

AGENCIA FEDERAL DE EDUCACIÓN
Institución Educativa Estatal de Enseñanza Profesional Superior
«**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE TOMSK**»

V.M. Perelmuter, V.A. Cha, E.M. Chuprikova

**ASPECTOS MÉDICO-BIOLÓGICOS DE LA
INTERACCIÓN DE ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS
CON EL ORGANISMO**

Recomendado como material didáctico
Por el Consejo Editorial y de Publicaciones
de la Universidad Politécnica de Tomsk

Editorial
de la Universidad Politécnica de Tomsk
2009

UDC 614.876(075.8)
ББК 28.071я73
П27

Perelmuter, V.M.

П27 Aspectos médico-biológicos de la interacción de ondas electromagnéticas con el organismo: manual / V.M. Perelmuter, V.A. Cha, E.M. Chuprikova. – Tomsk: Editorial de la Universidad Politécnica de Tomsk, 2009. – 128 pp.

El manual de capacitación se basa en un curso de conferencias elaborado por los autores para el programa de máster en «Física Médica». Uno de los objetivos principales del manual es el estudio de las etapas clave en el desarrollo de investigaciones teóricas y experimentales sobre el impacto de las ondas electromagnéticas de rango milimétrico y baja intensidad en sistemas biológicos de diversa complejidad organizativa, incluidos los organismos vivos.

El manual se ha desarrollado en el marco de la implementación del Programa Educativo Innovador de la UTP en el ámbito de «Energía Atómica, ciclo del combustible nuclear, gestión segura de residuos radiactivos y combustible nuclear gastado, garantía de la seguridad y lucha contra el terrorismo», y está destinado a estudiantes de último curso, estudiantes de máster y estudiantes de doctorado que cursen especialidades físicas y médico-biológicas.

UDC 614.876(075.8)
ББК 28.071я73

Revisores

Doctor en Ciencias Médicas, Profesor de la SSMU (Universidad Estatal de Medicina de Siberia)

I. V. Sukhodolo

Candidato a Doctor en Ciencias Técnicas, Académico de la RAEN (Academia Rusa de Ciencias Naturales)

Director de ООО «Spinor»

A. M. Kozhemyakin

© ГОУ ВПО «Universidad Politécnica de Tomsk», 2009
© Perelmuter V. M., Cha V. A., Chuprikova E. M., 2009
© Diseño. Editorial de la Universidad Politécnica de Tomsk, 2009

ÍNDICE

Introducción	5
0.1. Relevancia del estudio de los efectos biológicos radiación electromagnética	5
0.2. Características de la radiación electromagnética de ultra alta frecuencia y de frecuencia extremadamente alta	9
0.3. Características de frecuencia de la radiación electromagnética de importancia biológica	12
Lista de referencias bibliográficas del capítulo	13
1. Influencia de la radiación electromagnética en objetos biológicos de diferente nivel de organización	15
1.1. Las proteínas como posibles receptores de la radiación electromagnética radiación	15
1.2. Acción de la radiación electromagnética en los estados conformacionales de las proteínas	19
1.3. Probabilidad de cambio en el estado de la membrana celular	22
1.4. Cambios en la transmisión del impulso nervioso	25
1.5. Influencia de la radiación electromagnética en las propiedades biológicas de los microorganismos	27
1.6. Influencia de la radiación electromagnética en los procesos metabólicos a nivel celular	30
1.7. Modificación del ciclo mitótico	31
1.8. Modificación de las propiedades adhesivas celulares	33
1.9. Peculiaridades de la cooperación intercelular	34
1.10. La radiación electromagnética como inductor de apoptosis	36
1.11. Efectos de la radiación electromagnética en células de tumores malignos	37
1.12. Conclusión	38
Lista de referencias bibliográficas del capítulo	39
2. Influencia de la radiación electromagnética en el organismo en su conjunto	45
2.1. Modificación funcional y morfológica de sistemas biológicos de los tejidos bajo la acción de la radiación electromagnética	46
2.2. Particularidades de las alteraciones nerviosas y endocrinas de los sistemas del organismo bajo la acción de las ondas electromagnéticas	48
2.3. Características de los efectos estresores y adaptógenos ondas electromagnéticas	52
2.4. Influencia de la radiación electromagnética en el comportamiento de los animales	55
2.5. Alteraciones en el comportamiento humano bajo la acción de radiación electromagnética	58
2.6. Corrección dirigida del estado fisiológico sistemas del organismo	59

2.7. Dependencia de los efectos locales y generales de la frecuencia de las ondas electromagnéticas, la tasa de absorción específica, el tiempo de exposición y el tipo de radiación (régimen continuo o pulsado)	63
2.8. Conclusión	66
Lista de referencias bibliográficas del capítulo	69
3. Efectos patógenos de la radiación electromagnética de microondas (REM)	72
3.1. Alteraciones del genoma: efecto mutagénico, malformaciones del desarrollo (influencia teratogénica)	72
3.2. Efectos sobre el sistema sexual (reproductor)	75
3.3. Alteraciones de la regulación neuroendocrina	76
3.4. Reversibilidad de los cambios en sistemas sensibles a la exposición a la radiación electromagnética de microondas (REM)	78
Lista de referencias bibliográficas del capítulo	79
4. Efectos terapéuticos de la radiación electromagnética de microondas (REM)	81
4.1. Efectos terapéuticos de la radiación electromagnética de microondas (REM) a nivel de potencia térmica	82
4.2. Efectos terapéuticos de la radiación electromagnética de microondas (REM) a nivel de potencia no térmica	82
4.3. Estimulación de la hematopoyesis	83
4.4. Estimulación del sistema inmunitario	84
4.5. Influencia en la cicatrización de úlceras del tracto gastrointestinal	84
4.6. Estimulación de la regeneración del tejido óseo	86
4.7. Dependencia de los efectos terapéuticos de la tasa de absorción específica, la frecuencia, el tiempo de exposición a la radiación, los regímenes continuos e impulsados, considerando la duración de los impulsos, frecuencia de repetición, parámetros de forma	87
4.8. Conclusión	87
Lista de referencias bibliográficas del capítulo	89
5. Dependencia de la influencia de la radiación electromagnética de microondas (REM) en el organismo del estado funcional de sus sistemas fisiológicos	91
5.1. El papel del nivel basal de actividad de los sistemas fisiológicos	92
5.2. Significado de la asimetría funcional de los sistemas representados por órganos pares	93
5.3. Predicción de los efectos biológicos de la radiación electromagnética en la banda de microondas	96
Lista de referencias bibliográficas del capítulo	97
6. Mecanismos subyacentes al impacto de la radiación electromagnética en la banda de microondas	99
6.1. Mecanismos físicos del impacto de la radiación de nivel térmico	99
6.2. Mecanismos físicos probables del impacto radiación de nivel no térmico	102
6.3. Mecanismos fisiológicos de la recepción de la radiación electromagnética (REM) a nivel del organismo completo	108
6.4. Sistemas sensoriales de mamíferos. Papel de la organización estructural de la piel en la recepción de la radiación electromagnética (REM)	112
6.5. Conclusiones	119
Lista de referencias bibliográficas del capítulo	121
Conclusiones	125

INTRODUCCIÓN

0.1. Relevancia del estudio de los efectos biológicos de la radiación electromagnética

El progreso técnico, en muchas de sus manifestaciones, está relacionado con el uso de campos electromagnéticos o con su generación como subproducto. La potencia total de las fuentes de campos electromagnéticos aumenta constantemente, y los parámetros de la radiación electromagnética se diversifican, de modo que las personas y, en general, el ecosistema, están expuestos a señales electromagnéticas con una intensidad creciente y características inusuales, sin precedentes. Esta exposición puede denominarse, con razón, contaminación electromagnética del medio ambiente. La intensidad media de este fondo electromagnético es extremadamente baja, pero en ciertas localidades y periodos es significativa, especialmente para el personal que opera y mantiene diversos sistemas de comunicación, localización e instalaciones tecnológicas. La inevitabilidad de la exposición a la radiación electromagnética, con sus posibles consecuencias adversas, nos obliga a evaluar el peligro que representan diversos tipos de este factor físico para la salud humana. En varios estudios se ha encontrado una relación entre el tiempo de exposición a las ondas electromagnéticas y la aparición de diversas enfermedades. Por ejemplo, en la revisión de L. Vershaeva [1] se señala un aumento en la frecuencia de leucemia y la aparición de tumores malignos del sistema nervioso central en niños expuestos a la radiación electromagnética. También se subraya la posibilidad de formación de radicales libres bajo la influencia de campos electromagnéticos, lo que conlleva alteraciones del genoma, incluso la ruptura de las cadenas de ADN.

En el trabajo de J. I. Trosko [2] se mencionan tres mecanismos de la posible influencia de las ondas electromagnéticas en el estado del sistema genético del organismo y, en última instancia, en el estado de salud del ser humano: 1) *killing* de células (citotoxicosis); 2) mutaciones genéticas o cromosómicas; 3) alteración de la expresión de la información genética durante la trans-

cripciones (bloqueo o desbloqueo de diversos loci del genoma durante la lectura) a nivel translacional (estabilización o desestabilización de mensajes genéticos) y postraduccionales (modificación del producto génico – proteína). Estos efectos pueden potencialmente conducir a diversas enfermedades. Este último mecanismo, a diferencia de los dos anteriores, es irreversible y se caracteriza por un comportamiento de umbral, diversas vías bioquímicas de desarrollo, y requiere una exposición repetida a la radiación electromagnética para que se manifieste el efecto. En última instancia, las ondas electromagnéticas, como factor epigenético, inducen en la célula uno de los cuatro efectos siguientes: alteración del crecimiento y del proceso de proliferación; alteraciones en la diferenciación celular; muerte celular programada (apoptosis); respuestas adaptativas de las células diferenciadas.

Las revisiones de J.R. Goldsmith y Y. Utilainen [3, 4] analizan el peligro que representan para el ser humano diversos dispositivos, incluidos los de uso doméstico. Se indican cuatro factores que demuestran la influencia de estos dispositivos en el estado de salud: 1) alteraciones en los indicadores hematológicos; 2) cambios en los cromosomas de los leucocitos; 3) aumento de la frecuencia de partos desfavorables; 4) mayor prevalencia de enfermedades cancerosas. Una serie de trabajos epidemiológicos se dedican al estudio de la correlación entre la exposición a la radiación electromagnética y ciertas enfermedades. C. Zmigalsky analizó la dependencia de la frecuencia de aparición de enfermedades oncológicas con respecto al nivel de exposición a la radiación electromagnética [5]. Se descubrió que la frecuencia de estas enfermedades es de 119 por cada 100 000 personas en el personal que mantiene instalaciones con un nivel elevado de radiación electromagnética, mientras que este valor es de 57 por cada 100 000 en el resto de la población. En jóvenes con tumores malignos de los sistemas hematopoyético y linfático, la mayor diferencia entre las categorías expuestas y no expuestas se observa en los casos de leucemia y linfoma, asociados a células inmunocompetentes.

Muchas personas poseen ordenadores personales. Aunque se declara que estos dispositivos son absolutamente inocuos, emiten ondas electromagnéticas. Se ha observado que esta radiación contribuye a la manifestación de un efecto mutagénico, perturba las funciones gástricas y glandulares, y debilita la memoria [6]. La radiación electromagnética de los teléfonos móviles actúa sobre el sistema nervioso central, los ojos y las gónadas [6]. Además, influye en la disfunción de los sistemas cardiovascular, hematopoyético e inmunitario, y altera los procesos metabólicos.

La radiación de ruido puede tener un impacto sustancial en las funciones vitales del organismo humano, especialmente en el rango de las ondas milimétricas [7]. Es precisamente en este rango espectral donde el agua absorbe con mayor intensidad la radiación electromagnética. El contenido de agua en la piel humana es de aproximadamente el 60 %. Debido a esto, las ondas milimétricas se absorben casi por completo en una capa de piel de 0,7 a 1 mm de espesor y no alcanzan los órganos internos del ser humano. El organismo humano se compone de aproximadamente 10^{15} células que generan campos electromagnéticos en el rango de las ondas milimétricas. Un ser humano, en estado de salud y enfermedad, presenta respuestas amplitud-frecuencia diferentes. Esto implica que cualquier patología es, primordialmente, una patología celular. La radiación electromagnética externa en el rango de las ondas milimétricas, por ejemplo, la generada mediante diodos IMPATT [8], estimula la radiación endógena del organismo en este rango en un individuo enfermo. La densidad espectral de la radiación de ruido difiere entre los distintos diodos IMPATT, aunque todos ellos presentan un nivel aproximadamente similar, del orden de 10^{-19} W/Hz. Cada persona genera su propia radiación electromagnética a frecuencias características, en las que la radiación de ruido puede influir en el organismo humano.

Todos estos datos señalan la necesidad de desarrollar nuevas normas sanitarias que establezcan los niveles de seguridad para la radiación electromagnética de origen tecnológico. Se debe prestar especial atención a fuentes de radiación tales como receptores de televisión, estaciones de radio, teléfonos móviles, líneas de transmisión de energía eléctrica, sistemas de radiocomunicación, televisión, medios de radionavegación, radiolocalización, transporte eléctrico y equipos domésticos y de oficina [9].

Una de las principales razones para la ausencia de dichas normas sanitarias es la insuficiencia de investigaciones sobre los efectos biológicos de la radiación electromagnética, especialmente su dependencia de los parámetros de la radiación y las condiciones de exposición. Para determinar niveles de radiación electromagnética intrínsecamente seguros, es necesario investigar minuciosamente los efectos biológicos a bajas magnitudes de intensidad de las ondas incidentes. No obstante, la existencia misma de efectos biológicos inducidos por campos electromagnéticos de baja intensidad es actualmente objeto de debate. A pesar de los resultados de numerosos trabajos experimentales, algunos físicos niegan la posibilidad de que los cuantos electromagnéticos en el rango de frecuencias de $10^8 \dots 10^{11}$ Hz puedan causar transiciones conformacionales en biomoléculas.

romoléculas, ya que la energía del cuanto $h\nu$ es mucho menor que la energía térmica del medio kT . Por ejemplo, en el trabajo de Yu.I. Kolchugin [10] se evaluó la absorción específica de radiación electromagnética en tejidos biológicos dentro del marco de la electrodinámica macroscópica. Y se halló que la absorción de energía no puede superar $kT/10$ a un nivel atómico de intensidad de la onda incidente. Se consideraron los siguientes mecanismos de acumulación de energía: 1) proceso multifotónico; 2) воздействие directo del campo eléctrico sobre los iones; 3) efectos cooperativos y/o excitaciones coherentes. Se descubrió que estos mecanismos son ineficaces desde el punto de vista de la transformación de la energía de la onda en energía interna del sistema. Se concluyó que los efectos biológicos no térmicos son imposibles en el rango de frecuencias de microondas de la radiación electromagnética aplica-

Todas las conclusiones sobre la imposibilidad de efectos no térmicos de la radiación electromagnética en objetos biológicos se fundamentan en la afirmación de que no se ha encontrado un mecanismo eficaz de acumulación de energía suficiente para superar la barrera de potencial entre los estados conformacionales. Esta situación se debe a que no se consideran una serie de características físicas de la interacción entre los biosistemas y la radiación electromagnética.

En primer lugar, una característica de las macromoléculas biológicas es que su estructura primaria está formada como una cadena de subunidades que presentan movimientos oscilatorios internos con sus correspondientes frecuencias propias, y que están unidas entre sí mediante enlaces disipativos, pero no elásticos (lo cual es muy importante). Al interactuar un sistema de este tipo con una onda electromagnética, se puede excitar un modo vibracional (tipo de vibración) en una biomacromolécula, impidiendo que la energía de este tipo de vibración se redistribuya a otros modos [11]. Este mecanismo posibilita la acumulación de energía suficiente para una transición conformacional en uno de los modos de vibración internos de la biomacromolécula. Este mecanismo también puede interpretarse de la siguiente manera: dicha interacción permite concentrar la energía de numerosas vibraciones internas no sincronizadas de una biomacromolécula en un único modo de movimiento vibracional, sincronizado por el campo electromagnético externo

La segunda característica de la interacción de los sistemas biológicos con la radiación electromagnética se relaciona con la longitud de onda electromagnética. Los oponentes a los efectos biológicos no térmicos de las ondas electromagnéticas en el rango de microondas sugieren una baja probabilidad de procesos multifotónicos. Desde un punto de vista termodinámico, esto es correcto para

la región de Wien en la teoría de la radiación de equilibrio (térmica), donde el número medio de fotones para un modo con una frecuencia determinada no puede ser superior a uno. El rango de microondas pertenece a la región de Rayleigh-Jeans, donde el número medio de fotones $\bar{n} \gg 1$. En este caso, el límite termodinámico de la eficiencia de transformación de la energía de la radiación externa en energía libre de Helmholtz será igual a 1 en un cierto intervalo de potencia absorbida [12]. En este intervalo, la energía del campo electromagnético externo se transforma de manera más eficiente en la energía de las oscilaciones internas, que son ordenadas en el sistema por la influencia externa, incluyendo procesos multifotónicos. Esta conclusión concuerda con la suposición de condensación de bosones en la estructura de las membranas biológicas [13]. Se utilizó un enfoque análogo al considerar la influencia del campo electromagnético en los procesos químicos de las membranas durante la transmisión de señales [14

0.2. Características de la radiación electromagnética de frecuencias ultraaltas y extremadamente altas

Las observaciones realizadas hasta el momento indican que los efectos biológicos de la radiación electromagnética dependen de los parámetros de los campos incidentes. Uno de los parámetros más importantes es la intensidad de la radiación. La intensidad se puede estimar mediante la densidad de flujo de potencia incidente o la intensidad de la componente eléctrica del campo electromagnético. La magnitud de la intensidad determina el carácter del efecto biológico, que puede ser térmico o no térmico. El criterio para esta distinción es la temperatura del bioobjeto irradiado por ondas electromagnéticas.

Si el aumento de esta temperatura debido a la irradiación no supera los 0,1 K, el nivel de intensidad se considera no térmico, y la radiación electromagnética se denomina, en este caso, de baja intensidad.

En la práctica, resulta conveniente utilizar una característica de la radiación incidente, concretamente: la densidad de flujo de potencia incidente. Realicemos una estimación del nivel no térmico de este parámetro tomando como ejemplo un animal (ratón). Para ello, refirámonos a la fig. 0.1, que muestra esquemáticamente un ratón expuesto a un flujo de potencia incidente con una densidad P_{fall} .

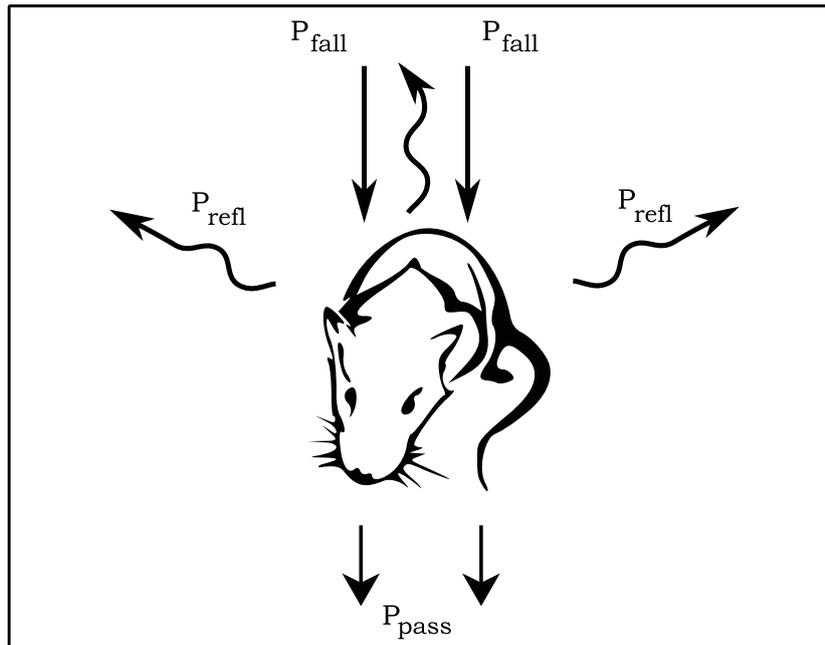


Fig. 0.1. Esquema de irradiación de un animal con radiación electromagnética.

