1965 г. Июнь *Том 86, вып. 2*

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

577.37

ДЕЙСТВИЕ МИКРОВОЛН НА ЖИВЫЕ ОРГАНИЗМЫ И БИОЛОГИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ

А. С. Пресман

Биологическое действие радиочастотных электромагнитных полей изучается на протяжении почти сорока лет. За это время, в соответствии с развитием радиотехники, в круг исследований включались все более и более высокие частоты. Особенно широкий размах получили исследования биологического действия микроволн *). Примерно за 20 лет, прошедших со времени технического освоения этого диапазона, опубликовано уже более 1000 работ по вопросам: электрических свойств живых тканей в микроволновом диапазоне, поглощения и преобразования энергии микроволн в тканях, действия этих волн на живые организмы и биологические структуры и выявления механизма этого действия, применения микроволн в физиотерапии, изучения вредного действия микроволн и, наконец, применения микроволн в биологических исследованиях.

Установлено, что микроволны оказывают влияние на живые организмы самой различной степени организации — от простейших до высокоразвитых, что это влияние имеет место даже при весьма небольших интенсивностях облучения и характеризуется разнообразными эффектами — от реакций целого организма до изменений на молекулярном уровне. Имеются основания полагать, что микроволны принимают участие и в некоторых биологических процессах.

Биологи и медики все более широко привлекают физиков и инженеров к исследованиям биологического действия микроволн. Особенно заметны такие тенденции в последние годы, когда накопленные уже экспериментальные материалы позволили перейти к исследованиям биофизико-химических механизмов этого действия. Вместе с тем физики и радиоинженеры нашли в этих исследованиях и самостоятельный интерес — возможность изучения некоторых специфических биологических явлений, а также отправные данные для физического моделирования некоторых биологических систем и процессов.

Изложенное дает основание считать, что назрела необходимость ознакомить физиков с экспериментальными и теоретическими работами по изучению биологического действия микроволн, так как до сего времени соответствующие обзоры публиковались главным образом в биологических и медицинских журналах [1-11], а из статей, появившихся в радиотехнической периодике [12-16], далеко не все отличаются достаточной полнотой изложения.

В данной статье мы рассмотрим такие экспериментальные и теоретические исследования, которые, на наш взгляд, представляют наибольший

*) В биологической и медицинской литературе под микроволнами подразумевают широкий диапазон частот — от 100 *Мгц* до 100 *Ггц*.

интерес для физиков, и постараемся сделать это в форме, доступной для неспециалистов в биологии и медицине.

Так как исследования биологического действия микроволн в значительной степени связаны с соответствующими исследованиями в других участках спектра радиочастот (а в последнее время даже низкочастотного и инфранизкочастотного диапазонов), то нам придется иногда выходить за рамки, ограниченные названием статьи.

1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТКАНЕЙ В МИКРОВОЛНОВОМ ДИАПАЗОНЕ

Исследованиям электрических свойств тканей и суспензий клеток в микроволновом диапазоне посвящено значительное число работ и в том числе несколько специальных обзорных статей [17–19].

Еще в ранних исследованиях было установлено [6, 18], что при частотах ниже десятков мегагерц диэлектрическая проницаемость и удельное сопротивление тканей определяются главным образом клеточными мембранами, действующими как тонкие слои с высокими емкостью и сопротивлением. Частотной зависимостью импеданца клеточных мембран и обусловливается наблюдаемое уменьшение импеданца тканей по мере возрастания частоты.

В микроволновом диапазоне (выше 100 *Мгц*) клеточные мембраны становятся практически короткозамкнутыми. Поэтому электрические свойства суспензий клеток и тканей с высоким содержанием воды определяются водным, солевым и протеиновым содержанием внутри- и межклеточной среды. Электрические свойства жировых тканей определяются параметрами жировых клеток и окружающей их электролитической среды.

Комплексная диэлектрическая проницаемость тканей животных и человека измерялась, как правило, на свежевырезанных образцах при температуре 37° С (в некоторых измерениях — при 27° С), при помощи известных в радиотехнике волноводных и резонансных методов, модифицированных с учетом высоких значений диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь в живых тканях [20–23]. Для измерений в диапазоне 100—1000 *Мгц* применялась двухпроводная линия [24–26], в диапазоне 1—3 *Ггц* — коаксиальная линия [27, 28] и при более высоких частотах — волноводная линия [29–31]. Измерения с жидкими субстанциями проводились теми же методами и, кроме того, с использованием коаксиальных и волноводных мостов [32]. Резонансные методы с помещением образца в коаксиальный или объемный резонатор применялись только для малых образцов биологических материалов [33, 34].

По величинам комплексной диэлектрической проницаемости $\varepsilon^* = \varepsilon' + j\varepsilon''$ и характеру ее дисперсии в микроволновом диапазоне ткани живых организмов можно разделить [5, 6, 18] на три группы в соответствии с содержанием в них воды: жидкие ткани (кровь, лимфа), ткани с высоким содержанием воды (мышцы, кожа, печень и т. п.) и ткани с малым содержанием воды (жир, кости).

В табл. I, составленной по данным разных авторов [5, 6, 18, 28–31, 35], приведены значения ε' и ε'' для типичных тканей человека при разных частотах. Приведены также соответствующие данные для воды [5, 25, 36]. Близкие значения рассматриваемых величин найдены и для соответствующих тканей животных [27] (см. табл. I).

Представленные в таблице данные показывают, что ткани с большим содержанием воды обладают высокими значениями диэлектрической проницаемости, а ткани с малым содержанием воды — низкими. Значения

Таблица I

Комплексная диэлектрическая проницаемость тканей человека в микроволновом диапазоне при температуре 37° С

Вид ткани	Частота, *Мгц*							
	100	400	1000	3000	4600	8500	9400	24 000
ε′—диэлектрическая проницаемость								
Мышцы	73,5	53,0	50,5	46,5	47,3	41,0	—	—
Кожа	—	—	—	43,5	—	35,5	—	23,0
Печень	77,5	46,0	46,5	42,5	—	36,0	—	—
Жир	—	5,5	6,4	6,5	5,85	4,0	4,5	3,4
Костный мозг	—	—	5,8	5,0	—	4,9	—	—
Кости	—	—	—	8,35	7,83	—	7,6	6,3
Цельная кровь	—	61,5	62,5	53,0	—	—	45,0	32,0
Вода	74,4	74,5	—	74,4	71,5	—	65,3	41,6
ε″—коэффициент потерь								
Мышцы	—	51,5	23,4	18,0	18,6	17,6	—	—
Кожа	—	—	—	16,5	14,0	—	16,0	13,0
Печень	107,0	39,0	17,6	12,2	—	13,3	—	—
Жир	—	3,7	2,08	1,6	1,17	0,66	0,95	1,1
Костный мозг	—	—	1,27	1,05	—	0,68	—	—
Кости	—	—	—	1,32	1,3	—	1,45	1,1
Цельная кровь	—	58,5	28,0	15,0	—	—	23,0	20,0
Вода	0,3	0,95	—	8,2	12,8	—	22,3	34,5

Примечания. 1. Значения ε″ при частотах 100—3000 *Мгц* получены путем пересчета соответствующих данных для удельной электропроводности.
2. Значения ε′ и ε″ для крови получены путем пересчета соответствующих данных для температуры 27° С (с помощью температурных коэффициентов).
3. Значения ε′ и ε″ для воды получены путем пересчета соответствующих данных для температур 20 и 25° С.

диэлектрической проницаемости крови оказываются примерно на 30% ниже соответствующих значений для воды (или физиологического раствора). Это различие относят [25,26] за счет присутствия в крови протеиновых молекул (главным образом гемоглобина), которые представляют как бы «диэлектрические полости» с низкой диэлектрической проницаемостью (20—25 и ниже) в электролитической среде с высокой диэлектрической проницаемостью.

Данные таблицы иллюстрируют частотную зависимость — дисперсию комплексной диэлектрической проницаемости в микроволновом

диапазоне. Теоретический анализ характера дисперсии для тканей с большим содержанием воды проводился [37, 38] на основе рассмотрения данных для крови, структура которой хорошо известна, а полученные на ней результаты легко сравнивать с соответствующими данными для воды. На рис. 1 представлены кривые дисперсии диэлектрической проницаемости и удельного сопротивления крови [6].

В ряде работ [25, 36, 38, 39] было показано, что при частотах ниже 100 *Мгц* ход дисперсии для крови удовлетворительно аппроксимируется уравнениями Дебая — Данцера [40], выведенными на основе теории Максвелла — Вагнера для сферических частиц, суспензированных в среде с иными значениями комплексной диэлектрической проницаемости:

$$\varepsilon' = \varepsilon'_\infty + \frac{\varepsilon'_0 - \varepsilon'_\infty}{1 + (\omega T)^2}, \quad \varkappa = \varkappa_0 + \frac{\varkappa_\infty - \varkappa_0}{1 + (\omega T)^2}(\omega T)^2, \tag{1}$$

где

$$\left.\begin{aligned} T &= RC_m \frac{\varkappa_i + 2\varkappa_a}{2\varkappa_i\varkappa_a + RG_m(\varkappa_i - 2\varkappa_a)}, \\ \varepsilon'_0 &= \frac{9}{4\varepsilon_r} \frac{pRC_m}{\left[1 + RG_m\left(\frac{1}{\varkappa_i} + \frac{1}{2\varkappa_a}\right)\right]^2}, \\ \varkappa_\infty &= \varkappa_a\left(1 + 3p\frac{\varkappa_i - \varkappa_a}{\varkappa_i + 2\varkappa_a}\right), \\ \varkappa_0 &= \varkappa_a\left[1 - \frac{3}{2}p\frac{1 - RG_m\left(\frac{1}{\varkappa_i} - \frac{1}{\varkappa_a}\right)}{1 + RG_m\left(\frac{1}{\varkappa_i} + \frac{1}{2\varkappa_a}\right)}\right], \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

ε — диэлектрическая проницаемость, $\varkappa$ — удельная проводимость ($ом^{-1}/см$), T — постоянная времени релаксации, R — радиус частиц крови ($см$), p — доля объема, занимаемая частицами, C_m и G_m — емкость и проводимость мембраны на 1 $см^2$, $\varepsilon_r = 8{,}85 \cdot 10^{-14}$ $ф/см$.

Индексы 0 и ∞ относятся соответственно к нулевому и бесконечно высокому значениям частоты, индексы i и a — к частицам и окружающей их среде.

Трудно было объяснить медленное изменение ε^* в диапазоне 100—1000 *Мгц*. При этих частотах влияние клеточных мембран уже не сказывается, а полярные свойства молекул воды еще не проявляются. Нельзя ожидать при таких частотах и релаксационной поляризации протеиновых молекул, частота релаксации которых около 10 *Мгц*. Было предположено [25], однако, что отдельные части протеиновых молекул обладают степенями свободы вращения, и частоты релаксации этих частей конечно выше, чем у молекулы в целом. Для экспериментальной проверки этой гипотезы были проведены измерения на молекулярных соединениях, сравнимых по размеру и свойствам с полярными группами в молекуле гемоглобина. Для некоторых аминокислот и пептидов был обнаружен спектр частот релаксации от 400 до 3000 *Мгц*. Другое интересное предположение [25] состоит в том, что молекулы воды, гидратирующие молекулу гемоглобина, с диэлектрической точки зрения находятся между льдом и свободной водой, обладая частотами релаксации в диапазоне 300—500 *Мгц*. При таких условиях в диапазоне 100—900 *Мгц* ε' «связанной» воды должна диспергировать в пределах 78—5, что могло бы объяснить дисперсию ε' крови в этом диапазоне.

Характер дисперсии при частотах выше 1 *Ггц* удовлетворительно объясняется полярными свойствами молекул воды. Кривые дисперсии ε' и ε'' достаточно хорошо аппроксимируются приведенными уравнениями

Дебая (1) для одного времени релаксации, если в выражение для ε'' ввести дополнительный член, учитывающий ионную проводимость [28, 33]:

$$\varepsilon'' = \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty}{1+(\omega T)^2}\,\omega T + 1{,}3\cdot 10^{13}\,\frac{\sigma}{\omega}, \qquad (3)$$

где σ — ионная проводимость, предполагаемая независимой от частоты.

Характер дисперсии ε^* жировых тканей обусловливается структурой последних. Установлено [28], что диэлектрические параметры чисто жировых тканей практически частотно независимы в микроволновом диапазоне, в то время как у тканей, состоящих из жировых клеток, окруженных электролитической средой, наблюдается дисперсия. Характер дисперсии параметров костных тканей найден [28] удовлетворяющим уравнениям Дебая со временем релаксации $0{,}7\cdot 10^{-11}$ *сек* и поправкой на ионную электропроводность.

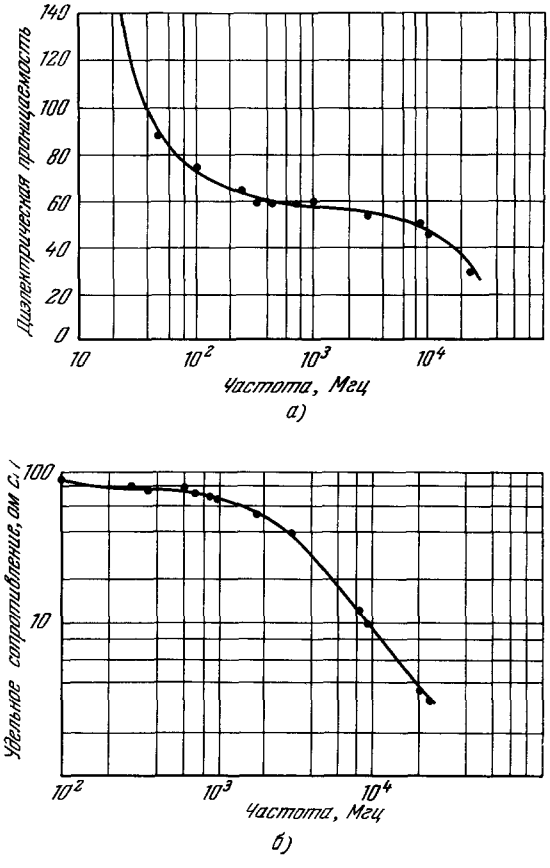


Рис. 1. Дисперсия диэлектрической проницаемости (*а*) и удельного сопротивления (*б*) крови в диапазоне радиочастот.

2. ПОГЛОЩЕНИЕ МИКРОВОЛН В ТКАНЯХ ЖИВЫХ ОРГАНИЗМОВ

Исходя из электрических свойств тканей, поглощение в них энергии микроволн связывают [1, 5, 6, 29, 30] с двумя основными процессами: потерями энергии за счет ионной проводимости и диэлектрическими потерями за счет релаксационной поляризации молекул воды. С возрастанием частоты все более значительная доля поглощаемой энергии обусловливается диэлектрическими потерями: в 10-*см* диапазоне — 50%, в 3-*см* — 90%, в 1-*см* — 98% [29, 30].

Как известно, такое поглощение энергии микроволн связано с преобразованием ее в тепловую. На этом основании многие исследователи считали нагрев тканей единственной причиной биологического действия микроволн. Утверждали [19], что действие микроволн короче 10 *см* практически не отличается от действия инфракрасных лучей. Между тем такое отождествление представляется необоснованным [3] уже в силу различия процессов преобразования этих двух видов лучистой энергии в тепловую. В самом деле, при инфракрасном облучении нагрев тканей происходит за счет увеличения кинетической энергии беспорядочного движения молекул, а при микроволновом — за счет упорядоченного, когерентного колебания ионов и молекул воды с частотой микроволн

(точнее с близкой к ней частотой). Если учесть, что в биологических структурах большую роль играют мембраны с поверхностными ориентированными слоями гидратированных белковых молекул, то существенное различие биологических эффектов при этих двух процессах станет очевидным. Как будет показано ниже, это соображение подтвердилось в экспериментах (которые будут описаны в гл. 6), показавших, что при одинаковом нагреве живых тканей инфракрасными лучами и микроволнами 1-*см* диапазона биологические эффекты отмечаются только в последнем случае.

Обсуждалась возможность поглощения микроволн, связанного с внутримолекулярными процессами в белковых молекулах. Так, например, предполагали [41], что поглощение энергии микроволн может быть связано с вращением внутримолекулярных структур относительно C — C-связей, с трансляционными переходами гидроксильных групп из одного положения с водородной связью в другое, с вращательными уровнями энергии в метастабильных состояниях и т. д. Рассматривалась также возможность ионизационных эффектов микроволн с формированием радикалов O_2 и OH при высоких импульсных мощностях [42]. Однако эти предположения не получили пока экспериментального подтверждения.

Более убедительны теоретические и экспериментальные данные о резонансном поглощении микроволн биоструктурами. Такое поглощение впервые было обнаружено [43–45] при измерении комплексной диэлектрической проницаемости метилпальмитата ($C_{15}H_{31}COOH_3$) в диапазоне частот от 50 *гц* до 30 *Ггц*. Наблюдался максимум tg δ и плато кривой ε' при частоте 4 *Ггц*. В пользу резонансного характера этого эффекта свидетельствовала независимость этой частоты от температуры. Однако максимумы tg δ понижались при уменьшении температуры, что противоречило чисто резонансному эффекту. Авторы пришли к заключению, что наблюдаемое поглощение следует рассматривать как комбинацию резонансного и релаксационно-поляризационного.

Недавно была высказана интересная гипотеза о возможности резонансного поглощения микроволн и УКВ белковыми молекулами [46, 47]. Возможность поглощения микроволн молекулами ферментов связывают с диполь-дипольными взаимодействиями, возникающими благодаря флуктуациям распределения протонов в молекуле. При среднем расстоянии между боковыми группами молекулы около 9,5 Å диполь-дипольный переход соответствует энергии кванта 3-*см* волн. С увеличением расстояния между группами возрастает длина волны, соответствующая энергии взаимодействия. Автор предположил [46], что влияние микроволн на протонное распределение в молекуле фермента может привести к изменению активности реакции фермент-субстратного комплекса. Для проверки этого предположения были проведены эксперименты по облучению раствора, содержащего такой комплекс, микроволнами со свипирующей частотой в пределах 8,2—12,4 *Ггц*. Облучение в течение 1 *мин* привело к изменению оптической плотности раствора.

