

ФИЗИКА

ПОДПИСНАЯ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ

1988/6

О. В. Бецкий
М. Б. Голант
Н. Д. Девятков

МИЛЛИМЕТРОВЫЕ ВОЛНЫ В БИОЛОГИИ



ЗНАНИЕ

НОВОЕ В ЖИЗНИ, НАУКЕ, ТЕХНИКЕ

НОВОЕ В ЖИЗНИ, НАУКЕ, ТЕХНИКЕ

ПОДПИСНАЯ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ

ФИЗИКА

6/1988

Издается ежемесячно с 1967 г.

О. В. Бецкий,
М. Б. Голант,
Н. Д. Девятков

МИЛЛИМЕТРОВЫЕ ВОЛНЫ В БИОЛОГИИ



Издательство «Знание» Москва 1988

Авторы: БЕЦКИЙ Олег Владимирович — доктор физико-математических наук; ГОЛАНТ Михаил Борисович — доктор технических наук, профессор;
ДЕВЯТКОВ Николай Дмитриевич — академик АН СССР.

Редактор: КУТУЗОВА К. А.

Бецкий О. В. и др.

Б 56 Миллиметровые волны в биологии. — М.: Знание, 1988. — 64 с. — (Новое в жизни, науке, технике. Сер. «Физика»; № 6).
11 к.

Брошюра посвящена обсуждению эффектов взаимодействия электромагнитных волн миллиметрового диапазона малой интенсивности с живыми организмами. Эти волны оказывают существенное влияние на нормализацию нарушенных процессов жизнедеятельности. Они находят все более широкое применение в биологии и медицине для активизации восстановительных и приспособительных процессов в организмах. Описан гипотетический механизм действия внешнего миллиметрового излучения на живой организм, сводящегося к имитации собственного излучения клеток с целью управления этими процессами.

Гипотеза непротиворечиво описывает совокупность основных физических явлений, лежащих в основе экспериментально наблюдающихся закономерностей.

Рассчитано на широкий круг читателей.

1903010000

ББК 28.071

1. ВВЕДЕНИЕ

Со времени предсказания (Дж. Максвелл, 1873 г.) и экспериментального обнаружения электромагнитных волн (Г. Герц, 1888 г.) прошло около 100 лет. С 1985 г., когда русский физик А. С. Попов продемонстрировал изобретенный им первый в мире радиопередатчик, электромагнитные волны находят применение для передачи и приема информации без проводов.

Современную жизнь трудно представить без таких достижений человеческой цивилизации, как радиосвязь, телевидение, радиолокация, радионавигация и т. п., где используются электромагнитные волны. Наряду с этими традиционными областями применения все большее внимание ученых и инженеров привлекает возможность использования когерентных электромагнитных колебаний в биологии, медицине, промышленности, сельском хозяйстве.

В медицине электромагнитные волны используются в качестве лечебного и диагностического средства. Широко известно использование электромагнитного излучения лазеров в научной и практической деятельности медиков и биологов. На основе различных типов лазеров разработана хирургическая и терапевтическая лазерная аппаратура. Разработаны методики лечения многих заболеваний, например, долго не заживающих трофических язв и ран, многих видов кожных заболеваний, ишемии сердца и других. Начали осваиваться методы лазерной акупунктуры при лечении ряда заболеваний.

В онкологических клиниках начинает использоваться СВЧ-гипертермия: сфокусированное электромагнитное излучение, на фиксированной частоте локально нагревающее опухоли (примерно до температуры 42—45°C), выступает в качестве дополнительного лечебного фактора. Торможение роста и рассасывание опухоли связаны как с нагревом, так и с усилением действия основных

лечебных факторов — химиотерапевтических препаратов и рентгеновского излучения.

Большие надежды возлагаются на применение электромагнитных волн для медицинской диагностики. В отличие от рассмотренных выше примеров использования высокоинформативных когерентных колебаний здесь играет роль не внешнее (от искусственного источника), а собственное тепловое (некогерентное) электромагнитное излучение биологического объекта.

Максимум теплового излучения тела человека по длинам волн находится около 10^4 нм. Для этого инфракрасного участка спектра созданы весьма чувствительные приемники на полупроводниковых соединениях, охлаждаемые жидким азотом, а на их базе — так называемая тепловизионная аппаратура. В тепловизорах тепловое поле кожи человека преобразуется в видимое изображение на экране кинескопа. По этому изображению можно определять в градусах отклонение тепловых полей от нормы. Такие наблюдения дают достаточную информацию для диагностики ряда заболеваний, для контроля динамики их развития и хода лечения.

За счет теплопередачи поля на коже человека отражают и тепловое состояние подкожных слоев, неглубоко расположенных сосудов и органов. Для определения полей источников тепла, расположенных более глубоко, могут использоваться разрабатываемые в настоящее время радиометрические методы.

Основаны они на измерении чувствительными приемниками электромагнитных колебаний дециметрового и сантиметрового диапазонов, излучаемых тепловыми источниками, глубоко залегающими в организме. Ими могут быть воспалительные процессы, гематомы, злокачественные образования и т. п. При регистрации происходящих во времени изменений интенсивности этого излучения можно получить ценную информацию о функционировании живого организма, о его реакциях на различные внешние воздействия.

Характер взаимодействия электромагнитной волны с биологическим объектом определяется как параметрами излучения (частотой или длиной волны, скоростью распространения, когерентностью колебания, поляризацией волны), так и физическими свойствами биологического объекта как среды, в которой распространяется электромагнитная волна (диэлектрической проницае-

мостью, электрической проводимостью, а также параметрами, зависящими от этих величин: длиной электромагнитной волны в ткани, глубиной проникновения, коэффициентом отражения от границы воздух — ткань). Так, уменьшение амплитуды волны при ее проникновении в ткань можно характеризовать глубиной проникновения δ — расстоянием, на котором амплитуда колебаний уменьшается в $e \sim 2,72$ раза. Например, при $\lambda = 10$ см (частота колебаний $\simeq 3$ ГГц) глубина проникновения в мышечной ткани и коже составляет 15 см, а при $\lambda = 8$ мм (частота $\nu \simeq 37,4$ ГГц) величина $\delta = 0,3$ мм.

Тенденция уменьшения δ с уменьшением λ наблюдается до тех пор, пока длина волны в среде существенно превышает размеры клеток или входящих в них оргanelл. На очень высоких частотах проницаемость тканей для электромагнитных колебаний вновь начинает возрастать. Например, жесткое рентгеновское и гамма-излучения пронизывают мягкие ткани практически без ослабления.

При оценке эффектов взаимодействия с различными объектами принято разделение излучений на ионизирующие и неионизирующие. Обычно к ионизирующим относят такие электромагнитные колебания (оптическое, рентгеновское, гамма-излучение), квант энергии которых велик настолько, что возможны, например, разрывы межмолекулярных связей или ионизация атома. Более длинноволновые электромагнитные колебания с малой величиной кванта энергии, в том числе излучение в миллиметровом диапазоне волн, относятся к неионизирующим излучениям.

Типичным примером энергетического воздействия излучения на организм является гипертермия, когда полезный эффект достигается при переходе энергии электромагнитного излучения в тепло.

Но возможно и такое воздействие электромагнитного излучения на организм, при котором повышение температуры незначительно ($\lesssim 0,1$ градуса) и не оно оказывается главным фактором при достижении полезного эффекта. В таких случаях обычно говорят об управляющем или информационном действии электромагнитного излучения низкой или нетепловой интенсивности. Исследования показали, что этим свойством обладают электромагнитные излучения миллиметрового диапазона для волн при малой плотности потока мощности, составля-

ющей доли или единицы милливатт на 1 см² облучаемой поверхности (длина волны излучения в свободном пространстве от 1 до 10 мм).

Благодаря ряду особенностей взаимодействия этих электромагнитных волн с различными объектами использование миллиметровых волн в биологии и медицине является уникальным, и именно об этом и пойдет речь в нашей брошюре.

2. ПОЧЕМУ ИМЕННО МИЛЛИМЕТРОВЫЕ ВОЛНЫ?

Идея о возможности специфического воздействия электромагнитного излучения миллиметрового диапазона длин волн на биологические структуры и организмы была высказана советскими учеными (Н. Д. Девятков, М. Б. Голант и другие) в 1964—1965 гг. Состояла она в следующем. Миллиметровое излучение внеземного происхождения сильно поглощается атмосферой Земли. Поэтому живые организмы не могли иметь естественных механизмов приспособления к колебаниям заметной интенсивности в этом диапазоне, обусловленным внешними причинами, однако могли приспособиться к собственным аналогичным колебаниям.

Возможность влияния миллиметрового излучения на живые объекты не самоочевидна. Поэтому возникли естественные вопросы: какое значение для биологической жизни может иметь реакция на когерентное электромагнитное излучение, которое в окружающей природе практически отсутствует? И если существует такая реакция, то каковы особенности ее проявления в живом организме?

Не удивительно, что на первых порах уже само предположение о возможности нетепловых (не вызывающих заметного нагрева тканей и сред) влияний электромагнитного излучения на жизнедеятельность не укладывалось в рамки привычных представлений, возбуждало множество вопросов и сомнений. Этому способствовало и то обстоятельство, что многие ученые не могли себе представить, что в принципе в живых организмах могут генерироваться какие-либо колебания, кроме некогерентных (тепловых). В то же время энергия кванта излучения $h\nu$ в миллиметровом диапазоне остается все

еще меньше энергии теплового движения kT . Даже для длины волны $\lambda = 1$ мм $h\nu = 1,17 \cdot 10^{-3}$ эВ, тогда как при комнатной температуре $kT = 2,53 \cdot 10^{-2}$ эВ.

Энергия кванта в рассматриваемом диапазоне частот оказывается существенно меньше не только энергии электронных переходов ($1 \dots 20$ эВ) или энергии активации ($0,2$ эВ), но и колебательной энергии молекул ($10^{-2} \dots 10^{-1}$ эВ), энергии водородных связей ($2 \cdot 10^{-2} \dots 10^{-1}$ эВ). Ниже рассматриваемого кванта энергии оказывается, например, энергия вращения молекул вокруг связей ($10^{-3} \dots 10^{-4}$ эВ), энергия куперовских пар при сверхпроводимости ($10^{-4} \dots 10^{-6}$ эВ) и энергия магнитного упорядочения ($10^{-4} \dots 10^{-8}$ эВ). Из приведенной энергетической оценки различных процессов следует, что миллиметровое излучение может оказывать заметное влияние на жизнедеятельность только при многоквантовых процессах, характерных для когерентных колебаний.

Тем не менее необходимо обратить внимание на несколько ранних идей, высказанных еще до постановки корректных экспериментов и важных для понимания развития представлений о механизмах взаимодействия излучения с биологическими объектами.

Один из первых механизмов генерации колебаний живыми организмами был предложен английским физиком Г. Фрëлихом. (Кстати, Фрëлих, ученый с мировым именем, одним из первых дал объяснение низкотемпературной сверхпроводимости. Возникновение своей идеи о когерентном возбуждении в биологических системах он объяснил как логическое расширение на живые объекты представлений и методов физики когерентного состояния конденсированных сред.)

Суть гипотезы Фрëлиха заключается в следующем. Биологические системы могут иметь поляризационные (дипольные) колебания в диапазоне частот от 100 до 1000 ГГц ($\lambda \simeq 3 - 0,3$ мм). Различные процессы жизнедеятельности в биологических клетках сообщают энергию локально возбужденным дипольным колебаниям (биологическая накачка). За счет нелинейных эффектов взаимодействия дипольных колебаний и нелинейной связи этих колебаний с упругими колебаниями может произойти переход системы в метастабильное состояние, в котором энергия трансформируется в энергию одного вида колебаний.

Под действием излучения метастабильное состояние

может переходить в основное — возникает «гигантский диполь», который является частным случаем когерентного состояния биологического объекта. Модель предполагает, что подобные колебания охватывают участки биологических мембран или части биомакромолекул. Такое состояние напоминает низкотемпературную конденсацию Бозе-газа.

В соответствии с другой гипотезой, гипотезой «белок—машина» советских физиков Д. С. Чернавского, Ю. И. Хургина и С. Э. Шноля, возможно запасание электромагнитной энергии в форме напряженного механического метастабильного состояния биомакромолекулы, которое является частным случаем когерентного состояния. (Упомянем, что этими учеными доказано, что в глобулярных белках «когерентное возбуждение» по модели Фрёлиха маловероятно.)

Описанные модели отличаются друг от друга в основном формой запасаения энергии. Главное, что их объединяет, — это положение о существовании в биологических структурах выделенной степени свободы, которая имеет механический характер и на которой может запастись энергия, а сама выделенная степень свободы выполняет важную функциональную роль в биологических процессах. Этим, в частности, живые (термодинамически неравновесные) системы отличаются от неживых. Энергия излучения может трансформироваться в энергию полярных молекул, связанную с вращательными степенями свободы. Роль таких аккумуляторов энергии играют полярные молекулы воды, имеющие дипольный момент $1,84 D$.

Вода выполняет исключительно важные функции в жизнедеятельности биологических объектов. Например, плоский слой воды толщиной всего 1 мм ослабляет излучение при $\lambda \simeq 8$ мм в 100 раз, а при $\lambda \simeq 2$ мм — уже в 10^4 раз. Поэтому излучение миллиметрового диапазона нагревает различные вещества практически лишь в тонком приповерхностном слое с большим градиентом температуры. В водных растворах различных веществ поглощение энергии также будет определяться молекулами воды и иметь локальный характер, определяемый как количеством молекул воды в растворе, так и взаимодействием их с другими молекулами. Такой избирательный микронагрев вещества может приводить к биологически значимым эффектам даже при малых мощностях излу-

чения, когда интегральный нагрев незначителен и несуществен.

Заканчивая эту мысль, следует, в частности, напомнить, что при облучении кожи человека миллиметровыми волнами практически все излучение поглощается в поверхностных слоях толщиной в несколько десятых миллиметра (весовое содержание воды в коже составляет более 65%).

3. ОСНОВНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МИЛЛИМЕТРОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С РАЗЛИЧНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

Экспериментальные исследования взаимодействия излучения проводятся на различных уровнях: молекулярном, клеточном и организменном. Первое экспериментальное исследование (на микроорганизмах) было выполнено в 1965 г., а начиная со второй половины 70-х годов миллиметровое излучение стало использоваться в лечебных целях в клиниках. Уже в первых экспериментах были обнаружены настолько необычные свойства взаимодействия миллиметрового излучения низкой интенсивности с биообъектами, что эти результаты привлекли внимание специалистов различных дисциплин — от радиофизики до медицины.

Выделим основные закономерности этого взаимодействия.

Прежде всего следует отметить, что оно не носит энергетического характера, т. е. полезный эффект воздействия не связан с существенным нагревом объекта или разрушением его тканей. Хорошо регистрируемые эффекты взаимодействия возникают при изменении плотности потока мощности от единиц микроватт на 1 см^2 . Нагрев облучаемых объектов в эксперименте обычно не превышает $0,1$ градуса.

Взаимодействие излучения с биообъектами носит обычно частотно-зависимый характер, причем эти зависимости хорошо воспроизводятся. Частотная зависимость эффекта взаимодействия напоминает по форме резонансную характеристику колебательного контура. По аналогии с этим обычно говорят о резонансных эффектах взаимодействия. Если формализовать эту анало-

гию, то можно говорить о собственной добротности эквивалентного контура, которая оказывается достаточно высокой и может достигать тысяч единиц. При использовании мёссбауэровской спектроскопии было установлено значительное различие в гамма-резонансных спектрах необлученного и облученного на определенных частотах гемоглобина. Так, исследования, проведенные Н. П. Диденко в Томском научно-исследовательском институте ядерной физики, электроники и автоматики, показали, что в диапазоне 40—50 ГГц существует более десяти частот, на которых резонансное взаимодействие электромагнитных колебаний с молекулой гемоглобина приводит к изменению мёссбауэровских спектров.