Una parte de la potencia incidente puede atravesar el ratón. El flujo, tras su paso a través del animal, tendrá una densidad P_{pass} . Una cierta proporción de la potencia incidente se reflejará en el cuerpo del ratón debido a la diferencia en las magnitudes de la constante dieléctrica entre el aire y los tejidos biológicos. La densidad de flujo de la potencia reflejada se denota en la fig. 0.1 como P_{refl} , aunque el valor numérico de este parámetro varía en función del ángulo de reflexión. Dado que la medición de P_{pass} y, especialmente, de P_{refl} , presenta grandes dificultades técnicas, normalmente en el experimento solo se miden las densidades de flujo de la potencia incidente P_{fall} . En este sentido, es conveniente limitarse a una estimación del límite inferior del valor umbral del nivel atórmico de radiación electromagnética, suponiendo que toda la potencia incidente es absorbida por el cuerpo del animal

Realizaremos una estimación para una duración de exposición de 30 minutos, despreciando el intercambio de calor entre el cuerpo del animal y el entorno. Además, supondremos que la capacidad calorífica específica del cuerpo del animal es de $3 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$, dado que los tejidos biológicos están compuestos, en promedio, por un 75 % de agua [15]. Para una masa corporal de ratón de aproximadamente 20 g, la energía absorbida por el animal no debería exceder los 6 J, asumiendo que el incremento de la temperatura corporal Δt es de 0,1 K:

$$Q = cm\Delta T = 6 \text{ Дж}.$$

Para cumplir esta condición, con un tiempo de exposición $t_{exp} = 30 \text{ min}$ y un área de proyección del cuerpo del ratón $S_m = 10 \text{ cm}^2$, la densidad de flujo de potencia incidente debe ser igual a:

$$P_{fall} \approx \frac{Q}{S_{mf} t_{exp}} \approx \frac{6[\text{Дж}]}{10[\text{см}^2] 1,8 \cdot 10^4 [\text{с}]} \approx 3,3 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2} \approx 330 \frac{\text{мВт}}{\text{см}^2}.$$

Para un ser humano, esta magnitud es aproximadamente 5 veces mayor, puesto que, para su cuerpo, la relación masa/área de proyección es de 10 g/cm^2 , mientras que para un ratón es de 2 g/cm^2 . Teniendo en cuenta el intercambio de calor del cuerpo con el entorno, así como el hecho de que una parte de la potencia incidente se refleja y no atraviesa el cuerpo, el valor umbral debe incrementarse. Es evidente que tales estimaciones son válidas para frecuencias en las que la absorción de las ondas incidentes involucra prácticamente a todo el cuerpo. Mediciones específicas demostraron que, en el rango de microondas, la temperatura del cuerpo humano aumenta $0,1 \text{ K}$ con un flujo de potencia incidente de aproximadamente 5 mW/cm^2 tras una exposición de 30 minutos. También es necesario considerar la dependencia de este umbral con respecto a la duración de la exposición. Cuanto menor es la duración de la exposición, mayor es el umbral del efecto no térmico de la radiación electromagnética.

El siguiente parámetro importante de la radiación electromagnética es su frecuencia, ya que los bioefectos no térmicos presentan un carácter resonante. No obstante, esta magnitud solo tiene sentido bajo una exposición continua o de pulso largo a una frecuencia portadora fija. El último caso se caracteriza porque la duración de los impulsos t_{imp} debe ser mucho mayor que el periodo de oscilación T :

$t_{imp} \ll T = 1/f$. En este caso, el espectro de la radiación modulada en amplitud es cercano al espectro de la señal de salida de generadores reales que operan a una frecuencia fija en modo continuo.

Con la modulación de amplitud o la modulación de frecuencia, la interacción resonante de los bioobjetos con la radiación incidente se produce con una periodicidad definida, determinada por la frecuencia de repetición de los impulsos de modulación. Esta frecuencia de repetición también reviste importancia biológica, ya que puede ser cercana o múltiplo de la frecuencia de los ritmos de actividad eléctrica del sistema nervioso central.

En muchos casos, como en la modulación de frecuencia, la modulación de amplitud con impulsos de corta duración y la exposición al ruido, tiene más sentido hablar del espectro de frecuencias o la banda de frecuencias de la radiación electromagnética que de la frecuencia portadora. En este caso, una característica cuantitativa de la intensidad de la exposición, además de la densidad integral del flujo de potencia incidente, es la densidad espectral de la radiación. Este parámetro es una medida de la potencia de la radiación incidente por unidad de intervalo de frecuencia: $\approx P / \Delta f$.

Finalmente, tiene sentido considerar por separado la cuestión del espectro de frecuencias de los impulsos ultracortos, también denominados señales de banda ultra ancha. Esto se aborda en el siguiente apartado.

0.3. Características frecuenciales de la radiación electromagnética de importancia biológica

En primer lugar, consideremos los rangos de frecuencia utilizados en medicina con fines terapéuticos o de diagnóstico. En la Fig. 0.2 se muestra un diagrama que ilustra el estado actual de la cuestión en este campo. También se indican los rangos de frecuencia de las ondas electromagnéticas generadas por los aparatos domésticos más comunes, donde la intensidad de la radiación antropogénica es suficientemente elevada. Además, el diagrama utiliza terminología radiotécnica, empleada habitualmente por los fabricantes de dispositivos generadores y transmisores.

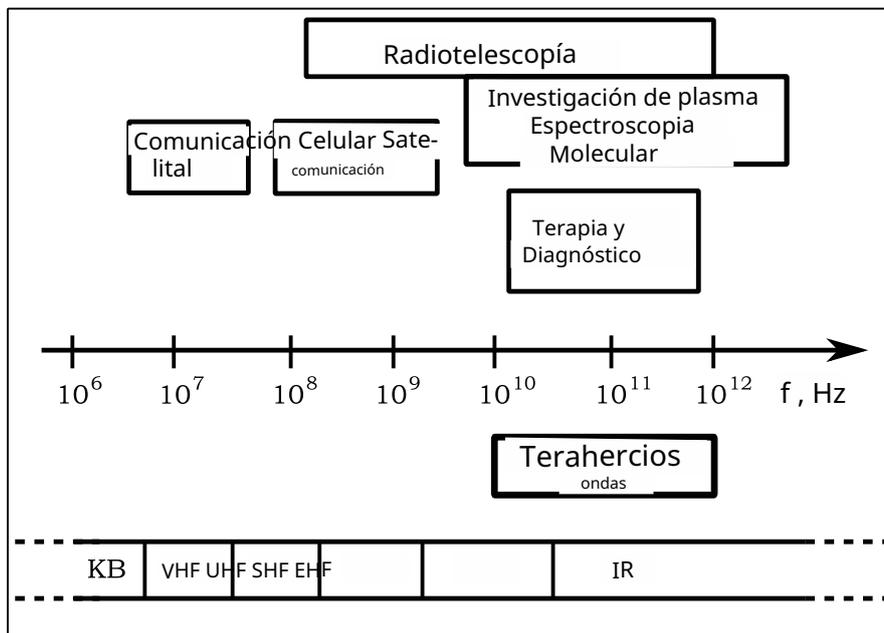


Fig. 0.2. Escala radioeléctrica de frecuencias

De la Fig. 0.2 se deduce que en la escala radioeléctrica no existen intervalos, y el término «ondas de terahercios» no se incluye en este sistema. Los físicos

utilizan una escala ligeramente diferente. En esta escala se suceden consecutivamente las ondas métricas, decimétricas, centimétricas, milimétricas y submilimétricas, seguidas por la luz infrarroja lejana y cercana, el espectro visible, el ultravioleta cercano y lejano, y los rangos de rayos X y gamma. En esta escala tampoco se incluye un intervalo para las «ondas de terahercios».

Por otro lado, los prefijos kilo, mega, giga y tera significan los multiplicadores 10^3 , 10^6 , 10^9 y 10^{12} , respectivamente. Por lo tanto, las «ondas de terahercios» deberían corresponder a frecuencias de 10^3 a 10^6 GHz, es decir, un intervalo que abarca parte de las ondas submilimétricas, el rango infrarrojo y una porción del espectro visible. En realidad, bajo este término se entiende un rango que va desde 100 hasta 100 000 GHz. ¿A qué se debe esto?

Existen dos razones para la aparición de este término. Por un lado, si bien en las escalas mencionadas no existe una discontinuidad, sí existía una brecha en el desarrollo y dominio de los rangos de frecuencia. Para el dominio del rango de frecuencias son necesarios tres componentes: generadores de oscilaciones, sistemas de guíaondas desarrollados y aparatos de diagnóstico. Desde la época de Hertz y Popov, los radiotécnicos han desarrollado esta técnica, ascendiendo secuencialmente por la escala de frecuencias hasta alcanzar, a finales del siglo pasado, el inicio del rango submilimétrico. Por otro lado, la óptica se ha desarrollado desde el rango visible hacia las regiones ultravioleta e infrarroja. Debido a estas razones históricas, el intervalo de frecuencia al que se atribuyen las «ondas de terahercios» ha comenzado a explorarse en los últimos años.

La segunda razón es que este rango ha resultado ser muy interesante desde el punto de vista de su aplicación, especialmente en medicina. Posee las mejores propiedades de sus vecinos. Al igual que las ondas de radio, penetra materiales opacos a la luz visible (excepto los metales). Sin embargo, las ondas de este rango pueden enfocarse como la luz y utilizarse las leyes de la óptica geométrica en la construcción de sistemas electrodinámicos.

Lista de referencias bibliográficas del capítulo

1. Verschaeve L. Can non ionizing radiation induce cancer? // *Cancer J.* — 1995. — № 5. — P. 237–249.
2. Trosko J.E. Human health consequences of environmentally modulated gene expression: potential roles of ELF-EMF induced epigenetic versus mutagenetic mechanisms of disease // *Bioelectromagnetics.* — 2000. — № 21(5). — P. 402–406.

3. Juutilainen J., Seze de R. Biological effects of amplitude-modulated radio-frequency radiation // *Scand. J. Work, Environ. and Health.* – 1998. – № 4. – P. 245–254.
4. Goldsmith J.R. Epidemiological studies of radio-frequency radiation: Current status and areas of concern // *Sci. Total Environ.* – 1996. – № 1. – P. 3–8.
5. Szmigielski S. Cancer morbidity in subjects occupationally exposed to high frequency (radiofrequency and microwave) electromagnetic radiation // *Sci. Total Environ.* – 1996. – № 1. – P. 9–17.
6. Malenko O.G., Tupítsina T.V. Impacto de la radiación emitida por monitores de vídeo en el organismo humano // *Actas de las XXXIV y XXXV conferencias científico-técnicas de la Universidad Técnica de Jabárovsk.* – Jabárovsk, 1966. – Pág. 96.
7. Búrov A.L. Aspectos ecológicos de la radiación electromagnética de estaciones base de sistemas de comunicación móvil / A.L. Búrov, Yu.I. Kolchugin, Yu.P. Páltsev // *Protección Laboral y Ecología Industrial.* – 1966. – № 9. – Pág. 17–19.
8. Medical application of noise radiation of INPATT diode / Ya. Savenko [et al.] // *AmerEM 2000.* – Report 1-2-2. – P. 30.
9. Grigoryev Yu. G. Man in electromagnetic field (present situation, expected effects and danger estimate) // *Radiation biology and radioecology.* – 1997. – № 4. – P. 690–702.
10. Kolchugin, Yu.I. Sobre la cuestión de las normas sanitarias de radiación electromagnética en el rango de 300...3000 MHz // *Protección Laboral y Ecología Industrial.* – 1996. – № 9. – P. 20–23.
11. Pickard W.F., Moros E.G. Energy deposition processes in biological tissue: nonthermal biohazards seem unlikely in the ultra-high frequency range // *Bioelectromagnetics.* – 2001. – № 22(2). – P. 97–105.
12. Karnaukhov, A.V., Ponomarev, V.O. Resonancia disipativa: una nueva clase de fenómenos físicos. Algunos enfoques para la descripción analítica // *Tecnologías Biomédicas y Electrónica.* – 2001. – № 8. – P. 23–31.
13. Chukova, Yu.P. El descubrimiento de los efectos resonantes no térmicos de la radiación electromagnética del rango milimétrico: el inicio de una nueva biofísica // *Actas del X Simposio de Toda Rusia «Ondas Milimétricas en Medicina y Biología».* – M., 1995. – P. 132–136.
14. Frohlich H. The Biological Effects of Mikrowaves and Related Questions // *Advances in Electronics and Electron Physics.* – 1980. – № 53. – P. 85–110, 143–152.
15. Neumann F. Digression on chemical electromagnetic field effects in membrane signal transduction – cooperativity paradigm of the acetylcholine receptor // *Biochemistry.* – 2000. – № 52(1). – P. 43–49.

1. INFLUENCIA DE LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA EN OBJETOS BIOLÓGICOS DE DIVERSOS NIVELES DE ORGANIZACIÓN

En el capítulo anterior se presentaron argumentos sobre la posibilidad de que la radiación electromagnética con una frecuencia de 10^{11} o inferior produzca efectos biológicos, posibilidad que estaría determinada por la existencia de una recepción primaria de ondas electromagnéticas. Es decir, si existe algún mecanismo físico de interacción entre las estructuras biológicas y el campo electromagnético de intensidad no térmica, que conduzca a una alteración en la actividad funcional de dichas estructuras. En este sentido, es importante comprender qué puede ocurrir durante dicha interacción a nivel microscópico. En este capítulo se examinarán los efectos de la radiación electromagnética a nivel molecular y celular.

1.1. Proteínas como posibles receptores de radiación electromagnética

Analizando los resultados de las investigaciones sobre el impacto de la radiación electromagnética en objetos biológicos de diversos niveles de organización, no es difícil observar que la mayoría de los efectos, si no todos, pueden explicarse por una alteración en la actividad funcional de las proteínas. Esto se aplica tanto a las proteínas de transporte como a las enzimas que determinan los procesos bioquímicos, así como a las biomacromoléculas integradas en las membranas. La estructura de las moléculas proteicas admite la posibilidad de múltiples estados conformacionales. La actividad funcional de una molécula proteica depende en gran medida del estado conformacional en el que se encuentre.

Las transiciones entre los estados conformacionales de las moléculas proteicas ocurren continuamente, pero su dinámica y direccionalidad vienen determinadas por las condiciones del entorno que rodea a la molécula de proteína. Uno de estos factores externos es la radiación electromagnética, que puede alterar el equilibrio dinámico en una u otra dirección. La posibilidad de que las moléculas biológicas acumulen energía suficiente para superar la barrera potencial entre los estados conformacionales está relacionada con la excitación de oscilaciones acústicas en las estructuras biológicas. Una condición importante para la realización de este proceso de acumulación es la disipatividad de los enlaces entre los osciladores internos, cuyo papel pueden desempeñar los grupos laterales de residuos de aminoácidos en la cadena proteica o las moléculas polares de agua en la capa de hidratación de la molécula proteica. Un ejemplo de dicha cadena proteica se muestra en la fig

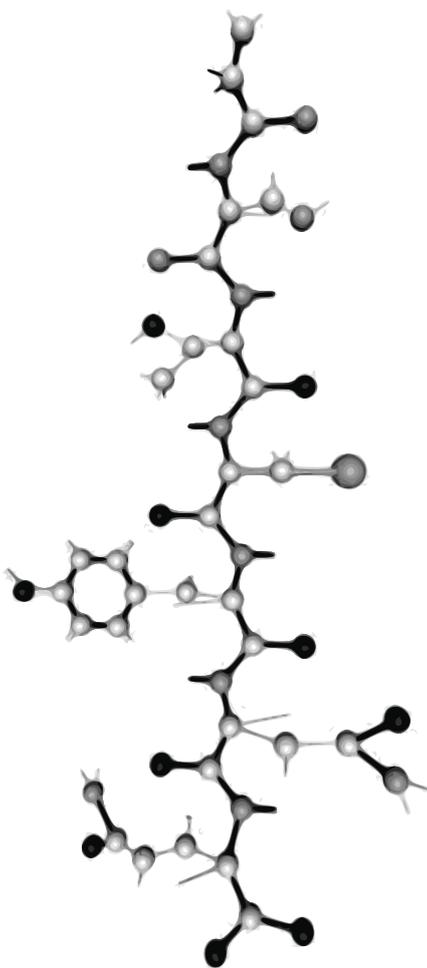


Fig. 1.1. Estructura primaria de la molécula proteica.

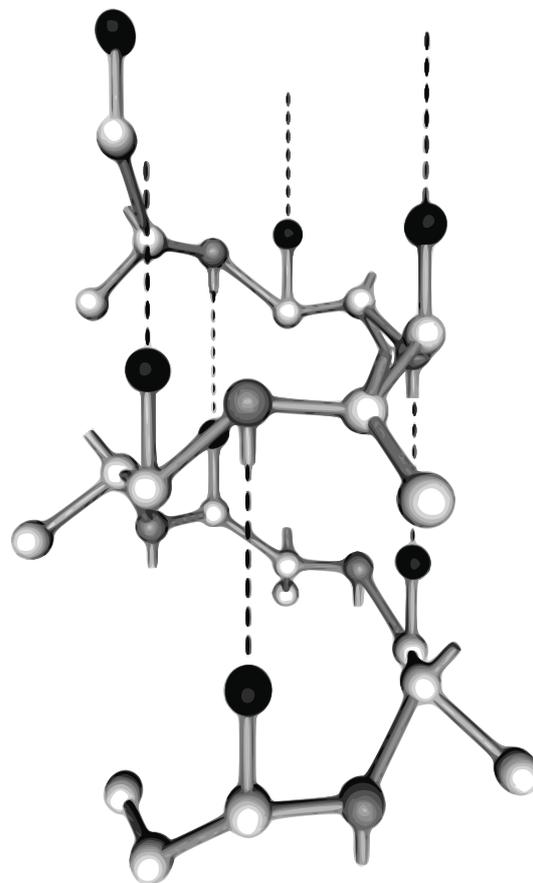


Fig. 1.2. Estructura secundaria de la molécula proteica.

Las cargas eléctricas o dipolos en estos osciladores interactúan con la componente eléctrica de la onda electromagnética incidente. Esta interacción puede provocar oscilaciones en los componentes individuales de la cadena proteica. El acoplamiento disipativo entre los osciladores asegura la sincronización de estas oscilaciones y, por consiguiente, el aumento de la amplitud, incluso en el caso de baja intensidad de la radiación electromagnética excitadora [1]. En cierta medida, se puede afirmar que la influencia externa no proporciona la energía necesaria para la transición conformacional, sino que organiza la energía de las vibraciones internas de la biomolécula mediante su sincronización para facilitar dicha transición.

Un aumento significativo en la amplitud de un determinado tipo de vibración interna conduce a una transición conformacional en la molécula proteica. La sincronización se produce cuando la frecuencia de excitación es próxima o múltiplo de la frecuencia propia del sistema oscilatorio. Puesto que los grupos laterales de la molécula proteica tienen diferente longitud, masa y sistema de enlaces (Fig. 1.2), el espectro de frecuencias propias y, consecuentemente, las frecuencias de interacción, será amplio.

Un modelo similar de interacción de sistemas biológicos con la radiación electromagnética se describía en el trabajo de A.R. Karimov [2]. Se consideró una cadena lineal de monómeros, unidos entre sí mediante una interacción dipolo-dipolo. El rol de los monómeros puede ser desempeñado por pares de nucleótidos que contienen bases nitrogenadas del ADN, o por restos peptídicos en la cadena proteica. La interacción con la componente eléctrica del campo electromagnético conducirá a la excitación de oscilaciones en los monómeros, con la participación de dipolos. La solución, obtenida mediante el método de álgebra matricial para las oscilaciones forzadas, muestra la presencia de frecuencias de resonancia en las que el impacto de la onda electromagnética sobre la molécula proteica es máximo.

