрон или дырка одного возбужденного примесного атома, вопрос об их числе в одной клетке или об ее суммарной энергии является наиболее интересным и очень важным с физической точки зрения. Не исключено, что количество атомов рецепторов, воспринимающих МПЗ, а по оценкам их в одной клетке около  $10^{11}$ , определяет и размер, и специфику живых клеток.

## 5. СРАВНЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТОМ

В период 1982-87 гг. была проведена серия работ по экспериментальной проверке возможного механизма влияния МП на электрическую активность /ЭА/ нейронов моллюска.

Магнитное поле создавалось с помощью двух катушек Гельмгольца. Оно могло изменяться по разным законам во времени с помощью специально сконструированного генератора.

На рис.2 показано изменение МП во времени, при котором можно осуществить резонансное взаимодействие МП с электроном примесного атома. Если, например, время нарастания переднего фронта  $t_{п.ф.} \gg \tau_{n \geq 2}$ , то при условии достижения резонансного значения  $\Delta B = \Delta B_{рез.}$  переход электрона с одного уровня на другой невозможен, ибо для каждого интервала  $\Delta t_{п.ф.} \approx \tau_{n \geq 2}$  изменение  $\Delta B < \Delta B_{рез.}$ . Только для спада импульса МП  $t_{з.ф.} < \tau_{n \geq 2}$  возможен резонансный ввод энергии.

При использовании одиночного импульса МП треугольной формы по амплитуде, всего на порядок превышающей ГМП, было получено /15/, что изменение ЭА нейронов происходит при условии огра-

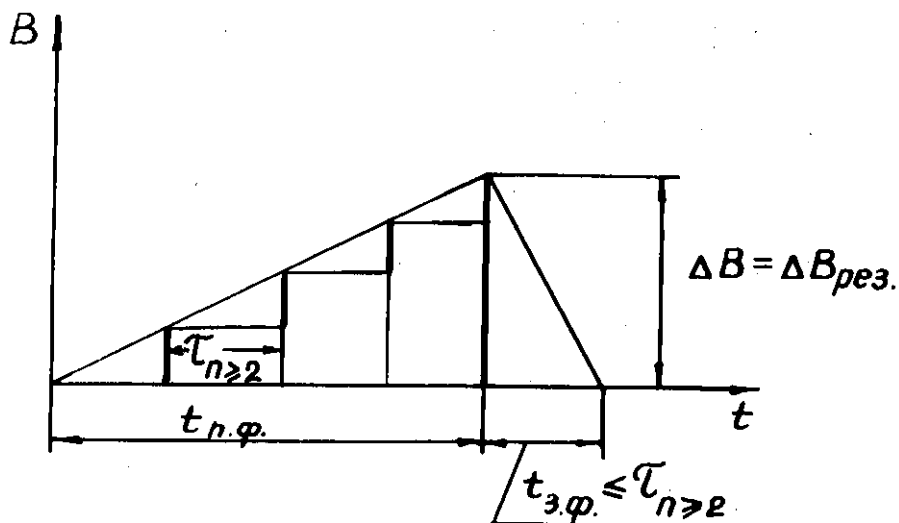


Рис. 2. Закономерности изменения импульса МП во времени, при котором возможно взаимодействие ВЭП с электронной плотностью возбужденного примесного атома среды.

нижения  $\partial B/\partial t$  в определенном диапазоне. Типичная картина изменения ЭА нейрона показана на рис. 3.

Эффективные значения  $\partial B/\partial t$  при амплитуде поля  $\Delta B = 10^{-3}$  Тл составляют  $10^{-4}$ – $10^{-3}$  Тл/с. Характерно также то, что при воздействии на нейроны импульсами МП со скоростью вне этого интервала реакции нейронов не наблюдалось.

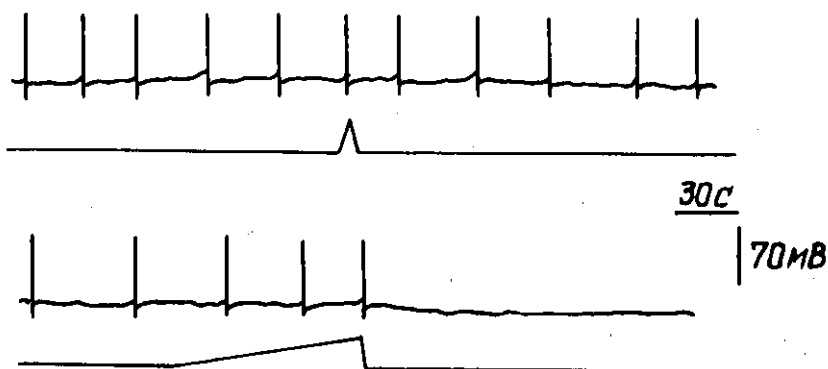


Рис. 3. Влияние на электрическую активность нейрона, обладающего импульсной энергетической активностью, симметричного и асимметричного импульса магнитного поля с перепадом  $\Delta B = 10^{-3}$  Тл. Калибровка: горизонтальный отрезок соответствует 30 с; вертикальный – 70 мВ.