Частотно-зависимые эффекты зарегистрированы при исследовании процессов клеточного деления микроорганизмов, что связывается с влиянием излучения на клеточный метаболизм. В экспериментальных исследованиях (например, на бактериальных культурах и животных) наблюдается обычно много резонансов, отдаленных друг от друга на 120—200 МГц в зависимости от облучаемого объекта.

На рис. 1 показано воздействие излучения на кишечную палочку. Исследовалось влияние миллиметрового излучения на функциональную активность генетических элементов бактериальных клеток. В качестве тест-объекта была выбрана индукция белка колицина кишечной палочкой, приводящая клетку к гибели. Эффект характеризовался коэффициентом индукции K_n — отношением процентного содержания микроорганизмов, выделявших колицин, в облученной и необлученной культурах. Как видно, относительные полосы частот $\sim 10^{-3}$, в которых коэффициент индукции достигал 2—3, наблюдаются при длинах волн 6,5, 6,53 и 6,55 мм. Плотность потока мощности составляла ~ 5 мкВт/см², а оптимальное время облучения — 2—3 ч.

После опубликования первых отечественных экспериментальных результатов в ряде стран были проведены аналогичные эксперименты (Ф. Кайлман, В. Грундлер, ФРГ, А. Берто, Франция и другие). Детальное изучение резонансных эффектов проведено западногерманскими учеными на дрожжевых культурах. Они, в частности, пришли к выводу, что эффекты можно объяснить резонансным поглощением миллиметрового излучения молекулярными комплексами.

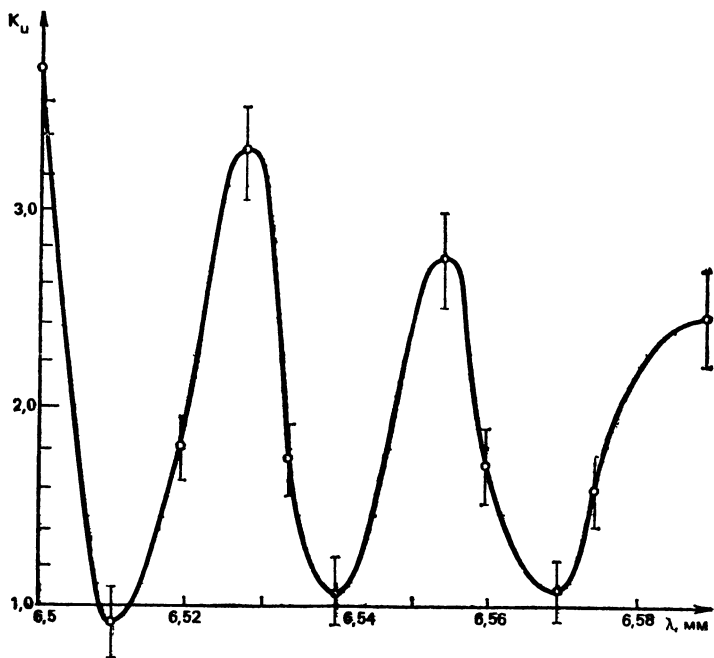


Рис. 1. Зависимость коэффициента индукции синтеза колицина от длины волны облучения (данные А. З. Смолянской и Р. Л. Виленской)

Анализ результатов, полученных различными учеными, позволяет сделать вывод, что частотно-зависимый (резонансный) отклик системы на излучение характерен именно для живых организмов.

Биологические эффекты имеют пороговый характер по СВЧ-мощности. Пороговая плотность мощности изменяется в довольно широких пределах примерно от 50 мкВт/см^2 до 10 мВт/см^2 , причем при облучении микроорганизмов мощность меньше, животных — больше.

Пороговый эффект можно проиллюстрировать с помощью рис. 2. Как известно, при действии только рентгеновского излучения количество клеток костного мозга обычно уменьшается относительно нормы (N/N_0). Влияние дополнительного СВЧ-облучения сказывается в том, что, начиная с некоторого порогового уровня, составляющего $\simeq 10 \text{ мВт/см}^2$, наблюдается защита клеток мозга от последующего воздействия рентгеновского об-

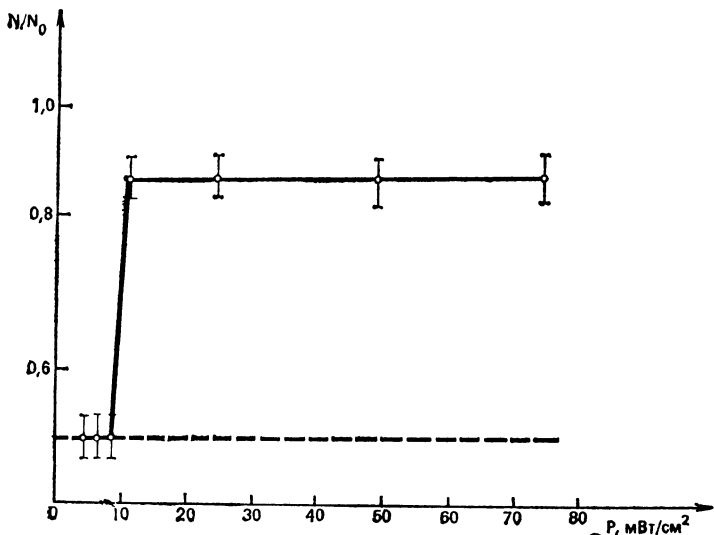


Рис. 2. Зависимость изменения количества клеток костного мозга при комбинированном воздействии СВЧ- и рентгеновского излучения (первые три точки соответствуют только действию рентгеновского излучения). Данные Л. А. Севастьяновой, Р. Л. Виленской, Э. А. Гельвича и М. Б. Голанта

лучения. При превышении порога величина эффекта остается практически постоянной.

Существование порога по мощности можно считать в какой-то степени целесообразным, ибо в противном случае отклик биологической системы на внешнее электромагнитное воздействие происходил бы при малых значениях мощности, сравнимых с шумовой, что приводило бы к неустойчивости работы системы.

Вызывают удивление малые значения плотности пороговой мощности $P_{\text{пор}}$, при которой облучаемый образец нагревается не более чем на доли градуса. Но если сравнивать $P_{\text{пор}}$ с плотностью мощности собственного теплового излучения биологических объектов $P_{\text{т}}$, то оказывается, что $P_{\text{т}} \gg P_{\text{пор}}$. Например, при комнатной температуре $T = 293$ К и $\lambda \simeq 8$ мм в полосе частот ~ 1 МГц за время, равное 1 с, при коэффициенте отражения $R_{\text{отр}}$ на границе кожа — воздух, равном 0,5, собственное излучение $P_{\text{т}}$ равно $(1 - R_{\text{отр}}) kT\Delta\nu/t\lambda^2 \sim 10^{-19}$ Вт/см². Хотя реальное тепловыделение в полосе

эффективного действия СВЧ-сигнала может быть существенно больше этой оценки, тем не менее реальную плотность потока мощности СВЧ-излучения, приводящую к биологическому эффекту, нельзя считать малой по сравнению с этой величиной.

Тот факт, что P_T много меньше $P_{\text{пор}}$, свидетельствует о возможности эффективного воздействия излучения на биологические объекты. Поэтому, возвращаясь к соотношению $h\nu \ll kT$ и к обсуждению роли этого соотношения для оценки возможности воздействия миллиметрового излучения на биологические объекты, можно сделать вывод, что логичнее оперировать соотношением $P_T \ll P_{\text{пор}}$. Одновременно надо помнить, что биологическим объектам не свойственно состояние теплового равновесия, поэтому, анализируя эффект действия на них излучения, следует исходить из представлений о неравновесных процессах.

Биологический эффект появляется спустя некоторое время после начала облучения. Оптимальное время облучения достаточно велико, от 15—20 мин до 1—2 ч, затем эффект, как правило, стабилизируется. Однако иногда при дальнейшем увеличении времени облучения эффект может и уменьшиться.

В некоторых случаях объекты облучались многократно, через определенные промежутки времени. Для микроорганизмов это соответствовало облучению многих поколений. Иногда признаки воздействия начинали обнаруживаться вообще только после нескольких сеансов облучения. Следовательно, биологический эффект носит кумулятивный характер. Инерционность ответа на внешнее воздействие вообще, как правило, является типичной реакцией живого организма.

Экспериментальные данные свидетельствуют, что биологический эффект не зависит от интенсивности облучения в широком диапазоне изменения мощности облучения (до двух и более порядков величины). Прибегая к аналогии из области техники, можно отметить сходство этого факта, например, с ситуацией в цифровых линиях связи, при работе которых передаваемая информация определяется законом изменения длительности импульсов и пауз между ними. Амплитуды импульсов могут при этом меняться в очень широких пределах, но это изменение не оказывает практического влияния на характер передаваемых сообщений.

Биологический эффект действия миллиметрового излучения зависит от фазы биологического развития объекта. Естественно, в чистом виде эту зависимость можно наблюдать лишь на организмах с достаточно растянутым (длящимся несколько суток) циклом биологического развития.

Эффективность действия излучения на живой объект зависит от исходного состояния организма. Если в исходном состоянии некоторая функция изменена по сравнению с нормой в несколько раз, то облучением на соответствующей частоте ее можно поднять приблизительно в то же число раз. На нормальное функционирование здорового организма облучение практически не влияет.

Облучением на определенных частотах можно подготовить организм к нормальному функционированию в изменившихся условиях. Это приспособление может выразиться, например, в изменении ферментативной активности микроорганизмов.

Возможность использования миллиметрового излучения в терапии является прямым следствием указанной зависимости действия излучения от исходного состояния организма. Такие исследования развиваются, с каждым годом захватывая все более широкий круг различных заболеваний. При этом в зависимости от причины и характера последних наибольший терапевтический эффект наблюдается при воздействии на организм различными частотами миллиметрового диапазона. В результате происходит восстановление организма, нормализация его функций, но не выход за пределы норм, т. е. наблюдается наиболее желательный для медицины эффект воздействия.

Как правило, терапевтический эффект достигается только за счет воздействия излучением; медикаментозные средства при этом не используются. Энергетическое воздействие на организм пренебрежимо мало. Следовательно, результат воздействия излучения связан с мобилизацией собственных сил организма для борьбы с заболеванием.

Одна из интересных особенностей действия миллиметрового излучения состоит в том, что при облучении достаточно крупных организмов действие его может сказаться на органах, значительно удаленных от места облучения. Не все точки поверхности тела человека и жи-

вотных одинаково восприимчивы к облучению, но приблизительно одинаковый эффект может быть получен при облучении самых разных областей тела. Например, в экспериментах с животными облучается обычно бедро, передняя лапа, затылочная область, в клинических исследованиях облучается область грудины, затылок и некоторые другие. В ряде работ воздействовали на биологически активные области (например, зоны Захарьина — Геда) или точки (точки акупунктуры). Последним исследованиям посвящены работы, выполненные киевскими физиками (С. П. Ситько и другими).

4. ВОДА И МИЛЛИМЕТРОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

В биологических эффектах важную роль, по-видимому, играют молекулы воды. Молекулы свободной и связанной воды поглощают миллиметровое излучение в разной степени, первые значительно сильнее вторых. Такое свойство молекул воды объясняется тем, что частоты их вращательных движений в значительной степени приходится на область миллиметровых и субмиллиметровых длин волн. При наличии внешнего электромагнитного поля происходит перекачка энергии именно в эти степени свободы полярных молекул с последующей диссипацией энергии за счет межмолекулярных взаимодействий (эта энергия переходит в тепло).

Интересно отметить, что на фиксированной длине волны миллиметровое излучение эффективно поглощает лишь небольшая доля молекул воды, имеющих частоты вращательных движений, близкие к частоте падающего излучения: В этом смысле поглощение носит резонансный характер. При изменении частоты внешнего поля характер поглощения не изменяется, но в поглощении участвует уже другая группа молекул в соответствии с функцией распределения молекул воды по частотам вращения. Однако экспериментально резонансный характер поглощения излучения обнаружить не удается вследствие широкополосности этой функции распределения и эффективности механизма диссипации энергии, которая происходит за очень короткие отрезки времени, порядка 10^{-9} — 10^{-10} с или даже менее.

Если молекулы воды взаимодействуют с молекулами других веществ, то характер поглощения излучения ка-

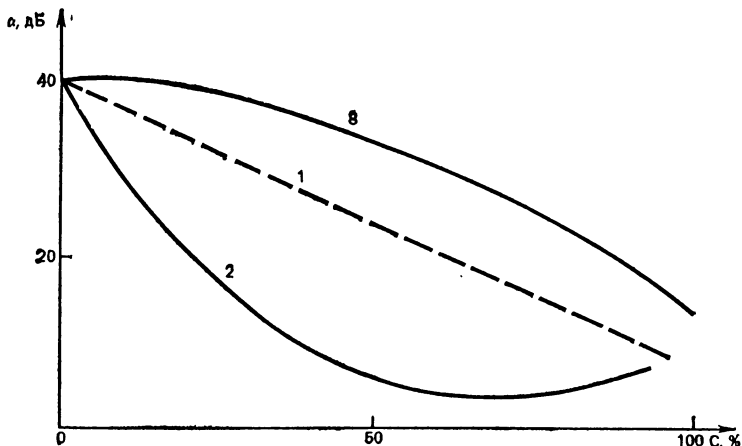


Рис. 3. Качественные зависимости поглощения миллиметрового излучения ($\lambda \sim 2$ мм) в двухкомпонентном водном растворе от концентрации растворенного вещества

чественно и количественно меняется. В ИРЭ АН СССР совместно с ИОХ АН СССР (Ю. И. Хургин, В. А. Кудряшова) обнаружен и детально исследован эффект нарушения аддитивности поглощения миллиметрового излучения водными растворами различных неорганических и органических веществ.

При прецизионном измерении концентрационных зависимостей поглощения излучения низкой интенсивности ($\lambda = 2$ мм, $P = 1\text{—}3$ мВт/см²) водными растворами оказалось, что поглощение излучения меняется в зависимости от характера взаимодействия молекул воды с молекулами растворенного в ней вещества. Возможны три случая (рис. 3): 1) поглощение электромагнитного излучения раствором равняется сумме поглощений растворителя и растворенного вещества; 2) общее поглощение меньше и 3) общее поглощение больше суммы парциальных поглощений.

В первом случае молекулы воды практически не взаимодействуют с молекулами растворенного вещества; во втором часть молекул воды теряет вращательную подвижность за счет межмолекулярного взаимодействия, т. е. суммарное поглощение уменьшается; в третьем случае межмолекулярное взаимодействие приводит к уве-

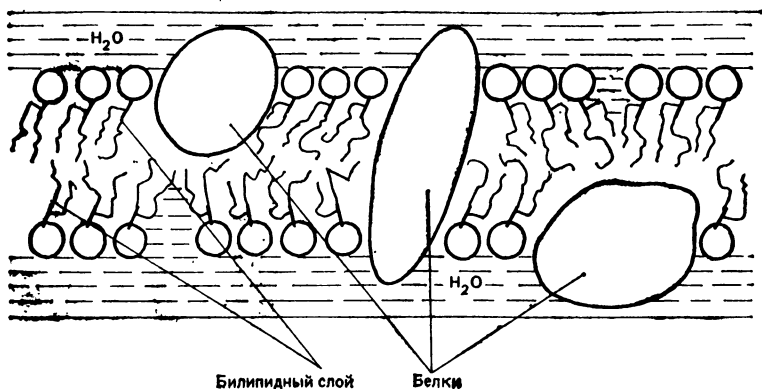


Рис. 4. Мозаичная модель мембраны

личению вращательной подвижности молекул воды, что определяет дополнительное увеличение суммарного поглощения. Таким образом, по зависимостям, аналогичным представленным на рис. 3, можно судить о таких важных параметрах, как степень гидратации, реакционная способность молекул в водных растворах и т. п.