La molécula de hemoglobina es un modelo adecuado para la investigación experimental de la interacción de la radiación electromagnética con moléculas de proteína. En uno de los primeros experimentos [3], se estudió la dinámica rápida en la molécula de hemoglobina de conejo, bajo la influencia de ondas milimétricas y sin ella, mediante espectroscopia Mössbauer. La espectroscopia Mössbauer permite observar el comportamiento dinámico de los grupos laterales de esta proteína, ubicados cerca del hemo, con tiempos característicos de $\sim 10^{-7}$ s, obteniendo información a través de la medición de los parámetros de la denominada línea «cuasi elástica» del espectro de Mössbauer. Los resultados experimentales demostraron que la radiación electromagnética no influye en los valores medios de los parámetros de la línea «cuasi elástica»; sin embargo, este efecto modifica sustancialmente

la distribución de amplitudes de dicha línea. La interpretación de los resultados , en el marco del modelo de oscilador browniano amortiguado, sugiere un aumento de las amplitudes de las oscilaciones de baja frecuencia en la molécula de hemoglobina bajo la influencia de la radiación electromagnética.

Los cambios estructurales en las moléculas proteicas están íntimamente ligados a su actividad funcional. Este aspecto se abordó por primera vez en la hipótesis de la «proteína-máquina» [4], propuesta para analizar la interacción de las moléculas proteicas con el campo electromagnético. La estructura de las moléculas proteicas viene determinada tanto por el sistema de enlaces entre los residuos peptídicos en la cadena proteica, como por los enlaces de los péptidos con las moléculas de agua en la capa de hidratación. Un ejemplo de tal estructura puede ser el componente principal de la piel: el colágeno. Esta proteína está muy hidratada [5]. La mayor hidratación del colágeno es característica de las zonas de la piel próximas a las articulaciones, donde se incrementa la concentración de mecanorreceptores (corpúsculos de Ruffini). El colágeno hidratado posee propiedades eléctricas y piezoeléctricas. Su estructura y, por lo tanto, las alteraciones dimensionales bajo la influencia de la radiación electromagnética podrían causar actividad espontánea en los corpúsculos de Ruffini, generando una señal hacia el sistema nervioso central

Así, los ejemplos considerados de la interacción de moléculas proteicas con la radiación electromagnética permiten considerar a estas macromoléculas como uno de los principales candidatos a receptores de ondas electromagnéticas. Este aspecto se examina en el § 1.2. El párrafo 1.3 está dedicado a la alteración de la permeabilidad de las membranas biológicas bajo la acción de ondas electromagnéticas. La influencia de la radiación electromagnética en la transmisión del impulso nervioso se examina en el § 1.4. Los efectos de las ondas electromagnéticas sobre las propiedades biológicas de los microorganismos son el tema del § 1.5. El siguiente párrafo contiene una revisión de algunos resultados de investigaciones sobre la influencia de la radiación electromagnética en los procesos metabólicos celulares. Estos procesos están relacionados con la actividad de la célula como un todo y, en especial, con la división mitótica, que se examina en el § 1.7. El estado de las membranas determina la interacción con la superficie (adhesividad) y la interacción célula-célula (cooperatividad). La influencia de la radiación electromagnética en estas propiedades se examina , respectivamente, en los § 1.8 y 1.9. El impacto de la radiación electromagnética en las células puede ser tan intenso que puede conducir a la muerte celular. Esta situación es el tema del § 1.10. Finalmente, el § 1.11 está dedicado a los efectos de la radiación electromagnética en tumores malignos

1.2. Efecto de la radiación electromagnética sobre los estados conformacionales en proteínas

Los modelos de interacción de la radiación electromagnética con moléculas proteicas, considerados en el § 1.1, muestran la posibilidad de sincronizar las oscilaciones internas de algunas cadenas y, debido a esto, la concentración de energía suficiente para modificar la conformación en macromoléculas. En diversos estudios se han obtenido confirmaciones experimentales de la existencia de transiciones conformacionales inducidas por la radiación electromagnética. Entre ellas, destacan las mediciones Mössbauer realizadas en moléculas de hemoglobina. Los resultados de estas mediciones se presentan en el trabajo de N.P. Didenko [6]. La espectroscopia Mössbauer proporciona información de alta precisión sobre la distribución del campo eléctrico y, por ende, sobre la estructura molecular en la proximidad del isótopo Mössbauer. En la hemoglobina, el isótopo correspondiente es el ^{57}Fe , ubicado en el centro del complejo hemo y rodeado por la porción proteica de la globina. La transición de la molécula de hemoglobina a un nuevo estado conformacional se acompaña de una modificación en el campo eléctrico del núcleo del isótopo ^{57}Fe , que se manifiesta en cambios en los parámetros del espectro de Mössbauer de la proteína. Los resultados de las mediciones se muestran en la fi-

En el rango de 44,50...50,36 GHz, se identificaron 10 valores de frecuencia en los que se observó interacción entre la radiación electromagnética y las moléculas de hemoglobina. Esta interacción se manifestó en los espectros de Mössbauer como la aparición de un doblete adicional de líneas, que corresponde a un nuevo estado conformacional. Los parámetros de estos dobletes, que aparecieron al interactuar a las frecuencias de resonancia, se muestran en la fig. 1.3. Es necesario destacar que la respuesta de las moléculas de hemoglobina a la exposición a la radiación electromagnética en diferentes frecuencias no es homogénea. Probablemente, cada frecuencia de resonancia corresponde a una transición a un estado conformacional propio, vinculado a esa frecuencia, lo que indica un gran volumen del espacio conformacional. Sin embargo, este hecho resulta sorprendente, puesto que el átomo de hierro de la hemoglobina presenta enlaces simultáneos únicamente con algunas partes del glóbulo.

Esta conclusión se ve corroborada por los resultados de los estudios Mössbauer de la interacción de la molécula de hemoglobina con radiación electromagnética a temperaturas de helio [7]. En este caso, el espectro Mössbauer de la hemoglobina presenta dos subespectros. Uno de ellos es un doblete de líneas bien resuelto, que corresponde al estado de bajo espín.

componente de la hemoglobina. Otro subespectro presenta la forma de un doblete asimétrico con líneas ensanchadas. Pertenece al componente de alto espín de la metahemoglobina, con un tiempo de relajación intermedio, insuficiente para la resolución completa de la estructura magnética hiperfina.

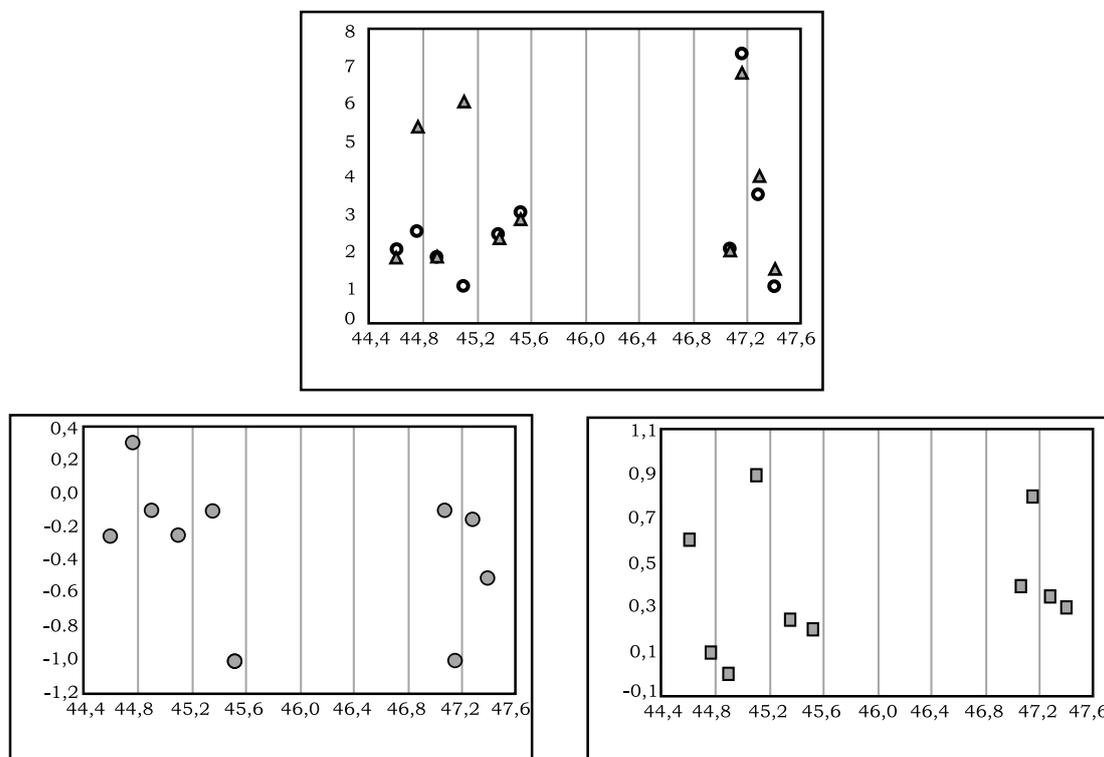


Fig. 1.3. Parámetros de los dobletes adicionales en los espectros de Mössbauer de la hemoglobina: círculos blancos – relación entre las anchuras de las líneas; triángulos grises – relación entre las áreas de las líneas; círculos grises: desdoblamiento cuadrupolar; cuadrados grises: desplazamiento químico

Durante la interacción resonante de la molécula de hemoglobina con la radiación electromagnética, los parámetros del primer doblete apenas varían, mientras que los parámetros del subespectro de alto espín, a las frecuencias resonantes de la interacción con ondas milimétricas, cambian significativamente, lo que indica transiciones conformacionales precisamente en este componente de metahemoglobina. Aún más, la relación entre las áreas de las líneas correspondientes a ambos componentes permanece invariable, lo que indica que las transiciones inducidas no son de carácter espínico. De este modo, los resultados de las mediciones indican que la transición de una biomacromolécula globular de un estado conformacional a otro, bajo la acción de la radiación electromagnética, se acompaña de una reorganización del sistema de enlaces internos en la estructura terciaria de la proteína.

Las transiciones conformacionales en las moléculas proteicas están estrechamente relacionadas con la estructura de los movimientos internos en las biomacromoléculas. Las mediciones Mössbauer del impacto de las ondas electromagnéticas en la dinámica de la hemoglobina [8, 9] demostraron que la interacción a las frecuencias de resonancia aumenta la intensidad de las transiciones en un subespacio conformacional determinado. Los espectros de Mössbauer evidencian una estabilización general de la estructura molecular bajo la influencia de la radiación electromagnética. Esto indica una sincronización de los movimientos internos en la molécula proteica por el campo electromagnético. Por consiguiente, la radiación electromagnética actúa de manera más efectiva sobre aquellos estados conformacionales que presentan frecuencias propias cercanas a la frecuencia del generador externo. El aumento de la amplitud de estas oscilaciones conduce a una transición conformacional.

Los cambios en la estructura de los enlaces de las moléculas proteicas también se registraron mediante espectroscopia infrarroja. En el trabajo de L.V. Kalyuzhnaya [11], se investigó por este método la influencia de la radiación electromagnética en el plasma sanguíneo. Se descubrió que la irradiación con ondas electromagnéticas induce cambios en los espectros infrarrojos, asociados a la ruptura de enlaces de hidrógeno. En el trabajo de T.V. Chenskaya e I.Ya. Petrova [12] se midieron los espectros infrarrojos de lecitina y albúmina sérica humana tras ser irradiadas con radiación electromagnética de longitud de onda de 8,6 mm y una densidad de flujo de potencia incidente de 50 mW/cm^2 . Estos espectros demostraron que las ondas milimétricas no inducen cambios irreversibles en la estructura secundaria de las moléculas proteicas, incluyendo transiciones de fase en lípidos y transiciones de hélices a giros. Sin embargo, la radiación electromagnética modificó la dinámica de las proteínas, lo que se manifestó en un aumento del intercambio de hidrógeno en la albúmina sérica humana. Este efecto fue completamente re-

La posibilidad de cambios conformacionales en las moléculas proteicas bajo la influencia de ondas electromagnéticas se investigó mediante un método inmunológico [13], concretamente la reacción de unión de anticuerpos con antígenos específicos. Esta reacción requiere un alto grado de correspondencia química y espacial de los grupos determinantes. Por lo tanto, las mediciones del grado de unión permiten evaluar la correspondencia espacial de los sectores de unión y, en consecuencia, el estado conformacional de la molécula.

1.3. Probabilidad de cambio en el estado de la membrana celular

En el párrafo anterior se demostró la posibilidad de transiciones conformacionales inducidas en moléculas proteicas tras la exposición a ondas electromagnéticas. En este párrafo examinaremos cómo se manifiestan los cambios conformacionales de las moléculas proteicas en el funcionamiento de las membranas celulares.

Los cambios en el estado de los canales iónicos y otras moléculas proteicas bajo la influencia de la radiación electromagnética pueden determinarse mediante la modificación de sus propiedades funcionales. En este sentido, la investigación de las respuestas de las membranas celulares a la acción de las ondas electromagnéticas es de gran interés.

Se han realizado varios estudios dedicados al examen de los efectos de la radiación electromagnética sobre el estado de las membranas eritrocitarias. La influencia de las ondas milimétricas en la resistencia de las membranas eritrocitarias se investigó en el trabajo de A.S. Koryagin [14] utilizando una señal de ruido en la banda de frecuencias de 53...78 GHz con una intensidad espectral de $\sim 6 \cdot 10^{-17}$ W/Hz, lo que corresponde a una potencia integral de $\sim 1,5 \mu\text{W}$. Se detectó un incremento en la resistencia de las membranas. En el experimento control, la hemólisis completa de los eritrocitos se produjo a una concentración de NaCl del 0,35 %, mientras que, bajo la acción de la radiación electromagnética, ocurrió a una concentración del 0,23 %. En ambos casos, el inicio de la hemólisis se observó al 0,55 %.

Se determinó que la irradiación con ondas milimétricas produce una disminución en la concentración de uno de los productos de la peroxidación lipídica en sangre. Esto indica una disminución en la velocidad de los procesos asociados a la formación de radicales libres. Es conocido [15] que el debilitamiento de los enlaces hidrofóbicos se acompaña de una intensificación de la peroxidación lipídica en las membranas y viceversa. Los datos presentados anteriormente muestran un aumento de las interacciones hidrofóbicas en las membranas celulares bajo la influencia de la radiación electromagnética.

El aumento de la resistencia de las membranas también puede explicarse por otro mecanismo, concretamente: la modulación de la actividad del sistema enzimático de la membrana. Con el fin de verificar la posibilidad de tal mecanismo, se realizó un estudio sobre las siguientes enzimas: a) alanina aminotransferasa, que es un catalizador de la reacción de transferencia reversible de alanina al ácido α -cetoglutarico y tiene una masa molecular de 114 daltons; b) amilasa, que pertenece a la clase de las hidrolasas y es un catalizador de la reacción hidrolítica

de la escisión de enlaces glucosídicos en el almidón y el glucógeno, con una masa molecular de 48 daltons [16]. La radiación electromagnética no afectó a la primera enzima, pero incrementó la eficiencia de la segunda en 1,7 veces. Las enzimas se diferencian entre sí, en primer lugar, por la magnitud de su masa molecular y, por consiguiente, por la frecuencia de sus vibraciones propias; y, en segundo lugar, porque la amilasa requiere agua en la reacción, a diferencia de la alanina aminotransferasa. Esta diferencia origina una interacción resonante de la radiación electromagnética con la amilasa, que modifica su estructura espacial y la transforma en una forma más activa, dado que en solución esta enzima presenta varias configuraciones diferentes [16]. Es necesario destacar que una serie de enzimas pueden clasificarse dentro de la clase de las hidrogenasas. Se trata de enzimas del metabolismo energético y enzimas relacionadas con el mantenimiento del potencial de membrana y la transmisión del impulso nervioso, como, por ejemplo, la Na^+ , K^+ -ATFasa y la Ca^{2+} -ATFasa

Se puede obtener información indirecta sobre el estado de la membrana de los eritrocitos a partir de la medición de un parámetro como la movilidad electroforética de estas células. Depende de la distribución de la carga en la superficie de la membrana. En el trabajo de S. Ivanova, M. En el estudio de Kuzhmanova [17] se investigó la influencia de la radiación electromagnética con una longitud de onda de 5,6 mm sobre la movilidad electroforética de los eritrocitos de rata. El experimento incluyó tres grupos de animales: un grupo control, un grupo expuesto a radiación electromagnética y un grupo expuesto a una combinación de radiación electromagnética e irradiación. Los resultados experimentales indicaron que las ondas milimétricas incrementan la movilidad electroforética de los eritrocitos durante los primeros días, retornando posteriormente al valor del grupo control. La irradiación con haces conduce a una disminución de este parámetro durante todo el período de observación; sin embargo, la exposición a la radiación electromagnética previa a la irradiación compensa, en mayor medida, dicho efecto de disminución. La irradiación con haces induce cambios conformacionales en las membranas de los eritrocitos, lo que provoca una redistribución de las cargas. Las ondas milimétricas también alteran la estructura de la membrana, pero estos cambios presentan una dirección distinta y, en cierta medida, opuesta: estabilizan el estado de la membrana ante una irradiación pos-

Se obtuvieron resultados similares en estudios sobre la influencia de la radiación electromagnética en la banda de frecuencias de 53...78 GHz, en modo de ruido, sobre eritrocitos aislados de ratas [18]. La densidad espectral de potencia incidente fue de $4 \cdot 10^{-17} \text{ B}_T/\Gamma_{\text{T}}$; la no homogeneidad

del campo se mantuvo dentro de ± 3 dB y la potencia integral fue de $1 \mu\text{W}$. La exposición a radiación electromagnética con estos parámetros también indujo un aumento de la movilidad electroforética.

En experimentos con microorganismos fotótrofos *Spirulina platensis* [19], se descubrió que la irradiación de estas células con ondas milimétricas provocaba una alteración en la velocidad de crecimiento en diferentes etapas, así como en la concentración de iones sodio y nitratos en el medio de cultivo. Es importante señalar que el transporte de iones sodio al interior de la célula es un proceso rápido, puesto que la dirección del movimiento coincide con el gradiente del potencial electroquímico. Por el contrario, la salida del ion nitrato de la célula es un proceso lento que depende de la iluminación y de la actividad metabólica. Por lo tanto, los cambios en la permeabilidad de la membrana se producen, principalmente, con respecto a los iones de sodio, lo que condiciona la dinámica correspondiente de la concentración de este ion.

También es necesario prestar atención a los experimentos con potentes impulsos de microondas de duración nanométrica, ya que la intensidad del campo eléctrico en dicha radiación es comparable a la intensidad en la membrana ($50\text{...}300 \text{ kV/cm}$). Se halló que la acción de tales impulsos potentes (con una longitud de onda de 3 cm , una duración de impulso de 10 ns y una potencia máxima de 30 MW) sobre las membranas de la piel de rana conducía a la aceleración del transporte activo de iones de sodio y al aumento de la permeabilidad de la membrana a las moléculas de agua [20].

El efecto de la radiación electromagnética con una frecuencia de 75 GHz y una potencia integral de 8 mW sobre la corriente rápida de potasio en una neurona de molusco se estudió en el trabajo de S.I. Alekseev [21]. Los resultados indicaron que la exposición produjo una disminución de las constantes de tiempo de activación e inactivación del $7,5 \%$ y el 16% , respectivamente. La velocidad de inactivación aumenta en mayor medida que la de activación. Esto implica que la radiación electromagnética incide de manera efectiva en el funcionamiento de los canales rápidos de potasio, lo cual podría explicarse por cambios conformacionales en las moléculas de la compuerta.

1.4. Cambios en la transmisión del impulso nervioso

Los cambios en el funcionamiento de las moléculas de compuerta, considerados en el párrafo anterior, están estrechamente relacionados con la transmisión del impulso nervioso. Esto último es significativo desde el punto de vista de la respuesta del organismo en su conjunto a la exposición electromagnética. Por lo tanto, la investigación sobre la influencia de las ondas electromagnéticas en el proceso de transmisión del impulso nervioso es muy importante para comprender la reacción del organismo a dicha exposición.