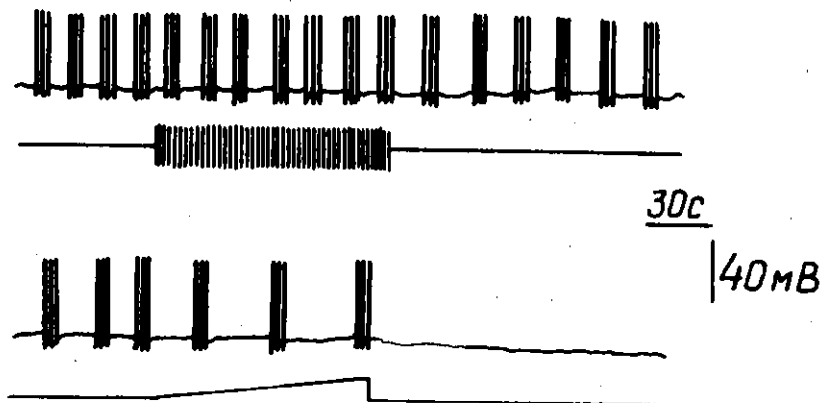


Рис.4. Влияние на электрическую активность нейрона, обладающего импульсной электрической активностью, асимметричного одиночного импульса магнитного поля с перепадом  $\Delta B = 10^{-4}$  Тл и серии таких же импульсов магнитного поля с интервалом между ними  $\Delta t = 15$  с. Калибровка: горизонтальный отрезок соответствует 30 с, вертикальный - 40 мВ.

Для одиночного импульса МП с перепадом до  $\Delta B = 10^{-4}$  Тл при скоростях переднего фронта  $10^{-5}$  Тл/с и заднего фронта  $10^{-4}$  Тл/с изменений ЭА нейронов не наблюдалось.

Однако при воздействии серии таких импульсов, показанных на рис.4 с интервалами между ними  $\Delta t = 15$  с, наблюдалось существенное изменение ЭА у 14 из 15 исследованных нейронов<sup>/16/</sup>.

Заслуживает большого внимания тот факт, что изменения ЭА происходили после воздействия определенным числом импульсов в серии. Достаточное для начала реакции нейронов количество импульсов МП в разных опытах варьировали от 3 до 10 /в большей части экспериментов - 5-8/. Таким образом, суммарная энергия, которая увеличивалась от импульса к импульсу, не превышала энергии воздействия одиночного импульса МП с  $\Delta B = 10^{-3}$  Тл.

Реакция нейронов наблюдалась при воздействии импульсами МП при увеличении интервала между ними до  $\Delta t = 60$  с. Однако увеличение временного интервала между импульсами приводило к снижению эффективности воздействия. Об этом свидетельствует тот факт, что у большей части нейронов, не прореагировавших на серию импульсов МП  $\Delta t = 60$  с, наблюдалась реакция на серию импульсов МП с интервалом между ними с  $\Delta t = 15$  с.

С целью оценки времени релаксации процессов, связанных с воздействием ВЭП на ЭА нейронов моллюска<sup>/17/</sup>, были использованы импульсы трапецидальной формы с перепадом поля  $\Delta B = 10^{-3}$  Тл.

Импульсы МП выбирались с одинаковой скоростью  $\partial V/\partial t = 10^{-3}$  Тл/с для обоих фронтов. В промежутке между передним и задним фронтами МП было постоянным и равным  $10^{-3}$  Тл. Установлено, что как передний, так и задний фронты импульсов МП в отдельности способны вызвать изменение ЭА клетки. Обнаружено, что импульсы МП, у которых плато во времени поддерживается в течение нескольких секунд, малоэффективны. При этом действие ВЭП одного направления компенсировалось действием ВЭП противоположного направления. В результате ЭА нейронов моллюска практически не изменялась.

Эффективность влияния импульсов МП трапецеидальной формы на ЭА нейронов моллюска возрастала с увеличением плато и достигала максимума при интервале  $\Delta t = 10$  с. Этот интервал с физической точки зрения является временем релаксации процессов, связанных с изменением ЭА нейронов моллюска МП.