Необычные свойства молекул свободной и связанной воды в миллиметровом диапазоне длин волн послужили стимулом для совершенствования теории диэлектрической релаксации полярных молекул, для разработки более совершенных молекулярных моделей, что, в свою очередь, дало много ценной информации для понимания структуры и свойств воды в сложных соединениях при взаимодействии с излучением. Оригинальные исследования в этом направлении выполнены В. И. Гайдуком и Ю. П. Калмыковым.

При действии миллиметрового излучения низкой интенсивности на воду и водные растворы возникает конвективное движение жидкости. Этот эффект, обнаруженный в ИРЭ АН СССР (А. В. Путвинский с сотрудниками), очень важен для исследования действия излучения на водные системы. Экспериментально конвекция была обнаружена при пороговых значениях плотности мощностей порядка $0,5 \text{ мВт/см}^2$, причем ни в одном опыте не удалось зафиксировать локальных изменений температуры растворов при чувствительности методов не ху-

же 0,1 К. Конвекция возникает на границе раздела фаз (воздух — жидкость, жидкость — твердое тело) за счет приповерхностного поглощения излучения и обусловлена изменением сил поверхностного натяжения на этой границе (термокапиллярный эффект).

Картину конвекции воды можно наблюдать, например, в прямоугольных кюветах из кварца или оргстекла с помощью методов фазового контраста и голографической интерферометрии. При различных способах облучения наблюдается движение воды по механизму межфазной конвекции за счет градиентов поверхностного натяжения, которая, очевидно, и служит основным механизмом отвода тепла от зоны облучения.

Конвективное перемешивание водной среды может иметь важные последствия для биологических объектов, особенно в тех случаях, когда процессы, происходящие в объекте, связаны с переносом веществ через слой воды, например, вблизи биологических мембран.

Живая клетка окружена оболочкой, основная часть которой — цитоплазматическая мембрана — прилегает к внутриклеточной жидкости. Толщина мембраны составляет ~ 10 нм. Мембрана — не просто полупроницаемая оболочка, она играет важную роль в основных функциях клетки. Мембрана состоит в основном из липидов (жироподобных веществ) и белков (рис. 4). Основной структурный элемент мембраны — билипидный слой, в котором гидрофобные «хвосты» липидов обращены внутрь, а гидрофильные «головы» — к поверхности мембраны, где они взаимодействуют с вне- и внутриклеточной жидкостью, белками и другими веществами. Экспериментально было обнаружено, например, влияние излучения низкой интенсивности на транспорт ионов через мембраны.

Сильно взаимодействуя с молекулами воды, излучение влияет на ее свойства как во внешней, так и во внутренней среде живых клеток.

Многие биохимические, в частности, мембранные процессы, чувствительны к перемешиванию среды, что получило экспериментальное подтверждение. Было обнаружено, что миллиметровое излучение низкой интенсивности приводит к ускорению активного транспорта ионов Na^+ ($P \gtrsim 1$ мВт/см²), изменению проницаемости мембран эритроцитов для ионов K^+ (1—5 мВт/см²), ускорению перекисного окисления ненасыщенных жирных

кислот в липосомах (≥ 1 мВт/см²), увеличению ионной проводимости бислойных липидных мембран (~ 10 мВт/см²) и т. д.

Биологические процессы мембранного транспорта обуславливают практически все функции клеток. Поэтому есть все основания предполагать, что биомембраны являются одним из своеобразных детекторов излучения в живой клетке.

Конвекция, снимающая диффузные ограничения в среде, а также во внутри- и внеклеточных областях, может являться, таким образом, одним из первичных проявлений действия миллиметровых волн на процессы в живых клетках.

5. КАКИЕ ВЫВОДЫ МОЖНО СДЕЛАТЬ ИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РАБОТ?

Критическое осмысление накопленного к настоящему времени экспериментального материала позволяет сделать два вывода: 1) электромагнитные колебания низкой интенсивности в миллиметровом диапазоне длин волн оказывают существенное влияние на жизнедеятельность различных организмов (от микроорганизмов до млекопитающих); 2) совокупность обнаруженных эффектов можно разделить на две взаимосвязанные группы исходя из наличия или отсутствия частотных зависимостей резонансного вида.

Нерезонансные эффекты имеют место во всех случаях, когда в облучаемой среде присутствуют молекулы воды, наиболее сильно поглощающие миллиметровое излучение. Эти эффекты связаны с микронагревом приповерхностных слоев и появлением конвективного движения жидкости, которое может оказывать влияние на мембранные процессы (в частности, на ионный транспорт и перенос различных веществ через мембраны).

Резонансные эффекты могут проявляться в сложно организованных живых объектах (включая клетки), когда существенно наличие различных систем обратной связи и каналов передачи информации внутри организма. В экспериментах с модельными объектами, такими, как бислойные липидные мембраны, липосомы, ко-

жа лягушки, водные растворы биомакромолекул, резонансные эффекты отсутствуют.

В настоящее время нет общепринятой точки зрения, объясняющей природу частотно-зависимых эффектов. Вопрос о механизмах острорезонансного действия миллиметрового излучения на живые организмы — это, пожалуй, самый главный вопрос в обсуждаемой проблеме, который будоражит умы физиков и является предметом многочисленных дискуссий в научной литературе, на конференциях и семинарах.

Велик диапазон полезных эффектов при действии излучения на живые организмы. На уровне микроорганизмов открывается возможность управления процессом деления клеток и функциональной активностью внутриклеточных систем. При использовании в медицинских клиниках миллиметровое излучение выполняет функции лечебного фактора. В частности, излучение оказывается полезным при лечении онкологических заболеваний, когда оно не только способствует рассасыванию опухолей, но и выполняет защитную роль по отношению к кроветворной системе, ослабляя токсичное действие химиопрепаратов и рентгеновского излучения.

Наиболее вероятной мишенью воздействия миллиметрового излучения являются, как мы уже говорили, биологические мембраны, которые определяют все функции клетки, межклеточные контакты и т. п. Так как практически все излучение поглощается в кожных покровах на глубине в несколько десятых долей миллиметра, кожа оказывается важной структурной организацией живого организма, выполняющей роль распределенного рецептора излучения. Именно в кожном покрове должны проявляться первичные эффекты воздействия миллиметрового излучения, а каналом дальнейшего распространения сигналов являются, возможно, нервные волокна и гуморальные системы.

Другая важная проблема — воспроизводимость экспериментальных результатов при облучении живых организмов (речь идет прежде всего о частотно-зависимых эффектах). Анализ многочисленных опытов с разными объектами позволил сформулировать условия воспроизводимости их результатов.

Прежде всего должны существовать признаки нарушения нормальной жизнедеятельности облучаемых организмов. Исходные состояния организмов данного

вида в эксперименте должны быть приблизительно одинаковыми. Следующее условие более или менее очевидно: нежелательно использовать потоки мощности, плотность которых близка к пороговому значению, так как при изменении условий отражения от поверхности облучение становится неэффективным.

При первых экспериментах необходимо использовать мощности, заведомо превышающие пороговые (ориентировочные данные могут быть получены из опытов с аналогичными объектами). Поскольку не все точки поверхности тела одинаково восприимчивы к миллиметровому облучению, желательно использовать облучатели с апертурой не меньшей $\sim 2 \text{ см}^2$, с тем чтобы какое-то число восприимчивых к излучению точек поверхности оказалось в зоне облучения.

Учитывая сложность топологии информационных каналов в живом организме, в ходе экспериментов для воспроизведения их результатов нужно сохранять неизменной область облучения, хотя в некоторых случаях приблизительно одинаковый результат может быть получен при облучении самых разных областей тела.

Очень важен контроль частоты колебаний. Модуляция частоты в небольших пределах ($\pm 50 \text{ МГц}$) вблизи резонансных частот позволяет существенно снизить требования к стабильности частоты источника излучений. Необходимо придерживаться одной продолжительности облучения, а она оказывается довольно большой — от нескольких десятков минут до двух часов. Именно при такой длительности облучения организма в нем формируется и «запоминается» эффект действия.

Начальная реакция организма может проявляться при очень малом времени облучения $\sim 0,001 \text{ с}$, но остаточные эффекты после прекращения действия излучения при этом не наблюдаются. Оказалось, что при использовании импульсного режима облучения биологический эффект остается неизменным, если общая длительность облучения (включающая паузы между импульсами) сохраняется такой же, что и длительность непрерывного облучения. Эксперименты показывают, что во многих случаях эффект действия излучения на организмы становится заметным лишь при многократных облучениях (сеансы облучения следуют друг за другом через сутки), каждое из которых длится 0,5—2 ч. При этом увеличение длительности одноразового

облучения к аналогичному эффекту не приводит. В некоторых случаях в экспериментах с микроорганизмами для достижения оптимального эффекта требуется определенное число облучений.

Помимо перечисленных, нельзя пренебрегать и другими условиями проведения эксперимента, в частности в случае микроорганизмов, видом питательных сред, концентрацией взвесей микроорганизмов и т. п.

6. О ПЕРВИЧНЫХ ЭФФЕКТАХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ С БИОЛОГИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ

Несмотря на достоверность биологических эффектов миллиметрового излучения, вопрос о физических механизмах, лежащих в их основе, нельзя считать окончательно решенным. Биологически значимые эффекты появляются, как мы уже говорили, при использовании низкой интенсивности излучения, когда отсутствует общее повышение температуры облучаемого объекта. Кроме того, в ряде практически важных случаев воздействие имеет четко выраженный частотно-зависимый характер в очень узкой полосе частот, что является весьма необычным откликом живых организмов на внешнее электромагнитное воздействие. Простые энергетические оценки лишь подтверждают нетривиальность поиска ответов на эти вопросы.

В различное время разными учеными делались физические оценки действия миллиметрового излучения на биологические системы. Имеет смысл, хотя бы кратко, рассмотреть эти оценки, хотя ни одну из них и даже их совокупность невозможно использовать для объяснения механизма действия излучения на биообъекты.

Рассмотрим взаимодействие излучения с биологической средой на различных уровнях ее организации: от отдельных атомов или молекул до простейших структур, таких, как мембраны или инфраструктуры клетки.

Действие магнитной составляющей электромагнитного излучения может быть связано с диа- или парамагнитной ориентацией молекул, а также с изменением траектории движущейся заряженной частицы (под действием силы Лоренца). Действие электрической составляющей связано с колебательным движением свобод-

ных зарядов (электронов, ионов). Электрическая составляющая может изменить ориентацию молекул, имеющих начальный дипольный момент. Так как среда обладает электрическим сопротивлением и вязкостью, в ней возникают потери энергии. Эти процессы хотя и могут зависеть от частоты излучения, но вряд ли будут проявлять такую высокую критичность к ней, которая характерна для биологических экспериментов.

При облучении молекул энергия излучения расходуется на переходы молекул из одного энергетического состояния в другое. Переходы электронов между энергетическими состояниями соответствуют оптическому диапазону. СВЧ-диапазону соответствуют вращательные переходы или вибрационные переходы, если рассматривать сравнительно крупные структуры.

В случае совпадения частоты излучения с частотой вращения полярных молекул возможна резонансная перекачка энергии излучения молекуле. При таком взаимодействии структура молекулы не меняется, но вращательная кинетическая энергия ее увеличивается. Для эффективности энергообмена важно, чтобы этот процесс был длительным, а диссипация энергии минимальной. В случае молекул воды, как уже указывалось, резонансная перекачка энергии сопровождается быстрым ее рассеянием вследствие соударений молекул. Поэтому резонансный характер взаимодействия наблюдать экспериментально невозможно.

При анализе динамики молекулярных белков также можно выделить колебания отдельных фрагментов с частотами, лежащими в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах. Однако эти движения ангармоничны и по истечении нескольких периодов колебаний прерываются тепловыми флуктуациями. Следовательно, внешнее электромагнитное излучение не может оказать существенного влияния на такие молекулярные движения.

Рассмотрим механизм взаимодействия, связанный с ограниченным вращением молекулярных сегментов. Ориентация таких участков относительно остальной части молекулы определяется потенциалом электростатического взаимодействия между ними и окружающей средой. При анализе экспериментов по исследованию влияния излучения на гемоглобин в диапазоне длин волн 6—8 мкм ряд исследователей высказывал гипотезу

о воздействии излучения на молекулярную группу в активном центре гемоглобина — дистальный гистидин E7, который может совершать вращательное качание с частотой, лежащей в этом диапазоне, и изменять характер связи между геном и глобином. По другой гипотезе миллиметровое излучение может возбуждать упругие колебания всего белкового тела, причем это возбуждение также может передаваться на гистидин E7 (это — гипотеза «белок — машина», о которой мы также упоминали выше). В водных растворах картина взаимодействия существенно усложняется за счет сильного поглощения излучения молекулами воды.

Рассмотрим простые соотношения при взаимодействии излучения с биологическими мембранами. На частоте 3 ГГц ($\lambda \sim 10$ см) приращение напряжения на мембране составляет $\sim 0,5$ мкВ, причем с увеличением частоты это напряжение резко уменьшается за счет шунтирующего действия емкости мембраны, которая составляет около 1 мкФ/см² (тепловой уровень шума на мембране ~ 1 мкВ).

Эта величина напряжения примерно на три порядка меньше уровня потенциала, который может оказывать биологическое действие на объект (около 10 мВ). При плотности мощности облучения 10 мВт/см² напряженность электрического поля в живой ткани равняется ~ 1 В/см. Для сравнения можно привести такие цифры. Напряженность статического поля мембраны составляет $\sim 10^5$ В/см. Для ориентации длинных полимеров требуется электрическая напряженность порядка нескольких киловольт на 1 см. Напряженность электрического поля вблизи многовалентного иона на расстоянии 10 нм от него составляет 1,5 кВ/см. Из приведенных оценок очевидно, что ползевой подход к объяснению физических механизмов вряд ли может оказаться плодотворным в случае непрерывного излучения.

Возможны и другие механизмы действия СВЧ-излучения, в основе которых лежат диэлектрофорез и пондеромоторное действие излучения. Возникновение механических сил в неоднородном поле (диэлектрофорез) связано с градиентом E и происходит, если частица с диэлектрической проницаемостью ϵ_1 находится в растворе с диэлектрической проницаемостью ϵ_2 . Сила, действующая на частицу, пропорциональна степени неоднородности поля, объему частицы и функции, которая вы-

ражает различие в электрических свойствах среды и частицы. Оценки показывают, что для перемещения частицы размером 1000 нм в поле необходим градиент порядка 10^4 В/см.

Пондеромоторное действие, аналогичное известному эффекту давления света, пропорционально квадрату напряженности электрического поля и эффективному размеру облучаемой частицы. Изменение потенциальной энергии молекулы под действием электрического поля E составляет $\Delta e = \mu E$, где μ — дипольный момент молекулы. Заметная ориентация молекул происходит при $\mu E \gg kT$. С увеличением размеров облучаемых частиц действие на них пондеромоторных сил возрастает. Аналогичные эффекты могут возникать и в результате кооперативного взаимодействия частиц с полем излучения.