En experimentos con preparaciones de vejiga aislada de rana [22], se midieron los cambios en la actividad impulsiva espontánea de los receptores en penacho mediante un registro del nervio de la vejiga. La irradiación de este preparado con radiación electromagnética a una frecuencia de 42,194 GHz incrementaba la frecuencia media total de la actividad impulsiva. La dinámica de los cambios en la magnitud relativa de este parámetro, inducidos por la radiación electromagnética, se muestra en la fig. 1.4, en comparación con los valores correspondientes para el control y la irradiación infrarroja.

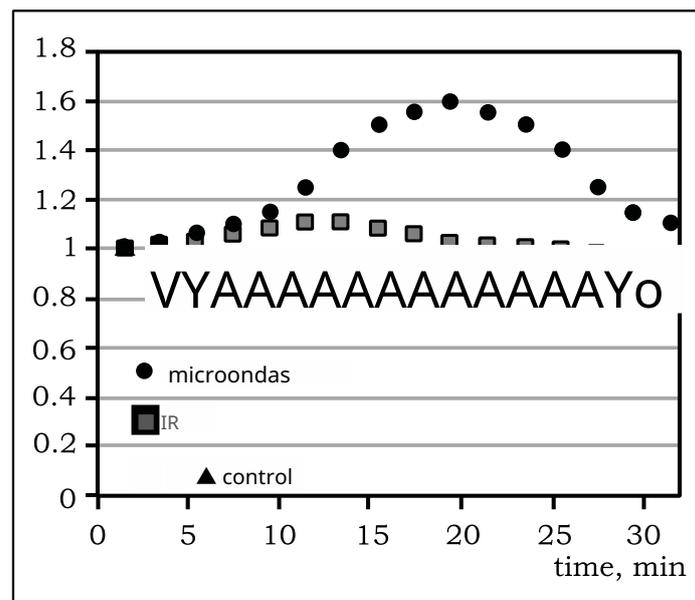


Fig. 1.4. Dependencia temporal de la frecuencia de la actividad impulsiva espontánea del nervio de rana.

En la Fig. 1.4 se muestra que las ondas electromagnéticas afectan a los receptores gustativos de forma distinta al efecto térmico causado por la radiación infrarroja. La radiación electromagnética aumenta la frecuencia de la actividad de fondo de estos receptores, aunque se observa una adaptación parcial durante el proceso de exposición. El mecanismo de dicha acción podría estar relacionado con la recepción de radiación electromagnética en la zona de inervación de los potenciales de acción.

Las respuestas de los receptores a la exposición a radiación electromagnética en el intervalo de frecuencias de 40,00...42,25 y 42,31 GHz fueron investigadas en el trabajo de N.G. Zheltov [23]. Los mecanorreceptores de piel de rana en estado semi-intacto, así como preparaciones cutáneo-nerviosas aisladas, fueron irradiados con ondas electromagnéticas. La corriente aferente de impulsos nerviosos, resultante de la estimulación mecánica de los receptores, se registró mediante una derivación externa de una rama del nervio dorsal que inerva el área de irradiación. Con una densidad de flujo de potencia incidente máxima ($\sim 35 \text{ mW/cm}^2$), el aumento de temperatura fue de 1...2 °C.

La primera serie de experimentos se llevó a cabo en un intervalo de temperatura de 18...22 °C, es decir, dentro del rango de neutralidad térmica para los mecanorreceptores de la rana, que se sitúa entre 13...26 °C, lo que sugiere un efecto no térmico de la radiación electromagnética sobre dichos mecanorreceptores. No obstante, la exposición a las ondas electromagnéticas no provocó la activación de la actividad espontánea ni la modificación de la respuesta. En la segunda serie de mediciones, realizada en el rango de temperaturas termosensible para el sistema mecanorreceptor de 27...30 °C, se observó que la irradiación con radiación electromagnética de 48 GHz provocaba una disminución de la actividad inducida de los mecanorreceptores.

La recepción de radiación electromagnética también es posible directamente en las fibras nerviosas. En este caso, el campo electromagnético modifica la propagación del impulso nervioso. En el trabajo de A.Yu. Sazonov [24] se investigó la influencia de la radiación electromagnética con una frecuencia de 42,19 GHz sobre el funcionamiento del nervio de la rana común. Se midió el tiempo de recuperación de la amplitud del potencial de acción tras la excitación mediante impulsos eléctricos, bajo irradiación en tres modos: a) antes de la estimulación; b) durante la recuperación; c) antes de las excitaciones durante la recuperación. En los tres modos, se registró una disminución del tiempo de recuperación del 20...40 % en comparación con los valores de control.

La acción de las ondas electromagnéticas sobre las fibras nerviosas puede ser no solo estimulante, sino también inhibidora. En el trabajo de G. Burachas [25] también investigó la influencia de la radiación electromagnética en el nervio ciático de la rana. Al exponer a ondas milimétricas de frecuencia no especificada, la amplitud del potencial de acción disminuía exponencialmente hasta cero. Tras finalizar la sesión de irradiación, la amplitud se recuperaba gradualmente.

Los datos anteriores permiten destacar dos características de la influencia de la radiación electromagnética en la transmisión del impulso nervioso al actuar sobre receptores y fibras nerviosas. En primer lugar, el efecto depende de la frecuencia, lo que concuerda con la hipótesis de la interacción resonante de la radiación con moléculas proteicas funcionalmente competentes. En segundo lugar, la presencia de una respuesta a la irradiación previa de los preparados con ondas electromagnéticas y el tiempo considerable que tarda en desarrollarse el efecto sugieren una lenta relajación de los cambios conformacionales en las moléculas proteicas.

Además de su acción sobre los receptores y las fibras nerviosas, el paso del impulso nervioso puede modificarse reflexivamente. Un ejemplo de esta situación se presenta en el trabajo de Yu. Gaponyuk [26]. En dieciocho de veinte pacientes con hipertensión se observó un aumento en la frecuencia de repetición de los potenciales de acción en las fibras aferentes del nervio mediano de la mano izquierda tras la irradiación, durante 1 min, de una zona cutánea cercana al punto de acupuntura 9.9 del canal del pericardio. La frecuencia de la radiación electromagnética variaba en la banda de frecuencias de 53,596 a 53,603 GHz, con una frecuencia de modulación de amplitud de 0,05 Hz. La densidad de flujo de potencia incidente fue inferior a 5 mW/cm^2 . El análisis de frecuencia del electroencefalograma mostró un aumento en la potencia del intervalo espectral del ritmo alfa en comparación con el nivel basal de estos pacientes. El bloqueo del nervio mediano entre la zona de irradiación y la zona de medición de potenciales de acción condujo a una disminución de la frecuencia de la actividad de impulsos de fondo y de la potencia espectral del EEG en todos los pacientes. La irradiación con radiación electromagnética no causó cambios en dichos parámetros.

1.5. Influencia de la radiación electromagnética en las propiedades biológicas de los microorganismos.

Anteriormente se destacó la función de los cambios conformacionales de las moléculas proteicas en el funcionamiento de las membranas celulares. Sin embargo, dichos cambios son importantes no solo para las proteínas de membrana, sino también para otras moléculas que determinan las propiedades biológicas de las células, en particular su crecimiento. En experimentos con cultivos de *E. coli* y *S. aureus* [27] se identificaron frecuencias de radiación cuyo impacto en dichos cultivos

alteraba su crecimiento. La irradiación con algunas de estas frecuencias estimulaba el crecimiento, mientras que con otras lo inhibía. Cabe señalar que no se detectó ninguna relación entre el nivel de potencia de la radiación electromagnética y la magnitud de su efecto biológico en estas bacterias.

Además de las reacciones bioquímicas esenciales para el crecimiento celular, la exposición a la radiación electromagnética puede inducir alteraciones en la estructura celular, como se ha demostrado, por ejemplo, en experimentos con microorganismos de la tos ferina [28]. Las investigaciones permiten concluir que la exposición a radiación electromagnética en ciertas frecuencias induce la alteración de las propiedades inmunológicas de estas células. Estas propiedades se evaluaron en función de la presencia de antígenos de superficie: aglutinógenos 1, 2 y 3. Se observó que las células incrementan la síntesis del aglutinógeno 1 bajo la influencia de radiación electromagnética con longitudes de onda de 6,39; 7,00 y 7,80 mm, y disminuyen la síntesis de este antígeno al ser irradiadas con una longitud de onda de 6,90 mm. La exposición a ondas electromagnéticas con longitudes de onda de 6,59 mm y 6,00 mm causó una disminución significativa en el nivel de síntesis de aglutinógenos 2 y 3 por parte de estos microbios.

En el trabajo de L.S. Kholodnaya [29] se demostró que las ondas milimétricas modifican las propiedades inmunológicas de los antígenos del estafilococo. Además, se descubrió que el principal factor patógeno del estafilococo, la proteína A, altera su capacidad de interacción con las inmunoglobulinas tras la irradiación con ondas electromagnéticas.

Las investigaciones sobre los efectos de la radiación electromagnética en los microorganismos fotosintetizadores *S. Platensis* y *P. Vividis* [30] demostraron que dicho impacto estimula el crecimiento de estos microorganismos, aumenta el contenido de clorofila en las células e intensifica la liberación de oxígeno. En este trabajo se confirma que la acción primaria de la radiación electromagnética, al alterar la permeabilidad de las membranas y, por consiguiente, el transporte de iones de sodio e iones nitrato, conduce a un desplazamiento del equilibrio entre la respiración y la fotosíntesis hacia esta última.

Investigaciones similares en la bacteria *B. subtilis* [31] mostraron la existencia de frecuencias a las que la exposición a la radiación electromagnética estimulaba el crecimiento de la biomasa y la producción de proteínas. Asimismo, se encontraron frecuencias cuya exposición suprimía la actividad funcional de estos microorganismos. La estimulación se manifestó en un aumento de la biomasa del 30 %, mientras que la supresión se tradujo en una disminución del 50 % con respecto a los valores de control. Paralelamente, la concentración de proteína aumentó en un 70 % tras la irradiación con ondas electromagnéticas a la frecuencia estimulante y disminuyó solo un 5 % a la frecuencia inhibidora.

frecuencia. De este modo, las ondas milimétricas alteran el metabolismo de la bacteria *B. Subtilis*, pero no modifican el proceso en su totalidad, sino que influyen en diversas reacciones metabólicas en función de la frecuencia aplicada.

La influencia de la radiación electromagnética en el crecimiento de microorganismos varía según la etapa de desarrollo del cultivo celular. Se realizaron dos variantes experimentales con cultivos de *Spirostomum.sp* [32]:

a) Irradiación del cultivo con radiación electromagnética durante la formación de la población. b) Irradiación con radiación electromagnética de un cultivo con una población no formada, debido al volumen limitado de la placa de Petri. Los cultivos tenían 6 días de edad y se irradiaron con radiación electromagnética de 7,1 mm de longitud de onda durante 30 minutos.

En la primera serie de experimentos, las relaciones poblacionales se formaron en el grupo de control, pero la irradiación en los días 2º, 4º y 7º condujo a una aparición significativamente más temprana de la población. La curva de crecimiento coincidió con la del grupo de control solo cuando la irradiación se realizó en la etapa en que la población estaba casi formada (días 9–11). En este caso, los mecanismos reguladores dominaron el impacto electromagnético.

En la segunda serie de experimentos, la población no se formó en el grupo de control. La irradiación con radiación electromagnética en diferentes etapas de crecimiento del cultivo condujo a una estabilización, que se manifestó en la formación de relaciones poblacionales. Cuando la irradiación se realizó en las etapas de crecimiento rápido (días 4, 7 y 9), la población generada fue más estable que cuando la irradiación se realizó en la etapa de inoculación (día 2).

Los datos experimentales demuestran que la radiación electromagnética puede afectar a los microorganismos a nivel genético. Los cambios en el genoma de **E. coli** bajo la acción de ondas milimétricas se investigaron en el trabajo de A.B. Гусев [33]. Se encontró que la radiación activa el profago lisogénico λ - del cromosoma y el gen de la β -galactosidasa (lactosa) del plásmido en células de **E. coli**. La expresión de estos operones se bloquea normalmente por el represor C1 λ - del fago.

La irradiación de células lisogénicas K-12 en condiciones de crecimiento mostró la presencia de varias frecuencias en las que el aumento de la expresión del fago fue de 5-6 órdenes de magnitud con respecto al nivel basal. En la vecindad de una de estas frecuencias, se investigó la dependencia de la inducción del gen de la β -galactosidasa en un cultivo de CSH 36 con respecto a la frecuencia de la radiación electromagnética. La inducción máxima del gen se registró en el intervalo de frecuencias de 70,5...70,7 GHz, de manera que el ancho relativo de la resonancia fue de $\sim 3 \cdot 10^{-3}$.

1.6. Influencia de la radiación electromagnética en los procesos metabólicos a nivel celular

La modificación de las propiedades de los microorganismos, descrita anteriormente, se debe en gran medida a alteraciones en el proceso metabólico, especialmente en lo que respecta al crecimiento celular. Por lo tanto, en este párrafo se presta atención a la influencia de la radiación electromagnética en el metabolismo celular.

Experimentos con cultivos de *E. coli* [27] mostraron una correlación entre la influencia de la radiación electromagnética en la tasa de crecimiento de este cultivo y el efecto de este factor en los parámetros de las proteínas del metabolismo fosfolipídico y energético de la célula, así como en la actividad de sus deshidrogenasas. Las bacterias fotosintéticas *Ph. Leognathi* fueron objeto de estudios sobre la influencia de la radiación electromagnética en la estructura de la membrana que regula los procesos metabólicos celulares [34]. La ventaja de estudiar estos microorganismos reside en la posibilidad de obtener información sobre los efectos de la radiación electromagnética en las funciones vitales de las células de forma intacta, utilizando la respuesta lumínica del sistema bioquímico. Los resultados de las mediciones mostraron que la exposición a ondas electromagnéticas con una frecuencia de 3,2 GHz provocó la extinción de la luminiscencia, sin que este efecto dependiera de la magnitud de la densidad de flujo de potencia incidente en el rango de 1,3 a 13 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$. La fuente de luminiscencia de estas bacterias es la reacción de reducción del flavín mononucleótido y del lipaldehído por el oxígeno molecular. Como resultado de esta reacción, se forma un complejo флуоресцент-сустрато de larga duración en un estado excitado, cuya relajación se acompaña de emisión de luz. Se puede suponer que la atenuación de la luminiscencia bajo la acción de la radiación electromagnética está relacionada, principalmente, con alteraciones en las membranas celulares. La reestructuración de las fracciones lipídicas puede conllevar una alteración del factor aldehído y reducir la intensidad de la luminiscencia. Como otra vía de impacto, se puede considerar la activación del consumo de oxígeno intracelular. Esto también conlleva una disminución del nivel de luminiscencia durante la irradiación electromagnética, y una recuperación de la intensidad de la luminiscencia al finalizar la irradiación. A.K. Tambiev y N.N. Kirikova [35] destacaron el importante papel del oxígeno molecular en las alteraciones de los procesos metabólicos bajo la acción de la radiación electromagnética, en estudios donde se analizaron los efectos de las ondas electromagnéticas en la cianobacteria *S. Platensis* y otros microorganismos

El mecanismo de acción de la radiación electromagnética sobre las células, basado en la interacción con la membrana, se confirma indirectamente con los datos obtenidos en el tratamiento de pacientes cardíacos mediante ondas milimétricas [36]. En la patogénesis de estas enfermedades, un papel importante lo desempeña la activación de la peroxidación lipídica de los fosfolípidos contenidos en las membranas celulares e intracelulares, en particular en los cardiomiocitos y las plaquetas. Este proceso provoca la alteración de las funciones de las enzimas dependientes de membrana, así como cambios en la estructura y la permeabilidad de las membranas.

1.7. Modificación del ciclo mitótico

Las alteraciones en los procesos metabólicos, consideradas en el párrafo anterior, podrían estar relacionadas con el ciclo mitótico, puesto que la división celular exige un cierto nivel de actividad metabólica.

Por consiguiente, es esperable que la radiación electromagnética influya en el ciclo mitótico. Según datos experimentales, las ondas electromagnéticas efectivamente influyen en la división celular. Estos efectos presentan un carácter resonante; es decir, las ondas electromagnéticas modifican la velocidad de la división mitótica únicamente a determinadas frecuencias.

Las modificaciones pueden dirigirse tanto a la estimulación de la mitosis como a su supresión, dependiendo de la frecuencia de la radiación incidente. Estos resultados se obtuvieron en experimentos con cultivos de *E. coli* y *S. aureus* [27], así como con microorganismos fotosintéticos *S. platensis* y *P. vividis* [30]. La irradiación de un cultivo leucocitario con ondas electromagnéticas de longitud de onda de 7,1 mm condujo a un aumento de la tasa de crecimiento del 50-70 % en el primer y segundo pase, mientras que la radiación electromagnética de 5,6 mm de longitud provocó un aumento de la actividad proliferativa celular del 52 % solo en el primer pase [37].

La estimulación de la proliferación celular puede explicarse por alteraciones bioquímicas inducidas por la radiación electromagnética. En un estudio de los efectos de la exposición in vitro a ondas milimétricas sobre linfocitos de personas sanas [38], se observó que estas células producían un factor citoplasmático, una citoquina asociada a la activación de deshidrogenasas, que actúa como factor de crecimiento.

La radiación electromagnética puede actuar directamente sobre los cromosomas, lo que también podría modificar los procesos de división celular. En el trabajo de V.A. Starshina [39] se investigó la influencia de la radiación electromagnética en el rango de frecuencias de 40,75...48,25 GHz sobre los cromosomas politénicos de larvas de *C. plumosus*. Se descubrió que los cambios iniciales en los cromosomas se producían inmediatamente después de la irradiación durante 15 o 30 minutos. En ambos casos, la actividad genética de los segmentos cromosómicos transcritos de forma continua se modificó de manera similar. Los mayores cambios se produjeron entre 1 y 2 horas después de la irradiación, lo que indica un mecanismo de activación de la radiación electromagnética que desencadena un proceso lento en las células. Además, la exposición a una frecuencia determinada provoca efectos de signo opuesto en diferentes segmentos del cromosoma: en algunos estimula la actividad genética, mientras que en otros la suprime. Probablemente, este resultado esté más relacionado con la diferenciación estructurofuncional del complejo macromolecular (ADN, histonas, proteínas nucleares) en diferentes segmentos cromosómi-

Además de la división celular, los efectos dependientes de la frecuencia, tanto estimulantes como inhibidores, de la radiación electromagnética también se han observado en relación con la actividad funcional de microorganismos. Por ejemplo, las ondas milimétricas modificaron la actividad fibrinolítica de *B. firmus* y la síntesis de penicilina por bacterias *S. aureus* [40, 41]. Las ondas milimétricas también alteran la lectura del código genético en células de *E. coli* [33]. Al irradiar células lisogénicas en condiciones de crecimiento, se encontraron varias frecuencias de resonancia en el rango de 69,72 GHz. Tras la irradiación con estas frecuencias, el rendimiento de fagos aumentó entre 5 y 6 órdenes de magnitud en comparación con el grupo de control. En investigaciones sobre la influencia de la radiación electromagnética en la inducción del gen de la β -galactosidasa en un cultivo de CSH 36, se determinó que la anchura relativa de la curva de resonancia es de $\sim 3 \cdot 10^{-3}$.

1.8. Modificación de las propiedades adhesivas celulares

Las propiedades adhesivas de las células están determinadas, en primer lugar, por el estado de las membranas y su capacidad para interactuar con otros cuerpos a través de fuerzas moleculares y coulombianas. Uno de los indicadores de dicha capacidad es la interacción con células del mismo tipo, es decir, la agregación celular. El grado de manifestación de esta propiedad, en particular en las células sanguíneas, es de gran importancia para el funcionamiento del organismo tanto en condiciones normales como patológicas.