Характер поглощения и распределения энергии микроволн в тканях тела животных и человека определяется степенью отражения от поверхности тела, анатомическим расположением слоев тканей и размерами тела относительно длины волны.

Коэффициент отражения ϱ вычислялся [6, 48–50] по известной формуле для плоской волны, падающей из воздуха на плоскую поверхность со значением ε^* для кожи и $\mu = 1$ (что справедливо для тканей животных)

$$\varrho = \left(\frac{\sqrt{\varepsilon^*} - 1}{\sqrt{\varepsilon^*} + 1}\right)^2. \qquad (4)$$

На рис. 2 показано изменение величины коэффициента отражения в зависимости от частоты, обусловленное соответствующим изменением ε^* кожи. В этом расчете не учитывается, однако, тот факт, что между слоем кожи и мышечными тканями, имеющими примерно одинаковое значение ε', находится слой подкожной жировой ткани, обладающий значительно меньшей величиной ε'. Теоретический анализ показал [51-53], что слой подкожного жира может играть роль своеобразного трансформатора импеданцев между воздушным пространством и мышечной тканью. Поэтому доля облучающей энергии, поглощаемая тканями тела, может

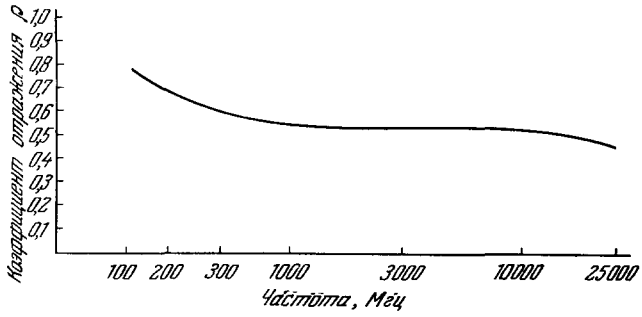


Рис. 2. Частотная зависимость коэффициента отражения радиоволн от поверхности тела человека.

варьировать в широких пределах от 20 до 100% в зависимости от длины волны и толщин слоев кожи и жира. На рис. 3 показаны такие вариации.

Глубина проникновения микроволн в ткани (уменьшение в e раз) вычислялась из уравнения распространения электромагнитных волн

Таблица II

Глубина проникновения энергии микроволн в различные ткани животных, *см*

Вид ткани \ Частота, *Мгц*	100	200	400	1000	3000	10 000	24 500	35 000
Костный мозг . .	22,9	20,66	18,73	11,9	9,924	0,34	0,145	0,0730
Головной мозг . .	4,132	3,56	2,072	1,933	0,476	0,168	0,075	0,0378
Хрусталик глаза	9,42	4,39	4,23	2,915	0,500	0,174	0,0706	0,0378
Стекловидное тело	2,17	1,69	1,41	1,23	0,535	0,195	0,045	0,03145
Жир	20,45	12,53	8,52	6,42	2,45	1,1	0,342	—
Мышцы	3,454	2,32	1,84	1,456	—	0,134	—	—
Цельная кровь . .	2,86	2,15	1,787	1,40	0,78	0,148	0,0598	0,0272
Кожа	3,765	2,78	2,18	1,638	0,646	0,189	0,0722	—

в диэлектрической среде с потерями [6, 50]. В табл. II представлены величины, вычисленные для разных тканей при различных частотах.

Для выяснения зависимости поглощения микроволн в тканях тела животного от линейных размеров последнего было проведено теорети-

ческое исследование поглощения энергии плоской волны в полупроводящей сфере [54]. В качестве меры поглощения было выбрано «относительное поглощающее сечение» S, представляющее отношение мощности, поглощаемой в сфере (ε_1, δ_1) радиуса a, к мощности, падающей на поперечное сечение сферы при распространении плоской волны в воздухе (ε_2, μ_2):

$$S = \frac{W_a}{P_d \pi a^2}, \qquad (5)$$

где $W_a = W_t - W_s$ — мощность, поглощаемая в сфере, W_t — мощность, получаемая сферой из плоской волны (частично поглощаемая, частично рассеиваемая), W_s — мощность, рассеиваемая на сфере,

$$P_d = \frac{E_0^2}{2\sqrt{\varepsilon_2/\mu_2}} = \frac{E_0^2}{754}\ вт/см^2$$

— плотность потока мощности.

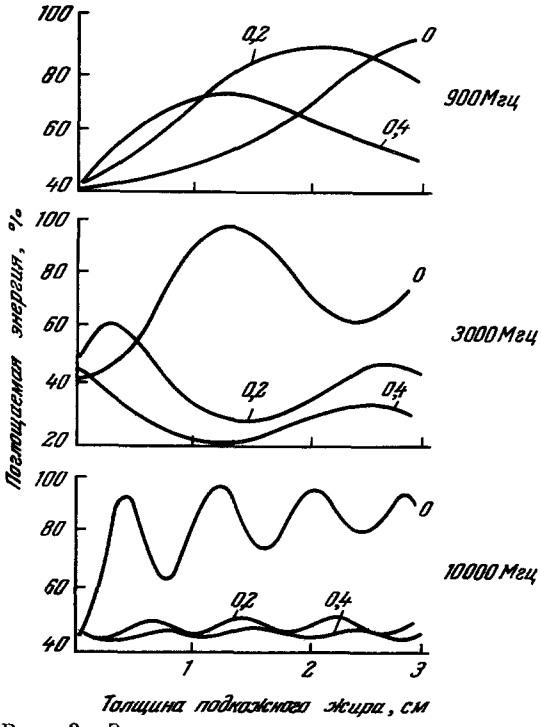


Рис. 3. Зависимость поглощения энергии микроволн разных частот тканями тела животных от толщины подкожного жирового слоя при различных толщинах кожи (цифры над кривыми).

Расчеты (проведенные на вычислительной машине типа «Юнивак») величины S как функции $\alpha = \frac{2\pi a}{\lambda}$ показали:

а) При $a < \lambda$ ($\alpha < 2{,}4$) S испытывает колебания с амплитудой, значительно превышающей единицу (рис. 4), т. е. при малых размерах объекта по сравнению с λ в нем может поглощаться больше мощности, чем падает на его поперечное сечение.

б) С увеличением α S плавно уменьшается, достигая при $\alpha = 6$ постоянного значения $S = 0{,}5 \pm 0{,}1$ (см. рис. 4) независимо от величин σ_1 и a. Таким образом, при достаточно больших размерах объекта по сравнению с длиной волны в нем будет поглощаться около 50% энергии независимо от формы объекта, его электропроводности σ_1 и длины волны. Эти закономерности были подтверждены в исследованиях на моделях [55].

Значительное число исследований было посвящено выяснению зависимости теплообразования в тканях от интенсивности и времени облучения, определению характера распределения температуры в тканях облучаемого участка [1, 2]. Однако результаты большинства таких исследований были противоречивыми: в одних случаях отмечался более значительный нагрев в глубоких тканях по сравнению с поверхностными, в других — противоположное распределение температуры, в третьих — наличие как положительного, так и отрицательного градиента температуры в зависимости от условий облучения. Основными причинами этих расхождений считают [2, 56] несовершенство дозирования поглощаемой мощности и несопоставимость ряда условий экспериментов.

Более определенные результаты были получены путем «контактного облучения» [56–58]. Облучаемый участок тела прижимали к рупорному окон-

чанию волноводного тракта, обеспечивая согласование этой нагрузки с волновым сопротивлением волновода. Температура кожи в центре

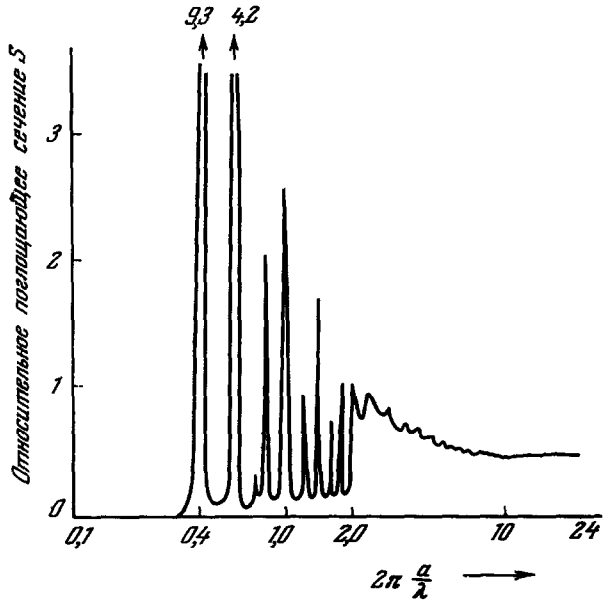


Рис. 4. Поглощение энергии плоской волны ($\lambda = 10{,}4$ *см*) в полупроводящей сфере ($\varepsilon_1 = 60$, $\sigma_1 = Mom$) в зависимости от отношения радиуса сферы a к длине волны λ.

облучаемого участка измерялась в процессе облучения при помощи термопары, провода которой располагались перпендикулярно электрическим силовым линиям. В глубоких тканях температура измерялась термопарой в кончике иглы шприца через 30—60 *сек* после прекращения облучения. На рис. 5 приведены графики нагрева тканей в облучаемом участке бедра собаки. Меньший нагрев подкожного жирового слоя автор объяснял малым поглощением энергии, а выравнивание температуры между слоями по мере продолжения облучения — теплопроводностью тканей и отводом тепла благодаря усилению кровотока.

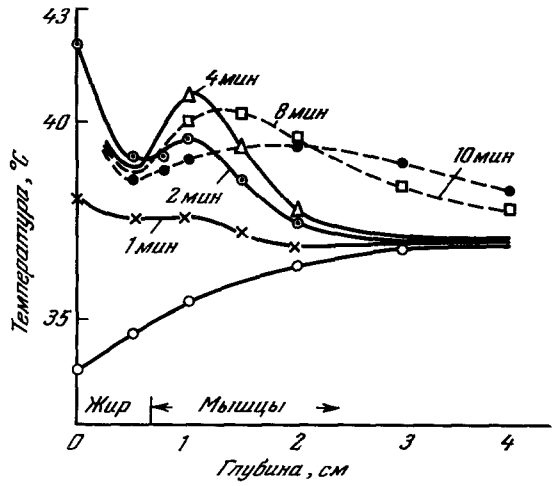


Рис. 5. Нагрев тканей на различной глубине от поверхности облучаемого микроволнами ($\lambda = 10$ *см*) участка бедра собаки при разных продолжительностях облучения.

Распределение нагрева между слоями кожи, подкожного жира и мышечных тканей зависит также от соотношения толщин этих слоев при данной частоте микроволнового облучения, что обусловливается эффектом согласования. На рис. 6

приведены графики теплообразования в слоях в зависимости от толщины подкожного жирового слоя и частоты [53].

Предпринимались попытки вычислить количество тепла, выделяющегося на заданной глубине от облучаемой поверхности, и оценить возможное повышение температуры в зависимости от интенсивности

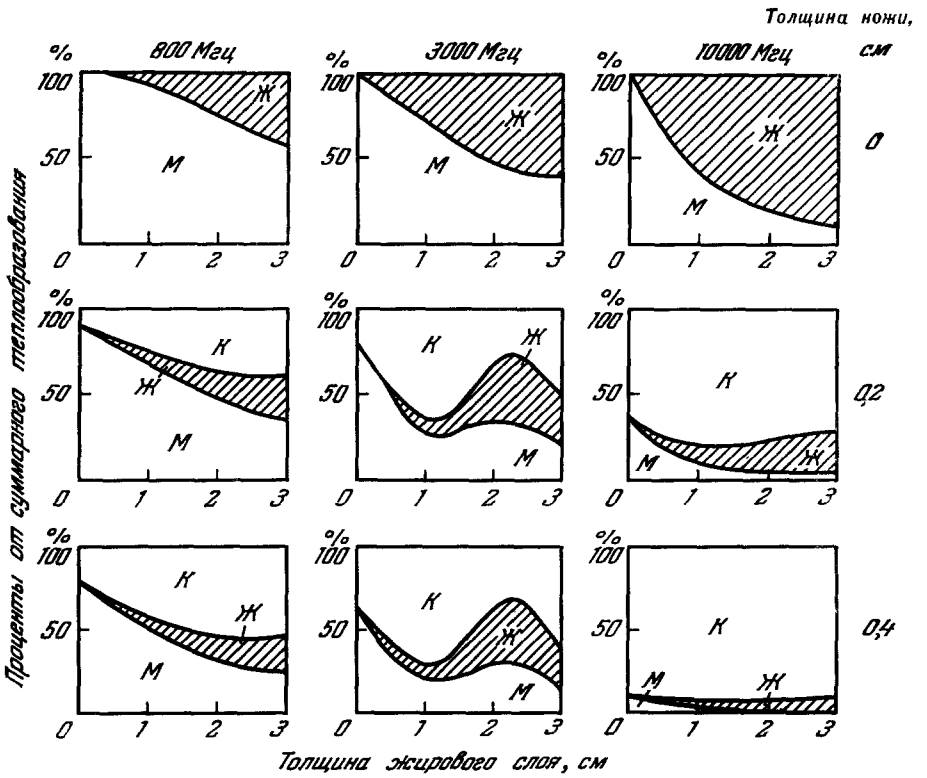


Рис. 6. Теплообразование в коже К, подкожном жировом слое *Ж* и мышцах *М* при облучении участков тела человека микроволнами разных частот в зависимости от толщины подкожного жирового слоя и толщины кожи в облучаемом участке.

облучения [58–60]. Однако поскольку эти расчеты делались на основе довольно грубых допущений, полученные результаты приближались к экспериментальным только при непродолжительном облучении.

3. ДОЗИМЕТРИЯ МИКРОВОЛН ПРИ ОЦЕНКЕ ИХ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЛЮДЕЙ И В ЭКСПЕРИМЕНТАХ С ЖИВОТНЫМИ

Для оценки интенсивности воздействия микроволн на людей, обслуживающих испытания и эксплуатацию генераторов, и при дозировке облучения животных в экспериментах предлагалось применять различные величины: интенсивность облучения (плотность потока мощности) [48, 61–63], полную поглощаемую мощность [63], дозу (поглощаемую энергию) [63] и плотность электромагнитной энергии [64]. Представляется, однако, очевидным, что при выборе какой-либо из этих величин следует исходить из конкретной задачи исследования [65].

При оценке условий облучения людей, находящихся в зоне излучения микроволн, а также при экспериментальном облучении животных, размеры тела которых по крайней мере сравнимы с длиной волны, целесообразно измерять интенсивность облучения (удобно выражать в *мвт/см*^{2}). Для суждения же о доле энергии, поглощаемой в поверхностных слоях тела, можно вычислять «действующую интенсивность»— разность между интенсивностями падающей и отраженной волн. Для измерения интен-

сивности облучения в производственных условиях, вблизи радиолокационных станций и в эксперименте разработан ряд приборов [16, 61, 62, 66, 67], представляющих собой измерители мощности (чаще всего термисторные) с соответствующей антенной.

При экспериментальном облучении малых животных встречается необходимость оценивать всю поглощаемую в их теле мощность. Такая оценка при частоте 350 *Мгц* осуществлялась путем помещения кролика внутри волновода и измерения входной и выходной мощностей [68]. Предлагались также методы облучения животных в объемных резонаторах [69,70]. Однако эти методы не нашли практического применения ввиду значительных технических трудностей.

Значительно легче добиться полного поглощения в облучаемом участке тела животного или человека при помощи упомянутого выше «контактного метода» [55–57], в котором непосредственно дозируется действующая интенсивность. С меньшей точностью этот метод применялся и для облучения малых животных, помещаемых под рупором (облучение со спины) или над рупором (облучение со стороны живота) при обеспечении соответствующего согласования с линией передачи [49,71]. Дозировка поглощаемой мощности применялась [72–74] при облучении малых биологических объектов (препаратов тканей, белковых растворов, одноклеточных в водной среде и т. п.).

В физиотерапии чаще всего пользуются относительной дозировкой по выходной мощности генератора и расстоянию от облучателя (с полусферическими и уголковыми отражателями) до облучаемой поверхности. Путем измерения температуры в различных местах облучаемого участка были получены диаграммы распределения интенсивности [75]. Этот метод дозирования широко использовался и в экспериментальных исследованиях.

Делались попытки добиться полного поглощения подводимой к облучателю энергии в облучаемом участке тела пациента, помещая между облучателем и поверхностью тела согласующие пластины — «четвертьволновые трансформаторы» [76]. В последнее время предложен контактный метод облучения при помощи керамического диэлектрического излучателя [77].

Для сравнения укажем, что условия воздействия сравнительно низкочастотных электромагнитных полей, когда объект находится в зоне индукции, оцениваются путем раздельного измерения напряженностей электрической и магнитной составляющих [70, 78]

4. РЕАКЦИИ ОРГАНИЗМА ЖИВОТНЫХ НА ОБЛУЧЕНИЕ МИКРОВОЛНАМИ СРЕДНИХ И БОЛЬШИХ ИНТЕНСИВНОСТЕЙ

Одной из выраженных реакций организма животного на общее облучение микроволнами средних и больших интенсивностей (десятки и сотни *мвт/см*^{2}) является повышение температуры тела (обычно измеряется реактальная температура). Этот тепловой эффект микроволн, связанный с процессами терморегуляции и активной адаптации организма, может приводить как к обратимым, так и к необратимым изменениям в зависимости от условий облучения и от физиологического состояния облучаемого животного.

