

УДК 541.144

**О МЕХАНИЗМЕ ЧАСТОТНО-ИЗБИРАТЕЛЬНЫХ
БИОЛОГИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ КВЧ ИЗЛУЧЕНИЯ
И СПОСОБАХ ИХ УСИЛЕНИЯ**

B.A.Шашлов

Приведено доказательство, что в участках биологических мембран, где энерговыделение превышает 10^{-9} Вт/мкм², имеет место акустический мазерный эффект и генерируются акустоэлектрические колебания частотой $5 \cdot 10^{10}$ Гц. Сделан вывод, что именно взаимодействие с этими колебаниями является исходной физической причиной КВЧ биоэффектов. Предложены способы повышения эффективности КВЧ терапии. Рассмотрена роль акусто-электрических мембранных мод в жизненных процессах.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ. Тот факт, что излучение частотой $\nu \sim 5 \cdot 10^{10}$ Гц с плотностью потока мощности $P_S \sim 1$ мВт/см² способно оказывать заметное влияние на биологические процессы, известен уже свыше 20 лет. Полученные за это время результаты обобщены в монографии [1] первооткрывателей этого явления. Несмотря на столько длительный срок исследований и широкое применение метода КВЧ терапии в практической медицине, физическая природа этого явления остается неизвестной. Особенно удивительна частотная избирательность эффектов: они имеют место лишь в отдельных частотных диапазонах, отстоящих друг от друга на $\delta\nu/\nu \sim 10^{-2}$ и внутри этих диапазонов — в узких частотных интервалах, расстояние между которыми доходит до $\delta\nu/\nu \sim 10^{-4}$ и менее. Ни в одном твердом или жидком теле небиологического происхождения не обнаружено ни одного физического явления, которое в КВЧ диапазоне обладало бы столь "изрезанной" частотной характеристикой.

ЦЕЛЬ ДАННОЙ РАБОТЫ — описать механизм первичного акта взаимодействия КВЧ излучения с биологическими тканями, который объяснит все характерные особенности КВЧ биоэффектов, и на основании этого механизма — предложить способы усиления воздействия КВЧ излучения на живые организмы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ. В первой части рассмотрена физическая система, моделирующая отдельные типы биологических мембран, и показано, что в этой системе выполнено условие самовозбуждения акустоэлектрических (АЭ) колебаний с требуемым видом спектра.

B.A.Шашлов

103

Во второй части указаны конкретные примеры мембран, которые могут служить реализацией описанного генератора АЭ колебаний и приведена оценка энергии взаимодействия КВЧ излучения с мембранными модами. В третьей части указаны способы, которые позволяют повысить эффективность воздействия КВЧ излучения на живые организмы. В четвертой части рассмотрено общебиологическое значение мембранных колебательных мод. В заключение указан прикладной аспект полученных результатов и основные выводы.

1. Рассмотрим диэлектрическую пленку $\epsilon \sim 10$ толщиной $d \sim 10^{-6}$ см (рис.1). С периодом $b \sim d$ в пленку встроены селективные ионные каналы, способные пропускать ионы определенного размера. Проводимость канала $\rho \sim 10^7$ ион/с. В окружающей пленку среде имеются однозарядные ионы требуемого диаметра. Проходя через канал, эти ионы большую часть ($\eta \geq 0,5$) своей энергии $eU \sim 0,1$ эВ (e — элементарный заряд, $U \sim 0,1$ В — разность потенциалов между сторонами пленки) передают субединицам, образующим наиболее узкую часть канала. Частоты колебаний этих субединиц распределены в широкой полосе $\Delta\nu \sim \nu_0/2 \sim 2,5 \cdot 10^{10}$ Гц вблизи частоты $\nu_0 \sim 5 \cdot 10^{10}$ Гц. Акустическое сопротивление пленки по крайней мере на (1-2)% превышает аналогичный параметр в окружающей среде, и примерно таким же является различие акустических сопротивлений штрихов периодической решетки. Скорость гиперзвуковых волн в указанной полосе частот $v \sim 10^5$ см/с, а затухание $\alpha \sim 10^4$ см⁻¹. Отмечу, что затухание не может превышать указанной величины, т.к. в противном случае не имел бы места эффект Мандельштама-Бриллюэна [2].