Las propiedades reológicas de la sangre en pacientes con ictus agudo fueron estudiadas en el trabajo de I.A. Podolyako [42]. Los resultados de estos estudios demuestran que la irradiación *in vitro* de eritrocitos de pacientes con radiación electromagnética con una frecuencia portadora de 53,53 GHz y modulación de frecuencia de ± 25 MHz produjo una disminución del 10 % en el índice de agregación y un aumento del 20 % en el índice de deformabilidad de los eritrocitos. Esto puede interpretarse como una disminución en el grado de interacción entre las moléculas en la superficie de las membranas celulares.

Mediciones similares en trombocitos mostraron un efecto más significativo de la radiación electromagnética sobre la agregación celular. En la tabla 1.1 se presentan los índices de agregación espontánea (K_{sp}) e inducida en los días 2, 4 y 8 (K_2 , K_4 y K_8) para estas células. De esta tabla se deduce que la relación del índice de agregación inducida en el control al índice correspondiente en la irradiación disminuye con el tiempo; sin embargo, la modificación de las membranas celulares por la acción de la radiación electromagnética sigue siendo notable.

Tabla 1.1

Influencia de la radiación electromagnética en la agregación celular

Indicador	Experimento	Control	P
K_{sp}	$11,96 \pm 0,29$	$6,09 \pm 0,62$	$< 0,001$
K_2	$12,42 \pm 1,32$	$21,44 \pm 1,82$	$< 0,001$
K_4	$25,55 \pm 2,73$	$42,62 \pm 3,47$	$< 0,001$
K_8	$37,82 \pm 3,70$	$61,54 \pm 4,58$	$< 0,001$

Las investigaciones realizadas en el trabajo de T.V. Golovacheva [43] demostraron que la capacidad de agregación de los eritrocitos se modifica bajo la acción de la radiación electromagnética, incluso tras la irradiación *in vivo*. El índice de agregación de eritrocitos varía de $(1,23 \pm 0,03)$ a $(1,08 \pm 0,02)$ u. a. tras la irradiación.

de pacientes cardiopatas con radiación electromagnética de longitudes de onda de 5,6 y 7,1 mm. En este caso, el índice de deformación de los eritrocitos aumentó de $(1,06 \pm 0,02)$ a $(1,20 \pm 0,02)$ unidades relativas. Estos datos confirman una modificación significativa de las propiedades superficiales de las membranas eritrocíticas bajo la influencia de la radiación electromagnética. Se detectó un aumento del potencial de coagulación sanguínea durante el tratamiento de prostatitis con radiación electromagnética de 5,5 mm de longitud de onda [44].

Las investigaciones del efecto de ondas electromagnéticas con longitudes de onda en el intervalo de 5,6...7,1 mm en pacientes con trastornos del sistema trombovascular, realizadas por G.E. Markova y V.F. Kirichuk [45], también mostraron un cambio en la capacidad de agregación plaquetaria. La irradiación a frecuencias seleccionadas individualmente para cada paciente conducía a la normalización de las propiedades funcionales de las plaquetas.

1.9. Peculiaridades de la cooperación intercelular

En el párrafo anterior se examinaba la capacidad de la célula para interactuar con sus semejantes. Sin embargo, el estado de la membrana también determina la interacción con células de otras especies. Esto resulta evidente a partir de los resultados de experimentos con microbios de la tos ferina [28]. Este tipo de célula se distingue por una gran variabilidad, gracias a la cual la exposición a la radiación electromagnética puede causar una disminución en el número o la pérdida total de algunos antígenos de superficie y, en consecuencia, una alteración en la síntesis de anticuerpos.

Otro ejemplo de modificación del grado de interacción celular bajo la acción de la radiación electromagnética lo ofrecen los resultados de la investigación de eritrocitos [46]. Sangre recién extraída con un conservante (citrato de sodio), que previene su coagulación a bajas velocidades de circulación, se sometió a irradiación con ondas electromagnéticas, y posteriormente se midió su viscosidad. Los resultados de las mediciones en función del tiempo de exposición se muestran en la figura 1.5. A bajas velocidades de circulación, la viscosidad de la sangre está determinada por la unión reversible de los eritrocitos y, por lo tanto, depende del estado de las membranas celulares. Según la figura 1.5, la exposición a ondas electromagnéticas altera el estado de la membrana, pero este efecto depende de la duración de la exposición.

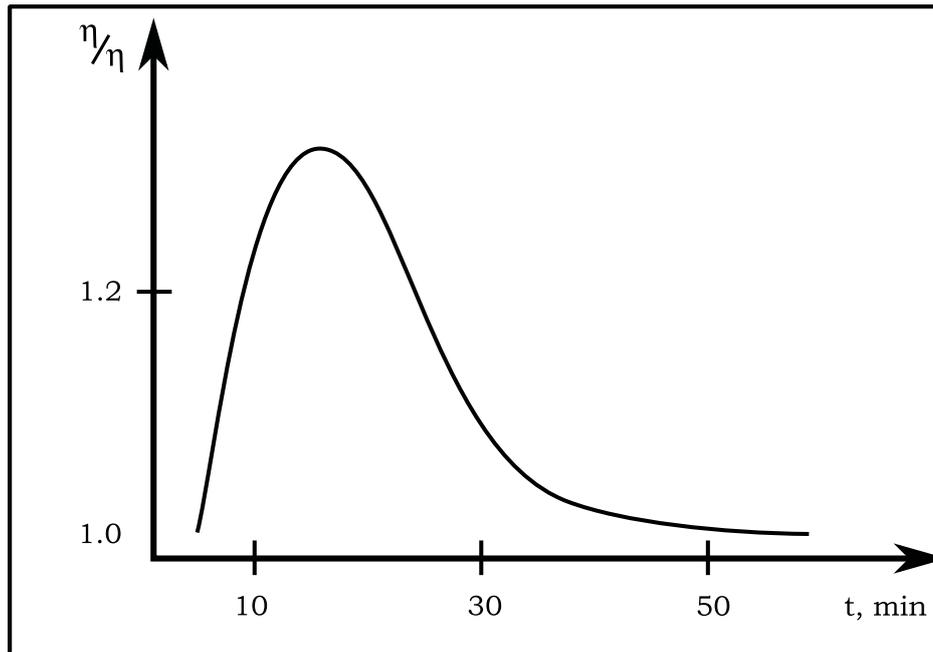


Fig. 1.5. Dependencia de la viscosidad sanguínea del tiempo de exposición

La capacidad de agregación de los eritrocitos se modifica notablemente bajo la acción de potentes impulsos electromagnéticos con una duración de nanosegundos. En el trabajo de N.D. Deviatkov [47] se investigó el efecto de dichos impulsos ($\square \square = 3$ cm, $\square = 10$ ns, $P_{peak} = 30$ MW) sobre eritrocitos cuyas membranas habían sido previamente dañadas mediante ruptura eléctrica. Como resultado de la exposición a impulsos de microondas, se recuperaron tanto las membranas como la capacidad de agregación.

En el trabajo de V.F. Kirichuk [48] se investigó la influencia de ondas milimétricas con una frecuencia de 42,2 GHz sobre las plaquetas in vitro. Se descubrió que el grado de agregación, así como sus velocidades inicial y máxima, disminuyen significativamente bajo los efectos de esta exposición. Se sugiere que el mecanismo de cambio en la actividad funcional de las plaquetas implica una modificación conformacional de las proteínas en la superficie de la membrana por la acción de las ondas electromagnéticas.

Esta corrección de la actividad funcional plaquetaria es importante en el tratamiento de diversas enfermedades. Por ejemplo, el uso de irradiación con ondas electromagnéticas de 42,2 GHz en pacientes cardíacos, en combinación con tratamiento farmacológico, produjo una normalización marcada de la capacidad de agregación plaquetaria [49]. Un patrón similar de cambios en la actividad funcional plaquetaria bajo la acción de la radiación electromagnética se observó también tras la irradiación in vitro de plasma rico en plaquetas con frecuencias más altas, de 149 a 154 GHz [50].

1.10. La radiación electromagnética como inductor de apoptosis

Los efectos considerados anteriormente evidencian una alteración de la actividad funcional de las células bajo la acción de la radiación electromagnética. No obstante, dicho impacto puede ser tan agudo que desencadena el mecanismo de apoptosis (muerte programada) en las células irradiadas con ondas electromagnéticas. En el trabajo [51] se investigó el efecto de la radiación electromagnética con una frecuencia de 42,2 GHz y una densidad de flujo de potencia incidente en el intervalo de 0,1...50 mW/cm² sobre la estructura de la piel. Se encontró que la irradiación produjo cambios ultraestructurales dinámicos en las células de la epidermis y la dermis. Dos horas después de la irradiación, se observaron cavidades de 0,2...3 μm de diámetro en el citoplasma y los núcleos de estas células. Seis horas después de la irradiación, estas cavidades persistían. Posteriormente, una parte de las células se recuperó, pero otra parte comenzó a degradarse. Doce horas después de la irradiación, las células mostraron signos evidentes de apoptosis: condensación de la cromatina, aparición de amplios espacios perinucleares y grandes vacuolas en el plasma, fragmentación celular. Investigaciones detalladas demostraron que, al menos, una parte de estas cavidades se formó durante el proceso de degradación de las mitocondrias.

El problema de la apoptosis también se investigó utilizando bajas frecuencias del campo electromagnético aplicado. En el trabajo de V.N. Voronkov [52] se realizaron experimentos *in vitro* con dos líneas celulares transformadas y una línea celular no transformada. Se descubrió un aumento en el número de muertes, que coincidían morfológicamente con la apoptosis, exclusivamente en las líneas celulares transformadas. Se observó inducción de muerte celular en un campo magnético con una inducción superior a 1 mT. Este efecto era independiente de la frecuencia del campo magnético y aumentaba al utilizar una combinación de un campo magnético estático y uno variable con una frecuencia de 50 Hz.

En el trabajo de R. Gómez [53] se obtuvieron resultados opuestos. El efecto del campo electromagnético se estudió *in vitro* en dos líneas celulares distintas a las empleadas en el trabajo de R. Gómez [52].

Las células fueron expuestas a un campo electromagnético con una frecuencia de 25 Hz y una inducción magnética de 1,5 mT durante 2 horas. No se detectaron cambios significativos en las fases del ciclo celular ni inducción de apoptosis. Es probable que cada tipo celular necesite su propia frecuencia para inducir la apoptosis. Esta conclusión se confirma con los resultados del trabajo de M. Simko [54], en el que se examinaron los efectos de campos de baja frecuencia.

del campo. Se investigaron dos líneas celulares: una transformada y otra no transformada. Se registró un aumento estadísticamente significativo en la formación de micronúcleos y la inducción de apoptosis en células transformadas bajo la influencia de un campo electromagnético de 50 Hz tras una exposición de 48 a 72 horas. No obstante, este efecto no se observó en células no transformadas.

1.11. Efectos de la radiación electromagnética en células de tumores malignos

La inducción de apoptosis, considerada en el párrafo anterior, es un factor importante desde la perspectiva del tratamiento de tumores malignos. En este contexto, los potentes impulsos electromagnéticos de duración nanométrica revisten gran interés. El uso de generadores de tales impulsos en regímenes con un elevado ciclo de trabajo garantizará un nivel atérmico de radiación electromagnética y, al mismo tiempo, permitirá crear en los tejidos biológicos campos con una intensidad comparable a la de los campos cuasiestáticos naturales en las membranas biológicas $\sim 10^2 \dots 10^5$ B/cm.

En el trabajo de M. Simko [54] llevó a cabo experimentos sobre el efecto de impulsos electromagnéticos potentes en ratas de la línea Vistar. Se utilizaron generadores que proporcionaban una potencia de pico de 100, 10 y 4 MW a frecuencias de 10, 20 y 40 GHz, respectivamente. La duración de los impulsos fue de 10 ns. La irradiación de ratas con carcinoma de Walker con 120 impulsos produjo una ralentización del índice de crecimiento tumoral de 1,5 veces y un aumento de la esperanza de vida del 30 % en comparación con el grupo de control. La irradiación con ondas electromagnéticas, en combinación con tratamiento médico, retardaba la tasa de crecimiento tumoral en un factor de 2. La investigación in vitro del efecto de dicha radiación electromagnética sobre células tumorales demostró la destrucción de estas.

En los trabajos de N.D. Deviatkov [55–57] también se llevaron a cabo investigaciones sobre la influencia de potentes impulsos electromagnéticos en células tumorales (carcinoma de Waker) in vitro. Se ha detectado que, bajo tal exposición, se produce una alteración distrófica de las células en la fase de lisis.

Se ha observado que la intensidad del campo eléctrico en las membranas celulares aumenta considerablemente en las células tumorales durante la fase de división. La proliferación en células tumorales difiere de la que se produce en células normales, por lo que la radiación electromagnética puede alterar el metabolismo de las células tumorales.

1.12. Conclusión

Por consiguiente, la radiación electromagnética ejerce un impacto sobre los objetos biológicos incluso a intensidades muy bajas, y el rango de frecuencias efectivas es muy amplio. Los efectos más relevantes desde el punto de vista biológico y médico de la radiación electromagnética a nivel molecular y celular se presentan en la tabla 1.2.

Tabla 1.2

Efectos de la radiación electromagnética a nivel molecular y celular

Objeto de Exposición	Rango de Frecuencias	Consecuencias de la exposición a la radiación electromagnética
Biomacromoléculas	1...150 GHz	<ol style="list-style-type: none"> 1. Transiciones conformacionales en moléculas proteicas. 2. Alteración de la actividad funcional: <ol style="list-style-type: none"> a) Enzimas; b) Proteínas de transporte; c) Canales iónicos. 3. Ruptura de cadenas de ADN. 4. Alteración de la estructura terciaria de los cromosomas. 5. Modificación de la transcripción de la información genética.
Membranas	1...150 GHz	<ol style="list-style-type: none"> 1. Alteración de la distribución de cargas en la superficie de las membranas. 2. Modulación de la resistencia a factores externos. 3. Alteración de la afinidad por biomoléculas. 4. Alteración de la permeabilidad a iones y biomoléculas.
Células	$0,1...2 \cdot 10^{11} \text{ Гц}$	<ol style="list-style-type: none"> 1. Alteración del metabolismo. 2. Modulación del crecimiento y la división celular. 3. Modificación de la actividad funcional. 4. Iniciación de la apoptosis.

Lista de referencias bibliográficas del capítulo

1. Karnaukhov, A.V., Ponomarev, V.O. Resonancia disipativa: una nueva clase de fenómenos físicos. Algunos enfoques para la descripción analítica // *Tecnologías Biomédicas y Electrónica*. – 2001. – № 8. – P. 23–31.
2. Características del impacto de la radiación electromagnética en las biomoléculas / A.R. Karimov [y otros] // *Dispersión Raman – 70 años de investigación*. – M., 1998. – P. 243–249.
3. Influencia de la radiación electromagnética de la banda milimétrica en la dinámica rápida de la molécula de hemoglobina / V.V. Gorbunov [y otros] // *Resúmenes del VII Seminario de toda la Unión «Uso de radiación electromagnética de baja intensidad en biología y medicina»*. – M., 1989. – P. 74.
4. Acerca de los fenómenos cooperativos (coherentes) en fenómenos biológicos (concepto de «excitación coherente» y «proteína-máquina») / D.S. Chernavskii [y otros]. – Preprint FIAN. – 1986. – № 185.
5. Betsky O.V., Yaremenko Yu.G. La piel y las ondas electromagnéticas // *Ondas milimétricas en biología y medicina*. – 1998. – № 1(11). – Pág. 3–15.
6. Investigación de la interacción multiresonante de oscilaciones electromagnéticas con la molécula de hemoglobina mediante espectroscopia Mössbauer / N.P. Didenko [y otros] // *Trabajos del Instituto de Investigación de Física Nuclear*. – Tomsk, 1983. – № 10. – Pág. 77–81.
7. El papel de las transiciones conformacionales inducidas en el mecanismo de interacción resonante de ondas milimétricas con biomacromoléculas / N. P. Didenko [y otros] // *Cartas a ZhTF*. – 1987. – T. 14. – C. 842–846.
8. Cambios en la dinámica de las proteínas bajo la influencia de oscilaciones electromagnéticas de nivel atómico / N. P. Didenko [y otros] // *Cartas a ZhTF*. – 1985. – T. 11. – C. 1515–1520.
9. Fluctuaciones conformacionales de relajación lenta en moléculas de proteína / N. D. Deviatkov [y otros] // *Informes de la Academia de Ciencias de la URSS*. – 1987. – T. 293. – № 2. – C. 469–472.
10. Dependencia anómala de la temperatura del desdoblamiento cuadrupolar de la metahemoglobina / N.P. Didenko [et al.] // *Cartas a ZhTF*. – 1983. – T. 9. – № 6. – C. 332–335.
11. Efecto de factores físicos sobre el plasma sanguíneo / L.V. Kalyuzhnaya [et al.] // *Resúmenes del VII Seminario de toda la Unión «Utilización de la radiación electromagnética de baja intensidad en biología y medicina»*. Moscú, 1989. – M., 1989. – C. 54.

12. Chenskaya T.B., Petrov I.Ya. Investigación de la influencia de la radiación electromagnética de rango milimétrico en los componentes de la membrana mediante espectroscopia IR // Resúmenes del VII Seminario de toda la Unión «Uso de la radiación electromagnética de baja intensidad en biología y medicina». Moscú, 1989 – M., 1989. – Pág. 77.
13. Influencia de la radiación electromagnética sobre la afinidad de las inmunoglobulinas hemoaglutinantes / N.P. Didenko [y otros] // NIIYaF TPU. – Tomsk, 1984. – 10 p. – Dep. en VINITI 17.05.84, № 3178-84.
14. Influencia de la radiación electromagnética sobre la resistencia de las membranas de los eritrocitos, la peroxidación lipídica y la actividad de las enzimas del plasma sanguíneo / A.S. Koryagin [y otros]. // Ondas milimétricas en biología y medicina. – 2000 – № 2 (18). – Págs. 8–10.
15. Peroxidación lipídica y factor de enfriamiento / V.Yu. Kulikov [et al.] – Novosibirsk: Nauka, 1988.
16. Fersht E. Estructura y mecanismos de acción de las enzimas. – M.: Mir, 1980.
17. Kuzhmanova M., Ivanov S. Efecto de las ondas milimétricas y la radiación *гиз* sobre la carga eléctrica superficial de las membranas de los eritrocitos // Actas del X Simposio de toda Rusia «Ondas milimétricas en medicina y biología». Moscú, 24–26 de abril de 1995. – M., 1995. – C. 105–107.
18. Influencia de la radiación electromagnética de la banda milimétrica en la movilidad electroforética de los eritrocitos / V.N. Krylov [et al.] // Ondas milimétricas en biología y medicina. – 2000. – № 2 (18). – C. 5–7.
19. Influencia de la radiación electromagnética en el crecimiento del estado inmunitario del medio de cultivo *S. Platensis* / A.J. Tambiev [et al.] // Ondas milimétricas en biología y medicina. – 1996. – № 8. – C. 23–28.
20. Acción de impulsos de microondas de baja energía, duración nanométrica y alta potencia pico, con diferente longitud de onda, sobre el transporte iónico, la permeabilidad de las membranas celulares, los procesos de regeneración celular y el desarrollo de tumores malignos / N.D. Devyatkov [y otros] // Actas del XII Simposio Ruso «Ondas Milimétricas en Medicina y Biología». Moscú, 30 de octubre – 1 de noviembre de 2000. – M., 2000. – P. 84–86.
21. Influencia de la radiación electromagnética de rango milimétrico en la corriente rápida de potasio en neuronas de moluscos / S.I. Alekseev [y otros] // Tesis del VII Seminario de toda la Unión «Uso de la radiación electromagnética de baja intensidad en biología y medicina». Moscú, 1989 – M., 1989. – Pág. 78.