Исследования роли процессов терморегуляции в тепловом эффекте микроволн проводились [79] на основе известной закономерности, что при данной температуре тела результирующая теплоотдача равна алгебраической сумме теплообразования за счет обменных процессов и теплопотерь за счет излучения и при дыхании (у человека добавляются потери при потоотделении), как это показано на рис. 7, *а*. В интервале терморегуляции (между точками пересечения результирующей кривой с осью абсцисс) преобладают теплопотери, что ведет к восстановлению нормальной температуры. Если же нагрев выше, то теплообмен может стать положительным и температура тела возрастает вплоть до гибельной для животного. Эксперименты с микроволнами проводились в интервале терморегуляции при автоматическом поддержании заданой температуры у облучаемого животного. На рис. 7, *б* приведена результирующая кривая, подобная приведенной на рис. 7, *а*. Максимально возможное поглощение микроволн (соответствующее максимуму теплопотерь) установлено при повышении температуры у крысы на 4,5°, у кролика на 3,5° и у собаки на 2,5°.

Серия исследований при длительных облучениях животных импульсными микроволнами больших интенсивностей (200 *Мгц* и 2,8 *Ггц*, 100 и 165 *мвт/см*^{2}) выявила реакции, свидетельствующие о включении активных адаптационных процессов [80–82]. Было установлено, что по мере облучения наблюдаются три последовательные фазы изменения температуры: начальное повышение, равновесное состояние и быстрый подъем до критических значений (41—42°С), приводящий к гибели животного, если не прекращено облучение. Облучение при частоте 2,8 *Ггц* давало больший тепловой эффект, чем при частоте 200 *Мгц* и той же интенсивности. Анестезирование собак приводило к укорочению равновесной фазы или к ее исчезновению. У кроликов и крыс анестезирование понижало тепловой эффект при частоте 2,8 *Ггц*, но повышало его у крыс при частоте 200 *Мгц*. По мере повторения облучений наблюдалось повышение

сопротивляемости организма — фаза равновесной температуры удлинялась и животные переносили все более продолжительное облучение.

Наряду с температурными реакциями облучение вызывало значительные изменения в составе форменных элементов крови: понижение концентрации эритроцитов, сменяющееся ее повышением при продолжении облучения, увеличение количества нейтрофилов, уменьшение лимфоцитов и эозинофилов. Подобные изменения наблюдались [83, 84] и при общем облучении крыс микроволнами частотой 24 *Ггц* при интенсивности 24 *мвт/см*², как это показано на рис. 8.

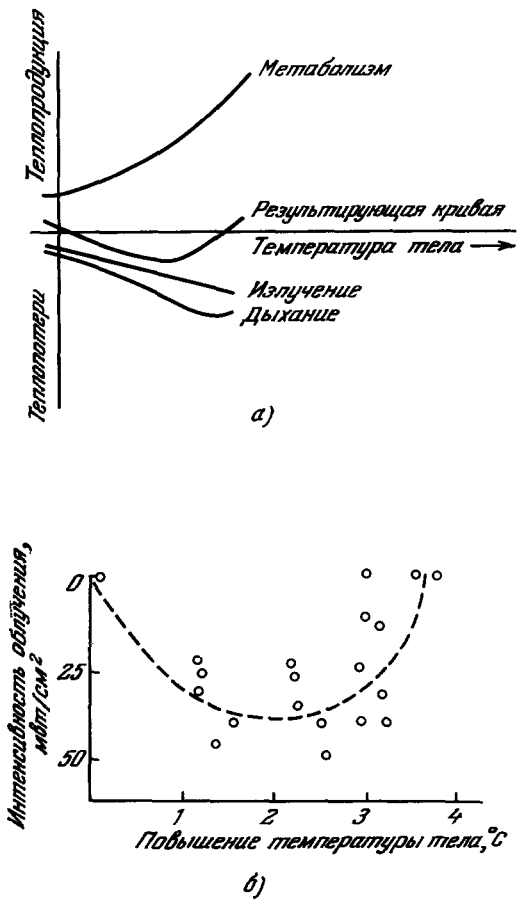


Рис. 7. *а*) Характер теплообмена у теплокровных животных в зависимости от температуры тела; *б*) соотношение между интенсивностями облучения и повышением температуры тела собаки при общем облучении микроволнами ($\lambda = 10$ *см*).

В этой же серии исследований [81, 85, 86] изучалось комбинационное действие микроволн и ионизирующих излучений. Было установлено, что животные, перенесшие ионизирующее облучение, сильнее реагируют на микроволновое. При одновременном облучении микроволнами (2,8 *Ггц*, 100 *мвт/см*²) и γ-лучами (250 *кв*) быстрее восстанавливался уровень нейтрофилов в крови, чем это происходило без микроволнового облучения. С другой стороны, число нейтрофилов возрастало в восемь раз больше, чем только при микроволновом облучении. Предварительное облучение микроволнами (2,8 *Мгц*) с интенсивностью 100 *мвт/см*² в течение 3—6 *час* почти в четыре раза уменьшало смертность от последующего ионизирующего (340 *р*); менее продолжительное облучение (0,5—1,5 часа) не давало эффекта. С другой стороны, продолжительное, но более интенсивное облучение (165 *мвт/см*²) также не давало эффекта. Наконец, многократное микроволновое облучение, к которому животные адаптировались, уменьшало смертность от ионизирующего примерно в полтора раза.

Эти адаптационные эффекты рассматривались авторами как проявление теплового стрессорного действия микроволн *). Между тем был получен ряд экспериментальных данных, не согласующихся с этой гипотезой. Так, например, наблюдалось [83], что микроволны с частотой 24 *Ггц* (полностью поглощающиеся в коже) вызывают в четыре раза большее повышение температуры, чем инфракрасные лучи при той же продолжительности и интенсивности облучения. А для гибели животных требовалось в 8 раз менее продолжительное облучение микроволнами, чем инфракрасными лучами той же интенсивности.

Как указывалось, повторные облучения собак микроволнами больших интенсивностей уменьшали чувствительность животных к облучению. Наряду с этим обнаружено [87], что многократное облучение крыс микроволнами малой интенсивности (3 *Ггц*, 1 *мвт/см*²), наоборот, сенсибилизируют организм к гибельному действию облучения

*) Стресс, или общий адаптационный синдром, — совокупность приспособительных реакций организма на любое опасное воздействие (тепло, химические вещества, психическая травма и т. д.). Эти реакции протекают по схеме: воздействующий агент (стрессор) стимулирует активность гипоталамуса и выделение гипофизом гормона АКТГ, что в свою очередь активизирует гормональную деятельность коры надпочечников. Описанные изменения крови характерны для ранних проявлений теплового стресса.

с большей интенсивностью (65 *мвт/см*^{2}) и что гибельная продолжительность облучения непрерывными микроволнами в 4—5 раз больше, чем при импульсном облучении той же средней интенсивности. Между тем в более ранних исследованиях [88] было установлено, что при одинаковой интенсивности импульсные и непрерывные микроволны одинаково нагревают ткани животных, а по повышению общей температуры тела непрерывные микроволны оказались даже эффективнее импульсных [81].

Комбинационное действие микроволн и ионизирующих излучений недавно наблюдалось [89] при столь малых интенсивностях и продолжительностях микроволнового облучения, когда тепловой стрессорный эффект был маловероятен. У крыс, в течение 25 дней ежедневно по 30 *мин* облучавшихся непрерывными микроволнами (2,5 *Ггц*, 10 *мвт см*^{2}), отмечено уменьшение смертности от последующего γ-облучения (600 *р*) в три раза по сравнению с контрольными. Облучение импульсными микроволнами (1 *мксек*, 700 *имп/сек*) при прочих равных условиях не давало эффекта.

Сопоставление рассмотренных данных приводит к предположению [3], что стрессорные реакции на действие микроволн средних и больших интенсивностей возникают за счет непосредственного действия на все рецепторы кожи (а не только на тепловые)

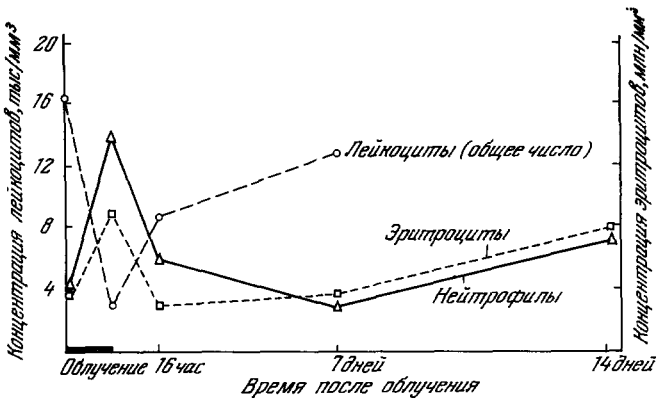


Рис. 8. Изменение концентрации лейкоцитов и эритроцитов в крови крысы в результате облучения микроволнами (24 *Ггц*, 24 *мвт/см*^{2}).

и на структуры головного мозга, а эффекты, возникающие при облучении с малыми интенсивностями, — только за счет действия на структуры головного мозга.

Представляют интерес исследования реакций животных на облучение головы микроволнами. В опытах с крысами [90, 91] облучение затылка микроволнами 2,4 *Ггц* с интенсивностью 300—400 *мвт/см*^{2} в течение 3 *мин* вызывало конвульсии при повышении температуры мозга до 40° С.

Недавно были проведены эксперименты [92], в которых голова обезьяны облучалась в цилиндрическом резонаторе, питаемом от генератора 225—339 *Мгц* мощностью 100 *вт*, а тело не подвергалось облучению. При фиксировании головы подбородком вверх облучение в течение 1 *мин* вызывало последовательно: возбуждение, сонливость, потерю подвижности, нарушение чувствительности, а трехминутное облучение — судороги, заканчивающиеся гибелью. При опущенном подбородке облучение вызывало только возбуждение и сонливость, а при свободном движении головы нарушений не отмечалось, но животные поднимали голову, глядя на антенну, питающую резонатор *). Облучение всего тела животного не вызывало никаких реакций. В процессе облучения головы температура тела изменялась незначительно, ритм биотоков головного мозга замедлялся (преобладал ритм 5 *гц*) и возрастала их амплитуда. В головном мозге отмечались нарушения межнейронных связей. Если облучение не было гибельным, то все эти объективные изменения и описанные нарушения поведения исчезали через 24 часа после опыта. Авторы рассматривают описанные эффекты микроволн как нетепловые, возникающие из-за нарушений функций промежуточного и среднего мозга в результате, по-видимому, молекулярных изменений в клетках.

Серия исследований была проведена [93—96] при воздействии на голову или изолированный мозг кролика импульсными и непрерывными микроволнами (2,4 *Ггц* и и 575 *Мгц*, 0,002—1000 *мвт/см*^{2}), полями УВЧ (43 *Мгц*, 1000 *в/м*) и постоянным магнитным полем (800 *э*). Оказалось, что все эти факторы вызывают сходные реакции —

*) Авторы указывают, что в других исследованиях крысы ориентировали свое тело, а собаки поворачивали голову в том направлении, откуда шло излучение на волнах 1,25 и 10,7 *см*.

появление медленных или частых ритмов в электроэнцефалограмме у 40—90% подопытных животных в зависимости от интенсивности воздействия. Характерно, что при облучении непрерывными микроволнами отмечалась парадоксальная зависимость: при переходе от сравнительно больших интенсивностей (2—10 *мвт/см*^{2}) к меньшим (0,08—0,4 *мвт/см*^{2}) соответственно понижался процент случаев изменения электроэнцефалограммы — от 79—84 до 40—65. Однако при еще меньшей интенсивности (0,02 *мвт/см*^{2}) процент случаев изменений неожиданно вновь возрастал до 67—90.

Перерезка на уровне среднего мозга приводила к увеличению процента случаев реакций на включение воздействия, но не изменяла его в реакциях на выключение. При дополнительной перерезке обонятельных и зрительных нервов реакции сохранялись. Авторы объясняют описанные реакции непосредственным действием применявшихся полей на структуры промежуточного и переднего мозга.

Экстремальное проявление необратимого действия микроволн — смертельный исход — изучается давно, но критерии гибельных условий облучения не установлены еще с достаточной определенностью.

В экспериментах с крысами приближенно оценивались продолжительности облучения импульсными микроволнами разных частот и интенсивностей, достаточные для наступления гибели животного (непосредственно после облучения и через некоторое время после него) [82, 83, 98, 99]. Данные этих оценок приведены в табл. III.

Таблица III

Минимальные продолжительности облучения микроволнами разных интенсивностей, приводящего к гибели крыс, *мин*

Частота, *Мгц* / Интенсивность облучения, *мвт/см*^{2}	3000	24 000
150—165	20	35
100—120	60	45
35—40	120	120

Как видно из табл. III, нельзя отметить зависимости «гибельной продолжительности» от частоты. Наряду с этим было установлено [87, 100, 101], что эти продолжительности зависят от ряда условий облучения и от состояния животного. При одной и той же интенсивности для гибели животного требуется тем менее продолжительное облучение, чем выше температура его тела и окружающей среды, чем меньше размеры животного, чем медленнее повышается температура тела в процессе облучения (при расположении животного в плоскости поляризации — быстрее, чем при перпендикулярном расположении).

Опасная интенсивность при местном облучении оценивалась у людей по едва переносимому болевому ощущению [60]. Оно возникало при нагреве кожи до температуры 46—47° С, для чего требовалось интенсивность микроволн (3 *Ггц*) в четыре раза более высокая, чем инфракрасных лучей (при одинаковой продолжительности облучения). Это различие объясняется более глубоким проникновением в ткани микроволн этого диапазона по сравнению с инфракрасными лучами. Опыты же с более короткими микроволнами (24 *Ггц*) [83] показали, что для одинакового нагрева кожи крыс требуется (при одинаковой продолжительности) интенсивность микроволн в 3 раза более низкая, чем интенсивность инфракрасных лучей.

Болевой эффект при непосредственном облучении периферического нерва у кошки импульсными микроволнами (2,5 и 10 *Ггц*) исследовался в сравнении с эффектом нагрева нерва инфракрасными лучами и конвекционным теплом [102, 103]. Независимо от вида воздействия при повышении температуры нерва до 46° С отмечались физиологические реакции, свидетельствующие о болевом ощущении (учащенное дыхание, учащенное сердцебиение, расширение зрачков, повышение кровяного давления и др.).

Рассмотренные экспериментальные данные позволяют подметить две основные черты действия микроволн средних и больших интенсивностей: во-первых, это действие нельзя объяснить только тепловым эффектом и, во-вторых, характер проявлений этого действия практически не зависит от частоты, хотя выраженность того или иного проявления изменяется с частотой

5. РЕАКЦИИ ОРГАНИЗМА ЧЕЛОВЕКА И ЖИВОТНЫХ НА ОБЛУЧЕНИЕ МИКРОВОЛНАМИ МАЛЫХ ИНТЕНСИВНОСТЕЙ

Нижняя граница теплового эффекта микроволн оценивалась для общего и локального облучений. Исходя из данных о теплообмене у человека, предположили [58], что при общем облучении маловероятно ожидать заметного повышения температуры тела, если интенсивность облучения ниже 10 *мвт/см*^{2}. Такого же порядка пороговая интенсивность была установлена при измерении нагрева кожи человека в облучаемом микроволнами (3 *Ггц*) участке тела (плечо, спина) [104]. Экспериментально установлено, что минимальное теплоощущение при облучении микроволнами 3 *Ггц* участка тела человека, возникает при интенсивности облучения около 10 *мвт/см*^{2}, а при инфракрасном облучении — около 1 *мвт/см*^{2} [105]. При облучении же более короткими волнами — 24 *Ггц* — пороговая интенсивность теплоощущения составляет 61—78% от соответствующей интенсивности инфракрасных лучей [106].

В экспериментах с животными [79, 83, 107, 108] общее облучение вызывало повышение температуры тела только при интенсивности выше 10 *мвт/см*^{2}, причем эта величина оказалась примерно одинаковой для импульсных и непрерывных микроволн сантиметрового и дециметрового диапазонов. А при облучении животных миллиметровыми волнами с интенсивностью 10 *мвт/см*^{2} отмечалось некоторое повышение температуры на 0,4—0,5° [109].

Таким образом, интенсивности облучения ниже 10 *мвт/см*^{2} можно считать «нетепловыми» для импульсных и непрерывных микроволн разных частот как при общем, так и при местном облучении людей и животных. Причина такой «универсальности» заключается, очевидно, в том, что при интенсивности 10 *мвт/см*^{2} энергия, преобразующаяся в тепловую (около 5 *мвт/см*^{2}*сек*), примерно равна теплопотерям с квадратного сантиметра поверхности тела человека и теплокровных животных при нормальных окружающих условиях.

Убедительные доказательства нетеплового действия микроволн были получены в многочисленных экспериментальных и клинических исследованиях, проведенных в СССР [110-114]. В этих исследованиях было установлено, что микроволны нетепловых интенсивностей (особенно при хроническом облучении) оказывают обратимое действие на функции нервной системы, проявляющееся в двух основных формах: в виде «ваготонических» реакций, свидетельствующих о функциональных изменениях в сторону превалирования парасимпатического отдела вегетативной нервной системы (замедление ритма сердечных сокращений, понижение артериального давления, снижение активности холинэстеразы и др.) и в виде нарушений функционального состояния структур головного мозга (торможение условнорефлекторной деятельности, понижение чувствительности к звуковому раздражению, изменение электроэнцефалограммы, нарушение межнейронных связей в коре и др.).

Следует отметить, что все эти проявления нетеплового действия микроволн на нервную систему отмечались в широком диапазоне длин волн — от миллиметровых до дециметровых — и начиная от весьма малых интенсивностей облучения, порядка десятых долей *мвт/см*^{2}. При этом общий характер того или иного проявления практически не зависел от длины волны во всем исследованном диапазоне. Степень же выраженности наблюдаемых изменений закономерно зависела от длины волны: нарушения функций головного мозга усиливались с возрастанием длины волны, а ваготонические реакции, наоборот, уменьшались. Такая зависимость согласуется с увеличением проникновения микроволн в ткани

по мере увеличения длины волны, что подтвердилось экспериментально: было обнаружено [115-117], что при облучении животных миллиметровыми волнами отмечались наиболее выраженные морфологические изменения в кожных рецепторах, а при облучении 10-*см* — нарушения межнейронных связей в коре головного мозга.