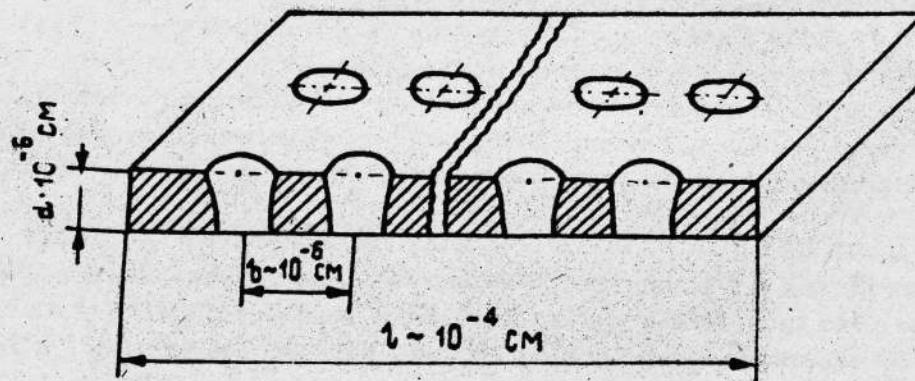


Рис.1:

Проверим, что число фононов определенного сорта, которые будут рождаться в пленке в единицу времени, будет превышать все виды потерь данных фононов в течение этого же отрезка времени.

Прежде всего, заметим, что для некоторых сортов фононов время нахождения в пленке будет определяться временем затухания. Это фононы, которые соответствуют гиперзвуковым волнам, распространяющимся вдоль пленки в волноводном режиме и испытывающим отражение в периодической решетке. Длина этих волн удовлетворяет соотношениям $\lambda \leq 2d$ и $b \sim \lambda/2$, т.е. $\lambda \sim 2 \cdot 10^{-6}$ см. Поскольку коэффициент отражения от единичного штриха $\Gamma \geq 1\%$, то гиперзвуковые волны будут испытывать полное отражение на длине [2] $a \sim \lambda/4\Gamma \leq 5 \cdot 10^{-5}$ см. Поскольку $2a \leq \alpha^{-1}$, то волны возвращаются в исходную точку практически без затухания. Это означает, что на длине $l \sim 2a \sim 10^{-4}$ см будут образовываться стоячие волны, спектр которых $\nu_{n,m} \sim \nu(1 \pm n\delta\nu_n \pm m\delta\nu_m)$, здесь $\nu \sim v/\lambda \sim 5 \cdot 10^{10}$ Гц — частота волны, n, m — натуральные числа, $\delta\nu_n \sim \lambda/2l \sim 10^{-2}$, $\delta\nu_m \sim \frac{1}{4}(\lambda/l)^2 \sim 10^{-4}$. Скорость исчезания таких фононов из участка площадью $S \sim l \times l \sim 10^{-8}$ см² будет иметь величину $\gamma \sim \alpha \nu \sim 10^9$ с⁻¹.

С другой стороны, скорость рождения фононов определенного сорта можно найти, разделив общее число фононов с частотой порядка ν_0 , рождающихся в данном участке в единицу времени, на число различных сортов фононов, которое может существовать в данном участке в полосе частот $\Delta\nu$. Эти величины равны соответственно $M \sim i\rho\eta eU/h\nu_0 \sim 2,5 \cdot 10^{13}$ с⁻¹, $i \sim S/b^2 \sim 10^4$ — число ионных каналов в данном участке пленки, h — постоянная Планка; $\xi \sim \frac{6\pi\nu}{\lambda} \Delta\nu S \sim 2,5 \cdot 10^4$, $6\pi\nu/v^2 \sim 10^2$ Гц⁻¹ см⁻² — спектральная и "объемная" плотность числа фононов в двумерном случае. Таким образом, искомая скорость имеет величину $N \sim M/\xi \sim 10^9$ с⁻¹.

Итак, для каждого участка пленки, площадь которого не менее 1 мкм², выполнено неравенство $N \geq \gamma$, которое и означает выполнение условия самовозбуждения. Действительно, за время $\tau \sim \gamma^{-1} \sim 10^{-9}$ с произвольно выбранный фонон частотой $\nu_{n,m}$ распадается (с вероятностью 1/2), однако за это же время рождается, по крайней мере, еще один ($N\tau \geq 1$) точно такой же фонон, имеющий ту же самую частоту, направление распространения и поляризацию. Следовательно, количество фононов данного сорта будет расти со временем, что и отвечает генерации гиперзвуковых волн.