22. Estudio de la influencia de las ondas milimétricas en los receptores de tipo arbustivo / A.Yu. Sazonov [y otros] // Actas del X Simposio de toda Rusia «Ondas milimétricas en medicina y biología». Moscú, 24–26 de abril de 1995 – M., 1995. – Págs. 105–107.
23. Zheltov N.G. Estudio de la influencia de la radiación electromagnética de rango milimétrico sobre la actividad electrofisiológica de los mecanorreceptores de la piel de la rana // Tesis del VII Seminario de toda la Unión «Uso de la radiación electromagnética de baja intensidad en biología y medicina». Moscú, 1989 – M., 1989. – Pág. 80.
24. Sazonov A.Yu., Ryzhkova L.V. Influencia de las ondas milimétricas en objetos biológicos de diferente grado de complejidad // Actas del X Simposio Nacional «Ondas Milimétricas en Medicina y Biología» . Moscú, 24–26 de abril de 1995. – M., 1995. – Pág. 112–114.
25. Burachas G. Supresión del potencial de acción en el nervio mediante ondas milimétricas // Resúmenes del VII Seminario de toda la Unión «Utilización de radiación electromagnética de baja intensidad en biología y medicina». Moscú, 1989. – M., 1989. – Pág. 80.
26. Gaponiuk Yu. El papel de los mecanismos reflejos en la influencia de la radiación electromagnética de rango milimétrico en el organismo humano // Tesis del VII Seminario de toda la Unión «Uso de la radiación electromagnética de baja intensidad en biología y medicina». Moscú, 1989. – M., 1989. – P. 23.
27. Efecto de las ondas milimétricas en bacterias en experimentos in vitro e in vivo / G.M. Shab [et al.] // Informes del X Simposio de toda Rusia «Ondas milimétricas en biología y medicina». Moscú, 24–26 de abril de 1995. – M., 1995. – Pág. 95–97.
28. Investigación de la influencia de la radiación electromagnética de rango milimétrico sobre las características inmunogenéticas del agente causante de la tos ferina / I.A. Alekseeva [y otros] // Actas del X Simposio Ruso «Ondas milimétricas en la medicina y la biología». Moscú, 24–26 de abril de 1995. – M., 1995. – Pág. 97–98.
29. Kholodnaya L.S. Influencia de las ondas milimétricas sobre las características inmunobiológicas de bacterias condicionalmente patógenas // Actas del X Simposio Ruso «Ondas milimétricas en la medicina y la biología». Moscú, 24–26 de abril de 1995. – M., 1995. – Pág. 100.
30. Tambiev A.K., Kurikova N.N. Principales regularidades de la acción de la radiación electromagnética de rango milimétrico sobre objetos fotointegradores // Actas del X Simposio de toda Rusia «Ondas milimétricas en medicina y biología». Moscú, 24–26 de abril de 1995. – M., 1995. – Pág. 100–102.

31. Influencia de la radiación electromagnética coherente de rango milimétrico de intensidad no térmica sobre la velocidad de crecimiento de *Bacillus subtilis* / A.Yu. Krinitskaya [et al.] // *Electrónica Biomédica*. – 2001. – № 2. – Pág. 49–53.
32. Influencia de las ondas milimétricas de baja intensidad en el crecimiento y desarrollo de cultivos de protozoos / M.Z. Levina [et al.] // *Resúmenes del VII Seminario de la Unión Soviética «Utilización de la radiación electromagnética de baja intensidad en biología y medicina»*. Moscú, 1989 – M., 1989. – Pág. 82.
33. Inducción selectiva de un operón reprimido en el genoma de **Escherichia coli** / V.A. Gusev [et al.] // *Resúmenes del VII Seminario de la Unión Soviética «Utilización de la radiación electromagnética de baja intensidad en biología y medicina»*. Moscú, 1989 – M., 1989. – Pág. 81.
34. Influencia de la radiación electromagnética de rango milimétrico en la bioluminiscencia de bacterias / L.Yu. Berzhanskaya [y otros] // *Ondas Milimétricas en Biología y Medicina*. – 1993. – № 2. – C. 63–67.
35. Tambiev A.K., Kirikova N.N. Effect of millimeter radiation on metabolism of cyanobacteria *Spirulina platensis* and other photosynthesizing organisms // *Crit. Rev Biomed. Eng.* – 2000. – V. 28 (3-4). – P. 589–602.
36. Dinámica de los procesos de peroxidación lipídica en pacientes con cardioneuralgia inestable durante la terapia con ondas milimétricas / A.Yu. Lebedeva [et al.] // *Ondas milimétricas en biología y medicina*. – 1995. – Pág. 18–20.
37. Influencia de las ondas milimétricas en la actividad funcional de los leucocitos humanos (in vitro) / V.A. Starshina [et al.] // *Tesis del VII Seminario de toda la Unión «Utilización de la radiación electromagnética de baja intensidad en biología y medicina»*. Moscú, 1989 . – M., 1989. – 34 pp.
38. Producción del factor de crecimiento de proliferación celular por linfocitos y fibroblastos tras irradiación con ondas electromagnéticas / V.I. Govallo [et al.] // *Ponencias en el Simposio Internacional «Ondas milimétricas de intensidad no térmica en medicina»*. – M., IRE AN URSS, 1991. – Parte 2. – Pág. 340–344.
39. Influencia de la radiación electromagnética de rango milimétrico en los cromosomas politénicos de *Chironomus plumosus* / G.G. Brill [et al.] // *Ondas milimétricas en biología y medicina*. – 2000. – № 1(17). – Pág. 3–7.
40. Rebrova T.V. Influencia de la radiación electromagnética de rango milimétrico en las funciones vitales de los microorganismos // *Ondas milimétricas en biología y medicina*. – 1992. – № 1. – Pág. 37–47.

41. Garaj-Vrhovac V. Ensayo de micronúcleos y actividad mitótica de linfocitos en la evaluación del riesgo de exposición laboral a radiación de microondas // *Chemosphere*. – 1999. – V. 39 (13). – P. 2301–2312.
42. Cambio in vitro de las propiedades reológicas sanguíneas bajo la acción de ondas milimétricas en pacientes en fase aguda de ictus / I.A. Podolyako [y otros] // *Ondas milimétricas en biología y medicina*. – 2000. – № 4 (20). – C. 53–55.
43. La radiación electromagnética de frecuencia milimétrica como terapia patogénica en enfermedades del sistema cardiovascular / T.V. Golovacheva [y otros] // *Ondas milimétricas en biología y medicina*. – 2000. – № 1 (17). – C. 18–25.
44. Suvorov S.A., Kirichuk V.F. Corrección de alteraciones del sistema hemostático en pacientes con prostatitis mediante el uso de radiación electromagnética de rango milimétrico // *Ondas milimétricas en biología y medicina*. – 2000. – N.º 1(17). – C. 39–46.
45. Kirichuk V.F. Markova G.E. Estado del componente vascular plaquetario del sistema hemostático y su corrección mediante ondas milimétricas // *Ondas milimétricas en biología y medicina*. – 2000. – N.º 1 (17). – C. 8–17.
46. Factor de separación tras la exposición de células vivas a radiación milimétrica / A.P. Kuznetsov [et al.] // *Actas del X Simposio Panruso «Ondas Milimétricas en Medicina y Biología»*. Moscú, 24–26 de abril de 1995 – M., 1995. – Págs. 102–105.
47. Efecto de la radiación de microondas pulsada de baja energía y duración nanométrica, con alta potencia pico y baja intensidad de radiación en el rango milimétrico, sobre el transporte iónico, la permeabilidad de las membranas celulares, los procesos de regeneración celular y el desarrollo de tumores malignos / N.D. Deviatkov [et al.] // *Actas del XII Simposio de la Unión Soviética «Ondas Milimétricas en Medicina y Biología»*. Moscú, 30 de octubre – 1 de noviembre de 2000. – M., 2000. – Págs. 84–86.
48. Características de los cambios en la actividad funcional de las plaquetas en el rango de las ondas milimétricas en pacientes con cardioneuralgia inestable bajo la influencia de radiación electromagnética in vitro / V.F. Kirichuk [y col.] // *Ondas milimétricas en biología y medicina*. – 2001. – № 1–2 (21–22). – Págs. 11–21.
49. Kirichuk V.F., Volin M.V. Cambios en la actividad funcional de las plaquetas al usar la terapia de ondas milimétricas en el tratamiento complejo de pacientes con cardioneuralgia inestable // *Ondas milimétricas en biología y medicina*. – 2001. – № 1–2 (21–22). – C. 11–21.

50. Influencia de las oscilaciones electromagnéticas del rango milimétrico en las frecuencias del espectro molecular de absorción y emisión de óxido nítrico sobre las plaquetas como células efectoras del sistema hemostático / V.F. Kirichuk [et al.] // Ondas Milimétricas en Biología y Medicina. – 2001. – № 1–2 (21–22). – Pág. 3–10.
51. Cambios ultraestructurales en la piel de ratones causados por radiaciones electromagnéticas del rango milimétrico / V.N. Voronkov [et al.] // Actas del XI Simposio de toda Rusia «Ondas Milimétricas en Medicina y Biología». Moscú, 2–12 de abril de 1997 – M., 1997. – Págs. 117–118.
52. Static and ELF magnetic fields induce tumor growth inhibition and apoptosis / S. Tofani [et al.] // Bioelectromagnetics. – 2001. – V. 22(6). – P. 419–428.
53. 25 Hz electromagnetic field exposure has no effect on cell cycle distribution and apoptosis in U-937 and HCA-2/1cch cells / Ruiz Gomez M.J. [et al.] // Bioelectrochemistry. – 2001. – V. 53(1). – P. 37–40.
54. Effects of 50 Hz EMF exposure on micronucleus formation and apoptosis in transformed and nontransformed human cell lines / M. Simko [et al.] // Bioelectromagnetics. – 1998. – V. 19(2). – P. 85–91.
55. Efectos de impulsos de microondas de baja energía con duración nanométrica, alta potencia pico y radiación milimétrica sobre estructuras biológicas (tumores malignos) / N.D. Deviatkov [y otros] // Actas del X Simposio de toda Rusia «Ondas milimétricas en medicina y biología». Moscú, 24–26 de abril de 1995 – M., 1995. – Pág. 115.
56. Influence of low-energetic pulse microwave and millimeter radiation of nanosecond duration with large peak power on biological structures (malignant tumors) / N.D. Devjatkov [et al.] // Biomedical electronics. – 1998. – № 1. – P. 56–62.
57. Efectos de la radiación de microondas de baja energía con duración nanométrica, alta potencia pico y radiación milimétrica de baja intensidad sobre tumores malignos en experimentos / N.D. Deviatkov [y otros] // Actas del XII Simposio de toda la Unión «Ondas milimétricas en medicina y biología». Moscú, 30 de octubre – 1 de noviembre de 2000. – M., 2000. – Págs. 87–90.

2. EFECTO DE LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA SOBRE EL ORGANISMO EN SU TOTALIDAD

En el capítulo anterior, se examinaron los efectos de la radiación electromagnética sobre bioobjetos a nivel microscópico, concretamente sobre biomoléculas y células. Es evidente que la modificación de las propiedades y la actividad de estructuras biológicas microscópicas, bajo la acción de ondas electromagnéticas, conlleva un cambio en las propiedades de los tejidos biológicos y los sistemas funcionales del organismo. En este capítulo examinaremos la manifestación de dichos cambios, tanto de carácter local como general. En el § 2.1 se presentan datos sobre los cambios locales, relativos a las características funcionales y morfológicas de los tejidos biológicos. Los cambios generales en el organismo bajo la influencia de la radiación electromagnética se examinan en los párrafos siguientes. El tema del § 2.2 son las características de las respuestas de los sistemas nervioso y endocrino del organismo. Los efectos de estrés y adaptógenos de las ondas electromagnéticas se examinan en el § 2.3. El párrafo 2.4 está dedicado al examen de la influencia de la radiación electromagnética sobre el comportamiento de los animales. Los cambios en el comportamiento del operador en condiciones de exposición a radiación electromagnética se examinan en el § 2.5. Las posibilidades de corrección dirigida del estado de los sistemas fisiológicos del organismo se muestran en el § 2.6. Finalmente, el § 2.7 se dedica a la exposición de datos relativos a la dependencia de los efectos locales y generales de los parámetros de irradiación, en particular, la potencia y la frecuencia de la radiación electromagnética, la duración de la exposición y el régimen de irradiación.

2.1. Modificación funcional y morfológica de tejidos biológicos bajo la acción de la radiación electromagnética

Los cambios que se producen en los tejidos biológicos bajo la acción de la radiación electromagnética de intensidad atérmica revisten gran interés desde el punto de vista de la determinación de la influencia patógena de las ondas electromagnéticas y su aplicación con fines terapéuticos. Estos cambios son, naturalmente, consecuencia de la modificación de los procesos biológicos por la acción de la radiación electromagnética; sin embargo, los datos publicados suelen ser de carácter fenomenológico y no contienen un análisis de los mecanismos de generación de dichos cambios. En el trabajo de V.M. Perel'muter[1] se investigó la influencia de ondas milimétricas de intensidad atérmica sobre la piel de ratones. Tras la irradiación del muslo izquierdo, el efecto general se manifestó en un aumento del flujo sanguíneo en los vasos cutáneos de ambos muslos y en una disminución del número de mastocitos (pertenecientes a la clase de células inmunocompetentes), aunque solo en la piel no irradiada. El efecto local de la radiación electromagnética consistió en un incremento del número de mastocitos y linfocitos en la zona irradiada. Tras la irradiación del muslo derecho, el efecto local se tradujo en una disminución del contenido sanguíneo en los vasos de esta extre-

Parte de los trabajos se dedicó a la investigación de la influencia de la radiación electromagnética en los procesos de regeneración tisular, en los que se estudió el tratamiento de heridas en animales de experimentación. Se irradiaron con ondas electromagnéticas de frecuencias 53,53 y 42,96 GHz, durante 5 días tras la intervención quirúrgica, las áreas con heridas circulares que abarcaban todo el espesor de la piel de ratones. Se obtuvo información sobre el grado de formación del tejido de granulación mediante la medición de la concentración de glucoproteínas. Los resultados de las mediciones se presentan en la tabla 2.1.

Tabla 2.1

Influencia de la radiación electromagnética en el grado de formación del tejido de granulación

	Control	Frecuencia de la radiación electromagnética: 53,5		
		3 GHz	42,96 GHz	42,96 GHz
		Sin modulación	Sin modulación	Modulación ± 200 MHz
Hidroxiprolina (HP)	$100 \pm 0,52$	$81,15 \pm 2,72$ P < 0,01	$82,12 \pm 2,72$ P < 0,01	$129 \pm 2,67$ P < 0,01
Hidroxilinsina (HL)	$100 \pm 0,04$	$91,95 \pm 7,00$ P > 0,05	$103,78 \pm 2,23$ P > 0,05	$155,17 \pm 2,37$ P < 0,05
HL/HP	$0,46 \pm 0,03$	$0,51 \pm 0,03$ P > 0,05	$0,61 \pm 0,02$ P < 0,05	$0,55 \pm 0,21$ P < 0,05

Según la tabla 2.1, la irradiación con ondas electromagnéticas sin modulación de la frecuencia portadora disminuye significativamente la síntesis de glicoproteínas. Cabe señalar que estas proteínas son los componentes principales de la linfa inflamatoria, considerada un participante necesario en el proceso de curación de heridas. Por lo tanto, la disminución de su concentración bajo la acción de la radiación electromagnética puede interpretarse como una supresión de la función inflamatoria. El aumento del contenido de colágeno, evaluado mediante la concentración de hidroxiprolina, indica una optimización en la formación de la cicatriz.

Puesto que el tejido de granulación se forma principalmente por vía extracelular, se puede suponer que la radiación electromagnética a las frecuencias fijas de 53,53 y 42,96 GHz suprime la síntesis de proteínas extracelulares, pero no afecta a las estructuras de colágeno, lo que se confirma por el mantenimiento de la relación de concentraciones GL/GP. La exposición a radiación electromagnética con modulación de la frecuencia portadora induce la activación de la síntesis de proteínas. La concentración de proteínas de colágeno, evaluada mediante el contenido de tirosina, permaneció prácticamente invariable en todos los experimentos.

Las ondas milimétricas ejercen un efecto estimulante en la regeneración de las fibras nerviosas. Así, la piel del muslo de rata en la zona de la sutura fue irradiada con ondas electromagnéticas de una frecuencia de 53,57 GHz y una densidad de flujo de potencia incidente de 4 mW/cm^2 . Las mediciones del potencial de acción a los 5 meses tras la operación mostraron un efecto estimulante de la radiación electromagnética en la rehabilitación nerviosa, manifestándose en un aumento del 30 % en la velocidad de transmisión del potencial de acción, en comparación con el grupo control.

Para comprender el mecanismo de respuesta de los tejidos biológicos a la acción de la radiación electromagnética, son importantes los estudios en preparaciones tisulares aisladas. En el trabajo de V.N. Krylov e I.V. Oshevenskogo [2], se irradió tejido muscular con ondas electromagnéticas en el rango de frecuencia de 53...78 GHz, con una densidad espectral de $4 \cdot 10^{-4} \text{ Вт/Гц}$ y una potencia integral de 1,5 mW. La actividad tónica propia del tejido (tono, frecuencia y amplitud) no se modificó tras dicha exposición. La reacción al mediador parasimpático (acetilcolina) también se mantuvo inalterada, pero la intensidad de la reacción al mediador simpático (noradrenalina) fue dos veces mayor. Se puede предположить que la radiación electromagnética aumenta la sensibilidad mediadora de los receptores adrenérgicos de las membranas celulares del tejido muscular liso intestinal, y esto podría llevarse a cabo tanto en relación con

-, así como los β adrenorreceptores La reacción de los primeros (-) puede estar relacionada con un aumento de la corriente transmembrana de potasio y, en consecuencia, con la supresión de la propia actividad miogénica, mientras que la de los segundos (-) puede estar relacionada con una disminución de la corriente de calcio y, por lo tanto, con la supresión de la conjugación entre la estimulación y la contracción de las células musculares

La irradiación de queratinocitos, que son el componente principal de la piel humana, con radiación electromagnética a una frecuencia de 61,22 GHz demostró que tal exposición provoca un pequeño, pero estadísticamente significativo, aumento del contenido intercelular de interleucina 1. Simultáneamente, esta exposición no modificó la proliferación ni la quimiotaxis de las células, ni afectó a las propiedades adhesivas de los queratinocitos. Estos datos indican que la irradiación de la piel humana puede activar los queratinocitos basales, estimulando la síntesis de interleucina 1.

La irradiación de tejidos nerviosos con ondas electromagnéticas puede provocar alteraciones morfológicas. Se detectó la destrucción del citoplasma de fibras nerviosas mielinizadas y no mielinizadas inmediatamente después de una irradiación de 15 minutos con ondas electromagnéticas de una frecuencia de 42,25 GHz.

2.2. Peculiaridades de los cambios en los sistemas nervioso y endocrino del organismo bajo la acción de ondas electromagnéticas.

Las respuestas del sistema nervioso a la exposición a la radiación electromagnética son muy diversas, dependiendo de las condiciones de irradiación y del estado del objeto expuesto. Por lo tanto, tener en cuenta todos los detalles de la irradiación es muy importante para establecer patrones generales de la respuesta del sistema nervioso a la exposición a la radiación electromagnética. Uno de los métodos para evaluar el estado funcional del sistema nervioso vegetativo consiste en el análisis espectral de los ritmos cardíacos. Los efectos vegetativos conforman tres componentes de los ritmos cardíacos: la baja frecuencia (inferior a 0,05 Hz), la frecuencia media (0,08...0,12 Hz) y la alta frecuencia (0,15...0,5 Hz). El primero de estos componentes está relacionado con el sistema metabólico de regulación, el segundo con el barorreflejo,

y el tercero con la respiración. La influencia de la radiación electromagnética se estudió en personas prácticamente sanas con edades entre 20 y 30 años. Se irradió la cara dorsal de la mano con radiación electromagnética, con una densidad de flujo de potencia incidente de 5 mW/cm^2 . Los resultados de la investigación mostraron una respuesta significativa en el componente de frecuencia media del ritmo cardíaco. La amplitud de este componente aumentó 1,5 veces, mientras que el efecto placebo la disminuyó ligeramente (hasta el 4 %). Por lo tanto, se puede presumir que los principales cambios en el sistema nervioso autónomo están relacionados con el sistema vascular.