В связи с этими данными были высказаны предположения [3, 118], что ваготонические реакции возникают рефлекторно за счет непосредственного воздействия микроволн на кожные рецепторы, а нарушение функций головного мозга — в результате действия микроволн на его структуры. Эти предположения частично подтверждались результатами исследований изменения ритма сердечных сокращений у животных в процессе их облучения микроволнами (2,4—3 *Ггц*) [119-120].

В опытах с кроликами облучение вентральных частей тела (со стороны живота) микроволнами малых интенсивностей (7—12 *мвт/см*^{2}) вызывало ваготонический эффект — замедление ритма. Такой же эффект возникал при облучении любого участка тела микроволнами средних и больших интенсивностей (70—200 *мвт/см*^{2}). Если же на облучаемом участке чувствительность кожных рецепторов была подавлена с помощью анестезии, то при указанных условиях облучения эффект не возникал.

Эти результаты достаточно убедительно свидетельствуют о том, что замедление ритма — результат рефлекса с кожных рецепторов, подвергаемых непосредственному действию микроволн. А эксперименты с лягушками [121] дают основания полагать, что рефлекторная дуга замыкается в подкорковых структурах мозга (по-видимому, в центре блуждающего нерва, расположенном в продолговатом мозгу), так как эффект замедления сердечного ритма у лягушки под действием микроволн исчезал при нарушении любого звена этой рефлекторной дуги — от кожных рецепторов до центробежных нервов сердца.

Более сложная картина наблюдалась при облучении дорзальных участков тела кролика (со стороны спины) и особенно головы. Облучение головы микроволнами малой интенсивности вызывало противоположный эффект — учащение сердечного ритма, а при анестезии рецепторов в кожном покрове головы этот эффект усиливался. Однако облучение головы при средних и больших интенсивностях приводило к замедлению ритма, а при анестезии кожных рецепторов изменений не происходило. Далее оказалось, что можно подобрать некую промежуточную интенсивность, когда облучение головы без анестезии кожных рецепторов вызывает замедление ритма, а при анестезии — учащение.

Конечно, этих данных недостаточно еще для определенных заключений о механизме рассмотренных явлений, однако некоторые соображения можно высказать. Представляется вероятным, что характер изменения сердечного ритма при облучении головы без анестезии кожных рецепторов зависит от того, какие возбудимые структуры в большей степени реагируют при данной интенсивности облучения — рецепторы или структуры головного мозга. С другой стороны, следует учитывать известную физиологам особенность реакции ядер блуждающего нерва на непосредственное воздействие [123]: слабое раздражение этой мозговой структуры вызывает учащение ритма сердца, а сильное — замедление.

6. ИЗМЕНЕНИЯ В ТКАНЯХ И ОРГАНАХ ЖИВОТНЫХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ МИКРОВОЛН

При длительном облучении животных микроволнами больших интенсивностей наблюдались резкие изменения в тканях и органах (кровоизлияния, ожоги, некроз тканей и т. д.), которые рассматривались большинством авторов [124-126] как результат резкого перегрева тканей.

Значительное число экспериментальных исследований было проведено при облучении глаз и семенников, которые наиболее эффективно нагреваются микроволнами в силу бедной снабженности кровеносными сосудами. Результаты этих экспериментов показали, однако, что изменения, вызываемые микроволнами в этих органах, нельзя отнести только за счет теплового эффекта.

Облучение семенников крыс микроволнами 2,5 *Ггц* в течение 10 *мин*, вызывающее нагрев тканей до 30—35° С, приводило к дегенеративным изменениям, в то время как при инфракрасном облучении подобные изменения происходили только при повышении температуры до 40° С [127]. В других исследованиях [128] при одинаковом нагреве микроволны (2,3 *Ггц*) вызывали более ранние и более значительные изменения в семенниках крыс, чем инфракрасные лучи. Сравнительные диаграммы показаны на рис. 9. Наряду с этим было обнаружено [124], что облучение семенников крыс микроволнами (2,4 *Ггц*), вызывающими нагрев тканей до 41° С, приводило к эндокринным нарушениям в половой системе при отсутствии видимых изменений в семенниках. Облучение же инфракрасными лучами, приводящее к такому же повышению температуры, не вызывало нарушений. Однократное облучение мышей [130] микроволнами (10 *Ггц*, 370—400 *мвт/см*^{2}) в течение 5 *мин* приводило к уменьшению численности потомства и увеличению числа мертворожденных. При этом изменения половых функций у животных были более значительными, чем это наблюдалось при обычном нагреве тела.

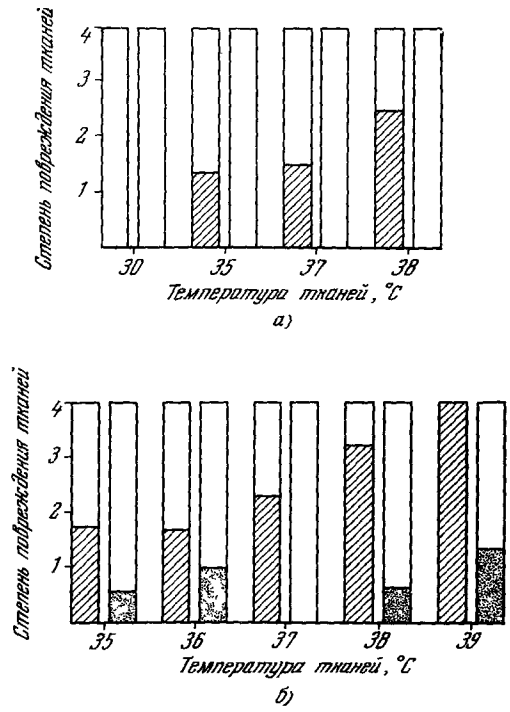


Рис. 9. Повреждение тканей семенников крыс (оцениваемое по четырехбалльной системе) в результате нагрева до различных температур путем облучения микроволнами (левые столбики) и инфракрасными лучами (правые столбики).

а) Через 1 час, *б*) через 2 дня после облучения.

В многочисленных исследованиях [131] было обнаружено необратимое действие микроволн средних и больших интенсивностей на глаза, выражающееся в появлении катаракты хрусталика глаза, развивающейся либо сразу после облучения, либо через несколько дней и даже недель. Были установлены пороговые интенсивности для возникновения катаракты при однократном облучении [132] разной продолжительности: от 120 до 600 *мвт/см*^{2} при продолжительностях 270,5 *мин* соответственно. Наряду с этим наблюдалось [133—135] возникновение катаракты в результате многократных облучений с интенсивностями значительно ниже пороговой для однократного облучения. Этот кумулятивный эффект и продолжительное время развития катаракты побудили ученых искать ее причину не в тепловом эффекте микроволн, а в их действии на биохимические процессы, протекающие в хрусталике. Было обнаружено [136], что микроволновое облучение глаз приводит к понижению активности некоторых ферментов хрусталика, а также к понижению содержания в нем аскорбиновой кислоты и глютатиона [133—138]. Авторы отмечают, что при других причинах образования катаракты (аллоксановый диабет) наблюдаются иные биохимические изменения.

Представляют интерес экспериментальные данные о влиянии микроволн на эмбриональное развитие [138—139]. После 48-часовой инкубации при температуре 39° С куриное яйцо в течение 5 *мин* облучалось микроволнами (2,4 *Ггц*) с поддержанием такой же температуры; это привело к нарушению развития эмбриона: в его недифференцированных структурах прекращался дальнейший рост тканей, а в частично дифференцированных — последующая дифференциация. В других исследованиях [140] наблюдалось замедление ритма сердечных сокращений у куриного эмбриона при облучении микроволнами 1875 *Мгц*, в то время как вызываемый микроволнами нагрев эмбриона должен был бы учащать сердцебиение. Отмечались также [141, 142] изменения в кардиограмме сердца куриного эмбриона, облученного микроволнами, которые свидетельствовали о нарушении обменных процессов. Наконец, облучение культуры

тканей куриного эмбриона микроволнами 1,4 и 10 *Ггц*, не вызывающее нагрева, приводило к стимуляции роста тканей [143].

Предпринимались исследования действия микроволн на злокачественные ткани. В серии экспериментов [144–146] наблюдалось замедление роста опухолей у мышей в результате многократных облучений (по 5—10 *мин*) микроволнами 1875 и 3000 *Мгц*. Однако через некоторое время после прекращения облучений разрастание опухоли продолжалось. Замедление опухоли происходило также после инъекции больным животным экстрактов доброкачественных кожи и жира, облученных в течение 5 *мин* в пробирке. Инъекция же облученного гликогена, наоборот, ускоряла развитие опухоли. Эти противоположные эффекты коррелировали с наблюдавшимся автором различием в действии микроволн на эти субстраты (что будет рассмотрено ниже). Торможение роста злокачественной опухоли у мышей наблюдалось [5] при облучении животных микроволнами 3 и 10 *Ггц* большой интенсивности, что относили за счет тепловой коагуляции тканей. С другой стороны, имеется сообщение [147] о рассасывании саркомы у мышей при облучении микроволнами 6 *Ггц* весьма малой интенсивности.

7. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТОВ МИКРОВОЛН И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ДРУГИХ ЧАСТОТ НА КЛЕТОЧНОМ И МОЛЕКУЛЯРНОМ УРОВНЕ

Действие электромагнитных полей радиочастот на одноклеточные организмы и биологические структуры изучалось в широком диапазоне от низких частот до сверхвысоких.

В ряде работ исследовалось действие полей высоких интенсивностей на бактерии, которое объяснялось с позиций теплового эффекта. Так, например, если под действием импульсных полей в диапазоне от 65 *гц* до 600 *Мгц* среда, содержащая бактерии, нагревалась до температур 55—60 С°, то жизнеспособность бактерий понижалась [148, 149]. Облучение вирусов птичьей саркомы микроволнами (3 *Ггц*) большой интенсивности [150] вызывало полную потерю активности, что объясняли нагревом среды. В недавно проведенных опытах по облучению светящихся бактерий микроволнами 2,6—3 *Ггц* не было обнаружено какого-либо нетеплового действия, хотя автор [151] не отрицает возможности такого действия при других условиях облучения.

Нетепловое бактерицидное действие впервые было отмечено в опытах с импульсными полями частотой 20 *Мгц* [152]. Под действием таких полей кишечные палочки погибали за 5—10 *сек* при напряженности 205 *в/см*, когда среда нагревалась до 40° С, в то время как при простом нагреве такой эффект получался при температуре 60° С за время 10 *мин*. Вирусы ящура полностью инактивировались при воздействии поля напряженностью 260 *в/см* в течение 10 *сек* и при 480 *в/см* — 2,4 *сек*; при этом среда нагревалась не более чем до 37 С°. Подобный эффект за счет простого нагрева до той же температуры происходил за 60 *час*. В других опытах того же времени [153] бактерицидное действие полей с частотами 12—300 *Мгц* проявлялось за 5 *мин*, хотя максимальная температура среды при этом не превышала 37 С°.

Нетепловое действие микроволн с длиной волны 21 *см* на ряд бактерий, проявлявшееся в замедлении или прекращении размножения, наблюдалось [143] при повышении температуры, которое не было биологически значимым. Такие же эффекты микроволн на бактерии отмечались [154] при температурах 37—42° С, не являющихся гибельными для бактерий.

В последние годы внимание многих исследователей было привлечено к исследованию эффекта ориентации частиц и одноклеточных организмов под действием УВЧ полей различных частот [155–159]. В этих исследованиях были получены следующие основные результаты:

а) Под действием импульсных и непрерывных полей УВЧ (1—100 *Мгц*) суспензированные частицы угля, крахмала и молока, эритроциты и лейкоциты выстраиваются в цепочки параллельно электрическим линиям поля. Для каждого типа частиц имеется оптимальный диапазон частот,

в пределах которого эффект возникает при минимальной напряженности поля.

б) Одноклеточные организмы — жгутиковые и ресничные движутся параллельно либо перпендикулярно линиям поля в зависимости от частоты. При этом для каждого типа одноклеточных имеются специфичные диапазоны частот. Так, например, эвглена ориентируется параллельно полю (рис. 10) при частотах 5—7 *Мгц* и перпендикулярно при частотах 27—30 *Мгц*. Амебы ориентируют тело вдоль линий поля при частоте около 5 *Мгц* и перпендикулярно при 27 *Мгц*.

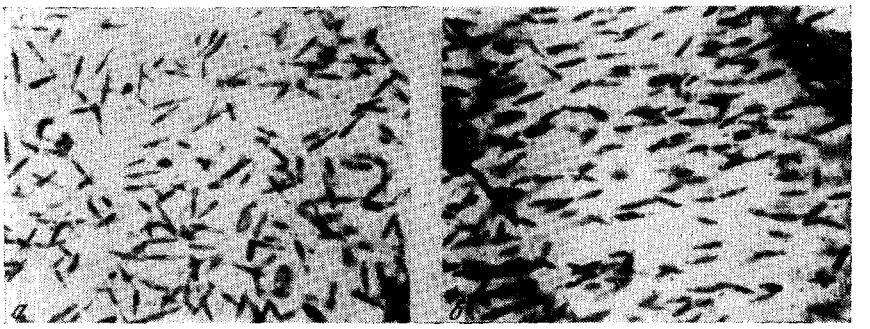


Рис. 10. Ориентированное движение жгутиковых одноклеточных организмов (эвглены) под действием электромагнитного поля (5—7 *Мгц*).

а) Беспорядочное движение до приложения поля; *б*) движение параллельно электрическим силовым линиям поля.

в) При ориентации одноклеточных вдоль линий поля их внутриклеточные несимметричные частицы могут быть ориентированы перпендикулярно.

г) Наряду с ориентационными движениями при некоторых (специфичных для каждого вида) частотах наблюдаются различные вращательные движения одноклеточных. Определенной корреляции между частотой и типом движения установить не удалось.

Теоретическое рассмотрение ориентационных эффектов [160-162] построено на анализе сил притяжения между частицами, в которых под действием полей индуцируются дипольные заряды. Показано, что постоянная времени формирования ориентированных цепочек пропорциональна кубу радиуса частичек и обратно пропорциональна напряженности при сильных полях. Эффекты предполагаются возможными и при микроволновых частотах, но при высоких и средних интенсивностях (сотни *мвт/см*^{2}), особенно в электролитических средах, в значительной мере шунтирующих поля. Определены области частот, при которых возможна «параллельная» и «перпендикулярная» ориентации в зависимости от значений диэлектрических параметров частиц и суспензирующей среды [163].

Однако проведенные недавно исследования [164-166] дают основания полагать, что поведение одноклеточных организмов под действием электромагнитных полей связано с предполагаемой у них возбудимой структурой, являющейся как бы прообразом нервно-мышечной системы [167]. Было установлено, что на импульсы постоянного и переменного тока при определенных пороговых напряжениях инфузории парамеции отвечают «электрошоковой реакцией» (ЭШР), проявляющейся в виде резких остановок движения с поворотом оси тела параллельно электрическим силовым линиям. А характер зависимости пороговых напряжений от длительности импульсов и от частоты переменного тока оказался таким же,

как и при соответствующих раздражениях нервных и мышечных тканей животных и человека (рис. 11). На длительное воздействие переменным током парамеции реагируют движениями различного типа (в зависимости от значений частоты и напряжения), которые свойственны этим инфузориям в естественных условиях их существования.

Результаты этих исследований, проведенных в широком диапазоне частот — от 20 *гц* до 10 *Мгц*,— подтверждали существование у парамеций возбудимой структуры, чувствительной к переменным электромагнитным

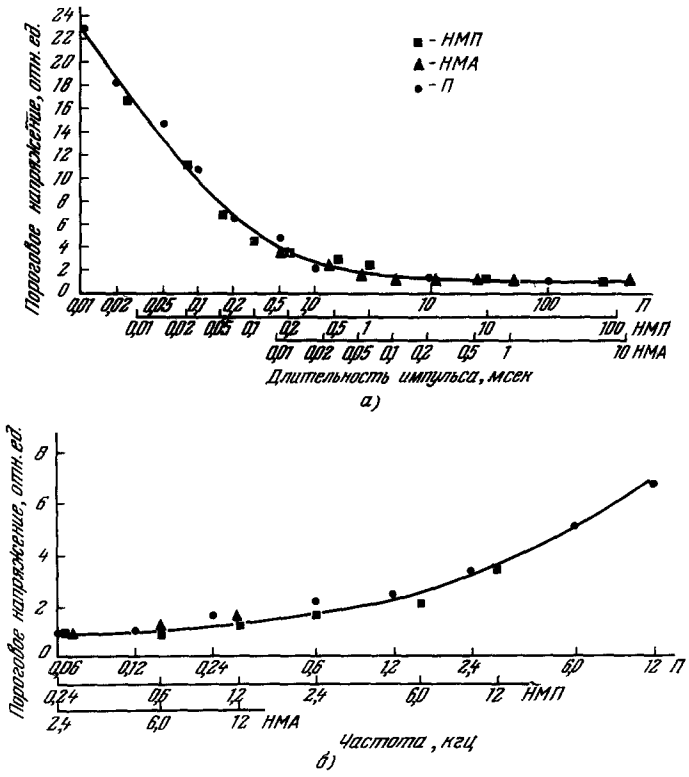


Рис. 11. Сравнение зависимости порога возбудимости парамеций (*П*), нервно-мышечного препарата лягушки (*НМП*) и нервно-мышечного аппарата человека (*НМА*) от длительности раздражающих импульсов постоянного тока (*а*) и от частоты переменного тока (*б*).

полям, и давали надежду на то, что эта структура будет чувствительна и к полям микроволновых частот. И в серии специальных исследований [168, 166а] такая чувствительность к микроволнам была обнаружена.

Оказалась, что реакция ЭШР у парамеций возникает под действием импульсов микроволн (2,4—3 *Ггц*) различной длительности и под действием серий коротких (1 *мксек*) импульсов. Пороговые значения мощности в импульсе (или средней мощности серии импульсов), при которых возникла такая реакция, были обратно пропорциональными длительности импульсов (или серии импульсов), как это показано на рис. 12, *а*. Далее выяснилось, что хотя при подпороговых значениях мощности микроволны не вызывают ЭШР, но отмечается повышение чувствительности парамеций к другим раздражителям. Такая сенсибилизация парамеций к раздражению импульсами переменного тока под действием микроволн иллюстрируется рис. 12, *б*.