Мы опять здесь подходим к идее, высказанной Г. Фрëлихом относительно образования структуры с гигантским μ вследствие кооперативных эффектов. Идеи Фрëлиха о когерентном возбуждении в биологических системах переплетаются с результатами теоретических исследований коллективных возбужденных состояний в одномерных молекулярных структурах, выполненных советским физиком А. С. Давыдовым. Он показал, что в одномерных молекулярных структурах и в альфа-спиральных белковых молекулах возможны коллективные возбужденные состояния в виде солитонов,

Солитоны (уединенные импульсы) в данном случае представляют собой суперпозицию вибрационных колебаний в пептидных группах белковых молекул и перемещаются вдоль молекулы со скоростью, меньшей скорости звука, поэтому они не затрачивают энергию на излучение фононов. Поскольку время жизни солитонов велико, они являются идеальными переносчиками энергии вибрационных колебаний пептидных групп вдоль белковой молекулы. Можно показать, что если возможно когерентное возбуждение по Фрëлиху, то одновременно создаются условия и для возбуждения солитонов по Давыдову.

Несмотря на заманчивость физических идей, лежащих в основе концепций «белок—машина» и «когерентное возбуждение», механические эффекты вряд ли играют заметную роль в резонансных явлениях, во всяком случае природу всех выявленных закономерностей

(см. раздел 3) они не объясняют. В этом отношении более существенными кажутся процессы, связанные с вращательными или конформационными переходами в макромолекулах и надмолекулярных структурах.

С эффектами влияния электромагнитного излучения на вращение молекул или молекулярных сегментов связана микротепловая гипотеза действия излучения на биологические системы. При действии электромагнитного излучения интенсивностью около 10 мВт/см^2 на некоторые структуры (взвеси) могут возникать значительные локальные градиенты температуры. В тех случаях, когда миллиметровое излучение низкой интенсивности оказывает на биологическую систему такое же действие, как и общий нагрев, соответствующий температурный эквивалент действия миллиметрового излучения может составлять 5—7 градусов, хотя при электромагнитном облучении, как уже неоднократно отмечалось, нагрев образца не превышает 0,1 градуса. В работах французского физика А. Берто показано, что тепловой эквивалент воздействия миллиметровых волн в большинстве случаев отсутствует.

Действие излучения можно в данном случае попытаться объяснить, например, тем, что увеличивается число молекул, участвующих в химических реакциях. Известно, что в некоторых реакциях при обычных условиях в каждый момент времени участвует ничтожная часть молекул, которые имеют нужную ориентацию и скорость (примерно 10^{-10} — 10^{-22} от всех молекул). Поэтому даже небольшое увеличение числа «нужных» молекул может заметно повлиять на ход реакции.

С градиентом температуры, вызванным миллиметровым излучением низкой интенсивности, связаны конвективные движения в жидких средах, которые могут привести к существенным для биологической системы эффектам, о которых мы упоминали в разделе 5. При этом возможно появление микродинамических эффектов, когда законы феноменологической гидродинамики могут оказаться некорректными (масштаб этих явлений составляет 10 — 10^5 нм). В маловязких средах (водных растворах) микроконвективные движения жидкости могут привести к макроэффектам. Ни один из микротепловых эффектов не может иметь сильную частотную зависимость.

При изучении частотных зависимостей биологиче-

ских эффектов миллиметрового излучения необходимо учитывать как особенности отражения излучения облучаемым объектом, так и его структуру, обычно слоистую, которые могут приводить к установлению стоячих электромагнитных волн, возникающих вследствие многочисленных переотражений. Это, в свою очередь, может стать причиной острой резонансной зависимости поглощения или распределения СВЧ-мощности в облучаемом объекте, маскирующей частотно-зависимые биологические эффекты миллиметрового излучения.

В экспериментальной установке может возникнуть распределенный резонансный контур, если электромагнитная волна последовательно переотражается от облучаемого образца и некоторого сечения волноводного тракта при плохом его согласовании (резонатор типа Фабри — Перо). При реальных длинах резонатора порядка 1 м возникает несколько видов колебаний в миллиметровом диапазоне с шириной полосы пропускания около 100 МГц и разном резонансных частот в сотни мегагерц. При падении волны на плоскую слоистую структуру изменение поглощенной энергии в направлении, перпендикулярном плоскости структуры, может составлять два порядка. Если коэффициент отражения велик, эта частотная зависимость приобретает вид чередующихся резонансных полос. Однако к корректным биологическим экспериментам эти резонансные частоты отношения не имеют. Обычно наблюдается независимость резонансных частот взаимодействия от изменения размеров и формы антенн и длины СВЧ-тракта.

При облучении кожных покровов в миллиметровом диапазоне могут возникнуть аналогичные эффекты. Как известно, кожа состоит из двух основных слоев — эпидермиса и дермы, каждый из которых также имеет слоистую структуру. Следовательно, в коже возникает сложная картина стоячих волн, сильно затухающих в приповерхностном слое, содержащем большое количество воды. Так как излучение в этом тонком слое затухает практически полностью, то логично предположить, что первичные приемники волн находятся именно в этом слое (дерме). Такими приемниками могут быть некоторые кожные рецепторы или нервные окончания.

Кожный покров представляет собой большое рецепторное поле, так что на 1 см² площади кожи приходится

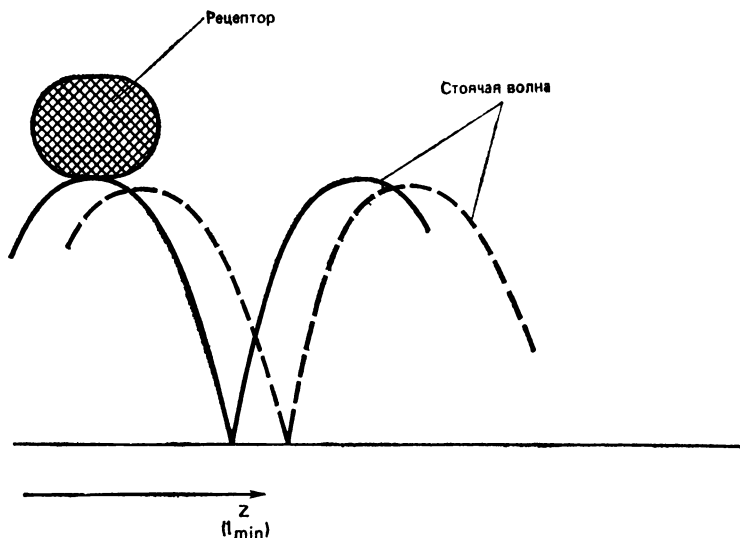


Рис. 5. Смещение максимума стоячей волны относительно гипотетического рецептора при изменении частоты облучения

более сотни чувствительных точек. Предположим для простоты, что стоячая волна есть результат суперпозиции падающей и одной отраженной волны. Поскольку стоячая волна сильно затухает в коже, а толщина кожного покрова мала, в приповерхностном слое может оказаться в лучшем случае либо один минимум, либо один максимум волны. Действительно, если $\lambda \sim 8$ мм, а значение ϵ для кожи равно примерно 25, то длина волны в коже равна $\lambda/\sqrt{\epsilon} \simeq 1,6$ мм, а толщина кожного (поглощающего) покрова составляет примерно несколько десятых миллиметра. Так как почти все кожные рецепторы являются пороговыми и в рассматриваемом примере это также, по-видимому, справедливо, то вблизи пороговых значений амплитуды стоячей волны, определяемых чувствительностью рецепторов, может возникнуть следующий эффект.

При изменении частоты падающего излучения точка максимума (или минимума) стоячей волны в рецепторе длиной l_p смещается вдоль него (рис. 5). Такое перемещение может определять частотную зависимость отклика рецептора на падающую электромагнитную волну. Например, если $\lambda \sim 7$ мм и $\epsilon = 25$, то ширина полосы

«резонансной» кривой отклика рецептора на падающее излучение $\Delta\nu = 200$ МГц при $l_p = 2,1 \cdot 10^3$ нм и $\Delta\nu = 300$ МГц при $l_p = 3,2 \cdot 10^3$ нм.

Более точный учет всех деталей задачи может изменить оценку размера «активной» части рецептора в сторону увеличения; во всяком случае, величины l_p оказываются соизмеримыми с характерными размерами кожных рецепторов. Например, при облучении кожи (тыльная сторона кисти) из пирамидального рупора при $\lambda \sim 8$ мм на расстоянии 8 мм от раскрыва рупора смещение минимума стоячей волны в волноводном тракте сечением $7,2 \times 3,4$ мм² составляет примерно 900 нм/МГц или 0,09 мм при изменении частоты на 100 МГц.

Эти оценки говорят о том, что при потоках СВЧ-мощности, заметно превышающих пороговые значения, частотная зависимость исключалась бы. На практике это, однако, не наблюдается. С таких позиций трудно объяснить также множественность и регулярность резонансных полос.

Последние рассуждения справедливы именно для миллиметрового диапазона длин волн. В более длинноволновом диапазоне вероятность проявления этих эффектов существенно уменьшается за счет слабого поглощения излучения (при нетепловых плотностях мощности порядка единиц мВт/см²) и большого значения длины волны в образце. В более коротковолновом диапазоне (субмиллиметровом) вероятность проявления эффекта также уменьшается из-за слабого проникновения излучения внутрь облучаемого объекта.

Кожа человека выполняет многообразные функции и является таким же важным органом, как и любой другой. Масса ее составляет около 2% общей массы человеческого тела. Чувствительность разных участков поверхности кожи различна к внешним воздействиям. Только болевых точек (рецепторов) на коже насчитывается свыше 3 млн. Строение их так же многообразно как и виды раздражителей, на которые они реагируют.

Уже древней медицине было известно, что с отдельными органами или системами человеческого организма существует связь определенных точек кожи. Таких точек изучено свыше 700, называют их по-разному — точки акупунктуры, биологически активные точки и т. п. Акупунктурные точки достигают в подкожной клетчатке. В области этих точек наблюдается усиление

поглощения кислорода, снижение электрического сопротивления, концентрация нервных волокон, клеток соединительной ткани, сосудов микроциркуляторного русла, здесь создается депо биологически активных веществ. Все это образует связь между точками и соответствующими внутренними органами, выполняющую регуляторные функции и объединяющую физиологические функции кожи и всего организма.

Позднее выяснилось, что связь с внутренними органами имеют не только отдельные точки, но и целые области кожи. Такие чувствительные участки называются проекционными зонами Захарьина — Геда. В отличие от точечных проекций, открытых в древности китайскими врачами, эти зоны занимают площади порядка нескольких квадратных сантиметров. Известны также проекционные зоны Подшибкина, которые гораздо меньше зон Захарьина — Геда и имеют площадь, сравнимую с площадью 10-копеечной монеты. Таких зон около 300.

При облучении кожных покровов миллиметровыми волнами некорректно говорить о воздействии на точки акупунктуры. Даже при фокусировке излучения минимальные размеры пятна превышают $\lambda/2$. Обычно область облучения больше 1—2 см², поэтому облучаются не выделенные точки, а биологически активные зоны.

Некоторые из рассмотренных выше первичных эффектов могут объяснить какие-то экспериментальные зависимости, но тем не менее они не позволяют непротиворечивым образом объяснить физический механизм действия излучения на живой организм.

Одну из гипотез о механизмах действия миллиметрового излучения низкой интенсивности при взаимодействии с биологическими системами мы рассмотрим подробно в следующем разделе.

7. О МЕХАНИЗМАХ ДЕЙСТВИЯ И РОЛИ МИЛЛИМЕТРОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОРГАНИЗМОВ

Приведенные выше первые описания возможных частных механизмов действия излучений малой интенсивности на живые организмы явились предметом многолетних дискуссий, которые, однако, не привели к фор-

мированию единой точки зрения. Это связано в первую очередь с тем, что эти механизмы, по замыслу их авторов, должны были объяснить возможность осуществления отдельных процессов генерации когерентных колебаний в организмах под влиянием внешнего облучения, и только эту функцию они в большей или меньшей степени выполняли. Во всяком случае, поскольку организм располагает энергией метаболизма (обмена веществ), она в принципе может быть трансформирована в энергию когерентных колебаний.

Но пути такой трансформации могут быть различными. Очевидно, единственный реальный путь определения истинного среди возможных — это выявление механизма, объясняющего все экспериментальные факты, все наблюдаемые закономерности. А этому требованию ни один из упоминавшихся механизмов не удовлетворял. Более того, эта задача их авторами не только не решалась, но даже и не ставилась. Применительно к наиболее глубоко развитой теории Фрёлиха это было связано с тем, что в период ее формирования было известно еще очень мало экспериментальных фактов и закономерностей, на которые можно было бы уверенно опереться.

Излагаемая ниже гипотеза также является в настоящее время дискуссионной и требует проверки временем. Однако, как представляется авторам, она достаточно корректно объясняет многочисленные экспериментальные факты.

Основные предположения, лежащие в основе самосогласованной гипотезы о роли миллиметрового излучения в жизнедеятельности организмов, следующие: 1) воздействие носит информационный, а не энергетический характер; 2) электромагнитное излучение — не случайный для живых организмов фактор, подобные сигналы используются самим организмом для управления, а внешнее облучение лишь имитирует вырабатываемые организмом сигналы; 3) информативным является спектр частот внешнего излучения; 4) длительное время облучения необходимо организму для осуществления приспособительных структурных перестроек.

Рассмотрим подробнее эти положения, развиваемые в работах Н. Д. Девяткова и М. Б. Голанта и др.

Информационные воздействия излучения на живой организм

Живые организмы — это сложные системы, состоящие из многих органов и подсистем, которые длительно и согласованно работают при изменениях внутренних и внешних условий, адекватно реагируя на эти изменения. Поэтому жизнедеятельность организмов не могла бы быть обеспечена при отсутствии развитых информационно-управляющих систем.

Огромный объем информации, которая должна быть переработана и учтена живым организмом, требует использования сигналов малого уровня мощности, затраты энергии на формирование которых были бы совместимы с энергетическими возможностями организма (используемыми к тому же в основном для обеспечения работы исполнительных систем). Например, для человека и животных эта мощность имеет порядок $1-10$ мВт и составляет $10^{-3} - 10^{-4}$ тепловой мощности, излучаемой организмом.

Те же общие соображения о большом объеме передаваемой и перерабатываемой информации заставляют предполагать, что для ее передачи используются в значительной мере высокочастотные колебания, верхняя граница частоты которых определяется только разрушительным для организма действием квантов большой энергии, т. е. верхняя граница частот лежит в области ультрафиолета.

Было высказано предположение, что наблюдаемые в ряде случаев эффекты действия внешних излучений нетепловой интенсивности на организмы определяются тем, что эти излучения в известной степени имитируют собственные информационные сигналы, вырабатываемые самими организмами в период, когда происходят нарушения условий их нормального функционирования. В этих случаях биологический эффект практически не зависит от потока мощности излучения, используемого для воздействия на организм, начиная от порогового уровня и до величин, уже вызывающих заметный нагрев тканей. Такая независимость от уровня сигнала является непременным условием надежной работы многих кибернетических систем, гарантирующим отсутствие влияния на результат работы неизбежных изменений входящих в систему элементов.

Поэтому именно этот признак удобно взять за основу, когда выясняется вопрос об информационном характере действия сигнала на организм.

При тепловых (в общем случае энергетических) воздействиях реакция организма на облучение зависит от энергетических характеристик сигнала, и по этому признаку их можно отличить от информационных.

Об информационном характере действия сигналов, не зависящих в широком диапазоне от мощности излучения, говорит и их пороговый характер, также присущий кибернетическим устройствам, так как наличие порога действия обеспечивает устойчивость работы в условиях внешних наводок и внутренних шумов.

С той же информационной точки зрения можно понять и причину выработавшейся у организма способности реагировать на сигналы, отсутствующие в окружающей его природе (монохроматические сигналы коротковолновой части радиодиапазона): эти сигналы имитируют сигналы внутренней информационной связи, и реакция на внешние сигналы только нарушала бы эту связь.

Резонансные частоты, на которых имеют место биологические эффекты, строго воспроизводимы при воспроизведении условий эксперимента. Такая зависимость действия от количественного значения информационного признака (частоты колебаний) характерна для информационных систем.