Las investigaciones sobre la respuesta del sistema nervioso central a la exposición a la radiación electromagnética se llevan a cabo, generalmente, utilizando el electroencefalograma (EEG). De los resultados de las investigaciones se pueden destacar las siguientes características principales de las reacciones del EEG a la irradiación electromagnética:

- 1) Aumento de la cantidad de oscilaciones fusiformes y ondas lentas (sincronización).
- 2) Los cambios en el EEG aparecen como respuesta a la activación o desactivación de la exposición electromagnética, con un intervalo de tiempo de 10...20 s (respuesta no específica).
- 3) Los cambios en el EEG se acompañan de alteraciones en los biopotenciales de las estructuras subcorticales, en particular el hipocampo, el hipotálamo, los núcleos específicos e inespecíficos del tálamo y los núcleos reticulares del mesencéfalo. Esto demuestra que, tras la exposición breve a ondas electromagnéticas, las alteraciones en los biopotenciales sumados y de impulsos de la corteza hemisférica son un efecto de la acción directa de factores penetrantes en el cerebro.

Es preciso señalar que las reacciones del EEG a la exposición a la radiación electromagnética dependen del estado emocional de la persona. En el tratamiento de pacientes con úlcera gastroduodenal mediante el uso de ondas electromagnéticas [3], se observó el desarrollo de una reacción de desincronización del ritmo electroencefalográfico (EEG). Esta reacción se producía con mayor frecuencia al exponer a frecuencias de 58,0...59,5 y 61,5 GHz. A. P. Alistov [3] postula que la reacción de estimulación de la actividad de fondo en la terapia de ondas milimétricas tiene un carácter no específico y podría reflejar un aumento de la sensibilidad del paciente durante el periodo de observación. La reacción de inactivación de la actividad de fondo refleja el hecho de que el paciente entra en un estado emocional de confort y somnolencia. Esto coincide con la relajación de los indicadores clínicos de la enfermedad ulcerosa.

En el tratamiento de pacientes con hipertensión, se ha registrado un aumento en la frecuencia de repetición de los potenciales de acción de las fibras aferentes del nervio mediano de la mano izquierda al irradiar un área de piel cercana al punto de acupuntura 9.9 del canal de pericardio durante 1 minuto. La frecuencia de la radiación electromagnética varió de 53,596 a 53,603 GHz, con una frecuencia de modulación de 0,05 Hz y una densidad de flujo de potencia incidente inferior a 5 mW/cm². El análisis del EEG mostró un aumento en la intensidad de la componente espectral en el rango del ritmo α en comparación con el valor basal en 18 de 20 pacientes. Durante el bloqueo del nervio mediano con novocaína, la irradiación con radiación electromagnética indujo cambios en los parámetros de la actividad impulsiva basal y en las características espectrales del EEG

La generalización de los resultados de las investigaciones sobre las reacciones sensoriales a la exposición electromagnética permite extraer las siguientes conclusiones [4]:

- el ser humano es capaz de distinguir una exposición electromagnética de una exposición simulada (placebo);
- la sensibilidad humana a las ondas electromagnéticas depende tanto de las características intrínsecas del individuo como de los parámetros de la radiación;
- el tipo de sensaciones percibidas (compresión, tacto, hormigueo, quemazón) sugiere la participación de los receptores cutáneos en la respuesta a la exposición a ondas electromagnéticas;
- el período latente de las reacciones sensoriales a la exposición a ondas electromagnéticas puede alcanzar los 15 minutos;
- asimetría sensorial en la percepción de ondas electromagnéticas (la reacción depende de qué mano fue expuesta a la radiación) tiene lugar.

A partir de estas observaciones, se puede suponer que la exposición a ondas electromagnéticas puede desencadenar la generación de señales por mecanorreceptores (sensibilidad táctil) o nociceptores (receptores del dolor), puesto que el desarrollo de la reacción es bastante lento (hasta 15 minutos). Se pueden destacar los mecanorreceptores más lentos como posibles «receptores» de ondas electromagnéticas. Estos son los discos táctiles de Merkel y las terminaciones nerviosas de Ruffini. El papel de «receptores» sensoriales de la radiación electromagnética también puede ser desempeñado por los receptores del dolor, que son terminaciones nerviosas libres con fibras nerviosas mielinizadas y amielínicas finas. Además del tipo de sensación (hormigueo o ardor), esta suposición se ve confirmada por la desaparición de la sensibilidad electromagnética.

durante el tratamiento de un área de piel expuesta a radiación, utilizando cloretilo para desactivar los receptores del dolor.

Además, la radiación electromagnética puede inducir actividad epileptiforme, manifestándose en la aparición de picos de baja frecuencia (2...4 Hz) y alta amplitud (superior a 300 μ V) en el EEG [5].

La posibilidad de aparición de tal actividad como resultado de la acción de la radiación electromagnética en determinadas condiciones (tras la administración de aminazina) fue señalada en el trabajo de A.V. Sidorenko y V.V. Tsaryuk [6], dedicado a la investigación de la influencia de la radiación electromagnética continua e impulsada, con una frecuencia portadora de 42,2 GHz, en el cerebro de animales bajo diferentes estados funcionales del sistema nervioso central. La diferencia en el estado funcional se reflejaba en la reacción del EEG. Los animales activos mostraron una reacción de sincronización al ser expuestos a la radiación electromagnética, mientras que en los animales narcotizados se observó un EEG con un aumento en los ritmos α y β y con indicadores de incremento en las características dinámicas del sistema nervioso central.

La reacción del sistema nervioso a la exposición a la radiación electromagnética se acompaña de alteraciones endocrinas. Se investigó la influencia de las ondas electromagnéticas sobre la concentración de serotonina y catecolaminas en los ganglios linfáticos de ratas. A los 15 minutos de la exposición electromagnética, la concentración de estas sustancias aumentó drásticamente en los ganglios linfáticos. Además, se observó un incremento en el número de células luminiscentes intrafoliculares.

Se estudió el efecto de la radiación electromagnética en el sistema simpatoadrenal humano. Las ondas electromagnéticas tenían una longitud de onda de 5,6 y 7,1 mm y una densidad de flujo de potencia incidente de aproximadamente 10 mW/cm². Se expuso una porción de la protuberancia occipital externa en personas prácticamente sanas y en pacientes con alteraciones del sistema simpático-adrenal. Los datos obtenidos en este trabajo permiten afirmar que

- las ondas electromagnéticas actúan sobre el sistema simpático-adrenal, alterando el metabolismo de las catecolaminas y otros mediadores;
- esta acción posee un carácter adaptativo, puesto que el sistema simpatoadrenal responde de manera adecuada:
 - a) con un nivel basal bajo de secreción de catecolaminas, bajo la influencia de ondas electromagnéticas, se observó un incremento en la secreción de dopamina del 65 %, de noradrenalina del 140 % y de adrenalina del 80 %;

b) con niveles basales normales y altos de secreción de catecolaminas, la reacción del sistema a la exposición a ondas electromagnéticas se caracteriza por una disminución del nivel de dopamina del 70 %, un aumento del de noradrenalina del 90 % y del de adrenalina del 4 %.

De este modo, la exposición a la radiación electromagnética con longitudes de onda de 5,6 y 7,1 mm puede conducir a la corrección del metabolismo de las catecolaminas, las cuales constituyen un vínculo integrador del sistema simpático-adrenal; los cambios en el estado de este sistema son de carácter adaptativo.

2.3. Características de los efectos estresores y adaptógenos de las ondas electromagnéticas

Yu.A. Kholodov [7] supuso que la reacción del sistema nervioso a la exposición a la radiación electromagnética se debe a la reacción inicial del cerebro. Esta reacción precede al estrés y, con una exposición breve, induce un efecto antiestrés y aumenta la resistencia del organismo. Se realizaron estudios bioquímicos de los efectos antiestrés de la radiación de ondas milimétricas en ratas blancas no lineales. Los resultados mostraron que la corrección de las consecuencias del estrés depende del estado inicial del organismo.

En animales «activos», el estrés provoca una disminución del nivel de serotonina en los macrófagos de la zona subcapsular del timo; tras la exposición electromagnética, este nivel se restablece a la normalidad. El nivel de serotonina en los linfocitos cerebrales aumentaba tras la exposición al estrés y disminuía después de la exposición subsiguiente a ondas electromagnéticas. En los linfocitos corticales, el estrés reducía el nivel de catecolaminas, mientras que la irradiación con ondas milimétricas lo restablecía.

Se registraron resultados distintos para animales «dormidos». El estrés inducía un cambio en el nivel de monoaminas en una dirección opuesta a la observada en animales «despiertos». En este caso, el nivel de serotonina aumentaba en los macrófagos subcapsulares y disminuía en los linfocitos cerebrales, mientras que el nivel de catecolaminas en los linfocitos corticales aumentaba. La exposición a

radiación electromagnética no condujo a la corrección de las alteraciones monoamídicas. Más aún, incrementó el nivel de serotonina en los macrófagos. Por lo tanto, la radiación electromagnética actúa unidireccionalmente con respecto a las alteraciones bioquímicas. Y su utilización se justifica si la reacción al estrés requiere corrección precisamente en esa dirección.

En el trabajo de N.A. Temuryanov [8] se investigó el efecto antiestrés de la radiación de ondas milimétricas con una longitud de onda de 5,6 mm y una densidad de flujo de potencia incidente de 10 mW/cm² en condiciones de reacción a la hipocinesia en ratas blancas. Para evaluar la acción antiestrés de las ondas electromagnéticas, se realizaron mediciones del estado citoquímico de neutrófilos (contenido de peroxidasa y lípidos) y de linfocitos (contenido de succinato deshidrogenasa y glicerofosfato deshidrogenasa) en sangre periférica. Tales mediciones proporcionan información sobre las variaciones en la resistividad inespecífica.

Los resultados de las mediciones mostraron que el efecto antiestrés depende del estatus tipológico de los animales y de la zona de irradiación. En animales con baja y media movilidad, el efecto antiestrés se obtenía al irradiar la nuca y la cara externa del muslo derecho; sin embargo, no se observó respuesta al irradiar el muslo izquierdo. El efecto antiestrés se manifestó en un incremento de los indicadores citoquímicos de lípidos y de la actividad de las deshidrogenasas en los linfocitos. Las evaluaciones de la eficiencia de la adaptación según la composición morfológica de la sangre demostraron que la respuesta de los animales a la exposición electromagnética constituía una reacción de entrenamiento. En animales con alta movilidad, el efecto antiestrés se obtenía al irradiar la nuca y el muslo izquierdo; la exposición del muslo derecho, en cambio, no limitaba la reacción de estrés.

La descripción de la asimetría de los efectos antiestrés de la radiación electromagnética también se halló en el trabajo de V.M. Perel'muter [9]. El estrés hipocinético se indujo colocando ratones en cámaras para su irradiación. Se utilizaron dos tipos de cámaras: la primera, diseñada para irradiar el muslo derecho, tenía una abertura correspondiente en el lado derecho; la segunda, una abertura en el lado izquierdo. La cámara «derecha» indujo una linfopenia transitoria y una disminución del número de timocitos en el timo izquierdo. Durante la irradiación del muslo derecho, se registró una linfopenia pronunciada una hora después de la irradiación, que posteriormente desapareció en las siguientes 24 horas. Además, se registró un aumento en el número de timocitos en el

timo. La irradiación del muslo izquierdo condujo únicamente a una linfopenia de corta duración en los primeros minutos tras la irradiación.

En continuación de este trabajo, se investigó la dependencia del efecto antiestrés de la exposición electromagnética con respecto a la longitud de onda de la radiación y la duración de la exposición [10]. Se observó que la exposición a una longitud de onda de 5,6 mm es más eficaz que a una longitud de onda de 7,1 mm. En el último caso, la exposición a las ondas electromagnéticas limitó el desarrollo del estrés, pero no incrementó el nivel de actividad funcional de las células sanguíneas. El efecto antiestrés de la radiación electromagnética con una longitud de onda de 5,6 mm dependió de la duración de la exposición. Se registraron resultados positivos con tan solo 15 minutos de exposición. El efecto se hizo más pronunciado con una duración de irradiación de 30 minutos, pero una exposición de 60 minutos resultó menos efectiva que las exposiciones de 15 y 30 minutos.

Es preciso señalar que el efecto antiestrés inducido por la radiación con una longitud de onda de 5,6 mm no se observó en todas las condiciones de estrés. En el trabajo de A.Yu. Arzumanov [11] se investigó la dependencia del efecto antiestrés con respecto al grado de desarrollo del estrés. Los resultados indicaron que, en condiciones de estrés severo en animales (inmovilización, incluida la fijación de la cabeza), no se observó un efecto antiestrés significativo. En este caso, todas las reacciones conductuales (alimentación, sexo, pruebas de «campo abierto» y «natación forzada») fueron suprimidas por el estrés.

En condiciones de estrés menos severo, concretamente ante limitaciones cinéticas, el efecto antiestrés de la radiación electromagnética se manifestó de forma más pronunciada en los casos en que el animal se encontraba en situaciones que amenazaban su vida. Una de estas situaciones se emplea en el test de Vogel, en el que el comportamiento de los animales se evalúa por el número de intentos de obtener agua, durante los cuales reciben una descarga eléctrica. Asimismo, el efecto estresante se manifestó con mayor intensidad en las reacciones conductuales de los animales ante un estimulador biológico positivo.

En el trabajo de N.N. Lebedeva y O.P. Sulimova [12] se investigó la influencia de la radiación electromagnética con una longitud de onda de 7,1 mm sobre el ritmo cardíaco y el EEG en condiciones de estrés psicológico inducido por un procedimiento experimental. Los datos obtenidos en 5 voluntarios mostraron la posibilidad de desarrollar una reacción de estrés. Esto se confirma con los resultados del tratamiento electromagnético de 52 pacientes, divididos en grupos según la gravedad de la quemadura, evaluada mediante el índice de Frank. La intensidad de la reacción de estrés se determinó según

el recuento de linfocitos en sangre. La irradiación de los pacientes produjo un aumento en el recuento de linfocitos en comparación con el grupo control correspondiente. El efecto antiestrés no dependió del área ni de la profundidad de la quemadura, dentro de un rango de varias a 50 unidades del índice de Frank, ni tampoco del grado de estrés inicial causado por la quemadura.

Además de los estudios fenomenológicos, revisten gran interés los trabajos dedicados al estudio de los mecanismos del efecto antiestrés. En uno de estos estudios se examinó el papel de la peroxidación lipídica y el intercambio de tiosulfuro en la limitación de la respuesta al estrés [13]. La selección de estos procesos bioquímicos se justificó porque desempeñan un papel importante en la regulación de los procesos de supresión y activación del sistema nervioso central. La peroxidación lipídica depende de muchos factores, en particular de la composición de los lípidos de membrana y de la actividad de proteínas y no proteínas en los sistemas prooxidantes y antioxidantes. La actividad de estos sistemas está controlada por mecanismos neurohumorales. Uno de los elementos más importantes del sistema antioxidante fisiológico es el intercambio tiosulfuro.

Los resultados de la investigación del proceso de peroxidación lipídica en ratones sometidos a estrés hipocinético e irradiados con ondas electromagnéticas de 7,1 mm de longitud de onda mostraron que dicho efecto electromagnético modifica este proceso, y la dirección de los cambios es opuesta a la acción del estrés. Si el estrés hipocinético conducía a un fuerte aumento de los productos de peroxidación lipídica en el tálamo y el hipotálamo, la exposición electromagnética inducía un cambio en el contenido de estos productos en la dirección de la normalización.

2.4. Influencia de la radiación electromagnética en el comportamiento animal

Los estudios experimentales de los efectos de las ondas electromagnéticas sobre el comportamiento animal se realizan con mayor frecuencia en ratas y primates. Se investigó la influencia sobre ratas del campo electromagnético generado por impulsos de banda ultraancha (UWB). El objetivo de las investigaciones fue la determinación de alteraciones teratológicas y conductuales tras la exposición a los siguientes regímenes:

- 1) Exposición diaria a pulsos UHP durante el período de gestación, entre 3 y 18 días;
- 2) Exposición durante 10 días después del nacimiento.

La irradiación se efectuó mediante pulsos con los siguientes parámetros: intensidad del componente eléctrico – 55 kV/m, duración del frente de subida – 0,3 ns, duración del pulso – 1,8 ns. Los resultados experimentales no mostraron alteraciones en el comportamiento de los animales tras la exposición a impulsos UWB, a excepción de un aumento en la emisión de ruido por parte de las ratas durante la sesión de irradiación en comparación con el grupo de control.

Se emplearon impulsos UWB con los siguientes parámetros: duración de los impulsos de 5...10 ns, ancho de banda de frecuencias de 0,25...2,5 GHz y frecuencia de repetición de impulsos de 60 Hz. La exposición breve (2 min) de ratas a estos impulsos no indujo cambios en el comportamiento animal en las pruebas de «campo abierto» y «natación forzada».

También se investigó la influencia de las ondas electromagnéticas en el comportamiento de las ratas. Se utilizaron tres grupos de animales: un grupo de control, un grupo expuesto a radiación de ondas electromagnéticas en el rango de microondas (СВЧ) y un grupo expuesto a radiación en el rango de radiofrecuencia. La intensidad de la componente eléctrica del campo electromagnético fue de 5 mV/m, y la exposición se realizó diariamente durante 10 minutos, a lo largo de 10 días. La capacidad de aprendizaje y memorización de las ratas se evaluó después de cada sesión de irradiación y diez días después de la última sesión. Las ratas del segundo y tercer grupo resultaron ser más capaces de aprender y memorizar que los animales del primer grupo. El efecto se explica por la influencia de las ondas electromagnéticas en el sistema nervioso central, mediante el aumento de la microcirculación y un posible efecto directo sobre algunas estructuras de la corteza cerebral.

Se realizaron estudios sobre la influencia de ondas electromagnéticas de diferentes longitudes de onda en el comportamiento de las ratas. Los animales fueron irradiados con radiación electromagnética en los rangos de onda métrica, decimétrica y centimétrica, con una densidad de flujo de potencia incidente de 10 mW/cm². Los resultados de los estudios demostraron que la radiación electromagnética en estos rangos puede ralentizar la formación de respuestas conductuales habituales. Esto se manifestó al irradiar con ondas electromagnéticas en el rango métrico. En el rango de ondas centimétricas, el efecto se manifestó con cierto desfase temporal. Se observaron cambios a intensidades no térmicas, y los animales se adaptaron fácilmente a las condiciones experimentales. Se investigaron

los efectos de la radiación electromagnética con modulación sinusoidal a una frecuencia de 2...50 Hz. La frecuencia portadora fue de 30 MHz, y la intensidad del componente eléctrico se situó entre 30 y 120 V/m. Se halló que dicha exposición bloqueaba la formación de reflejos condicionados en los animales.

Los estudios experimentales de los efectos biológicos de los impulsos de microondas procedentes de radares navales mostraron la dependencia de estos efectos con respecto a la intensidad de la radiación y la duración de la exposición. La influencia de dicha radiación en el comportamiento de animales (ratas blancas) se evaluó mediante la prueba de «campo abierto». Se descubrió que la reacción a la exposición electromagnética depende del tipo de comportamiento de los animales.

Las investigaciones en primates son de gran interés, puesto que su comportamiento es cercano al comportamiento humano. Se estudió la influencia de impulsos UWB en el comportamiento de primates. La duración de la exposición fue de 2 minutos, y el ancho de banda efectivo comprendía de 0,1 a 1,5 GHz. La frecuencia de repetición de los impulsos fue de 60 Hz, y la intensidad del componente eléctrico del campo electromagnético fue de 250 kV/m. El comportamiento de los animales se evaluó utilizando la prueba de la «plataforma equilibrista», en la que el mono debía compensar las inclinaciones de la plataforma, generadas de forma pseudoaleatoria por un programa informático mediante un joystick.