2. Рассмотренная модель достаточно хорошо отражает основные свойства отдельных участков мембран нейронов, в частности, мембран первых окончаний и так называемых перехватов Ранвье: участков аксонов, через которые проходят потоки ионов Na^+ и K^+ во время распространения первого импульса. Другим важным примером мембран, в которых может реализоваться описанный эффект — это внутренние мембранны митохондрий. Здесь накачка может осуществляться потоком ионов H^+ или, что более вероятно, — за счет энергии тех стадий окислительно-восстановительного процесса, которые протекают в масштабе времени порядка 100 пс. В принципе, накачкой может служить

любой физико-химический процесс с плотностью энерговыделения, превышающей $\rho eU/b^2 \sim 10^{-9}$ Вт/мкм². Что касается необходимой для создания обратной связи периодической решетки, то она, по-видимому, присуща всем мембранам и обусловлена их смектическими свойствами: в настянутых смектических пленках состояние с периодическим изменением ориентации молекул является энергетически самым низким.

Таким образом, описанные колебательные моды имеются в каждой клетке. Оценим энергию взаимодействия этих мод с монохроматическим КВЧ излучением. Величина этой энергии равна $W \sim -\int_0^t (\vec{p}\vec{E}) dt$, здесь \vec{p} — дипольный момент колебательной моды, \vec{E} — электрическая компонента излучения, t — время взаимодействия. Для поперечной моды дипольный момент численно равен произведению заряда $q \sim CU \sim 10^{-15}$ Кл ($C \sim \epsilon_0 S/d \sim 10^{-14}$ Ф — емкость занимаемого модой участка, ϵ_0 — электрическая постоянная) на толщину мембранны: $|\vec{p}| \sim qd \sim 10^{-23}$ Кл м. Абсолютная величина электрической компоненты $|\vec{E}| \sim \sqrt{4\pi Ps/c} \sim 1$ в/см, c — скорость света. В результате интегрирования находим:

$$W \sim -2\pi |\vec{p}| |\vec{E}| \cos \Psi \delta(\omega_p - \omega_e) \cos \varphi,$$

здесь $\delta(\omega_p - \omega_e)$ — дельта-функция от разности круговых частот колебательной моды и КВЧ излучения, Ψ, φ — угол и разность фаз между \vec{p} и \vec{E} .

Из полученной формулы видно, что энергия взаимодействия будет отлична от нуля только в том случае, если частота КВЧ излучения будет совпадать с частотой мембранный моды. Тем самым находит объяснение частотная избирательность КВЧ биоэффектов.

Энергия взаимодействия будет достигать максимума, когда кроме $\omega_p = \omega_e$ будут выполнены соотношения $|\cos \Psi| = |\cos \varphi| = 1$, $\cos \Psi = -\cos \varphi$ которые означают, что вектор \vec{E} должен быть коллинеарен вектору \vec{p} и они должны колебаться в противофазе. Численное значение $W_{\max} \sim 2\pi |\vec{p}| |\vec{E}| \sim 6 \cdot 10^{-21}$ Дж. Это в 1,5 раза превышает тепловую энергию колебательной моды ($kT \sim 4 \cdot 10^{-21}$ Дж, k — постоянная Больцмана, $T \sim 300$ К — температура). Это означает, что несмотря на нетепловую интенсивность используемого в КВЧ биоэффектах излучения, оно увеличивает энергию отдельных колебательных мод на величину, превышающую энергию их теплового движения. Этого вполне достаточно для того, чтобы оказать существенное влияние на процессы, в которых принимают участие данные моды. В частности, скорость ферментативных реакций в пучностях мембранный моды может увеличиться в $\exp(W_{\max}/kT) \sim (4-5)$ раз, т.е. на вполне заметную величину. Таким образом, предлагаемый механизм "проходит" и по энергетике.