Следует отметить некоторые характерные особенности рассмотренных явлений: во-первых, характер двигательной ЭШР парамеций был идентичным при воздействии переменными токами различной частоты (от 20 *гц*

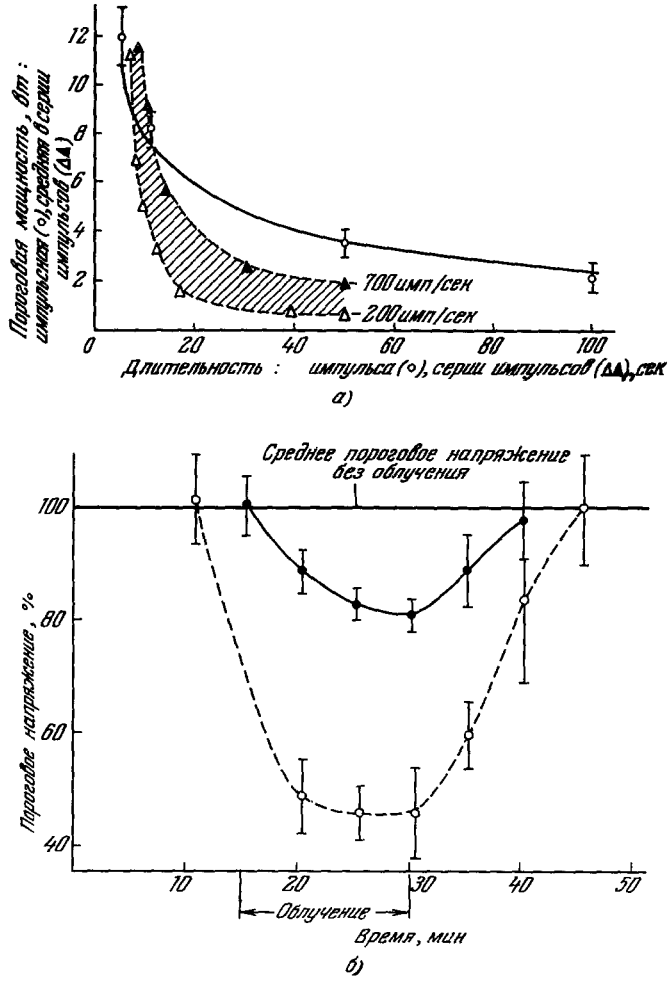


Рис. 12. Влияние микроволн ($\lambda = 10$ *см*) на возбудимую систему парамеций.

а) Пороговые мощности импульсов (или серий импульсов) микроволн, вызывающих раздражение (ЭШР) парамеций, при различных длительностях импульса (серии): сплошная кривая — зависимость при раздражении отдельными импульсами; заштрихованная область — зависимость при раздражении сериями коротких (1 *мксек*) импульсов с различной частотой повторения. *б*) Изменение порогового напряжения импульсов переменного тока (1200 *гц*, 100—120 *мсек*), вызывающих раздражение парамеций (ЭШР), при одновременном облучении импульсами микроволн подпороговой мощности: сплошная кривая — изменение при облучении импульсами микроволн с длительностью, равной длительности импульса переменного тока; пунктирная кривая — изменение при облучении сериями коротких импульсов при длительности серии, равной длительности импульса переменного тока.

до 10 *Мгц*) и микроволнами; во-вторых, пороговые значения напряжений и мощностей, при которых возникала ЭШР, были обратно пропорциональными квадратным корням из величин длительности импульсов и частоты (а не первым степеням этих величин); в-третьих, нагрев среды, в которой находились парамеции, был незначительным при всех видах воздействий, вызывавших ЭШР.

Исходя из этих особенностей, можно заключить, что ЭШР следует рассматривать как результат нетеплового действия электромагнитных

полей и что характер этой реакции не зависит от частоты воздействующих полей. Таким образом, в реакции возбудимой структуры парамеций на электромагнитные поля мы встречаемся с теми же характерными чертами, которые отмечались выше для реакций нервной системы животных и человека.

Следует упомянуть здесь о недавно проведенных исследованиях [169] влияния микроволн на физиологическую функцию парамеций — фагоцитарную. Оказалось, что под действием микроволн 2375 *Мгц* фагоцитарная активность инфузорий (поглощение в вакуолях частиц туши) изменяется двухфазно в зависимости от интенсивности: в интервале от 1,5 до 275 *мвт/см*^{2} отмечается сначала повышение активности почти

Рис. 13. Изменения в хромосомном аппарате делящихся клеток корня чеснока под действием импульсных полей УВЧ.

Образование: *а*) мостиков между дочерними группами хромосом; *б*) мостиков и фрагментов; *в*) микронуклеусов из фрагментов.

вдвое, затем снижение до нормального уровня и, наконец, понижение ниже нормального уровня.

Наряду с этими опытами, свидетельствующими о влиянии электромагнитных полей на клетку-инфузорию, имеются экспериментальные основания предполагать возможность влияния полей и на внутриклеточные процессы. Примером такого влияния могут служить результаты исследования действия импульсных полей УВЧ на процессы деления клеток в растущем корне чеснока [156,159]. В клетках корня, подвергавшегося пятиминутному воздействию (5—40 *Мгц*, 15—30 *мксек*, 500—1000 *имп/сек*, 250—6000 *в/м* пиковых), отмечались хромосомные аберрации: в той стадии деления, когда хромосомы должны были разделиться на две дочерние группы, они были соединены мостиками, которые распадались на фрагменты с образованием микронуклеусов, как это показано на рис. 13. Такие изменения должны приводить к изменению наследственных признаков. И такие изменения наблюдались этими же авторами в экспериментах с мушками-дрозофилами при аналогичном воздействии (от 5 *мин* до 1 часа): возрастало число летальных и внешне проявляющихся мутаций примерно в 13 раз по сравнению со средним числом таких мутаций у мушек, не подвергавшихся воздействию.

Влияние микроволн на структуры биологических молекул впервые было обнаружено в 1940—1946 гг. [144, 145, 170, 171]. Облучение раствора гликогена микроволнами с частотами 1875 и 3000 *Мгц* приводило к уменьшению угла вращения плоскости поляризации в этом оптически активном растворе. Величина этого эффекта и характер его развития по мере облучения зависели от частоты воздействующих волн, концентрации и вязкости раствора. Частота 3000 *Мгц* оказалась значительно эффективнее, поэтому она и применялась в большинстве экспериментов.

Зависимость эффекта от концентрации и вязкости оказалась весьма резкой, как это иллюстрируется рис. 14, *б* *). При облучении водного раствора гликогена процент уменьшения угла вращения плоскости поляризации возрастал по мере уменьшения концентрации до «оптимального» значения 0,1%, при котором наблюдалась полная потеря оптической активности раствора (изменение на 100%). В растворе гликогена в глицерине такой же максимальный эффект имел место при концентрации 0,05%, не «оптимальной» для водного раствора. Было обнаружено также,

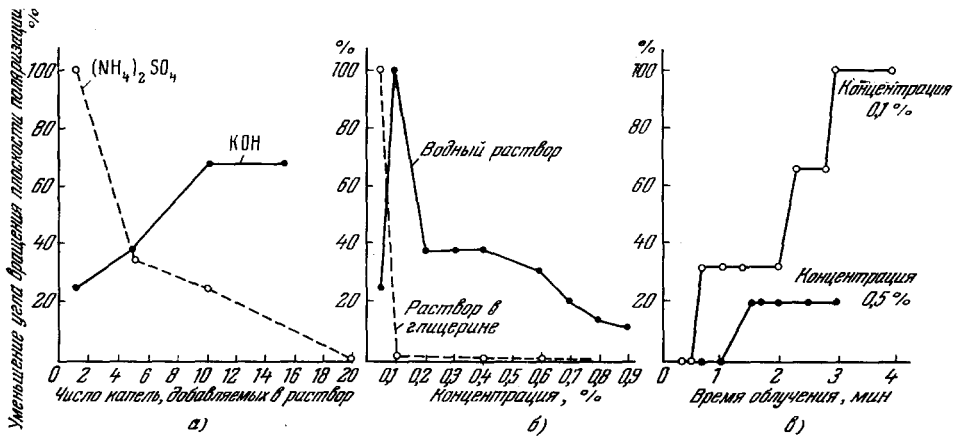


Рис. 14. Изменение угла вращения плоскости поляризации в растворе гликогена под действием микроволн (3 *Ггц*), в зависимости:

а) от добавления в раствор KOH (облучение 3 *мин*); *б*) от концентрации и вязкости раствора; *в*) от времени облучения.

что влияние микроволн на водный раствор гликогена резко изменяется, если к раствору добавить несколько капель KOH или $(NH_4)_2SO_4$, как это показано на рис. 14, *а*.

Изменение оптической активности водного раствора гликогена в зависимости от времени облучения носило ступенчатый характер (рис. 14, *в*). При этом как наклон ступенчатых переходов, так и их число зависели от концентрации раствора.

Противоположное действие оказывали микроволны на оптически неактивные экстракты тканей кожи и жира крысы (в сероуглероде): облучение превращало эти экстракты в оптически активные, правовращающие плоскость поляризации [145, 146, 171].

Наряду с этими эффектами наблюдалось также действие микроволн на структуру коллоидных растворов крахмала [162]. Облучение в течение 1 *мин* повышало скорость коагуляции раствора, причем этот эффект также зависел от концентрации последнего (рис. 15).

Описанные результаты стимулировали исследования действия электромагнитных полей на гамма-глобулины человека [172, 173]. Так как ранее установленное влияние рентгеновских лучей на раствор гамма-глобулинов выражалось в изменении электрофоретической диаграммы с однопиковой на двухпиковую, а также в изменении антигенной активности раствора, эти методы индикации и были приняты в исследованиях с электромагнитными полями.

Гамма-глобулины в физиологическом растворе подвергались воздействию полей в диапазоне 10—200 *Мгц* при импульсном (10—60 *мксек*,

*) Графики, представленные на рис. 14, несколько изменены по сравнению с оригиналами с учетом замечаний и данных, приведенных в статье [170].

500—2000 *имп/сек*) и непрерывном облучениях в течение 20 *мин*. Исследование с интервалами 10 *Мгц* выявило «эффективные частоты»— 30, 60, 140, 180, 200 *Мгц*, при которых в электрофоретической диаграмме появлялись двойные пики. При интервале 1 *Мгц* и поддержании постоянной тем-

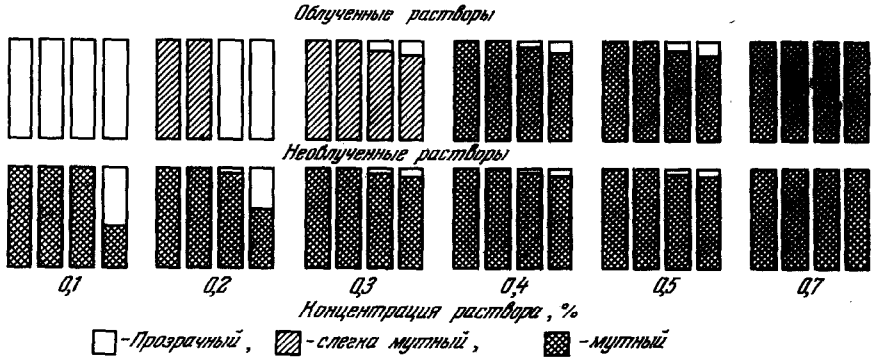


Рис. 15. Коагуляция в растворе крахмала, облученном микроволнами (3 *Ггц*, облучение 1 *мин*).

Первый столбик — сразу после облучения; второй столбик — через 30 *мин* после облучения; третий столбик — через 60 *мин* после облучения; четвертый столбик — через 90 *мин* после облучения.

пературы 22° С эффективными оказались частоты 10, 15, 20 и 25 *Мгц*, что указывало на наличие гармоники 5 *Мгц*.

Пользуясь уравнениями Дебая (для данной вязкости раствора), авторы пересчитали эти эффективные частоты для температур 30—40° С. Экспериментальные данные, полученные с интервалом 20 *кгц* при температуре 37,5° С, хорошо согласовывались с вычисленными, как это иллюстрирует рис. 16.

Исследование влияния микроволн на антигенную активность гамма-глобулинов проводилось путем титрования облученного и необлученного

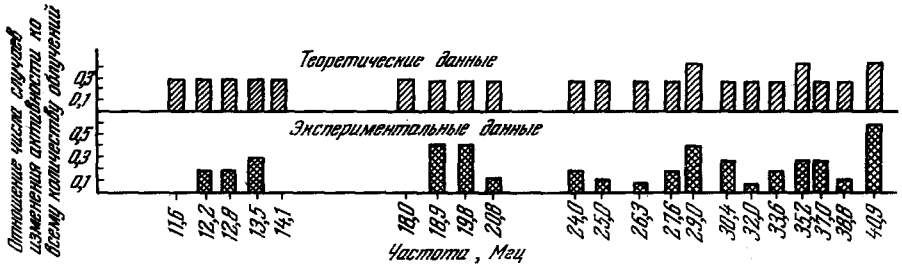
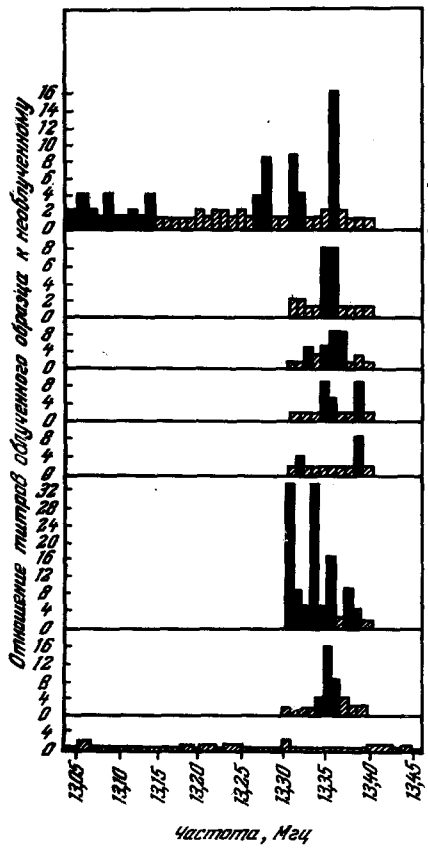


Рис. 16. Изменение активности гамма-глобулинов крови человека (оцениваемой по изменению электрофоретической диаграммы) под действием электромагнитных полей УВЧ определенных частот.

растворов против сыворотки крови кролика (иммунизированного к гамма-глобулинам человека). Были обнаружены «эффективные частоты», при которых облученные растворы показывали значительно более высокие титры, чем необлученные или облученные при других частотах. Эффективные частоты либо совпадали с соответствующими частотами, выявленными в электрофоретических исследованиях, либо были несколько сдвинуты относительно последних как в сторону более низких, так и в сторону более высоких частот (на десятки *кгц*).

На рис. 17 приведены данные этих исследований при различных условиях облучения, которые показывают, что эффект проявляется при облучении с малыми интенсивностями, причем главную роль играет не поглощенная в растворе энергия, а напряженность поля.

Авторы пришли к выводу, что нагрев раствора не играет роли в обнаруженном эффекте. Изменение температуры раствора только сдвигает эффективные частоты, в соответствии с теорией Дебая. Предполагают, что



Частота повторения, *имп/сек*	Длительность импульсов, *мксек*	Напряженность поля, *в/см*	Средняя интенсивность, *мвт/см²*	Продолжительность облучения, *мин*	Полная поглощенная энергия, *эдс*	Объем раствора, *см³*	Суммарное время облучения, *сек*
525	60	130	2,11	20	5680	0,9	38
250	10	40,0	0,013	30	63	0,8	4,5
100	10	40,0	0,005	30	24	0,8	1,8
200	10	20,0	0,0025	30	11	0,8	3,6
300	10	13,3	0,0016	30	7,8	0,8	5,4
Непрерывное облучение	Непрерывное облучение	13,3	0,54	10	875	0,8	600
		6,7	0,135	30	655	0,8	1800
		4,7	0,07	30	330	0,8	1800

Рис. 17. Изменение активности гамма-глобулинов крови человека (оцениваемой путем титрования против сыворотки крови кролика, иммунизированного к гамма-глобулинам крови человека) под действием полей УВЧ при варьировании режима воздействия.

повышение активности гамма-глобулинов происходит благодаря тому, что под действием полей «раскручиваются» спирали гамма-глобулинов.

Эти же авторы сообщают [174] о полной инактивации фермента амилазы (из поджелудочной железы свиньи) в результате воздействия электромагнитными полями с частотами 12, 14, 15 и 16 *Мгц* при постоянной температуре субстанции 37,5° С.

Наряду с этим изменение активности некоторых ферментов наблюдалось и при воздействии микроволн на животных. Так, облучение морских свинок микроволнами в течение 5—10 *мин* понижало активность амилазы и липазы [175], понижало содержание в крови глютатиона — одного из активаторов ряда ферментов [176]; под действием микроволн с частотой

2,4 *Ггц* в мышцах крыс повышалась расщепляющая активность фермента фосфорилазы [177].

В заключение этого раздела укажем на некоторые исследования с белковыми молекулами, проведенные с помощью микроволн. На основе измерений диэлектрической проницаемости сывороток крови в широком диапазоне микроволновых частот была определена степень гидратации некоторых протеиновых молекул. Для молекул гемоглобина крови человека степень гидратации оказалась равной 0,23 ± 0,1 *г* на 100 *г* воды [36, 37], для альбуминов сыворотки бычьей крови 0,15 ± 0,1 *г* [178, 179] и для альбуминов сыворотки крови человека 0,42 ± 0,1 *г* (или с учетом всех возможных ошибок в интервале 0,04—0,65 *г*) [180].