В работе <sup>18/</sup> произведено сравнение двух типов изменения МП во времени, а именно: симметричного и асимметричного импульса МП. В качестве симметричного сигнала использовалось МП, меняющееся по гармоническому закону, а асимметричным сигналом служит импульс МП треугольной формы, у которого длительности переднего и заднего фронтов резко различались. При этом скорость "быстрого" фронта импульса МП была выбрана равной  $10^{-3}$  Тл/с. Для меняющегося во времени МП синусоидальной формы с амплитудой  $V = 10^{-3}$  Тл была выбрана частота от 0,1 до 1 Гц.

В каждом эксперименте один и тот же нейрон подвергали двум способам воздействия: сначала синусоидальным МП с частотой 0,1 или 1 Гц в течение приблизительно 2 мин, а затем воздействовали асимметричным импульсом. Установлено, что при воздействии МП с частотой 0,1 Гц изменений ЭА не было ни в одном эксперименте, а при воздействии поля с частотой 1 Гц реакция имела место для шести нейронов из 16 обследованных.

Однако при воздействии на эти же нейроны одиночным асимметричным импульсом МП у 24 из 28 исследованных наблюдалось резко выраженное изменение характера ЭА.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведенные эксперименты по влиянию МП на электрическую активность нейронов моллюска достаточно хорошо подтверждают качественную картину взаимодействия ВЭП, индуцированного изменением МП во времени, со "связанными зарядами" атомов-магнорецепторов, находящихся внутри объема живых клеток.

2. Минимальное изменение энергии "связанных зарядов" для одного атома в наших экспериментах оценивается в  $10^{-27}$  Дж /  $10^{-8}$  эВ/, и отсюда следует, что атомами, способными не только

воспринимать, но и накапливать очень малую по величине электромагнитную энергию внешней среды, могут быть примесные атомы, так как они обладают большим временем жизни и малой по величине энергией ионизации.

3. Эффективное воздействие на биологические объекты возможно лишь при использовании несимметричных по времени импульсов МП. При этом резонансное значение перепада МП  $\Delta V_{рез.}$ , при котором возможны вынужденные переходы между зеемановскими подуровнями, осуществляется на одном из фронтов импульса за время, которое меньше времени жизни возбужденных примесных атомов.

Считаю своим долгом поблагодарить В.В.Паршинцева за проведенные эксперименты, плодотворное обсуждение полученных результатов, способствующих написанию данной работы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Чижевский А.Л. - Земное эхо магнитных бурь. М.: Мысль, 1976.
2. Пресман А.С. - Электромагнитные поля и живая природа. М.: Наука, 1968.
3. Влияние солнечной активности на атмосферу и биосферу Земли. Ред. М.И.Гиевышев, А.И.Оль. М.: Наука, 1971.
4. Дубров А.П. - Геомагнитное поле и жизнь. Л.: Гидрометеоиздат, 1974.
5. Белов К.П., Бочкарев Н.Т. - Магнетизм на Земле и в космосе. М.: Наука, 1983.
6. Blackman C.F. et al. - Bioelectromagnetics, 1985, v.6, p.327.
7. Liboff A.R. - Bioelectromagnetics, 1988, V9, p.39.
8. Биогенный магнетизм и магниторецепция. - Новое в биомagnetизме. М.: Мир, 1989, т.1, с.133.
9. Троицкая В.А., Гульельми А.В. - УФН, 1988, т.97, вып.3, с.453.
10. Блохинцев Д.И. - Основы квантовой механики. М.-Л.: Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1949, с.330.
11. Вонсовский С.В. - Магнетизм. М.: Наука. Главная редакция физ.-мат.литературы, 1971, с.239.
12. Бете Г., Солпитер Д. - Квантовая механика атома с одним или двумя электронами. М.: Гос.изд.физ.-мат.литературы, 1960, с.33.
13. Парселл Э. - Электричество и магнетизм. М.: Наука, Главная редакция физ.-мат.литературы, 1963, с.345.
14. Петров Ю.И. - Физика малых частиц. М.: Наука, 1982, с.63.

15. Данилов В.И. и др. - Биофизика, 1984, т.29, № 1, с.109.
16. Данилов В.И. и др. - Биофизика, 1984, т.29, № 2, с.320.
17. Данилов В.И. и др. - Биофизика, 1986, т.31, № 5, с.838.
18. Данилов В.И. и др. - Сообщение ОИЯИ Р9-87-772, Дубна, 1987.

Рукопись поступила в издательский отдел  
23 февраля 1990 года.