3. Понимание механизма КВЧ биоэффектов позволит не только за-

ложить теоретические основы КВЧ терапии, но и разработать способы, которые сделают этот терапевтический метод еще более эффективным. В частности, КВЧ биоэффекты можно усилить, введя частотную и фазовую модуляцию, а также используя циркулярно поляризованное излучение. Во всех этих случаях будет увеличиваться число колебательных мод, для которых энергия взаимодействия будет достигать максимального значения.

Дополнительного усиления эффектов можно добиться, выбрав частоту модуляции и циркуляции вектора поляризации, равной частоте какого-либо мембранных процесса, например, открытия ионного канала или обращения фермента. В этом случае будет иметь место двойной резонанс, благодаря которому будет происходить избирательное усиление именно данного процесса. Фактически появится способ воздействия на отдельные мембранные процессы.

Еще одним возможным способом усиления КВЧ биоэффектов является использование излучения, состоящего из синхронизированных спектральных компонент, частоты которых совпадают с частотами мембранных мод. Такое излучение будет синхронизировать мембранные моды, в результате чего будут образовываться короткие мощные импульсы АЭ воли, способные не только ускорять биохимические процессы, но и непосредственно осуществлять структурные изменения в макромолекулах. Действительно, уже при числе синхронизирующих мод равном трем, энергия импульса составит не менее $3^2 kT \sim 0,2 \text{ эВ}$, — этой энергии достаточно для разрыва водородных связей. Этот способ будет наиболее эффективен.

Хорошо известно, что синхронизацию мод можно осуществить, манипулируя параметры активной среды с частотами, равными разностным частотам генерируемых мод. В нашем случае такую модуляцию можно осуществить, облучая объект ультразвуковыми волнами с частотами $\nu_n \sim \nu \delta\nu_n \sim 5 \cdot 10^8 \text{ Гц}$ и $\nu_m \sim \nu \delta\nu_m \sim 5 \cdot 10^6 \text{ Гц}$. На основании этого может быть разработан новый терапевтический метод, который может оказаться не менее эффективен, чем КВЧ терапия, а для некоторых приложений — более предпочтительным.

4. Факт наличия в мембранах живых организмов АЭ колебательных мод — если он найдет прямое экспериментальное подтверждение — должен иметь важное значение для биофизики в целом. Эти моды могут использоваться в качестве очень емкого носителя информации (10^{10} бит/с), а также для записи информации с чрезвычайно большой плотностью ($1/\lambda^3 \sim 10^{17} \text{ бит/см}^3$). Трудно предположить, что природа не воспользовалась столь совершенным носителем информации. Единственным препятствием на этом пути могло бы стать большое затухание АЭ воли, однако, существует, по крайней мере, две причины, которые способны существенно увеличить длину распространения АЭ воли. Вследствие большой величины элементарной ячейки, в фоновом спектре биологических

мембран имеется большое количество низколежащих оптических ветвей: при достаточно большой плотности таких ветвей затухание гиперзвука резко уменьшается [2]. Вторая причина заключается в том, что генерация с самого начала может осуществляться в режиме синхронизации мод: требуемая для этого связь между модами может быть обеспечена диффузией составляющих мембранных липидов и белков (характерные частоты перескоков равны, соответственно, $5 \cdot 10^8$ Гц и $5 \cdot 10^6$ Гц). Синхронизированные импульсы способны распространяться вдоль мембран в режиме самоиндукционной прозрачности.

Каждая из указанных причин способна увеличить длину распространения АЭ волн в несколько десятков раз, поэтому уже одной из них достаточно для того, чтобы АЭ волны могли распространяться на расстояния, сравнимые с масштабом клетки (30 мкм). Это позволяет высказать гипотезу, что в клетках существует акустоэлектрический канал связи. Именно посредством АЭ канала связи может осуществляться согласование режимов работы клеточных органелл и обеспечиваться функционирование клетки как единого целого. С этой точки зрения клеточный цитоскелет выполняет функцию акустических волноводов для АЭ волн. Функционирование АЭ канала связи может начаться уже в процессе клеточной дифференцировки: одновременно с формированием мембранный сети новой клетки в нее могут поступать АЭ импульсы, которые несут информацию о том, какова должна быть "архитектура" и специализация данной клетки. Другими словами, АЭ канал связи может выполнять функции морфогенетического поля. Другая возможная функция — согласование темпов деления соседних клеток: именно с нарушениями этой функции связано опухолевое перерождение клеток. Выделенные пути в мембранный сети организма, вдоль которых действуют обе указанные выше причины увеличения длины распространения АЭ волн, а также имеются участки, в которых происходит усиление и ретрансляция волн, можно отождествить с меридианами, связывающими биологически активные точки.