Группа авторов исследовала комплексную диэлектрическую проницаемость кератинов [33, 181, 182]. Основанием для исследований послужил тот факт, что диэлектрическая проницаемость кератинов при частоте 13 *Мгц* оказалась значительно выше квадрата коэффициента преломления. Это позволяло предполагать наличие атомной и ионной поляризации в молекулах кератина, что должно было приводить к изменению диэлектрической проницаемости в зависимости от ориентации волокон шерсти относительно электрических линий в микроволновом диапазоне. Однако такое различие не было обнаружено. Но данные, полученные при вариации количества адсорбированной волокнами шерсти воды, дали основания полагать, что существуют три вида последней: «локализованная вода», молекулы которой невращательно связаны с полярными группами кератиновой молекулы, «подвижная вода», обладающая свойствами жидкости, и «промежуточная вода», потенциальная энергия адсорбции которой лежит между соответствующими величинами для локализованной и связанной воды.

Исследования диэлектрических свойств некоторых кристаллических протеинов, пептидов и аминокислот в диапазоне 1 *кгц* — 4 *Ггц* и интервале температур 0—100° С [34] позволили сделать заключения, что поляризация этих молекул происходит за счет релаксации их полярных групп в соответствии с моделью Дебая для широкого спектра времен релаксации и что эта релаксация частично ограничена как внутрицепочечными, так и пространственными водородными связями. Высказаны соображения о возможности резонансного поглощения микроволн протеиновыми молекулами, особенно в растворах.

8. РЕЦЕПЦИЯ И ГЕНЕРАЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В ЖИВЫХ ОРГАНИЗМАХ

Влияние микроволн на органы чувств человека было установлено экспериментально [183]: у людей, подвергавшихся хроническому облучению при нетепловой интенсивности (от сотых долей *мвт/см*^{2}), понижалась чувствительность обонятельного и зрительного анализаторов. В опытах с кроликами было обнаружено [184], что повреждение обонятельного анализатора резко ослабляет реакцию на облучение головы полями УВЧ — изменение электроэнцефалограммы. Автор заключил, что это свидетельствует о двух возможных путях действия полей на кору головного мозга: через обонятельный анализатор и за счет непосредственного влияния на структуры промежуточного и переднего мозга.

Непосредственная рецепция микроволн человеком была открыта недавно [185] в форме звуковых ощущений, появляющихся у людей в процессе облучения импульсно-модулированными микроволнами. Подробные исследования этого интересного явления [186–188] позволили установить некоторые его закономерности.

а) При включении импульсно-модулированного передатчика микроволн люди, находящиеся в зоне излучения, слышат звуки в виде жужжания, свиста или щелкания (в зависимости от режима модуляции). Источник звука ощущается где-то в области затылка. Опыты с экранированием показали, что восприятие «радиозвука» происходит только в височной области головы.

б) «Радиозвук» хорошо сопоставляется со звуком, создаваемым в динамике усиленными случайными колебаниями огибающей модуляционных импульсов при вырезании частот ниже 5 *кгц* и максимальном расширении в сторону более высоких частот. Люди, способные воспринимать звуки только через костные ткани, но с частотой выше 5 *кгц*, слышат «радиозвук» так же хорошо, как и здоровые.

в) «Радиозвук» ощущался при облучении микроволнами с частотами 425, 1310 и 2982 *Мгц* и скважности импульсов от 0,0004 до 0,028. Пороговые импульсные интенсивности, при которых ощущался «радиозвук», составляли 230—270 *мвт/см*^{2} для частот 425 и 1310 *Мгц* (средние интенсивности 0,4—7 *мвт/см*^{2}) и 5250 *мвт/см*^{2} для частоты 2982 *Мгц*. При облучении же микроволнами с частотой 8900 *Мгц* эффекта не наблюдалось даже при интенсивности 25 000 *мвт/см*^{2}.

г) Окружающий шум до 90 *дб* не устранял эффекта «радиозвука», хотя и снижал чувствительность к нему. Опыты с антишумовыми пробками и соответствующие расчеты показали, что при помещении испытуемого в звукоизолирующую камеру можно ожидать восприятия «радиозвука» при весьма малых импульсных интенсивностях микроволн — порядка 0,3 *мквт/см*^{2}.

д) Предполагается, что восприятие микроволн происходит непосредственно в слуховых нервах и клетках слуховой зоны коры головного мозга различными «детекторами» и что наряду с «радиозвуком» возможны и другие ощущения при облучении (в зависимости от его режима).

Автор полагает, что исследования подобных эффектов могут дать существенную информацию о функционировании нервной системы и, в частности, о характере кодирования сигналов, поступающих в центральную нервную систему. С другой стороны, он считает, что микроволны могут с успехом применяться для стимуляции нервной системы, так как при этом не будет неизбежных повреждений, связанных с введением электродов.

Следует указать здесь на появившиеся недавно короткие сообщения, свидетельствующие о рецепции микроволн живыми организмами [13]. Облучение людей микроволнами в диапазоне 380—500 *Мгц* вызывало галлюцинации, которые возникали при определенных для каждого субъекта частотах. При облучении муравьев микроволнами 3-*см* диапазона насекомые ориентировали свои усики вдоль электрических линий поля и теряли способность «сообщать» другим особям о нахождении источников пищи. У больших муравьев размеры усиков были близкими к 1/4 длины волны.

По современным представлениям [189] деятельность органов чувств не ограничена только рецепцией, связанной с ощущениями, а проявляется и в функциях рецепторов, не имеющих эквивалента в виде ощущений. Исследованиями последних лет установлено [190, 191], что на всем протяжении существования животного мира (и даже в некоторых случаях растительного) в основе функций рецепции и биологического движения лежат одни и те же главные механизмы, основанные на элементарной чувствительности белковых молекул, отвечающих изменением структуры на внешние воздействия.

В свете этих положений можно было бы рассматривать как проявление рецепции микроволн у одноклеточных организмов описанные выше

ЭШР, а изменения активности гамма-глобулинов под действием полей УВЧ — как рецепцию на молекулярном уровне.

Наряду с рассмотренными примерами рецепции микроволн и других электромагнитных полей различными возбудимыми структурами живых организмов имеются данные и о наличии рецепторов, специализированных к восприятию электрических полей. Недавно открыта высокая чувствительность некоторых видов рыб к электрическим полям (минимальные изменения градиента поля, воспринимаемые рыбами, составляют 0,003 *мкв/мм*) [192]. Автор рассматривает эту способность как новое «чувство», органом которого являются специализированные «электрорецепторы».

В последние годы у некоторых животных была обнаружена способность к генерации электрических и магнитных полей. Рыбы определенных видов испускают электрические импульсы (длительностью 0,2—10 *мсек* и с частотой 60—1000 *имп/сек*) [192]. При распространении электрических импульсов в возбужденном нерве лягушки вокруг нерва возникают соответствующие импульсы электрического и магнитного полей [193, 194].

Вопрос о возможности излучения электромагнитных полей животными организмами возник еще в 30-х годах в связи с сообщением [195] о том, что методами гетеродинирования удалось обнаружить излучение радиоволн у людей, находящихся в состоянии сильного эмоционального возбуждения. В течение ряда лет к таким сообщениям относились скептически ввиду несовершенства применявшейся в этих экспериментах радиоаппаратуры. Однако недавно появилось сообщение [13] об успешном повторении этих исследований с применением совершенной современной аппаратуры.

В недавно проведенных (весьма корректно поставленных) опытах было обнаружено излучение электромагнитных полей мышцами человека [196]. В процессе сокращения мышцы излучают поля с частотами от десятков килогерц до 150 *кгц* (а по предположению авторов, и более высоких). Наибольший эффект наблюдался от мелких мышц, средний — от икроножных; не отмечалось излучения от мышц головы. При различных методах измерения — узкополосном, широкополосном и выделяющем специфические частоты — были обнаружены вариации в характере излучения в зависимости от возраста и состояния здоровья испытуемых.

На основе анализа экспериментальных данных о биологическом действии электромагнитных полей, о рецепции и генерации этих полей в живых организмах была высказана гипотеза о возможной роли электромагнитных полей в процессах жизнедеятельности [3, 197]. Предполагается, что наряду с нервной и гуморальной системами передачи информации и управления эти функции осуществляются в живых организмах и при помощи электромагнитных полей. Такая система связи и управления представляется вероятной на всех уровнях функционирования живого организма — на молекулярном, клеточном, органов и системном (а возможно, и между особями биологического вида). Исходя из соображений надежности, электромагнитная связь на клеточном уровне предполагается широкополосной в диапазоне примерно от 100 до 1000 *Мгц*, в пределах которого частотная зависимость импеданца клеточных мембран уже незначительна, а полярные свойства молекул воды еще не проявляются. На молекулярном уровне взаимодействие предполагается остроизбирательным и вероятным как в микроволновом и инфракрасном диапазонах, так и в низкочастотном. Следует упомянуть здесь высказанное ранее предположение [198] о наличии прямой электродинамической связи между близко расположенными молекулами.

9. ВОПРОСЫ МЕХАНИЗМА БИОЛОГИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ МИКРОВОЛН И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ДРУГИХ ЧАСТОТ

Накопленного экспериментального материала недостаточно еще для настоящего физико-химического анализа биологического действия электромагнитных полей микроволнового и более длинноволнового диапазонов. Вместе с тем за последние годы предложено несколько гипотез (большей частью феноменологических) о механизмах этого действия, которые полезно рассмотреть в качестве отправных пунктов для дальнейших исследований.

Так как большинство данных о биологическом действии микроволн было получено при исследовании физиологических изменений в облучаемом организме, целесообразно было попытаться подойти к выяснению

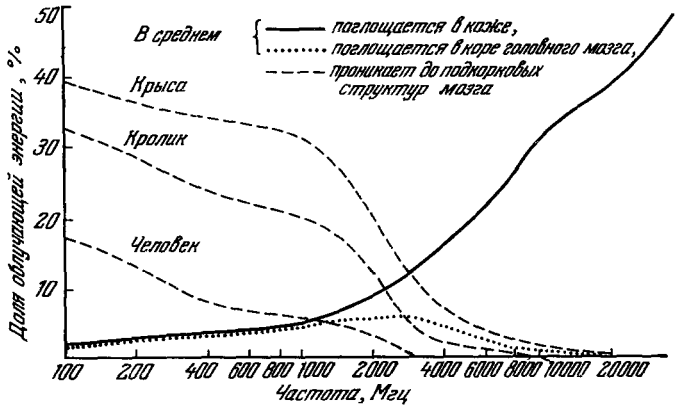


Рис. 18. Частотная зависимость поглощения микроволн в структурах мозга человека, кролика и крысы при облучении головы.

механизма этого действия по пути от реакций организма к первичным физико-химическим реакциям. С таких позиций и рассматривались возможные механизмы действия микроволн на физиологические функции организма человека и животных [3, 199, 200].

Как было показано выше, характер различных физиологических реакций у животных на микроволновое облучение свидетельствует о действии микроволн главным образом на нервную систему и вероятнее всего на периферические рецепторы и структуры головного мозга. Исходя из данных о проникновении энергии микроволн в ткани тела животных и человека, можно довольно определенно ответить на вопрос, действием на какие из этих возбудимых структур обусловливается та или иная реакция организма животного на облучение микроволнами определенной частоты.

В предположении облучения затылочной части головы человека, кролика и крысы приближенно оценивалось поглощение микроволн в коже, мышечной и мозговой тканях (без учета небольшого поглощения в подкожной жировой ткани и костях черепа). На рис. 18 приведены частотные характеристики поглощения микроволн с учетом отражения от поверхности тела в среднем 50% облучающей энергии. Анализ этих кривых показывает, что при облучении человека микроволнами сравнительно низких частот действие на подкорковые структуры преобладает над действием на рецепторы кожи, при частотах 600—1000 *Мгц* оба типа действия становятся сравнимыми, а при более высоких частотах можно говорить только о действии на рецепторы кожи. При облучении кролика

и крысы частоты «сравнимого действия» составляют соответственно 2000 и 3000 *Мгц*. Поглощение в коре головного мозга во всех случаях невелико и сравнимо с поглощением в коже до частот 1000—2000 *Мгц*.

Эти выводы достаточно хорошо согласуются с экспериментальными наблюдениями влияния микроволн различных диапазонов на центральную нервную систему человека и животных. Сравнительные данные,

Таблица IV

Сравнение эффективности влияния микроволн разных диапазонов на центральную нервную систему животных и человека при непосредственном и рефлекторном воздействии

Предполагаемый характер воздействия	Наблюдаемые физиологические изменения и метод их оценки	Диапазоны длин волн			
		миллиметровый	сантиметровый: 3 *см* 10 *см*	дециметровый	метровый
Непосредственное воздействие на структуры головного мозга	Изменение электроэнцефалограммы у кроликов [201]: % животных, у которых отмечены изменения	—	64	77	81
	Ощущение человеком «радиозвука» [186]: чувствительность $= \frac{1}{\text{мин. ощут. интенс.}}$, отн. ед.	—	0 1,9	37—43	—
Рефлекторное воздействие через поверхностные рецепторы	Снижение уровня кровяного давления у крыс [202]: критерий Стьюдента	5,25	4,60 4,09	2,88	—
	Замедление ритма сердцебиения у людей [203]: % людей, у которых отмечены изменения	—	73	—	24
Сочетание рефлекторного и непосредственного воздействий	Изменение реакции у крыс на звуковое раздражение [204]: % животных, у которых отмечены изменения	50	58 100	50	—
	Понижение активности холинэстеразы в стволе мозга (числитель) и в крови (знаменатель) у крыс [205]: % понижения	$\frac{37}{15}$	$\frac{30}{27}$	$\frac{48}{36}$	—
	Изменение условнорефлекторной деятельности у крыс [206]: качественная оценка	Средне выражено	Слабо выражено	Сильно выражено	—

приведенные в табл. IV, показывают, что в тех случаях, когда физиологические реакции могут быть однозначно отнесены за счет непосредственного воздействия микроволн на структуры головного мозга, эффективность этих реакций закономерно возрастает с увеличением длины волны; в тех случаях, когда реакции организма можно объяснить рефлекторными эффектами за счет непосредственного воздействия микроволн на поверхностно расположенные рецепторы, эффективность реакций убывает по мере увеличения длины волны; и, наконец, в тех случаях, когда физиологические реакции можно рассматривать как результат сочетания рефлекторного и непосредственного воздействия микроволн, нельзя отметить определенную закономерную зависимость эффективности реакций от длины волны.

Изменения функций нервной системы, возникающие под действием микроволн, не являются специфичными. Известно, что подобные изменения происходят при любом способе раздражения или изменения возбудимости периферической и центральной частей нервной системы. Поэтому естественно полагать, что и действие микроволн на нервную систему обусловливается раздражением или изменением возбудимости нервных тканей. И в опытах с нервно-мышечным препаратом лягушки [3, 207] удалось непосредственно наблюдать такое действие микроволн. Облучение непрерывными волнами (2,4 *Ггц*, 11 *мвт/см*^{2}) вызывало удлинение абсолютной и относительной рефрактерной фазы нерва, а облучение импульсными (3 *Ггц*, 1 *мксек*, 700 *имп/сек*, 12 *мвт/см*^{2}) — повышение возбудимости нерва и скорости проведения по нему возбуждения. В качестве другого первичного физиологического механизма действия микроволн на нервную систему можно предполагать влияние волн на так называемую спонтанную электрическую активность периферической нервной системы, которая, как известно, играет важную роль в поддержании общей возбудимости нервных центров. Наконец, описанные выше опыты с парамециями [168] показывают, что микроволны могут раздражать возбудимую структуру или повышать ее чувствительность к другим раздражителям. Эти результаты в сочетании с данными о действии микроволн на бактерии и культуры тканей (описанными выше) дают основание говорить о возможности влияния микроволн на возбудимые структуры любых живых клеток.

Выяснение физико-химических механизмов действия микроволн на возбудимые структуры связано со значительными трудностями и прежде всего потому, что еще далеко не ясен физико-химический механизм возбудимости живой ткани вообще. Вместе с этим некоторые соображения, высказанные по поводу механизма действия микроволн на функциональное состояние возбудимых структур [3, 199, 200], имеет смысл здесь рассмотреть.

Одним из вероятных механизмов предполагается детектирование микроволн в мембране нервной клетки, следствием чего может быть повышение возбудимости или возбуждение последней. Это предположение основывается на данных о детектирующих свойствах мембраны нервной клетки [208]. Имеются экспериментальные основания предполагать наличие детектирующих свойств оболочки парамеции [3], так как при сравнительном раздражении импульсами переменного тока, выпрямленного (полупериодно) переменного тока и сериями импульсов постоянного тока такой же частоты и скважности амплитуды пороговых напряжений возбудимости парамеции оказались одинаковыми.

К другому возможному механизму можно подойти с позиций современных представлений о гидратации ионов натрия и калия в водных растворах [209], из которых следует, что тепловое и особенно трансляционное движение молекул воды, окружающих ион натрия затруднено по сравнению с движением в чистой воде (положительная гидратация), в то время

как молекулы воды вблизи иона калия более подвижны, чем в чистой воде (отрицательная гидратация). Трансляционное же движение самих ионов связано с обменом ближайших к ним молекул воды. Можно полагать, что эффект действия микроволн на молекулы воды, окружающие ионы натрия и калия, будет различным, а поэтому неодинаковым будет и соответствующее изменение подвижности этих ионов, что в свою очередь должно привести к изменению калий-натриевого градиента между клеткой и внеклеточной средой и, следовательно, к возбуждению или изменению возбудимости клетки *).

Третьим возможным механизмом возбуждающего действия микроволн может быть изменение проницаемости клеточной мембраны. Можно полагать, что вызываемые микроволнами колебания молекул воды, гидратирующих белковые молекулы поверхностного слоя мембраны, должны в той или иной мере сказываться на проницаемости мембраны, а следовательно, приводить к возбуждению либо к изменению возбудимости.