Информационная основа наблюдаемых явлений хорошо объясняет причину того, что изменения живых тканей, возникающие в результате облучения, не наблюдаются в случае, если ткани облучаются после прекращения жизнедеятельности: в неживых тканях системы управления не работают.

Действие излучения зависит от исходного состояния организма. На текущее функционирование работающего организма облучение практически не действует. И это тоже понятно, так как одной из важных функций информационных сигналов в организме является поддержание функции гомеостаза.

Наконец, упомянем, что практически одинаковый информационный эффект воздействия удастся получить, облучая различные участки тела животного, удаленные как друг от друга, так и от органа, на который оказывается воздействие. А это говорит о том, что речь идет

о действии на единую информационно-управляющую систему организма.

Основные особенности действия излучения всегда проявляются совместно. Таким образом, речь идет не о случайном подборе фактов, а об их глубокой взаимосвязи, определяемой специфическими закономерностями работы информационных систем.

Энергетическое обеспечение информационных действий миллиметрового излучения

На связь информационных действий с энергией облучения указывает наличие энергетического порога — уровня мощности, ниже которого отсутствует биологический эффект. Поскольку информация передается организму дискретным спектром частот излучения, можно предположить, что принимают это излучение многочастотные резонансные структуры. Частоты, на которые реагирует организм, могут быть собственными резонансными частотами этих структур.

Но резонансных частот много, облучение проводится лишь на некоторых из них. Чтобы организм запомнил характер действия именно этих частот и продолжал генерировать их самостоятельно после прекращения облучения, необходимо, чтобы во время облучения в резонансных структурах образовались дополнительные подструктуры.

Из электродинамики СВЧ известно, что выделение предпочтительных условий для возбуждения определенных резонансных частот в резонансной структуре может быть обеспечено созданием некоторой дополнительной системы внутренних шунтов, отражающих и активных элементов.

В технике СВЧ подструктуры, обеспечивающие возбуждение генератора с многочастотной резонансной системой на определенной частоте (на определенном виде собственных колебаний системы), используются достаточно широко. Известно и применяется возбуждение определенного вида собственных колебаний резонансной системы с помощью синхронизирующих сигналов. Но специфика биологических систем заключается в том, что в них подструктуры, фиксирующие определенный

вид собственных колебаний, строятся под влиянием внешнего синхронизирующего сигнала.

Как будет показано ниже на основе результатов морфологических исследований, такие шунты, отражающие и активные элементы возникают, по всей вероятности, при внутриклеточных перестройках и образовании агрегатов и конгломератов, связанных с резонансными внутриклеточными структурами. Но для выяснения характера зависимости биологического эффекта от мощности излучения существенно лишь то, что упомянутые подструктуры могут создаваться постепенно, из отдельных молекул или иных субъединиц, входящих в упомянутые агрегаты, причем смещение субъединиц в клетке может происходить под воздействием поля излучения. А характер распределения поля в структурах будет зависеть лишь от частоты колебаний, определяемой частотой облучения.

Чтобы создаваемые подструктуры были устойчивыми к разупорядочивающему действию теплового броуновского движения, поле излучения должно иметь некоторую минимальную амплитуду, а облучение — минимальную длительность. В то же время возрастание амплитуды этого поля не изменит характера образующейся подструктуры, а лишь несколько ускорит процесс ее образования. Увеличение амплитуды поля с ростом мощности излучения практически не сказывается (в достаточно широких пределах) на выделяемых резонансных частотах и, следовательно, на информации, передаваемой организму облучением. Возможно, что после формирования под действием облучения некоторого зародыша структуры, необходимого для возбуждения определенных частот колебаний в организме, последний сам достраивает ее до оптимальных размеров. Во всяком случае, известно, что часто максимальное влияние на функционирование организма наблюдается не сразу после облучения, а по прошествии определенного времени (до нескольких суток).

На мысль о существовании подструктур, выделяющих определенные частоты собственных колебаний резонансных структур при генерации СВЧ-колебаний самим организмом, навели опыты по исследованию влияния на организм облучения в импульсном режиме. В экспериментах импульсная мощность излучения совпа-

дала с мощностью, воздействующей на организм в непрерывном режиме.

Было установлено, что характер биологического эффекта при воздействии в импульсном и непрерывном режимах одинаков, если одинаковы частоты излучения. Это говорило о том, что структуры, определяющие резонансные частоты, для обоих режимов воздействия совпадают. Кроме того, выяснилось, что, хотя средняя мощность в импульсном режиме была в несколько раз меньше пороговой для непрерывного режима, биологический эффект оставался таким же, как при непрерывном воздействии излучения. Таким образом, в паузах между импульсами режим колебаний в организме изменялся мало. В то же время при сокращении общей длительности импульсного воздействия по сравнению с длительностью непрерывного никакого биологического эффекта не наблюдалось. Это может свидетельствовать о том, что при малой длительности воздействия не создаются условия, необходимые для построения подструктур.

Из сказанного можно сделать вывод, что информационные действия излучения на живые организмы связаны с созданием материальных структур, а элементы для формирования таких структур далеко не всегда имеются в наличии в нужной области организма (области, где формируется подструктура). Поэтому увеличение длительности не может привести к необходимому информационному действию облучения. Появление дополнительных элементов, необходимых для достройки структуры, должно явиться результатом протекания процессов метаболизма (обмена веществ), а последние требуют времени.

Это обстоятельство является, вероятно, причиной того, что во многих случаях для достижения определенного биологического воздействия необходимы многократные периодически повторяющиеся облучения. При этом подчеркнем, что речь здесь идет не о времени, необходимом для проявления результатов образования в организме новой информационной структуры, включающей образовавшиеся подструктуры, — этот процесс мог бы проходить и без дополнительного облучения, а о времени, необходимом для образования самой резонансной подструктуры.

Какой вид имеют подструктуры, с помощью которых клетка запоминает воздействие облучения, могли пока-

зять только морфологические исследования, выполненные на электронном микроскопе. Одно из характерных изображений такой структуры представлено на рис. 6. Хорошо видны белковые образования, адгезированные к мембране после нарушения нормального функционирования. Наибольший размер образований соответствует тем точкам поверхности мембраны, в которых нарушения имеют наибольшую кривизну — в областях концентрации СВЧ-полей у поверхности мембраны. Забегая вперед, отметим, что образование этих подструктур является прямым следствием распространения когерентных акусто-электрических волн в этих мембранах.

Таким образом, информация при облучении миллиметровыми волнами сообщается организму через посредство энергии этих волн, частоты которых (если уровень мощности превышает пороговый) определяют характер формируемых подструктур и спектр сигналов, генерируемых после прекращения облучения.

Тот факт, что явления, имеющие информационную природу, порождаются энергетическими процессами не только в данном случае, можно проиллюстрировать наглядным примером. Когда зажигается зеленый свет светофора, пешеход переходит дорогу. Зеленый сигнал оказывает информационное действие — говорит, что путь открыт. Информация не изменит своего содержания, если лампочка будет менее яркой (но свет ее будет еще воспринимаем) или более яркой (но еще не будет слепить глаза). Энергия воспринимаемого светового потока не определяет энергии, затрачиваемой на движение через дорогу. Но если предметом исследования сделать энергетический процесс, происходящий в глазах, выход

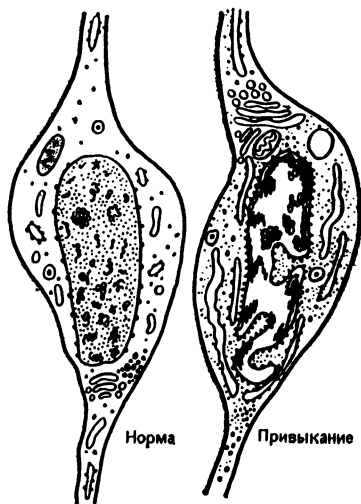


Рис. 6. Образование белковых структур на поверхности ядерных мембран ганглиозных элементов гидры в процессе запоминания

биохимических реакций в светочувствительных элементах глаза, то были бы зарегистрированы закономерности, типичные для энергетических процессов, — эффект зависел бы от энергии.

Но раз имеет место такая закономерность, это означает, что, изучая действие излучения на живые организмы, можно зафиксировать как информационные, так и энергетические эффекты — все зависит от того, что рассматривается в качестве теста, критерия, по которому оценивается действие. Это и было зафиксировано в многочисленных экспериментах.

Из сказанного можно сделать вывод, что «нетепловой» характер миллиметрового излучения сам по себе еще не является препятствием для проявления энергетических эффектов. Критерием для определения, каким является тот или иной эффект — информационным или энергетическим, — служит не мощность потока излучения и не степень нагрева тканей или сред, а характер зависимости биологического эффекта от плотности потока мощности и частоты волн.

Если зависимость от мощности отображается ступенчатым графиком, подобным изображенному на рис. 2, а зависимость от частоты имеет остро резонансный характер — эффект информационный. Если же эффект прямо пропорционален интенсивности излучения или связан с ней логарифмической зависимостью или другим подобным законом, причем острорезонансных частотных зависимостей не наблюдается — тогда эффект будет энергетическим.

Из сказанного ясно, что одно и то же облучение может одновременно порождать и информационные, и энергетические эффекты. Но если информационные эффекты немыслимы без энергетических процессов, то энергетические эффекты могут и не сопровождаться информационными.

Существенно, что основной источник энергии для любых происходящих в организме процессов общий — это метаболизм. Процессами метаболизма обеспечиваются и энергия, необходимая для генерации в организме управляющих сигналов миллиметрового диапазона, и регулировка амплитуды сигналов управления, и процесс образования информационных структур, формируемых организмом для устранения возникших нарушений функционирования, и, конечно, работа исполнительных

систем. Поэтому рациональное (выработанное в ходе эволюции) взаимодействие всех этих систем и процессов в организме связано с соразмерностью реальных затрат энергии в каждом звене необходимости в этих затратах и выбором наиболее экономных механизмов обеспечения любых функций.

Экспериментальное выявление генерируемых клетками колебаний миллиметрового диапазона

В соответствии с излагаемой гипотезой в клетках должны возбуждаться колебания миллиметрового диапазона. Сопоставление полной излучаемой организмом человека тепловой мощности и числа клеток в организме говорит о том, что полная мощность, которой располагает клетка, составляет всего 10^{-13} — 10^{-12} Вт. Очевидно, что лишь очень малая доля этой мощности может быть израсходована на генерацию монохроматических колебаний миллиметрового диапазона, используемых к тому же для управления. Основная же часть энергии в разных ее формах потребляется исполнительными системами клетки. Лишь малая часть мощности, генерируемой в СВЧ-диапазоне, может быть излучена клеткой во внеклеточную среду; главная же часть используется для управления внутриклеточными процессами.

Иначе говоря, речь идет о приеме колебаний, уровень которых может быть ниже уровня тепловых излучений. Однако в соответствии с проведенным выше анализом в живых организмах такие слабые колебания могут приниматься и использоваться в целях управления. Поэтому важно попытаться понять, как, на основе каких принципов это осуществляется в живой природе, и использовать их.

Первый принцип подсказывается характером уже неоднократно обсуждавшейся зависимости, изображенной на рис. 2. Такого рода зависимости, называемые биологами «всё или ничего», объясняются в биологии кооперативностью ответа реагирующих на воздействие единиц. Суть этого объяснения сводится к тому, что сигнал облучения синхронизирует генерируемые клетками колебания. В результате частоты их уравниваются, колебания становятся сфазированными и их амплитуды

могут суммироваться. Более того, если биологическая система обладает усилительными свойствами в некоторых полосах частот, то монохроматические сигналы могут в этих полосах дополнительно ею усиливаться. Мощность, необходимая для синхронизации сигналов, много меньше мощности синхронизируемых колебаний.

Можно предположить, что синхронизированные сигналы с энергией, увеличенной благодаря сложению и усилению, распространяясь в организме, играют роль информационных сигналов. Но и эти сигналы еще очень слабы, и для их приема организм должен, по-видимому, накапливать информацию в течение длительного времени. Вероятно, именно способность к эффективному накоплению информации в течение длительного времени является главным фактором, обеспечивающим прием организмом сверхслабых сигналов. Представление о длительности этого процесса можно получить исходя из минимальной длительности облучения организма миллиметровыми волнами, необходимой для достижения биологического эффекта, сохраняющегося после прекращения облучения: эта длительность близка к 1 ч.

Накопление информации в течение этого времени обеспечивается постепенным созданием подструктур, формирующихся в клетках под действием даже очень слабых СВЧ-полей, задающих направление перемещения и конечное расположение элементов, образующих эти структуры. Характер же полей определяется частотой происходящих в клетке колебаний.

Применить такой уникальный способ накопления информации в технических устройствах, очевидно, непросто. Но поскольку речь идет об исследованиях, проводимых с биологическими системами, ничто не мешает использовать их не только в качестве источников, но и в качестве приемников излучения, для которых описанный способ накопления информации естествен.

В микробиологии широко применяются синхронные культуры, т. е. такие, которые состоят из одновременно делящихся клеток или, точнее, из клеток, имеющих малый разброс в момент деления по сравнению с длительностью цикла развития между последовательными делениями. Существует ряд способов выделения клеток, находящихся приблизительно в одинаковых фазах развития. Если предоставить затем этим клеткам возможность развиваться в питательной среде, причем кон-

центрация их не будет настолько велика, чтобы их токсичные выделения препятствовали размножению, то кривая, характеризующая процесс деления, будет многоступенчатой (рис. 7).

Число ступенек в этой кривой обычно относительно невелико: культура постепенно рассинхронизируется и переходит к экспоненциальному росту. Это является результатом небольших различий в длительности периодов развития разных клеток между актами деления. Такие различия постепенно приводят ко все большему смещению моментов деления

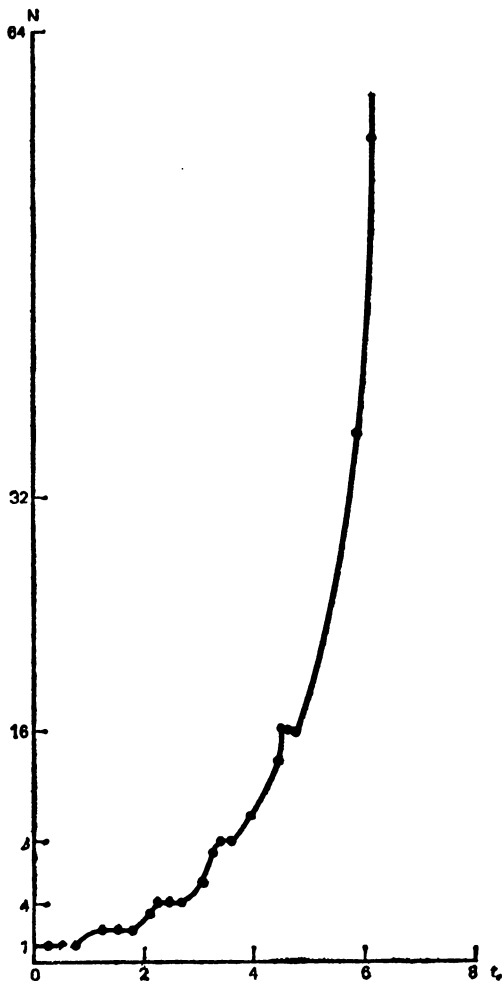


Рис. 7. Кривые синхронного деления дрожжевых клеток, не подвергавшихся внешним воздействиям

клеток друг относительно друга, в результате чего через несколько циклов наступает полная рассинхронизация.