Информационная система мозга также может работать по принципу АЭ записывающего устройства. Основным носителем информации могут служить АЭ импульсы, генерируемые в перехватах Ранвье. Запись и воспроизведение осуществляются в миелиновых оболочках, между которыми заключены перехваты Ранвье. Миелиновые оболочки можно рассматривать как смектические жидкие кристаллы, обладающие сегнетоэлектрическими свойствами, или как дипольные стекла, имеющие дополнительную степень упорядоченности. Под действием АЭ импульсов домены и диполи могут изменять свою ориентацию, переходя из одного устойчивого состояния в другое, — такой переход и может отвечать записи информации. Данный подход объединяет обе наиболее разработанные в феноменологическом отношении модели памяти — голограммическую и модель спинового стекла, и дает этим моделям физическое обоснование.

Описанные примеры не исчерпывают функций, которые могут выполнять АЭ колебательные моды в биологических мембранах. Например, во внутренних мембранах митохондрий эти моды могут служить тем промежуточным носителем энергии, посредством которого энергия окислительно-восстановительных реакций передается субъединицам активного центра, которые непосредственно осуществляют синтез молекул АТФ. Кроме того, АЭ мембранные моды могут участвовать в процессах рецепции, мышечного сокращения и других: возможно, что АЭ колебания биологических мембран являются именно тем физическим фактором, неучет которого не позволял до сих пор понять многие жизненные явления. Всем этим вопросам будет посвящена отдельная работа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Прикладной аспект данной работы также не ограничивается усовершенствованием метода КВЧ терапии. Описанный в первом разделе источник АЭ волн, представляющий собой акустический аналог инжекционного лазера с распределенной обратной связью, может быть положен в основу создания нового класса АЭ устройств, моделирующих соответствующие системы в живых организмах. На этой основе могут быть созданы биосенсоры, микродвигатели..., однако наиболее важными представляются устройства обработки и записи информации. В перспективе возможно создание нейрокомпьютера, который будет работать на тех же физических принципах, что и мозг человека.

ВЫВОДЫ:

1. описан мазерный источник акустоэлектрических колебаний, который может найти важные практические применения;
2. показано, что подобными источниками могут являться отдельные типы биологических мембран;
3. высказана гипотеза о наличии в живых организмах АЭ информационной системы и указаны ее возможные функции;
4. предложена акустоэлектрическая модель информационной системы мозга;
5. предложено уточнение механизма преобразования энергии в митохондриях;
6. дано объяснение физического явления, лежащего в основе КВЧ биоэффектов;
7. предложены способы повышения эффективности КВЧ терапии;
8. отмечена возможность создания нового терапевтического метода: частотно-избирательной ультразвуковой терапии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Девятков Н.Д., Голант М.Б., Бецкий О.В. Миллиметровые волны и их роль в процессах жизнедеятельности. – М.: Радио и связь, 1991. С.160.
2. Красильников В.А., Крылов В.В. Введение в физическую акустику. – М.: Наука, 1984. С.448.

Поступила в редакцию
28 июня 1993 г.

ON THE MECHANISM OF FREQUENCY-SELECTIVE BIOLOGICAL EFFECTS OF THE EHF RADIATION AND THE WAYS TO INCREASE THEM

V.A.Shashlov

The acoustic maser effect responsible for the generation of acoustoelectric oscillations with the frequency $5 \cdot 10^{10}$ Hz. was proved to appear in the regions of biological membranes with the energy release 10^{-9} W/mcm². The energy of the EHF radiation interaction with these oscillations is comparable with that of the thermal motion.

The conclusion was made that this very interaction of EHF radiation with the acoustoelectric oscillating modes of biological membranes forms the basis of frequency-selective bioeffects. Based on this mechanism, the ways to increase the efficiency of EHF therapy were suggested. The role of membrane-oscillating modes in life processes was considered.