Иной подход к выяснению механизма биологического действия микроволн (и электромагнитных полей других частот) возможен на основе приведенной выше гипотезы о роли электромагнитных полей в процессах жизнедеятельности [3, 197]. В свете этой гипотезы нарушения физиологических функций организма под действием микроволн можно было бы рассматривать как результат «радиопомех», вносимых микроволнами в «радиосвязь», осуществляющую определенные информационные взаимодействия во внутренних средах организма. Можно, далее, предположить, что при определенных условиях микроволновое облучение (определенной частоты, интенсивности и характера модуляции) может «навязывать» биологическим системам организма несвойственные им ритмы функционирования. Наконец, не исключена возможность того, что при некоторых особых условиях микроволновое облучение окажется «адекватным» биологическим системам организма и будет усиливать их естественные функции. Однако концепция о влиянии электромагнитных полей на информационные взаимодействия в живом организме требует особого рассмотрения.

Большой интерес представляет механизм куммулятивного действия микроволн, проявляющегося в результате многократных облучений животных и человека. Однако по этому поводу можно высказать только самые общие соображения.

Экспериментальные данные указывают на возможность «полезной» кумуляции действия микроволн средних интенсивностей, когда отмечается постепенная адаптация организма к последующим облучениям [80–82] и «вредной» кумуляции микроволновых облучений малой интенсивности, постепенно сенсибилизирующих организм к последующим более интенсивным облучениям [87]. Как уже указывалось, в результате систематических облучений происходят морфологические изменения как в периферических рецепторах, так и в структурах головного мозга [115–117]. По-видимому, от того, где именно происходит кумуляция действия микроволновых облучений в данных условиях — в периферической или в центральной нервной системе, и зависит ее характер, т. е. будет ли она «полезной» или «вредной».

В последние годы предложены некоторые гипотезы о молекулярном механизме биологического действия микроволн и электромагнитных полей других диапазонов.

Возможность денатурации молекул под действием микроволн проверялась в экспериментальных исследованиях [87]. Облучению микровол-

*) Эта концепция может оказаться плодотворной для выяснения механизма различной проницаемости калия и натрия в мембране нервного волокна.

нами (10 *Ггц*, 245 *мвт/см*^{2}) подвергали раствор альбуминов сыворотки крови человека. Нагрев раствора за счет облучения (рис. 19) приводил к денатурации макромолекул, причем зависимость этого процесса от времени облучения не отличалась от соответствующей зависимости в случае обычного нагрева раствора до той же температуры (рис. 20). Эти данные указывали на тепловой механизм денатурации молекул под действием микроволн при описанных условиях. Однако автор не исключает возможности и нетепловой денатурации при высоких интенсивностях импульсного облучения.

Вероятность нетепловой денатурации белковых молекул под действием импульсных микроволн рассматривалась [32] с точки зрения возникновения «диэлектрического насыщения». Предполагается, что все

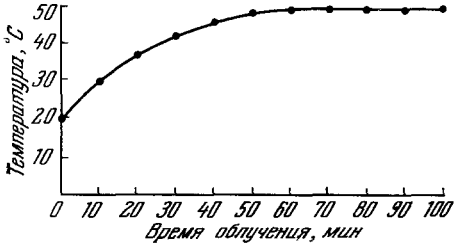


Рис. 19. Повышение температуры раствора альбуминов сыворотки крови человека при облучении микроволнами (10 *Ггц*, 245 *мвт/см*^{2}).

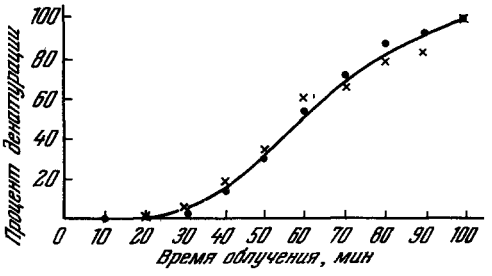


Рис. 20. Денатурация альбуминов сыворотки крови человека под действием микроволн (точки) и при обычном нагреве (крестики).

поляризованные боковые цепи белковых молекул могут быть ориентированы под действием сильных полей импульсных микроволн. Это должно приводить к возможности разрыва водородных связей и изменению зоны гидратации, от которой зависит растворимость молекул. А такие процессы могут служить причиной денатурации или коагуляции белковых молекул.

На основе теоретического исследования сделано заключение [210], что при распространении электромагнитных полей в электролитах на ионы будут действовать силы Лоренца при условии малости потерь энергии в среде. Это условие, по мнению автора, выполняется при распространении в жидкой среде импульсных волн. Такие явления предполагаются вероятными и в биологических средах.

В другой теоретической работе [47] обращается внимание на тот факт, что в ряде биологических явлений обнаружены межмолекулярные силы, отличающиеся более сильным взаимодействием между идентичными или подобными молекулами. Это взаимодействие происходит за счет флуктуаций протонных и электронных зарядов в одной молекуле, в результате чего создается благоприятное распределение зарядов в смежной молекуле, что и приводит к взаимодействию молекул. Однако этому притяжению препятствуют окружающие молекулы воды, которые должны быть при этом вытеснены, а этот процесс зависит от того, сходны или различны взаимодействующие молекулы. На основе этих положений и была высказана приведенная выше гипотеза [46] о диполь-дипольном взаимодействии молекул фермента и субстрата и о влиянии микроволн на такое взаимодействие.

Представляет интерес теоретическое исследование возможного влияния электрического поля на относительную стабильность двух возможных состояний или конфигураций макромолекулярных систем [211]. Автор

приходит к выводу, что электрическое поле с напряженностью порядка 10 000 *в/см* может вызвать разделение молекулярных цепей в ДНК (переход от неспаренного к спаренному состоянию), а также оказывать влияние на упругость протеиновых цепей (переход от длинной цепи к короткой), т. е. приводить к мышечному сокращению. Недавно получены экспериментальные данные, свидетельствующие о существовании в живых организмах ранее неизвестной управляющей системы[212]. При исследовании поверхностных электрических потенциалов, вместо предполагаемой ранее дипольной симметрии эквипотенциальных линий, найдено распределение, соответствующее анатомическому расположению крупных частей центральной нервной системы, как это показано на рис. 21 для ящерицы (подобное распределение найдено и у человека). Исследования с использованием эффекта Холла показали, что найденное распределение потенциалов обусловливается потоком электронов вдоль нерва, в направлении дендрит—тело нейрона—аксон (тогда как биотоки нерва возникают за счет радиального движения ионов в нервном волокне), причем на периферическом конце чувствительного нерва — положительный потенциал, а на конце двигательного — отрицательный (рис. 22). Авторы предположили,

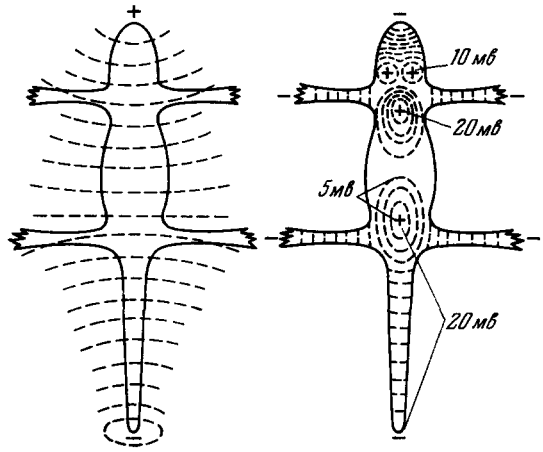


Рис. 21. Распределение поверхностного электрического потенциала по телу ящерицы.

Слева—предполагаемое, справа—экспериментально обнаруженное.

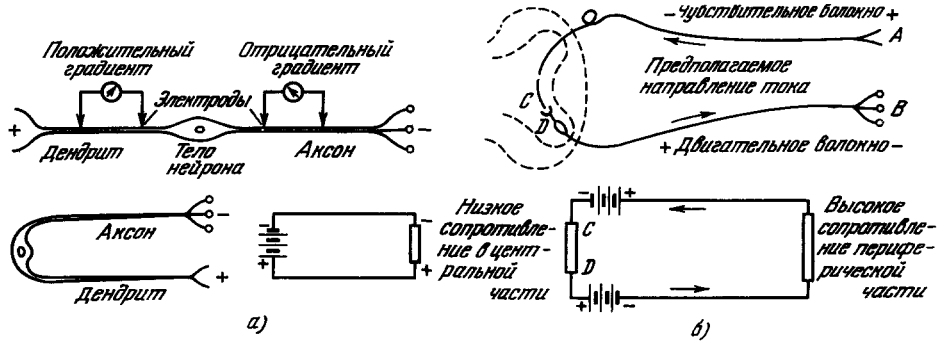


Рис. 22. Распределение потенциала вдоль нейронов спинного мозга и соответствующие эквивалентные схемы для нейрона (*а*) и нервного центра спинного мозга (*б*).

что найденная система электрической активности осуществляет управление биотоками нерва, влияя на скорость передачи информации и команд в живом организме. Кроме того, эту систему считают связанной с медленной передачей информации о боли и повреждениях и с психическим состоянием, что подтвердилось экспериментально. На основе полученных результатов сделаны и более широкие заключения:

а) Медленно изменяющиеся потенциалы мозга представляют собой механизм, контролирующий поведение человека и животного.

б) Внешние электрические и магнитные поля должны влиять на эту систему управления и, следовательно, на поведение человека. Эти предположения авторы сопоставляют со статистическими данными о связи между изменениями интенсивности магнитного поля Земли и психическими заболеваниями. Оказалось, что резкие увеличения психических заболеваний достоверно коррелируют с магнитными бурями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе рассмотренного экспериментального и теоретического материала может сложиться впечатление, что из всей широкой области электромагнитных полей — от инфранизкочастотных до сверхвысокочастотных — наиболее активным с биологической точки зрения является микроволновый диапазон. В самом деле, на протяжении десятков лет не могли обнаружить какие-либо биологические эффекты электромагнитных полей высоких и ультравысоких частот, отличные от чисто теплового, а в опытах с микроволнами биологическое действие было обнаружено в весьма короткие сроки и в самых разнообразных проявлениях.

Но дело здесь не в особой биологической активности микроволн, а в том, что исследования в этом диапазоне оказались наиболее плодотворными с методической точки зрения: сравнительно легко можно было дозировать интенсивность облучения, воздействовать на локальные участки тела животных, регулировать глубину проникновения энергии, варьируя частоту. Нельзя не учитывать и то немаловажное обстоятельство, что ко времени технического освоения микроволнового диапазона были уже разработаны новые, более совершенные методы биологических исследований — электрофизиологические, микроскопические, биохимические и др.

Вместе с этим успешные результаты, достигнутые в биологических исследованиях с микроволнами, стимулировали широкое изучение биологического действия электромагнитных полей других частотных диапазонов. В связи с этими успехами вновь возник интерес к давней проблеме о возможной роли электромагнитных полей в эволюционном развитии живой природы, в жизнедеятельности организмов. Достаточно сказать, что за последние годы опубликованы десятки работ о влиянии на живые организмы низкочастотных и инфранизкочастотных полей, о возникновении у людей, животных и растений физиологических реакций на периодические изменения магнитного и электрического полей Земли, о генерации электромагнитных полей различных частот в живых организмах, об участии этих полей в процессах жизнедеятельности. Число исследований в этих направлениях интенсивно возрастает, и появилось уже даже несколько обзорных статей [213–218].

Все это дает основание полагать, что вслед за изучением взаимодействия живой природы с электромагнитной энергией оптического и ионизирующего участков спектра, что привело к созданию новых областей биологии —«фотобиологии» и «радиобиологии»,— в настоящее время «осваивается» остальная область электромагнитного спектра — от субмиллиметровых радиоволн до медленно изменяющихся электрического и магнитного полей. Формируется новый раздел биологии, который можно было бы назвать «электромагнитная биология».

Было бы, конечно, преждевременным делать какие-то обобщения по поводу этой новой общебиологической проблемы, не получившей еще «законных прав» в науке. Однако анализ экспериментальных данных о биологическом действии микроволн и электромагнитных полей других частот приводит к мысли об одной общей черте этого действия [219].

Биологическое действие электромагнитных полей чаще всего сводится к тому или иному их влиянию на процессы управления и взаимосвязей в живом организме: между системами, между клетками, между молекулами. Иначе говоря, электромагнитное поле оказывает влияние на информационные взаимодействия в организме и, по-видимому, энергия поля служит только средством для осуществления этого влияния. В самом деле, ведь экспериментально установлено, что характер данной физиологической реакции на электромагнитное поле остается практически неизменным при вариации величины энергии воздействующего поля в довольно широких пределах. Более того, эффективность реакции может даже возрастать по мере уменьшения интенсивности воздействия.

Все это приводит к предположению, что биологическая активность электромагнитных полей обусловливается не энергетическим, а информационным их взаимодействием с живыми организмами, т. е. что главное в этом взаимодействии—не преобразование электромагнитной энергии в другие формы, а влияние электромагнитных полей на процессы преобразования, передачи, кодирования и хранения информации в живых системах. Дальнейшие исследования покажут, насколько правомерна эта концепция.

В заключение хотелось бы подчеркнуть, что накопленный экспериментальный материал и некоторые теоретические соображения по поводу взаимодействия живой природы с электромагнитными полями дают уже достаточные основания к тому, чтобы считать эту проблему заслуживающей серьезного обсуждения и многосторонних исследований.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. А. С. Пресман, Успехи совр. биол. **41**, 40 (1956).
2. А. С. Пресман, Ю. И. Каменский, Н. А. Левитина, Успехи совр. биол. **51**, 84 (1961).
3. А. С. Пресман, Успехи совр. биол. **56**, 161 (1963).
4. Z. V. Gordon, I. A. Kitsovskaya, M. S. Tolgskaya, A. A. Letavet, Digest Intern. Conf. Med. Electronics, 1961, стр. 153.
5. J. E. Roberts, H. F. Cook, Brit. J. Appl. Phys. **3**, 33 (1952).
6. H. P. Schwan, G. M. Piersol, Amer. J. Phys. Med. **33**, 371 (1954).
7. H. P. Schwan, G. M. Piersol, Amer. J. Phys. Med. **34**, 425 (1955).
8. J. Duhamel, La Presse med. **66**, 744 (1958).
9. J. Duhamel, La Presse med. **67**, 1951 (1959).
10. H. Kalant, Canad. Med. Ass. J. **81**, 575 (1959).
11. H. Boiteau, Rev. Corps. sante Armeés **1**, 637 (1960).
12. А. С. Пресман, Зарубежная радиоэлектроника **3**, 63; 4, 67 (1964).
13. T. Jaski, Radio Electronics **31**, 43 (1960).
14. A. F. Harvey, Proc. IEE **B107**, 557 (1960).
15. K. Marha, Pracovni lekarstvi **15**, 387 (1963).
16. W. Mumford, Proc. IRE **49**, 427 (1961).
17. L. Hartmuth, Zs. Naturforsch. **96**, 257 (1954).
18. H. P. Schwan, Advances Biol. and Med. Phys. **5**, 147 (1957).
19. H. P. Schwan, Proc. 2d Tri-Servis Conf. Biol. Eff. Microwave Energy, 1958, стр. 126.
20. W. Jackson, Trans. Farad. Soc. **42A**, 91 (1946).
21. H. P. Schman, Zs. Naturforsch. 8, 3 (1953).
22. H. P. Schwan, K. Li, Trans. Amer. IEE **74**, 603 (1955).
23. B. Rajewsky, A. Redhardt, Arch. d. Elektr. Übertrag. **11**, 163 (1957).
24. H. P. Schwan, Ann. d. Phys. **6**, 253 (1950).
25. H. P. Schwan, Trans. IRE **PGME-3**, 32 (1955).
26. H. P. Schwan, K. Li, Elect. Eng. **74**, 64 (1955).
27. E. R. Laird, K. Ferguson, Canad. J. Res. **A27**, 218 (1949).
28. H. F. Cook, Brit. J. Appl. Phys. **2**, 295 (1951).
29. T. S. England, N. A. Sharpless, Nature **163**, 487 (1949).
30. T. S. England, Nature **166**, 480 (1950).
31. J. F. Herrick, D. G. Jelatis, G. M. Lee, Feder. Proc. **9**, 60 (1950).
32. T. J. Buchanan, Proc. IEE **99**, pt. 3, 61 (1952).