Было сделано предположение, что указанные различия в длительности цикла между делениями у разных клеток определяются отличиями их информационных

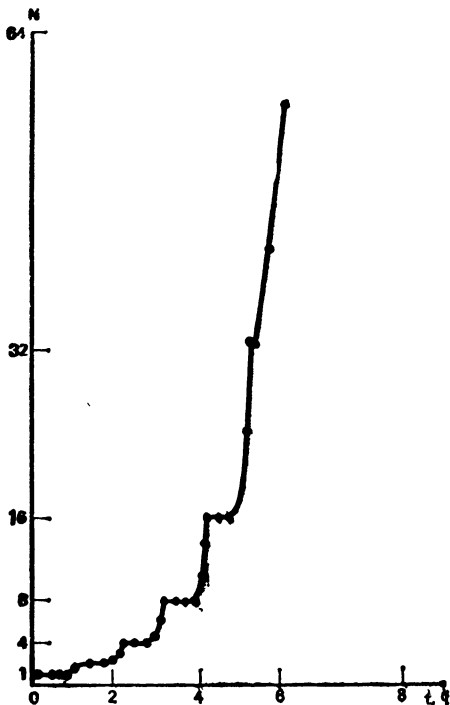


Рис. 8. Кривые синхронного деления дрожжевых клеток при внесении в питательную среду молекул полиэтиленоксида

структур, что должно было бы сказаться в несовпадении частот генерируемых этими клетками колебаний. Чтобы проверить это предположение, прежде всего нужно было попытаться замедлить процесс рассинхронизации за счет усиления взаимного влияния клеток друг на друга — взаимной синхронизации их колебаний. Усиление взаимного влияния было решено осуществить с помощью длинноволкнистых молекул полиэтиленоксида, которые могут играть роль антенн, согласующих излучение клеток с окружающей средой. При достаточном для взаимной син-

хронизации излучении клеток в период их синхронного деления рассинхронизация в соответствии с высказанным предположением о ее природе, по крайней мере у части клеток с исходно менее всего разнящимися информационными структурами, должна была бы прекратиться или замедлиться,

Эксперименты, описываемые в настоящем разделе, проводились на дрожжевой культуре *Sacharomices Carlsbergensis*. Полиэтиленоксид был выбран с молекулярным весом 20 000 при его концентрации в растворе, составляющей 0,33 мг/мл, что близко к оптимуму с точки зрения усиления межклеточной связи. С внесением полиэтиленоксида в клеточную взвесь на кривой рис. 8 появилась дополнительная короткая ступенька (рис. 8);

не исчезающая при последующих делениях, что особенно важно, так как свидетельствует о наступившей у части клеток полной синхронизации колебаний.

Чтобы проверить высказанное предположение, было решено усилить эффект, прибегнув к синхронизации колебаний в клетках при воздействии на них миллиметрового излучения: в этом случае амплитуда синхронизирующих колебаний могла быть существенно большей, чем при взаимной синхронизации. Результат

этих экспериментов иллюстрирует рис. 9. Колебания в клетках синхронизирова-

ны облучением относительно тонкого ~ 1 мм, слоя культуры на волне 6,5 мм при плотности потока мощностью $0,25 \text{ мВт/см}^2$ в течение 1 ч. Как видно из рисунка, после такого внешнего воздействия синхронность деления продлевается без каких-либо заметных признаков начала рассинхронизации за пределы интервала времени, при котором удавалось добиться синхронности в отсутствие облучения. (Эти и другие подобные эксперименты проводятся М. Б. Голантом с сотрудниками.)

Очень существенно, что длительность цикла между последовательными делениями синхронизированных клеток зависит от частоты синхронизирующих колебаний (чем больше частота, тем больше длительность цикла). Это позволяет ориентировочно судить о частоте

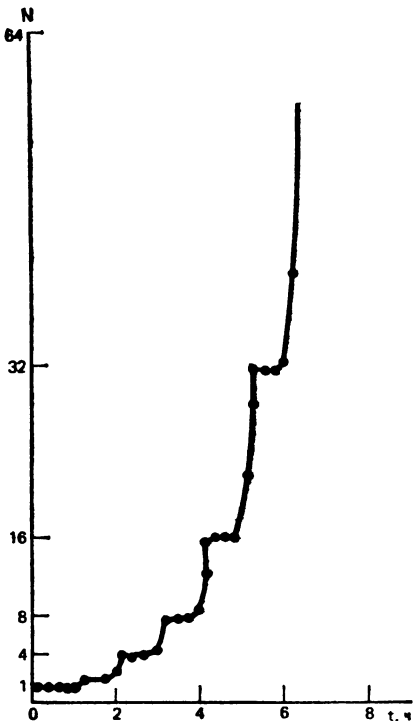


Рис. 9. Кривые синхронного деления дрожжевых клеток, подвергнутых облучению миллиметровыми волнами

колебаний, генерируемых клеткой. Одновременно наличие этой зависимости говорит о влиянии частоты на происходящие в клетке процессы (на длительность цикла влияют практически все внутриклеточные процессы).

О генерации клетками когерентных колебаний говорят и многие другие эксперименты. Например, можно наблюдать взаимопротяжение клеток в изотопическом растворе при синхронизации внешним излучением генерируемых ими колебаний и одинаковой ориентации их дипольных моментов.

Эксперимент проводился с культурой эмбриональных мышечных фибробластов человека в изотоническом растворе с концентрацией $2 \cdot 10^6$ кл/мл при температуре $25-27^\circ\text{C}$. Клеточная взвесь помещалась в чашке Петри. После осаждения клеток на дно они фиксировались абсолютным этиловым спиртом и окрашивались метиленовой синью.

Осадок клеток фибробластов распределяется по дну чашки Петри приблизительно равномерно, что говорит о слабом взаимодействии между клетками или вообще о его отсутствии. Совершенно иная картина наблюдалась, если в период осаждения клеток чашка Петри помещалась на раскрыв прямоугольного рупора сечением 10×20 мм² и в течение одного часа облучалась на волне 7,1 мм потоком плотностью ~ 10 мВт/см². В этом случае клетки в области концентрации высокочастотного электрического поля стягивались к центру чашки. Такой опыт позволяет оценить порядок мощности излучаемых клетками когерентных колебаний. Можно использовать также и результаты экспериментов, в которых наблюдалось отталкивание от клеток диэлектрических частиц в гипертоническом растворе в условиях генерации ими когерентных колебаний. Это явление может быть объяснено диэлектрофорезом (впервые оно наблюдалось Б. В. Дерягиным и М. В. Головановым).

В соответствии с оценками по результатам проведенных экспериментов по взаимодействию клеток и отталкиванию от них диэлектрических частиц мощность излучаемых клетками когерентных электрических колебаний составляла $10^{-17} - 10^{-18}$ Вт.

Описанные методы выявления колебаний, генерируемых клетками, позволяют сделать следующий шаг — приступить к исследованию параметров этих колебаний. Важность данного шага определяется тем, что по ха-

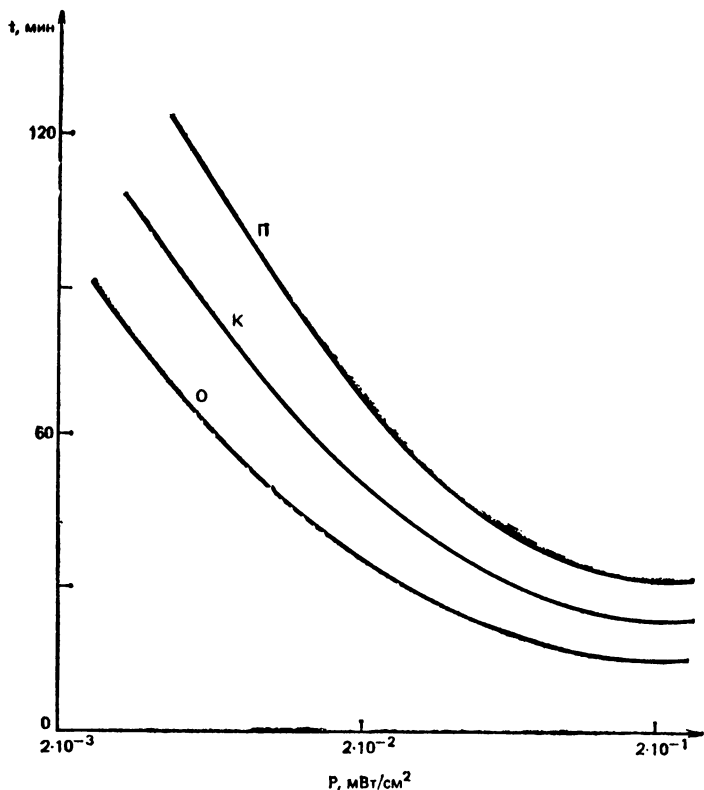


Рис. 10. Зависимость длительности воздействия от плотности потока СВЧ-излучения при неизменном биологическом эффекте

рактическим колебаниям можно в принципе судить о состоянии организма. Усиление определенных линий в спектре генерируемых клетками колебаний должно соответствовать активизации борьбы организма с теми или иными нарушениями его деятельности. Наоборот, отсутствие реакции организма на нарушение функционирования, характеризующееся ослаблением или отсутствием определенных линий в спектре, должно говорить о необратимости или глубине изменения некоторых систем организма, призванных бороться с такими нарушениями.

Подойти к решению этой задачи можно разными путями. Проще всего, по-видимому, исследовать измене-

ния генерируемых клетками колебаний при изменении условий внешнего облучения. Например, приведем описание экспериментов по выявлению степени влияния на длительность цикла деления клеток времени и интенсивности облучения.

График этой зависимости приведен на рис. 10. Здесь выделены три градации степени синхронизации: максимум воздействия излучения, при котором еще не наступает синхронизация (кривая *O*); воздействие, соответствующее синхронизации примерно 15% облученных клеток (кривая *K*); минимальное воздействие, соответствующее синхронизации подавляющего большинства клеток (кривая *П*). Из рис. 10 можно видеть, что степень влияния облучения на формирование подструктур, выражающаяся в проценте синхронизированных клеток, определяется как длительностью, так и интенсивностью облучения: с увеличением интенсивности длительность, необходимая для достижения определенного эффекта, снижается, но только до определенного предела. Это хорошо согласуется с выводами об энергетике процесса формирования информационных структур и о роли процессов метаболизма в обеспечении этого формирования необходимыми элементами.

В связи с обсуждением рис. 10 небезынтересно следующее замечание, важное с точки зрения практического применения излучения миллиметровых волн в медицине. В терапии желательно использовать режимы, при которых максимальный биологический эффект достигается при минимальном времени воздействия излучения, т. е. использовать мощности облучающего потока, которые при этом времени облучения превышают пороговое значение. Для диагностики же предпочтительны режимы с большей длительностью облучения, не превышающей пороговой величины.

По интенсивности и времени облучения на данной частоте, необходимых для синхронизации клеток или получения другого биологического эффекта, можно судить о степени сформированности их информационных подструктур. Поскольку для разных частот колебаний степень сформированности подструктур может быть различной, проводя эти исследования на разных частотах, можно получить представление о характере спектра колебаний клеток — чем меньше интенсивность и время облучения, необходимые для получения определен-

ного эффекта, тем выше степень сформированности информационной подструктуры на данной частоте.

Впрочем, во избежание неправильного понимания сказанного сразу оговоримся, что при этом необходимо учитывать тот факт, что и максимально возможная интенсивность генерации, и степень сформированности подструктур для разных частот могут быть различными, и это необходимо учитывать при истолковании результатов экспериментов. Но что очень существенно — такое выявление характера спектра может быть использовано для определения состояния организма или для диагностики его заболевания, а также для установления характера воздействия излучения, обеспечивающего желаемый терапевтический эффект.

Анализ механизма возбуждения колебаний миллиметрового диапазона в живых клетках

Все оценки, начиная с первых попыток теоретического анализа экспериментальных фактов, связанных с воздействием излучения на живые организмы, говорили о том, что реагируют на воздействие излучения клетки и, более конкретно, клеточные мембраны. Об этом же говорит, в частности, практическое совпадение спектра резонансных частот одномолекулярных клеток и их мембран.

Механизм выработки клеткой информационного сигнала под воздействием внешнего излучения в какой-то мере аналогичен синхронизации колебаний многих осцилляторов. О природе этих осцилляторов можно судить по тонкой структуре спектров действия, возбуждаемых излучением, обусловленной, как это будет показано ниже, возможностью возбуждения в липидных клеточных мембранах акустических волн шепчущей галереи (волн, не излучающихся во внешнюю среду благодаря полному внутреннему отражению).

Для оценки можно принять, что упругие свойства этих мембран (см. рис. 4) определяются в основном их модулем упругости K_y и толщиной гидрофобной области Δ_m : $K_y \simeq 0,46$ н/м, $\Delta_m \simeq 3 \cdot 10^{-9}$ мм. Эти данные, дополненные величиной плотности ρ липидного (жироподобного) слоя ($\rho \simeq 800$ кг/м³), позволяют оценить

скорость v_a распространения акустических волн вдоль мембраны: $v_a \sim (K_y/\rho\Delta_m)^{1/2}$. Она составляет ~ 400 м/с.

Мембраны ряда клеток и субклеточных элементов имеют форму цилиндров. Если колебания возбуждаются по периметру боковой поверхности этих цилиндров, то условие резонанса определяется равенством периметра πd (d — диаметр цилиндра) целому числу N длин акустических волн Λ : $\Lambda = v_a/\nu$, где ν — частота колебаний. Поскольку $N = \pi d/\Lambda$, то

$$\nu = N(K_y/\rho\Delta_m)^{1/2}(\pi d)^{-1}.$$

Разделение по частоте $\Delta\nu$ между соседними резонансами соответствует изменению числа длин волн на ± 1 и равняется

$$|\Delta\nu| = v_a/\pi d \simeq (K_y/\rho\Delta_m)^{1/2}(\pi d)^{-1}.$$

Клеточные мембраны поляризованы, и на них имеется постоянная разность потенциалов, соответствующая напряженности поля порядка 10^5 В/см. Благодаря этому деформирующие мембрану акустические колебания вызывают появление переменного электрического поля — образуется акустоэлектрическая волна.

Пространственный период переменной составляющей электрического поля, естественно, равняется длине волны акустических колебаний. Например, для бактерии кишечной палочки, имеющей диаметр около 0,65 мкм, при возбуждении колебаниями с длиной волны в свободном пространстве $\lambda = 6,5$ мм (что соответствует частоте $\nu = 46,1$ ГГц) длина волны в мембране приблизительно равна 10 нм. Электрическая длина N периметра близка к 200. Изменение длины волны в свободном пространстве между соседними резонансами составляет $3 \cdot 10^{-2}$ мм. Это практически совпадает с экспериментальными данными.

Однако существенны не только количественные совпадения вычисленных и экспериментально установленных спектров действия. Более важно познавательное значение проведенного анализа. Как же можно интерпретировать эти оценки?

Прежде всего становится понятным, чем объясняется узость линии в спектрах действия, а также наличие в них полос, которым соответствует близкий биологический эффект. И то и другое связано с тем, что клеточные мембраны представляют собой для акустических

колебаний многочастотные резонансные системы, т. е. такие, в которых может возбуждаться большое число видов колебаний, и в некоторых из них (мало отличающихся величиной N) картины возбуждающихся полей оказываются сходными.

Становится понятным также, почему, судя по биологическому эффекту, на текущее функционирование здоровой клетки излучение действует относительно слабо: обычно только после нескольких сеансов облучения. Дело, видимо, в частности, в том, что полученное выше значение скорости волны $v_a \simeq 400$ м/с соответствует замедлению волны (снижению ее скорости по отношению к скорости света в вакууме) почти в 1 000 000 раз. Поэтому поле практически вплотную прижато к мембране: глубина проникновения δ поля в мембрану для волны $\lambda = 5$ мм составляет всего ~ 1 нм.