33. T. M. Shaw, J. J. Windle, J. Appl. Phys. **21**, 956 (1950).
34. S. T. Bayley, Trans. Farad. Soc. **47**, 509 (1951).
35. H. P. Schwan, K. Li, Proc. IRE **41**, 1735 (1953).
36. H. F. Cook, Brit. J. Appl. Phys. **3**, 249 (1952).
37. H. F. Cook, Nature **168**, 247 (1951).
38. H. P. Schwan, Amer. J. Phys. Med. **32**, 144 (1953).
39. B. Rajewsky, H. Schwan, Nature **155**, 315 (1948).
40. H. Danzer, Ann. d. Phys. **20**, 463 (1934).
41. D. E. Barber, Techn. Rep. Univ. Michigan School of Publ. Health, April 1961.
42. V. T. Tomberg, В сб. Biol. Eff. Microwave Radiation, vol. **1**, Plenum Press, N. Y., 1961, стр. 221.
43. J. Dryden, W. Jackson, Nature **162**, 656 (1948).
44. W. Jackson, Nature **164**, 486 (1949).
45. H. F. Cook, T. J. Buchanan, Nature **165**, 358 (1950).
46. P. O. Vogelhut, 3d. Intern. Conf. Med. Electronics, 1960, стр. 52.
47. S. Prausnitz, C. Susskind, P. Vogelhut. Biol. Eff. Microwave Radiation, vol. 1, Plenum Press, N. Y., 1961, стр. 135.
48. А. С. Пресман, Гигиена и санитария **9**, 32 (1956).
49. А. С. Пресман, Биофизика **3**, 354 (1958).
50. J. Fleming, L. Pinnec, R. Baus, R. McAffee, Biol. Eff. Microwave Radiation, vol. 1, Plenum Press, N. Y., 1961, стр. 229.
51. H. P. Schwan, K. Li, Trans. IRE. **PGME-4**, 45 (1956).
52. H. P. Schwan, K. Li, Proc. IRE **44**, 1572 (1956).
53. H. P. Schwan, K. Li, Arch. Phys. Med. **36**, 363 (1955).
54. A. Anne, O. Salati, M. Satio, H. Schwan, Biol. Eff. Microwave Radiation, vol. 1, Plenum Press, N. Y., 1961, стр. 153.
55. H. Mermagen, там же. стр. 143.
56. A. C. Boyl, H. F. Cook, T. J. Buchanan, Brit. J. Phys. Med. **13**, 1 (1950).
57. L. Seguin, G. Castelain, Compt. rend. **224**, 1662 (1947).
58. H. F. Cook, Brit. J. Appl Phys. **3**, 1 (1952).
59. J. Clark, Proc. IRE **38**, 1028 (1950).
60. H. F. Cook, J. Physiol. **118**, 1 (1952).
61. А. С. Пресман, Аннотация научных работ АМН СССР, М., Изд-во АМН СССР, 1954, стр. 479.
62. А. С. Пресман, Гигиена и санитария **1**, 29 (1957).
63. H. P. Schwan, в кн. Therapeutic Heat, vol. 2, 1958, стр. 26.
64. К. Г. Кнорре, Тезисы конф. Института гигиены труда и профзаболеваний АМН СССР *), 1959, стр. 22.
65. А. С. Пресман, Тезисы 2-й конф. по примен. радиоэлектроники в биол. и мед., М., 1962, стр. 23.
66. J. H. Vogelman, Biol. Eff. Microwave Radiation, vol. 1, Plenum Press, N. Y., 1961, стр. 23.
67. F. G. Hirsch, Trans. IRE. **PGME-4**, 22 (1956).
68. J. E. Boysen, Arch. Indust. Hyg. **7**, 516 (1953).
69. В. В. Елисеев, Тр. ИГТ **2**, 94 (1964).
70. К. Г. Кнорре, Б. М. Белицкий, Тезисы конф. ИГТ, 1959, стр. 36.
71. А. С. Пресман, Новости мед. техн. 4, 51 (1960).
72. А. С. Пресман, Ю. И. Каменский, Биофизика **6**, 231 (1961).
73. А. С. Пресман, Биофизика **6**, 370 (1961).
74. А. С. Пресман, Биол. и мед. электроника **6**, 76 (1963).
75. J. W. Rac, J. F. Herrick, K. G. Wakim, F. H. Krusen, Arch. Phys. Med. **30**, 199 (1949).
76. J. W. Gersten, K. G. Wakim, F. H. Krusen, Arch. Phys. Med. **31**, 281 (1950).
77. А. Р. Ливенсон, Тезисы 2-й конф. по примен. радиоэлектроники в биол. и мед., М., 1962, стр. 25.
78. А. С. Пресман, в кн. «Физические факторы внешней среды», М., Изд. ИГТ, 1960, стр. 142.
79. T. Ely, D. Goldman, IRE Trans. **PGME-4**, 38 (1956).
80. S. Michaelson, R. Thomson, J. Howland, Industr. Med. Surgery **30**, 298 (1961).
81. J. Howland, R. Thomson, S. Michaelson, Biol. Eff. Microwave Radiation, vol. 1, Plenum Press, N. Y., 1961, стр. 261.
82. S. Michaelson, R. Thomson, J. Howland, Amer. J. Physiol. **201**, 351 (1961).
83. W. Deuchman, F. Stephens, M. Keplinger, K. Lampe, J. Occup. Med. **1**, 369 (1959).

*) В дальнейшем цитируется как издание ИГТ.

84. W. Deuchman, J. Midle, K. Landen, Toxic. Appl. Pharmacol. **6**, 71 (1964).
85. J. Howland, S. Michaelson, R. Thomson, H. Mermagen, RADC-TDR 62-102, Univ. of Rochester, 1962.
86. S. Michaelson, R. Thomson, J. Howland, Aerospace Med. **34**, 111 (1963).
87. K. Marha, Pracovni lekarstvi **15**, 238 (1963).
88. B. Scelsi, Radioterapia, Radiobiologia, Fisica Med. **12**, 135 (1957).
89. А. С. Пресман, Н. А. Левитина, Радиобиология **2**, 170 (1962).
90. G. M. Austin, S. M. Horwarth, Amer. J. Med. Sci. **218**, 115 (1949).
91. G. M. Austin, S. M. Horwarth, Amer. J. Phys. Med. **33**, 141 (1954).
92. M. Boldwin, S. Bach, S. Levis, Neurology **10**, 178 (1960).
93. Г. В. Бавро, Ю. А. Холодов, Тезисы Конф. по гигиене труда и биол. действию эл.-магн. полей радиочастот, М., Изд. ИГТ, 1963, стр. 108.
94. Ю. А. Холодов, там же, ср. 109.
95. Ю. А. Холодов, З. А. Янсон, Бюлл. эксп. биол. мед. **11**, 8 (1962).
96. Ю. А. Холодов, Бюлл. эксп. биол. мед. **9**, 42 (1963).
97. З. М. Гвоздикова, В. М. Ананьева, Бюлл. эксп. биол. мед. 8, 63 (1964).
98. Е. А. Лобанова, Тр. ИГТ **1**, 61 (1960).
99. S. Baranski, P. Czerski, Med. Pracy **3**, 129 (1963).
100. W. B. Deuchmann, F. H. Stephens, Indust. Med. Surg. **30**, 221 (1961).
101. C. Addington, F. Fischer, R. Neubauer, S. Osborn, Y. Sarkees, G. Swartz, Biol. Eff. Microwave Radiation, vol. 1, 1961, стр. 177.
102. R. D. McAfee, Amer. J. Physiol. **200**, 192 (1961).
103. R. D. McAfee, Amer. J. Physiol. **203**, 374 (1962).
104. А. С. Пресман, Бюлл. эксп. биол. мед. **2**, 51 (1957).
105. E. Hendler, J. Hardy, IRE Trans. **Me-7**, 143 (1960).
106. A. J. Vendrik, J. J. Vos, J. Appl. Physiol. **13**, 435 (1958).
107. З. В. Гордон, Е. А. Лобанова, Тр. ИГТ **1**, 59 (1960).
108. Н. В. Тягин, Бюлл. эксп. биол. мед. 8, 67 (1958).
109. Е. А. Лобанова, Тр. ИГТ **2**, 75 (1964).
110. См. литературу в [2].
111. О биологическом воздействии сверхвысоких частот, под ред. А. А. Летавета, Тр. ИГТ **1** (1960).
112. Физические факторы внешней среды, под ред. А. А. Летавета, М., Изд. ИГТ, 1960.
113. З. В. Гордон, Е. А. Лобанова, И. А. Кицовская, С. В. Никогосян, М. С. Толгская, Биол. и мед. электроника **6**, 72 (1963).
114. Тр. ИГТ, под ред. А. А. Летавета, **2** (1964).
115. З. В. Гордон, Е. А. Лобанова, М. С. Толгская, Гигиена и санитария **12**, 16 (1955).
116. Е. А. Лобанова, М. С. Толгская, Тр. ИГТ **1**, 69 (1960).
117. М. С. Толгская, З. В. Гордон, Тр. ИГТ **1**, 99 (1960).
118. А. С. Пресман, Тезисы 2-й конференции по примен. радиоэлектроники в биол. и мед. М., 1962, стр. 21.
119. А. С. Пресман, Н. А. Левитина, Бюлл. эксп. биол. мед. **1**, 41 (1962).
120. А. С. Пресман, Н. А. Левитина, Бюлл. эксп. биол. мед. **2**, 39 (1962).
121. Н. А. Левитина, Бюлл. эксп. биол. мед. 58, **67** (1964).
122. Н. А. Левитина, А. С. Пресман, Тезисы Конф. по гигиене труда и биол. действию эл.-магн. полей радиочастот, М., Изд. ИГТ, 1963, стр. 51.
123. М. Г. Удельнов, Нервная регуляция сердца, М., Медгиз, 1961, стр. 224.
124. L. Seguin, G. Castelain, Compt. rend. **224**, 1850 (1947).
125. В. Ю. Первушин, А. В. Триумфов, Тр. ВМОЛА **73**, 141 (1957).
126. М. С. Толгская, З. В. Гордон, Е. А. Лобанова, Вопр. курортологии, физиотерапии и леч. физкульт. **1**, 21 (1959).
127. C. Imig, J. Thomson, H. Hines, Proc. Soc. Exp. Biol. Med. **69**, 382 (1948).
128. G. Seerle, R. Dahlen, C. Imig, C. Wunder, J. Thomson, J. Thomas, W. Moressi, Biol. Eff. Microwave Radiation, vol. 1, 1961, стр. 187.
129. S. Gunn, T. Gould, W. Anderson, Biol. Eff. Microwave Radiation, vol, 1, 1961, стр. 94.
130. С. Ф. Городецкая, Фізіол. ж. **9**, 394 (1963).
131. Лучевые катаракты, под ред. А. А. Летавета, М., Медгиз, 1959, стр. 235—302.
132. D. Williams, I. Monahan, W. Nicolson, Trans, IRE **PGME-4**, 17 (1956).
133. L. Daily, K. Wakim, J. Herrick, E. Parkhill, W. Benedict, Amer. J. Ophthal. **35**, 1001 (1952).
134. С. Ф. Белова, З. В. Гордон, Бюлл. эксп. биол. мед. **4**, 43 (1956).

135. R. Carpenter, D. Bidle, C. Van Ummersen, Trans. IRE **Me-7**, 152 (1960).
136. L. Daily, E. Zeller, J. Herrick, W. Benedict, Amer. J. Ophthal. **34**, 1301 (1951).
137. R. Carpenter, D. Bidle, C. Van Ummersen, 3d Intern. Conf. Med. Electronics, 1960, стр. 30.
138. L. O. Merola, J. H. Kinoshita, Biol. Eff. Microwave Radiation, vol. 1, 1961, стр. 285.
139. V. Van Ummersen, Biol. Eff. Microwave Radiation, vol. 1, 1961, стр. 201.
140. W. A. Van Everdigen, Nederland. Tjudschr. voor Geneeskunde **84**, 4370 (1940).
141. G. Paff, W. Deuchman, R. Bouceck, Anatom. Record. **142**, 264 (1962).
142. G. Paff, J. Bouceck et al., Anat. Rec. **147**, 379 (1963).
143. L. Seguin, L'Onde electr. **29**, 271 (1949).
144. W. A. Van Everdingen, Nederland. Tjudschr. voor Geneeskunde **82**, 284 (1938).
145. W. A. Van Everdingen, Nederland. Tjudschr. voor Geneeskunde **87**, 406 (1943).
146. W. A. Van Everdingen, Rev. Belge des. Sci. Med. **5**, 261 (1946).
147. A. Montani, J. Electronics **17**, 114 (1944).
148. G. H. Brown, W. C. Morrison, Food Technol. 8, 361 (1954).
149. G. H. Brown, W. C. Morrison, Trans. IRE **PGME**-4, 16 (1956).
150. M. A. Epstein, H. F. Cook, Brit. J. Cancer **5**, 244 (1951).
151. D. E. Barber, Trans. IRE **BME**-2, 77 (1962).
152. J. E. Nyrop, Nature **157**, 51 (1946).
153. H. Fleming, Electr. Engng. **1**, 18 (1944).
154. П. П. Счастная, Тр. Харьк. мед. ин-та **15**, 239 (1957).
155. A. Wildervank, K. Wakim, J. Herrick, H. Krusen, Arch. Phys. Med. **40**, 45 (1959).
156. J. H. Heller, A. A. Teixeria-Pinto, Nature **183**, 905 (1959).
157. J. H. Heller, Radio Electronics **6**, 6 (1959).
158. A. Teixeria-Pinto, L. Nejelsky, Gulter et al., Exp. Cell. Res. **20**, 548 (1960).
159. G. H. Mickey, New York St. J. Med. **63**, 1935 (1963).
160. M. Satio, H. Schwan, Biol. Eff. Microwave Radiation, vol. 1, 1961, стр. 85.
161. A. A. Furedi, R.C. Valentine, Bioch. and Biophys. Acta **56**, 33 (1962).
162. A. A. Furedi, I. Ohad, Bioch. and Biophys. Acta **79**, 1 (1964).
163. M. Satio, L. Sher et al., Digest Intern. Conf. Med. Electronics **21**, 3 (1961).
164. А. С. Пресман, Биофизика 8, 138 (1963).
165. А. С. Пресман, С. М. Раппепорт, Научн. докл. высш. шк., сер. биол., **1**, 48 (1964).
166. А. С. Пресман, С. М. Раппепорт, Научн. докл. высш. шк., сер. биол. **3**, 44 (1964).
166а. А. С. Пресман, С. М. Раппепорт, Бюлл. эксп. биол. мед. № 4, 48 (1965).
167. Х. С. Коштоянц, Основы сравнительной физиологии, т. 2, М., Изд-во АН СССР, 1957.
168. А. С. Пресман, Биофизика 8, 258 (1963).
169. Е. Т. Кулин, Е. И. Морозов, ДАН БССР 8, 329 (1964).
170. W. A. Van Everdingen, Nederland. Tjudschr. voor Geneeskunde **85**, 3094 (1941).
171. W. A. Van Everdingen, Rev. Belge des Sci. Med. **5**, 279 (1946).
172. S. A. Bach, A. J. Luzzio, A. S. Brownell, Biol. Eff. Microwave Radiation, vol. 1, 1961, стр. 117.
173. S. A. Bach, A. J. Luzzio, A. S. Brownell, J. Med. Electronics **9**, Sept.—Nov. 1961.
174. S. A. Bach, Digest Intern. Conf. Med. Electronics **21**, 1 (1961).
175. G. Sacchitelli, F. Sacchitelli, Folia Medica **39**, 1037 (1956).
176. G. Sacchitelli, F. Sacchitelli, Folia Medica **41**, 342 (1958).
177. К. Кирчев, П. Ефтимов, Г. Чернаев, Тр. 5-го Межд. биохим. конгр., секц. 14—28, 427 (1962).
178. G. H. Haggis, T. J. Buchanan, J. B. Hasted, Nature **167**, 607 (1959).
179. T. J. Buchanan, G. H. Haggis, J. B. Hasted, B. G. Robinson, Proc. Roy. Soc. London **A213**, 379 (1952).
180. E. H. Grant, Phys. in Med. and Biol. **2**, 17 (1957).
181. J. J. Windle, T. M. Shaw, J. Chem. Phys. **22**, 1752 (1954).
182. J. J. Windle, T. M. Shaw, J. Chem. Phys. **25**, 435 (1956).
183. З. В. Гордон, в кн. «Физические факторы внешней среды», М., Изд. ИГТ, 1960, стр. 135.

184. Ю. А. Холодов, Матер. Всесоюзн. конф. эксп. курортологии, М., 1962, стр. 339.
185. An Observation on the Detection by the Ear of Microwave Signals, Proc. IRE **44**, 2A (1956).
186. A. H. Frey, Aerospace Med. **32**, 1140 (1961).
187. A. H. Frey, J. Appl. Physiol. **17**, 689 (1962).
188. A. H. Frey, Amer. J. Med. Electronics **2**, 28 (1963).
189. Р. Гранит, Электрофизиологическое исследование рецепции, М., ИЛ, 1957, стр. 16.
190. Х. С. Коштоянц, Основы сравнительной физиологии, т. 2, М., Изд-во АН СССР, 1957, стр. 13.
191. В. А. Энгельгард, Некоторые проблемы современной биохимии, М., Изд-во АН СССР, М., 1959.
192. Т. Н. Буллок, Современные проблемы биофизики, т. 2, М., Изд-во АН СССР, 1961, стр. 248.
193. H. Burr, A. Mauro, Yale J. Biol. Med. **21**, 455 (1949).
194. R. Morrow, J. Seipel, J. Washington Acad. Sci. **1** (1960).
195. F. Cazzamolli, Neurologica **6**, 193 (1925).
196. W. K. Volkers, W. Candib, IRE Convent. Rec. **1**, pt. 9, 116 (1960).
197. А. С. Пресман, Биофизика **9**, 131 (1964).
198. А. Сент-Дьердьи, Биоэнергетика, М., Физматгиз, 1960, стр. 26—27.
199. А. С. Пресман, в кн. «Электроника в медицине», М., Госэнергоиздат, 1960, стр. 219.
200. А. С. Пресман, Тезисы 2-й конф. по примен. радиоэлектроники в биол. и мед., 1962, стр. 21.
201. З. М. Гвоздикова и др., Тр. ИГТ **2**, 20 (1964).
202. З. В. Гордон, Тр. ИГТ **2**, 57 (1964).
203. М. Н. Садчикова, Тр. ИГТ **2**, 111 (1964).
204. И. А. Кицовская, Тр. ИГТ **2**, 39 (1964).
205. С. В. Никогосян, Тр. ИГТ **2**, 43 (1964).
206. Е. А. Лобанова, Тр. ИГТ **2**, 13 (1964).
207. Ю. И. Каменский, Биофизика **9**, 695 (1964).
208. K. S. Cole, Trans. IRE **PGME-6**, 28 (1956).
209. О. А. Самойлов, Структура водных растворов электролитов и гидратация ионов, М., Изд-во АН СССР, 1957.
210. F. Heinmets, A. Herschman, Physics in Med. and Biol. **5**, 271 (1961).
211. T. L. Hill, J. Amer. Chem. Soc. 8, 2142 (1958).
212. R. O. Becker et al., N. Y. State, J. Med. **62**, 1169 (1962).
213. H. S. Alexander, Am. J. Med. Electronics **1**, 181 (1962).
214. R. O. Becker, Med. Electronics and Biol. Eng. **1**, 293 (1963).
215. H. Friedman, R. O. Becker, Nature **200**, 626 (1963).
216. A. H. Frey, Behavioral Biophysics, Rep. No. 64-01 (1964).
217. Ed. M. F. Barnothy, Biological Effects of Magnetic Fields, Plenum Press, N. Y., 1964.
218. А. С. Пресман, Наука и жизнь, № 5 (1965).
219. А. С. Пресман, Тезисы 3-й конф. по мед. электронике, М., 1964, стр. 117