Для того чтобы такая система оказалась связанной с волной, распространяющейся во внешней среде, необходимы специальные элементы связи. Забегая вперед, скажем, что такие элементы возникают лишь в неблагоприятных биологических условиях, на которые клетки или системы клеток отвечают структурной перестройкой. В нормальных условиях мембраны должны слабо излучать миллиметровые волны. Соответственно и внешнее излучение воспринимается ими слабо.

По-видимому, особенно существенно, что изменения формы мембран при нарушении функционирования клеток (см. рис. 6) в ходе построения подструктур постепенно устраняются вследствие механического воздействия на мембраны притягиваемых к ним цитоплазмы белковых молекул. Белковые молекулы подтягиваются к поверхности мембраны благодаря взаимодействию их дипольных моментов с неоднородным СВЧ электрическим полем, распространяющейся по мембране акустоэлектрической волны. Изменения же формы мембран не могут не влиять на функционирование клетки, и это сравнительно просто зарегистрировать. Мембраны здоровой клетки имеют правильную, устойчивую, слабо изменяющуюся при воздействии белковых молекул форму; поэтому возникновение в них под действием излучения подструктур на текущее функционирование клеток влияет слабо.

Можно объяснить и другой экспериментально установленный факт — очень высокую воспроизводимость

не только тонкой структуры спектров, но и значений частот, на которых наблюдаются определенные биологические эффекты, в одинаковых условиях проведения эксперимента, хотя дисперсия размеров отдельных клеток и их субклеточных элементов может быть довольно велика. Дело в том, что на величину v_a влияет ряд параметров (величина скорости 400 м/с вычислена для некоторых средних значений и сама, таким образом, является определенным усреднением). Длина волны Λ при фиксированной частоте ν изменяется пропорционально v_a и следовательно, для данных N и ν периметр мембраны d также будет изменяться пропорционально v_a . А изменение числа длин волн N (для фиксированной ν) на периметре мембраны в данных условиях эксперимента очень маловероятно.

Мембрана строится последовательно из отдельных «кирпичиков»-молекул. При построении клеточных структур одна ошибка приходится на 10^9 движений, выполняемых в ходе построения. В то же время на длину волны приходится очень малое число молекул, так что даже в тех случаях, когда по периметру мембраны укладываются тысячи длин волн Λ , изменение при построении мембран числа молекул вдоль их периметра у сколько-нибудь заметного процента клеток практически исключается. А при одном и том же числе молекул на величины v_a и Λ , как это следует из анализа, влияет лишь продольная (вдоль периметра) плотность упаковки молекул, изменения которой приводят к пропорциональным друг другу изменениям Λ и d , не влияющим на резонансные значения.

Информационное действие излучения на клетки связано, по-видимому, с частотой ν в значительной мере через число длин волн N , так как N определяет характер и направление сил в естественной системе координат, связанной с мембраной. В частности, тонкость и гибкость управления функционированием клеток изменением ν могут определяться тем, что при большом числе видов колебаний, характеризующем N , малыми вариациями N и соответствующих конфигураций полей, можно осуществить достаточно плавную регулировку процессов, происходящих в клетке.

Замедление акустоэлектрических волн, распространяющихся по мембранам, объясняет механизм построения подструктур в клетке. В соответствии с законами

электродинамики указанное замедление означает быстрое спадание поля при удалении от поверхности мембраны (плотность потока мощности снижается на порядок на расстоянии 1 нм). Поэтому распространение волн в мембране приводит к подтягиванию к ее поверхности белковых молекул, генерирующих колебания на тех же частотах, что и частота колебаний в волне. Как показывает расчет, учитывающий и постоянную составляющую поля на мембране, подтягиваемые к ней молекулы группируются в сгустки на расстоянии Λ друг от друга. Таким образом, мобилизация клетки и организация подструктур осуществляются генерируемыми ею когерентными волнами.

На экспоненциальный характер спадания поля у поверхности мембран указывают и результаты экспериментов, изображенные на рис. 10. Сокращение времени воздействия, необходимого для получения желаемого биологического эффекта, требует компенсации экспоненциальным возрастанием мощности. Увеличение мощности содействует сокращению времени воздействия только за счет вытягивания белковых молекул, используемых для построения подструктур, из глубины цитоплазмы, т. е. из области, где электрическое поле спадает экспоненциально.

Очень важно, что к экспоненциальному росту мощности, требуемой для достижения определенного биологического эффекта, приводит также снижение степени когерентности колебаний. Как показали прямые эксперименты, проведенные на культуре дрожжей, снижение степени когерентности всего на 0,5% требует увеличения необходимой мощности на два порядка. Вероятно, с возрастом или вследствие перенесенных заболеваний когерентность генерируемых организмом колебаний снижается. Это приводит к резкому росту мощности, необходимой для организации процессов управления. Когда же последнее требование приходит в столкновение с энергетическими возможностями организма, интенсифицируются заболевания и на каком-то этапе наступает гибель.

Каков же механизм возбуждения клеточной мембраны? Свободные заряды, способные, как в электронных приборах, многократно взаимодействовать с СВЧ-полем мембран, в клетках, по-видимому отсутствуют. Более реально выглядит предположение об использовании для

возбуждения колебаний зарядов, связанных с белковыми молекулами, совершающими колебания на своих резонансных частотах (за счет энергии метаболизма). Благодаря большому молекулярному весу этих молекул связанные с ними заряды в ходе колебаний могут передать СВЧ-полю мембраны значительную энергию. Обращает на себя внимание тот факт, что многие белковые молекулы работают, будучи ассоциированы с мембранами. Осцилляции отдельных белковых молекул можно уподобить колебаниям пружин, отвечающих затухающими колебаниями на собственных, достаточно многочисленных резонансных частотах на любые неперiodические возмущения.

Как было описано Н. П. Диденко и ее сотрудниками, при комнатной температуре различные колебательные состояния белковых молекул находятся в тепловом равновесии, и их излучение практически не отличается от теплового. Для возбуждения когерентных колебаний осцилляции этих белковых молекул должны быть сфазированы. Функцию фазирования по отношению к ассоциированным к ним молекулам могут выполнить мембраны. Но в здоровой клетке с недеформированными и неискаженными мембранами нет условий для преимущественного возбуждения каких-либо из резонансных частот. Поэтому тепловой характер излучения практически не нарушается.

Когда же вследствие тех или иных воздействий на клетку ее функционирование нарушается, мембраны деформируются и создаются условия для преимущественного возбуждения в них определенных резонансных частот. Это приводит к синхронизации колебаний белковых молекул, резонансные частоты которых совпадают или близки к преимущественно возбуждаемым в мембранах. Синхронизация и связанное с ней когерентное сложение колебаний повышают эффективность передачи энергии этих колебаний мембране и ее излучения в окружающее пространство. В результате зависимость излучения от частоты становится отличной от равновесного теплового излучения клетки: на резонансных частотах оно возрастает.

Нарушение теплового равновесия за счет увеличения излучения на определенных частотах приводит к перераспределению энергии между белковыми молекулами, направленному на восстановление равновесного состоя-

ния. Этот процесс связан с преимущественной передачей энергии молекулам, синхронизированным мембранами, так как излучение на их резонансных частотах превосходит излучение на частотах колебаний других молекул. Увеличение амплитуды колебаний определенных частот приводит к стягиванию к поверхности мембран, особенно в местах их искажений, белковых молекул, колеблющихся на соответствующих частотах. Амплитуда колебаний возрастает, острота резонансов повышается. Воздействие на поверхность мембраны стягиваемых к ней белковых молекул таково, что искажение поверхности сглаживается.

Таким образом, мы проследили возможный путь от нарушения функционирования клетки к возбуждению отражающих это нарушение когерентных колебаний и к устранению с их помощью исходных нарушений.

О механизмах внешней и внутриклеточной связей клетки на СВЧ

Мы упоминали о том, что связь здоровой, нормально функционирующей клетки с внешней средой очень слаба. Для ее усиления нужны специальные элементы связи. Но необходимость в приеме и излучении сигналов управления нередко бывает временной — от момента возникновения нарушений функционирования до восстановления нормальной жизнедеятельности, т. е. в периоды, когда СВЧ-излучение способствует организации восстановительных или приспособительных процессов в клетках. В периоды нормального функционирования клетки ее сильная связь с помощью СВЧ-поля с внешним пространством привела бы лишь к бесполезным потерям этого вида энергии.

Поэтому можно было ожидать, что и элементы связи в некоторых случаях будут представлять собой лишь временно существующие структуры. Поскольку СВЧ-поле прижато к поверхности мембран на расстояние порядка 1 нм, можно было ожидать, что элементы этих структур — зонды — должны иметь длину в несколько десятков ангстрем, с тем чтобы они могли вывести поле за пределы той области, в которой происходит полное

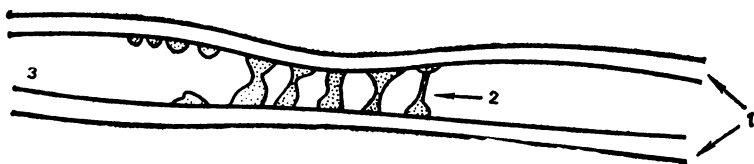
внутреннее ограждение волн от поверхности мембраны. Очевидно, маловероятно, чтобы отвод энергии с помощью одиночного зонда мог обеспечить достаточную связь, в ряде случаев должны параллельно работать несколько зондов. Для эффективной работы существенно, чтобы они отходили от мембраны в точках, смещенных друг от друга на расстояния, равные или кратные длине волны, колебания в которых происходят в одинаковой фазе.

Проведенные с помощью электронного микроскопа морфологические исследования нейронов — нервных клеток — показали, что в период, когда на них воздействуют неблагоприятные факторы, на мембранах этих клеток появляются выступы (септы) — примембранные агрегаты. Эти выступы формируются постепенно, элемент за элементом из белковых молекул, концентрирующихся в определенных точках мембран. Высота этих выступов действительно оказалась равной нескольким десяткам ангстрем. Нередко септы образуют периодические последовательности со смещением одного элемента относительно другого, равным 10—12 нм. Таким образом, результаты радиотехнических и морфологических исследований подтверждают друг друга не только качественно, но и количественно.

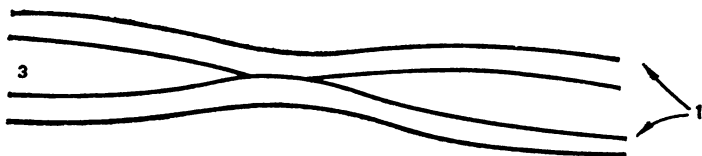
Морфологические исследования позволили установить и последующие стадии процесса (рис. 11). Через септы осуществляется первичный контакт между сближающимися после неблагоприятных воздействий мембранами (септы снижают затухание СВЧ-поля при удалении от мембраны, что обеспечивает взаимодействие между мембранами на значительно большем расстоянии между ними). На рис. 11 схематически изображен процесс реактивной перестройки мембраны после неблагоприятного для клетки воздействия переменного поля: а — формирование септ, б — стягивание двух мембран.

Примечательно, что если необходимость во вновь установленной связи сохраняется, то в соответствии с описанным процессом реактивной перестройки она не будет вызывать бесполезного излучения во внешнее пространство — энергия будет циркулировать во вновь образованной мембранной информационной системе.

На первый взгляд может показаться, что, поскольку Λ зависит от частоты, определенное расстояние между выступами, если его увязать с конфигурацией поля,



а



б

Рис. 11. Появление периодической системы выступов, септ, у поверхности мембран после неблагоприятных воздействий на клетку (а) и образование в результате их сокращения после соприкосновения с другой мембраной контакта подтянутых друг к другу мембран (б): 1 — мембраны; 2 — материал, адгезированный с мембраной и образующий септы; 3 — межклеточная щель

должно было бы говорить об узкополосности осуществляемой с их помощью связи. Однако реально число септ в периодических последовательностях относительно невелико — 5—6 — и их форма заметно варьируется. Поэтому с их помощью может осуществляться связь в огромном диапазоне частот при расстоянии между выступами, равном среднему значению Λ для этого диапазона. Нужно учесть также, что изменение степени связи в достаточно широких пределах мало влияет на информационное действие, так как, с одной стороны, последнее мало зависит от амплитуды сигнала, с другой — величина связи при недогрузке генератора относительно медленно изменяет излучаемую им мощность.

В пользу существования связи периодических структур на мембранах с электрическим полем говорит также то, что они обычно возникают в областях, где мембраны выпячиваются. Эти выпячивания уже сами по себе обеспечивают некоторую, хотя и более слабую, чем с

выступлениями, связь высокочастотных полей в мембране с внешним пространством.

Каким же образом информация, заключенная в конфигурации СВЧ-полей, возбужденных в мембране, может вызвать необходимые изменения в клетке?

Для ответа на этот вопрос необходимо учесть, что размеры клеток не превышают обычно нескольких микрон и заполнены средой, по диэлектрической проницаемости близкой к воде. Следовательно, минимальные размеры волноводных каналов для незамедленных или относительно мало (до 10 раз) замедленных волн в этой среде должны во много раз превосходить размеры клеток, и никакие соображения, совместимые с реальными данными о диэлектрических свойствах элементов, находящихся в цитоплазме, не могут обосновать возможность образования каналов, пригодных для распространения волн СВЧ-диапазона в областях, занимающих лишь часть клетки.

Более естественно обратить внимание на процессы, происходящие на поверхности мембран при распространении по ним акустоэлектрических волн.

Прежде всего обратим внимание на то, что мембран в клетках много: помимо ограничивающей клетку внешней мембраны (так называемой плазматической), мембранами окружены и субклеточные частицы, в частности, митохондрии (энергетические станции клетки), лизосомы (содержащие ферменты, расщепляющие белки, нуклеиновые кислоты и другие вещества). В процессе жизнедеятельности, когда клетка подвергается неблагоприятным воздействиям, в ней могут появляться новые мембраны, которые затем исчезают. Иногда для обеспечения контакта возникают многослойные мембранные структуры и тельца. Мембранная система образует так называемую эндоплазматическую сеть цитоплазмы, которая буквально пронизывает клетку.

Но наиболее важно для обсуждаемого вопроса то, что именно на поверхности мембран осуществляется значительная часть процессов, определяющих функционирование клетки. В частности, мембраны влияют на ферментативную активность, координируют происходящие в клетке химические реакции. Часть ферментов, как уже упоминалось, нормально работает только в контакте с мембраной.

Будучи связанными с энзиматическими процессами,

мембраны, по-видимому, оказывают влияние на движение молекул в цитоплазме, осуществляя особый механизм контроля клеточного метаболизма. По мнению биологов, роль структур эндоплазматической сети заключается в создании путей циркуляции между внешней и внутриклеточной средой, облегчающих и направляющих обмен веществ.

Морфологи и раньше отмечали, что расположение структур эндоплазматической сети и степень их развития претерпевают определенные модификации при повреждении клеток. Исследования, проведенные на электронном микроскопе, зафиксировали также появление определенных модификаций в эндоплазматической сети клеток после их облучения электромагнитными полями. Поэтому в свете обсуждаемого влияния изменения информационных структур на генерацию клетками СВЧ-колебаний и, наоборот, влияния облучения на создание информационных структур в клетках следует обратить внимание на эндоплазматическую сеть и происходящие в ней изменения.

Высокочастотная связь между эндоплазматической сетью и основными мембранами клетки (плазматической мембраной, мембранами ядра, митохондрий, лизосом и другими) может приводить к необходимым для устранения нарушений или приспособительным процессам в клетках, зависящим от положения элементов эндоплазматической сети. Таким образом, рассматривавшееся выше в общем виде влияние СВЧ-полей и связанных с ними сил на примембранные процессы приобретает конкретное содержание.

Наличие СВЧ-связи между элементами эндоплазматической сети при возможности изменения взаимоположения этих элементов под воздействием СВЧ-полей (эти элементы представляют собой тонкие, протяженные, расположенные рядом друг с другом структуры, к тому же имеющие в разных точках соединения и разрывы) делают эндоплазматическую сеть гибким, достаточно легко настраиваемым инструментом для регулирования клеточных процессов. Впрочем, поскольку изменения в информационной структуре должны в течение определенного времени сохраняться, изменение форм должно сопровождаться образованием временных связей, таких же, как показанные на рис. 11. Процесс образования временных связей в эндоплазматической

сети также постепенный, поэлементный, приводящий в конечном итоге к образованию информационных структур, о которых речь шла выше.

Во многих случаях необходимость в произошедших изменениях оказывается временной: процесс восстановления нормального функционирования заканчивается, изменившиеся условия существования возвращаются к прежним или претерпевают новые изменения, требующие нового приспособления. Изменения же в структуре и связях, необходимость в которых уже отпала, могут начать играть вредную роль, так как их управляющее воздействие повлечет неадекватное обстановке функционирование. Поэтому организм начинает стирать информацию, ставшую ненужной, расформировывая существующие элементы связи и перестраивая информационные структуры.

Вероятным представляется процесс, обратный описанному выше процессу формирования: молекулы, образовавшие ранее новые элементы связи, под действием изменившихся конфигурацию сил СВЧ-полей постепенно перемещаются на новые места или уходят в цитоплазму. Постепенное перемещение молекул и разрушение связей, ставших ненужными и поэтому не восстанавливаемых СВЧ-полями, должны происходить и под действием теплового броуновского движения. А до тех пор, пока условия, вызвавшие появление изменений в информационных структурах, сохраняются (или периодически возобновляются), сохраняются и условия для продолжения их функционирования. Иными словами, речь идет о динамическом равновесии в системе, характерном для большинства процессов в живых организмах.

СВЧ-информационные процессы в многоклеточных организмах

Неоднократно высказывались идеи о том, что электромагнитные колебания могут распространяться по мембранам нервных волокон, или по микротрубчатым структурам, располагающимся вдоль аксоплазмы, или через глиальные клетки, повсеместно окружающие мембраны нервов.

На мысль о передаче излучения через нервную систему наводят и многочисленные эксперименты, в кото-

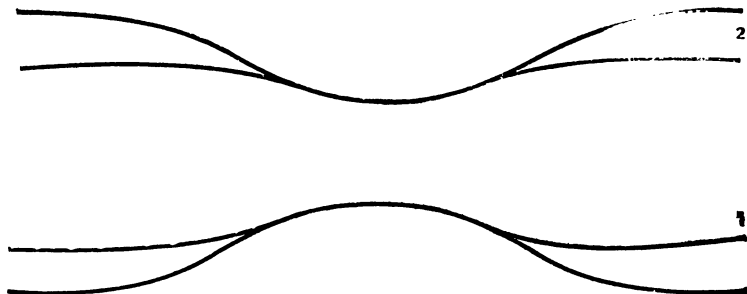


Рис. 12. Схематическое изображение участка нерва с перехватом Ранвье. 1 — нейтроплазма; 2 — компактная миелиновая намотка

рых наблюдалось прекращение такой передачи при анестезии. Можно сделать следующий шаг, уточняющий предположение о путях распространения излучения по нервной системе на большие расстояния. Дело в том, что поверхность нервов окружена свернутой в многослойную спираль миелиновой оболочкой (сразу обратим внимание читателя на то, что миелины — это липиды, и потери в них на СВЧ-излучение относительно малы).

Расстояние между средними линиями последовательных слоев миелиновой оболочки составляет примерно 10 нм, т. е. в соответствии с данными проведенного анализа благоприятствует распространению акустоэлектрических волн СВЧ. Однако в нормальных условиях эти волны через миелиновые оболочки распространяться не могут, так как через небольшие интервалы вдоль этих оболочек они прерываются так называемыми перехватами Ранвье, в которых волна, не имея пути для перехода к следующему интервалу, окруженному миелиновой спиралью, полностью отражается (рис. 12).

При неблагоприятных воздействиях на организм, когда вырабатываются СВЧ-сигналы значительной амплитуды, положение изменяется. По-видимому, именно под действием этих сигналов, когда их величина превышает некоторое пороговое значение, на краях спиралей, на границе с перехватами Ранвье, образуются большие септированные контакты (рис. 13). В областях этих контактов образуются спиральные каналы, заполненные цитоплазмой, через которые акустическая волна может согласоваться с нервом и через ближайший септирован-

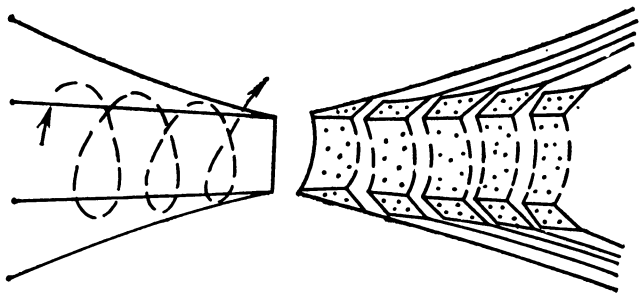


Рис. 13. Образование спирального цитоплазматического канала и большого септированного контакта на границе перехвата Ранвье

ный контакт возбудить следующий участок миелиновой спирали.

В ходе такого последовательного возбуждения может регулироваться и канал, по которому передается энергия. Существенно, что как только восстанавливается нормальное состояние клеток, т. е. когда необходимость в управляющих СВЧ-сигналах исчезает, восстанавливается исходное состояние нерва. Конечно, эта интерпретация нуждается в детализации и проверке, но если принять, что она в основных чертах отражает истинную картину развития процесса, то этот механизм будет содействовать еще более экономному расходованию СВЧ-энергии, выработка которой сопряжена с большими энергетическими затратами. Экономия, определяемая ничтожной амплитудой генерируемых колебаний в периоды, когда процессы в клетках протекают нормально, дополняется экономией за счет устранения потерь при передаче СВЧ-энергии, так как в период, когда процессы в клетках протекают нормально, передачи энергии просто нет.

Жизненный процесс связан с непрерывными изменениями в деятельности организма. Некоторые из этих процессов изменения регулярно повторяются, и их можно назвать регулярными. К ним относятся процессы метаболизма, период повторения которых сравнительно велик (часто около суток), сезонные изменения и многие другие. Влиять излучением на нормально протекающие процессы, вероятно, нет необходимости, и на быстро протекающие регулярные процессы даже невозможно, так как необходимая для получения остаточного био-

логического эффекта длительность воздействия СВЧ слишком велика (порядка 1 ч). Не могут дать положительного эффекта и воздействия излучения на нормально протекающие регулярные процессы с большим периодом: воздействия излучения лишь нормализуют процессы, а при нормальном их протекании организм успевает приспособиться к изменениям естественным путем.

Совершенно иначе обстоит дело, когда речь идет о нерегулярных процессах, т. е. о процессах, не повторяющихся или повторяющихся очень редко по сравнению с периодом времени, потребным для перестройки организма. Таковы, например, восстановление организма после повреждений или его перестройка, связанная с внезапным или быстрым изменением условий существования. Такие процессы нередко желательно ускорять.

В некоторых случаях пораженный болезнью или ослабленный вследствие возрастных изменений организм уже не способен самостоятельно, без дополнительных сигналов, поступающих извне, сформировать необходимые информационные структуры, и воздействие излучения позволяет восстановить утраченную функцию.

Таким образом, смысл и значение терапевтических воздействий могут заключаться в организации или ускорении протекания нерегулярных восстановительных или приспособительных процессов в организме.

Одна особенность излучения миллиметрового диапазона. Информационная ценность электромагнитных излучений неодинакова. Наименее ценны хаотические тепловые излучения в живых организмах. Несравненно более информативны упорядоченные электромагнитные колебания, причем их информативность возрастает с частотой. Не будем останавливаться на общеизвестном — на том, что с увеличением частоты колебаний ν возрастает возможность передачи по одному каналу информации о быстро изменяющихся процессах или о большом числе процессов (что используется, например, в системах связи).

Для изучения специфических процессов в живых организмах особенно существенна, по-видимому, другая информация, связанная с длиной волны Λ . Дело в том, что для резонансной системы, обладающей средним линейным размером L , число резонансных частот возрастает с укорочением Λ пропорционально L/Λ . А каждому резонансу соответствует свой характер распределения

полей в системе, определяющей состояние системы. Скорость распространения акустоэлектрических колебаний v_a в поляризованных клеточных мембранах, как уже отмечалось, примерно в 10^6 раз меньше скорости распространения электромагнитных волн в свободном пространстве. А это означает, что информативность определенного участка (составляющего некоторую долю средней волны) миллиметрового диапазона может превысить информативность таких же участков более высокочастотного диапазона. Например, информативность равного участка оптического диапазона оказывается приблизительно в 10^2 раз меньшей (акустоэлектрические волны с присущим им огромным замедлением в оптическом диапазоне могут иметь место лишь вблизи абсолютного нуля, так как при нормальных температурах величина Λ оказывается сравнимой с тепловыми флуктуациями размеров информационных структур).

Информационная ценность того или иного диапазона длин волн, особенно для живых организмов с их ограниченными энергетическими ресурсами, определяется не только его информативностью, но и энергетическими затратами на обеспечение определенного объема информации. Поэтому информационную ценность рационально определять отношением объема информации к энергетическим затратам на ее обеспечение.

Если для низкочастотных диапазонов, для которых $h\nu \ll kT$, а доминирующими являются шумы, имеющие тепловую природу, информационная ценность возрастает пропорционально ν , то для частот, для которых $h\nu \gg kT$, где доминируют квантовые шумы, определяемые дискретным характером излучения, положение изменяется на обратное. Дело в том, что для передачи некоторой информации в области, где $h\nu \gg kT$, необходимо число квантов, не меньшее некоторой величины. Поэтому энергия, нужная для уверенной передачи одной и той же информации, возрастает пропорционально ν , что приводит к снижению информационной ценности диапазона. Для миллиметрового диапазона $h\nu$ лишь приблизительно на два порядка меньше kT , так что энергетические затраты на обеспечение определенного объема информации в этом диапазоне близки к минимуму.

Таким образом, информационная ценность миллиметровых волн для изучения процессов в живых организ-

мах особенно велика как вследствие очень малых величин U_a , обеспечивающих высокую информативность при использовании этого диапазона, так и вследствие малых энергетических затрат на возбуждение колебаний на резонансных частотах, определяющих состояние системы.

Конечно, авторы отдают себе отчет в том, что рассмотренный выше идеализированный подход для объяснения механизма действия миллиметрового излучения низкой интенсивности на биологические объекты нуждается в уточнении и развитии. Например, необходимо корректно оценить затухание акусто-электрической волны в биологических структурах, стабильность частоты колебаний в мембранных резонаторах, силы, необходимые для периодической деформации липидной мембраны, и т. д. Но тем не менее развитая гипотеза не противоречит основным экспериментальным фактам и может послужить основой для объяснения биологических эффектов миллиметрового излучения.

ЛИТЕРАТУРА

Пресман А. С. Электромагнитные поля и живая природа. — М.: Наука, 1968.

Медико-биологические аспекты миллиметрового излучения, низкой интенсивности / Под ред. акад. Н. Д. Девяткова. — М.: ИРЭ АН СССР, 1985.

Сотников О. С. Динамика структуры живого нейрона. — М.: Наука, 1982.

Бергельсон Л. Д. Мембраны, молекулы клетки. — М.: Наука, 1982.

Тушмакова Н. А., Маракуева И. В. Сравнительно-физиологическое исследование ультраструктурных аспектов памяти. — М.: Наука, 1986.

Бабаева А. Г., Зотиков Е. А. Иммунология процессов адаптивного роста, профиликации и их нарушений. — М.: Наука, 1987.

Голант М. Б., Бобровский Ю. Л. Генераторы СВЧ малой мощности. — М.: Советское радио, 1977.

Гершензон Е. М., Голант М. Б., Негирев А. А., Савельев В. С. Лампы обратной волны миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов. — М.: Радио и связь, 1985.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение	3
2. Почему именно миллиметровые волны?	6
3. Основные экспериментальные закономерности взаимодействия миллиметрового излучения с различными объектами	9
4. Вода и миллиметровое излучение	15
5. Какие выводы можно сделать из экспериментальных работ?	19
6. О первичных эффектах взаимодействия излучения с биологическими объектами	22
7. О механизмах действия и роли миллиметрового излучения в жизнедеятельности организмов	30
Литература	63

Научно-популярное издание

**Олег Владимирович Бецкий,
Михаил Борисович Голант,
Николай Дмитриевич Девятков**

МИЛЛИМЕТРОВЫЕ ВОЛНЫ В БИОЛОГИИ

Гл. отраслевой редактор *Л. А. Ерлыкин*
Редактор *К. А. Кутузова*
Мл. редактор *Н. А. Сергеева*
Художник *Г. Ш. Басыров*
Худож. редактор *П. Л. Храмцов*
Техн. редактор *О. А. Найденова*
Корректор *Л. В. Иванова*

ИБ № 9243

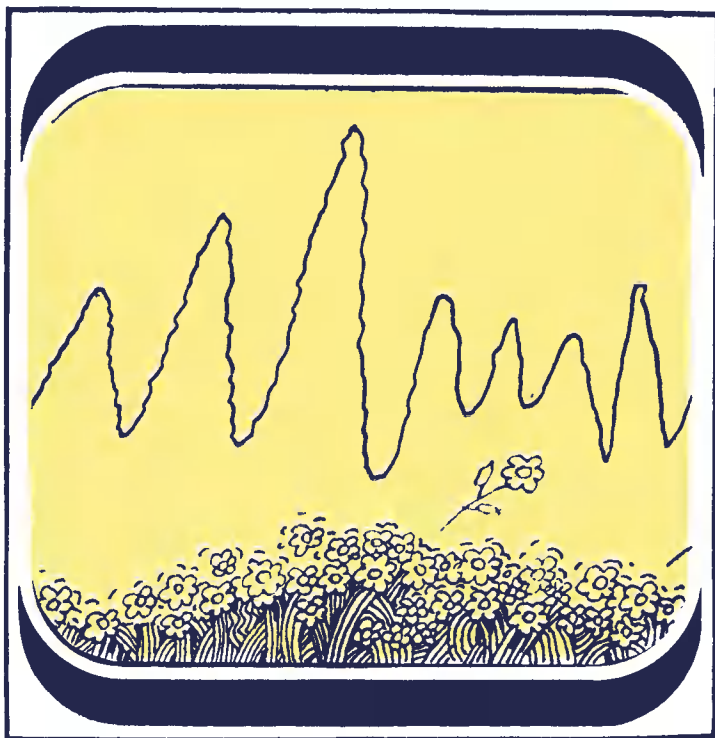
Сдано в набор 04.03.88. Подписано к печати 19.05.88. Т 11786. Формат бумаги 84×108¹/₃₂. Бумага тип. № 3. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 3,36. Усл. кр.-отт. 3,57. Уч.-изд. л. 3,43. Тираж 35 368 экз. Заказ 690. Цена 11 коп. Издательство «Знание». 101835, ГСП, Москва, Центр, проезд Серова, д. 4. Индекс заказа 884006.
Типография Всесоюзного общества «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.

ДОРОГОЙ ЧИТАТЕЛЬ!

Брошюры этой серии в розничную продажу не поступают, поэтому своевременно оформляйте подписку. Подписка на брошюры издательства „Знание“ ежеквартальная, принимается в любом отделении „Союзпечати“.

Напоминаем Вам, что сведения о подписке Вы можете найти в „Каталоге советских газет и журналов“ в разделе „Центральные журналы“, рубрика „Брошюры издательства „Знание“.

Цена подписки на год 1 р. 32 к.



СЕРИЯ
ФИЗИКА