Además de estos experimentos, se realizaron estudios con babuinos. Se empleó un campo electromagnético con una intensidad del componente eléctrico de 30 y 60 kV/m. La exposición a este campo inducía a los monos a interrumpir sus actividades durante el primer día de exposición, pero al segundo día la situación volvía a su estado inicial. La finalización de las sesiones de exposición tras 6 semanas se acompañó de una interrupción de la actividad, similar a la observada durante el primer día de exposición. En mediciones del umbral de sensibilidad al campo eléctrico en babuinos, se obtuvo un valor de 12 kV/m. Esta magnitud coincide con el valor correspondiente en ratas y humanos.

2.5. Cambios en el comportamiento humano inducidos por la radiación electromagnética

La información sobre los efectos de la radiación electromagnética en el comportamiento humano es muy limitada: se investigó la influencia de la radiación electromagnética de ondas milimétricas sobre el estado funcional de un operador al irradiar el punto biológicamente activo T[20] en la cabeza. Los resultados de la investigación demostraron que dicho impacto mejora significativamente el bienestar general y el estado funcional de los operadores, aumentando así su rendimiento laboral. Además, se intensifican los procesos nerviosos básicos en la corteza cerebral

Se puede obtener información indirecta sobre las reacciones del sistema nervioso de los operadores a partir de observaciones fenomenológicas, como observaciones fisiológicas del estado del sistema nervioso del personal que trabaja en condiciones de irradiación pulsada con ondas electromagnéticas de baja intensidad. La radiación presentaba los siguientes parámetros: frecuencia portadora – 1 GHz, frecuencia de repetición de paquetes de impulsos – 32 Hz, frecuencia de repetición de impulsos en el paquete – 250 Hz, densidad de flujo de potencia incidente en los puestos de trabajo – de 0,34 a 312 mKBT/cm^2 . Se registraron cambios estadísticamente significativos en la actividad funcional del sistema nervioso de los operadores, incluyendo disfunciones vegetativas. Se observaron síndrome de distonía neurocirculatoria (85 %), síndrome asténico (49 %), síndrome de vestibulopatía (31 %) y síndrome de polineuropatía (87 %). El desarrollo de estas alteraciones en el funcionamiento del sistema nervioso dependió de la antigüedad laboral y, por consiguiente, de la duración total de la exposición de los operadores.

Investigaciones clínicas del personal de la Fuerza Aérea de EE. UU. expuesto a radiación electromagnética mostraron que una parte significativa de los individuos examinados presentaba anomalías psíquicas. Se trata de quejas de un fuerte dolor de cabeza, que persistió durante varias semanas sin ningún tipo de síntomas neurológicos. Es necesario señalar que no se observaron alteraciones oftalmológicas ni neurológicas, que habitualmente se asocian en EE. UU. con una dosis excesiva de radiación electromagnética.

Se realizaron estudios socio-higiénicos que analizaron la relación entre las condiciones laborales y el estado de salud de especialistas expuestos regularmente a ondas electromagnéticas en aeropuertos. Los resultados mostraron un incremento estadísticamente significativo

de la frecuencia de enfermedades cardiovasculares y del sistema nervioso, así como un envejecimiento prematuro del organismo (en 3,5 años). Se detectaron alteraciones en los sistemas de defensa del organismo, con la consiguiente formación de inmunodeficiencia, en mayor medida en el personal que trabaja con radares que en personas en contacto con sistemas de radionavegación y sistemas de radiocomunicaciones.

Tratamiento de pacientes con úlcera gastroduodenal [3], incluyendo la irradiación a frecuencias de 58,0...59,5 y 63,5 GHz mediante guías de onda dieléctricas en contacto con puntos de acupuntura. El registro del EEG mostró el desarrollo de una reacción de desincronización del ritmo. En varias frecuencias del rango indicado, los pacientes manifestaron una reacción de inactivación de la actividad de fondo, acompañada de un estado emocional confortable y somnolencia.

2.6. Corrección dirigida del estado de los sistemas fisiológicos del organismo

Modulación del estado inmunitario

Los efectos biológicos de la radiación electromagnética pueden utilizarse para la corrección dirigida del estado del sistema inmunitario del organismo. Existe una serie de trabajos dedicados al estudio de la modificación del estado inmunitario mediante la acción de ondas electromagnéticas. Por ejemplo, se investigó la influencia de la radiación milimétrica en la supervivencia de ratones albinos en casos de infección gripal letal. Los regímenes de irradiación y los resultados de las pruebas se presentan en la tabla 2.2.

Según la tabla 2.2, la modificación del estado inmunitario de los ratones presenta un retardo temporal, y la magnitud de la modulación depende de la duración y el régimen de exposición.

Para la corrección dirigida de la respuesta del sistema inmunitario, se pueden utilizar generadores basados en diodos IMPATT. Investigaciones médicas han confirmado la eficacia de estos dispositivos en el tratamiento de disfunciones del sistema nervioso, alteraciones del sistema inmunitario y trastornos del metabolismo.

Tabla 2.2

Influencia de la radiación milimétrica en la duración de la vida de ratones infectados con el virus de la gripe.

Número de grupo	Régimen de irradiación	Longitud de onda, mm	Mortalidad animal, %	Duración media de la vida, días
1	14 días después de la infección	7,1	42 + 12	8,3
2	14 días antes de la infección	7,1	0	14,0
3	7 días antes de la infección	7,1	36 + 14	8,6
4	7 días antes y 14 días después de la infección	7,1	16 + 10	11,1
5	7 días antes y 14 días después de la infección	5,6	25 + 13	10,1
Control	—	—	70 + 14	7,6

En el trabajo de V.N. Zaporozhan [41] se demostró que la corrección del estado inmunitario mediante el uso de ondas milimétricas de baja intensidad permite limitar las alteraciones en el sistema inmunitario relacionadas con la supresión de los sistemas T y B de la inmunidad en el período postoperatorio. Al mismo tiempo, la modificación del estado inmunitario puede tener una dirección tanto positiva como negativa. Se estudió el efecto de la radiación electromagnética en células del sistema inmunitario de ratones. Los resultados mostraron que las ondas electromagnéticas con una frecuencia de 41,95 GHz suprimen la actividad de estas células en un 20 %. También se observó supresión al utilizar la misma radiación, aunque modulada con frecuencias de 16 y 50 Hz. Con una modulación a 1 Hz en el rango de frecuencias portadoras de 41,95...42,05 GHz, se registró una activación de las células del sistema inmunitario, mientras que en el rango de 41,8...41,9 GHz se detectó una supresión de su actividad. Por lo tanto, el régimen de exposición correspondiente puede modificar de forma dirigida el estado del sistema inmunitario del organismo.

Influencia reguladora sobre el sistema hematopoyético

En varias series de experimentos se estudió la posibilidad de regular la hematopoyesis en la médula ósea. En el trabajo de N.P. Didenko [15] se investigó la hematopoyesis en la médula ósea de los fémures de ratones, tanto en la extremidad irradiada como en la contralateral. Los animales se irradiaron durante una hora con ondas electromagnéticas de longitud de onda comprendida entre 7,00 y 7,30 mm y una densidad de flujo de potencia incidente de 10 mW/cm². Al tercer día después de la irradiación, se manifestó una leve reacción del brote eritroide con un ligero aumento en el número absoluto de basófilos.

de normoblastos. Un estudio retrospectivo del estado basal de los animales permitió identificar dos grupos. Grupo A: ratones, con un pronóstico de «sensibilidad» a la radiación electromagnética y caracterizados inicialmente por un bajo contenido de leucocitos en sangre periférica. Grupo B: animales «insensibles» con un contenido inicial elevado de leucocitos (superior a $12 \cdot 10^9 \text{ л}^{-1}$). Los cambios se observaron únicamente en la extremidad irradiada. En el grupo A se registró un aumento del 25 % en la cantidad total de elementos eritroides, incluyendo normoblastos basófilos.

Otra serie de experimentos [16] se dedicó a la investigación de la significación pronóstica del número inicial de eritrocitos en sangre periférica al exponerse a radiación electromagnética con los mismos parámetros que los utilizados por N.P. Didenko [15], para la hematopoyesis cerebral en ratones de la línea CBA. Los ratones se dividieron en dos grupos basándose en las mediciones eritropoyéticas: «bajo en eritrocitos», con un nivel inferior a $8 \cdot 10^6 \text{ л}^{-1}$, y «alto en eritrocitos», con un nivel que excede esta cantidad. Se descubrió que las alteraciones en la hematopoyesis de la médula ósea se iniciaban en los animales del primer grupo tras la exposición de la extremidad posterior izquierda, mientras que en los ratones del segundo grupo, ocurría tras la exposición de la extremidad posterior derecha.

Por lo tanto, el número de leucocitos y eritrocitos en sangre periférica es un indicador pronóstico del efecto regulador de la radiación electromagnética.

Iniciación de un efecto protector frente a factores ambientales perjudiciales

Entre los factores ambientales adversos, la contaminación química y los alérgenos biológicos naturales, que inducen enfermedades alérgicas, son los que más preocupan a ecólogos y médicos en los últimos tiempos. En estas enfermedades, es importante corregir el estado del sistema inmunitario desde la perspectiva de la inmunidad celular y humoral. El trabajo de V.P. Adaskevich [17] se dedicó al estudio de la radiación electromagnética de la banda milimétrica como un factor que inicia los procesos de corrección de los indicadores inmunológicos y neuroendocrinos en pacientes con dermatitis atópica. Los resultados del estudio demostraron que el uso de ondas electromagnéticas conlleva una mejora estable y una dinámica positiva de los indicadores inmunológicos (inmunoglobulinas E, M y G) y neuroendocrinos (T_3 , T_4 , cortisol, estradiol).

Los sistemas antioxidante y antitóxico de la sangre desempeñan un papel importante en la protección del organismo frente a efectos adversos. Se investigó la influencia de la radiación de baja intensidad, con una longitud de onda de 7,1 mm, sobre sistemas sanguíneos in vitro. Se encontró que dicha exposición incrementaba la actividad de la glutatión reductasa, la catalasa y la superóxido dismutasa. La glutatión peroxidasa y la glutatión S-transferasa no reaccionaron a esta exposición, mientras que la respuesta de la glucosa-6-fosfato deshidrogenasa dependió del nivel de actividad inicial. Cuando la actividad inicial era baja, la radiación electromagnética activaba esta enzima, mientras que, si era alta, disminuía su actividad. Por lo tanto, en este caso, el efecto fue de carácter correctivo.

Modificación de los efectos de la radiación ionizante

De los resultados de las investigaciones en este ámbito, cabe destacar, sobre todo, aquellos que se refieren a experimentos con dosis letales de radiación. Se describe un experimento sobre el efecto protector de las ondas electromagnéticas de rango milimétrico realizado en ratones albinos. Los resultados del experimento mostraron que la exposición previa de los animales a ondas electromagnéticas con una frecuencia de 42,19 GHz durante 10 días, o la exposición previa durante 5 días y una exposición durante 30 días tras la irradiación conllevan una reducción de la mortalidad de 1,6 a 2,0 veces, con una dosis de radiación de 6,5 Gy. La mortalidad de los ratones aumentó 3,3 veces cuando se expusieron a ondas electromagnéticas únicamente después de la exposición inicial.

Se utilizaron impulsos de microondas en experimentos sobre el efecto protector de la radiación electromagnética en ratones de la línea CBA. La exposición previa a estas ondas electromagnéticas durante 24 horas aumentó la supervivencia y el tiempo de vida medio en 10 veces con una dosis de radiación de 7,0 Gy, y en 3 veces con una dosis de 7,5 Gy. El tratamiento de animales con estas ondas electromagnéticas, simultáneamente a la exposición a radiación (7,0 Gy), condujo a un aumento de la supervivencia y del tiempo de vida medio de 5 veces en comparación con el grupo de control. Sin embargo, con una dosis de radiación de 8,0 Gy, las ondas electromagnéticas no mostraron un efecto protector.

Se realizó una exposición preliminar de ratones a ondas milimétricas durante 1 h, 2 h antes de la irradiación. Se registró un efecto protector de las ondas milimétricas con dosis de radiación de 3 a 8 Gy. El efecto protector más pronunciado se observó con una dosis de 4,0 Gy. Cabe destacar que la disminución del estrés en los animales,

debido a las condiciones experimentales, también condujo a un aumento de la supervivencia. Algunas condiciones experimentales por sí mismas, en particular la colocación de los animales en cámaras de irradiación, modificaron positivamente el efecto de la radiación ionizante, ya que el estrés hipodinámico induce una hipoxia estable, que condiciona un efecto radioprotector.

No obstante, dado que la disminución del grado de estrés hipocinético mediante la exposición a ondas milimétricas produjo un efecto protector por parte de las ondas electromagnéticas, los mecanismos subyacentes a estas exposiciones difieren en su naturaleza y presentan una direccionalidad opuesta.

2.7. Dependencia de los efectos locales y generales con respecto a la frecuencia de las ondas electromagnéticas, la tasa de absorción específica, el tiempo de exposición y el tipo de radiación (régimen continuo o pulsado).

La dependencia de los efectos biológicos de la radiación electromagnética de la banda milimétrica con sus parámetros se examina detalladamente en la revisión [19]. En primer lugar, se observa una dependencia de umbral de los efectos con respecto a la densidad de flujo de potencia incidente. En condiciones experimentales, especialmente durante la irradiación in vivo, es difícil determinar la potencia absorbida por el bioobjeto, pero es relativamente fácil controlar el nivel de potencia incidente. Si el experimento es correcto y las mediciones de la potencia reflejada y transmitida son exitosas, el balance de potencias permite determinar la magnitud de la potencia absorbida. En cualquier caso, el nivel de potencia incidente proporciona una estimación superior de la potencia absorbida por el bioobjeto. Por lo tanto, la densidad de flujo de potencia incidente es una buena medida de la interacción energética de los bioobjetos con las ondas electromagnéticas. En la Fig. 2.1 se presenta la dependencia experimental del coeficiente de inducción KI de la síntesis de colicina en función de la densidad de flujo de potencia incidente, como ejemplo del carácter de «umbral» de los efectos biológicos de las ondas electromagnéticas. De esta figura se deduce que el efecto comienza a manifestarse a partir de una cierta magnitud «umbral» de la densidad de flujo de potencia incidente, y que, para flujos más potentes, la magnitud del efecto se mantiene

invariable. La magnitud del umbral está determinada por las características del bioobjeto y las condiciones de la exposición.

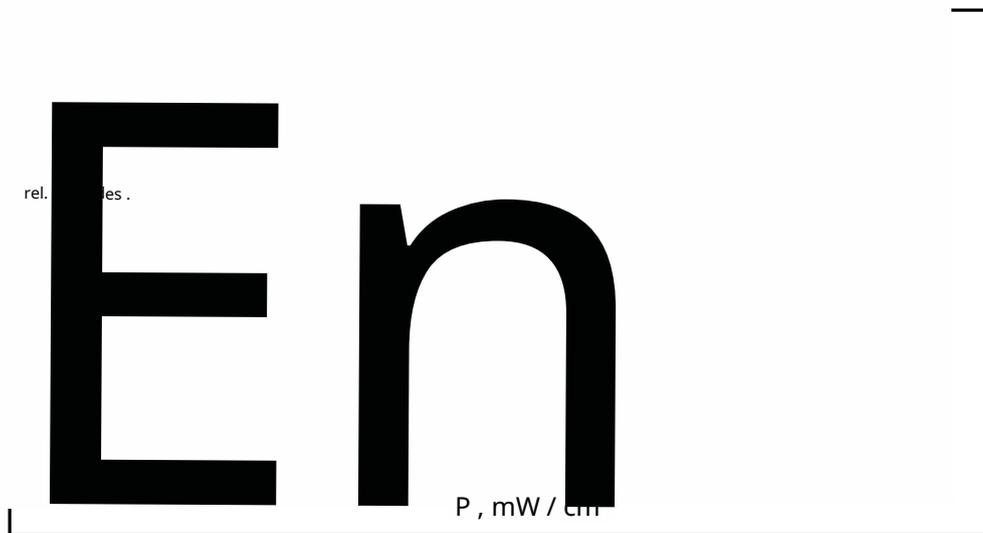


Fig. 2.1. Dependencia de la síntesis de colicina respecto a la densidad de potencia incidente

Una segunda característica de la interacción de ondas electromagnéticas con objetos biológicos es la resonancia de la respuesta de los biosistemas a la exposición electromagnética, lo que implica que la alteración del estado o función de un objeto biológico se observa únicamente bajo la acción de radiación electromagnética en un intervalo de frecuencia estrecho. La anchura relativa de este intervalo es del orden de 10^{-3} . Esto no implica que tales cambios en los bioobjetos se produzcan únicamente bajo la acción de la radiación electromagnética precisamente en este intervalo de frecuencia. Existen diversas frecuencias cuyo impacto provoca una respuesta cualitativamente idéntica en los biosistemas. Un ejemplo de esta situación puede ser la dependencia del coeficiente de inducción de colicina K_1 de la longitud de onda de la radiación incidente, que se muestra en la Fig. 2.2.

Se realizaron mediciones de la dependencia de la intensidad de la radiación electromagnética inherente al ser humano con respecto a la frecuencia de las ondas electromagnéticas incidentes. La exposición se realizó en el rango de frecuencias de 40 a 70 GHz, con una densidad de flujo de potencia incidente del orden de $1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$. La radiación inherente al ser humano se registró en el intervalo de frecuencias $(1,000 \pm 0,025)$ GHz. Los resultados de las mediciones indicaron que esta dependencia presenta un carácter resonante. La frecuencia central de esta resonancia se sitúa en torno a 57,8 GHz, y su anchura relativa era de 10^{-2} . Se observó que la respuesta a

el efecto electromagnético se observó con una intensidad de radiación incidente de 1 a 10 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$.

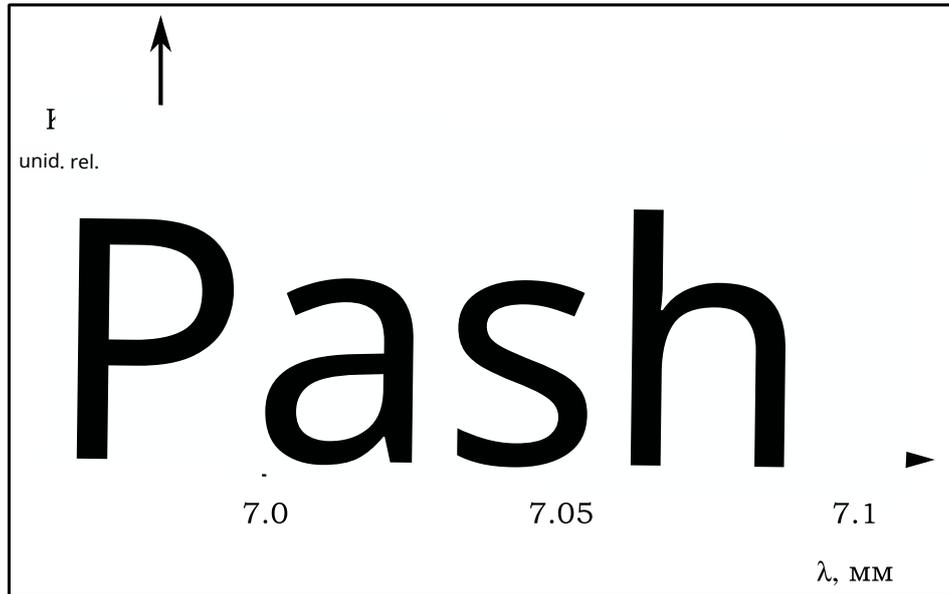


Fig. 2.2. Dependencia de la inducción de colicina con respecto a la longitud de onda

Los efectos generales que se manifiestan a nivel del organismo dependen de la localización y la duración de la irradiación con ondas electromagnéticas. Estas dependencias fueron investigadas en varios trabajos. La exposición a radiación electromagnética se realizó en ratones con longitudes de onda de 5,6 y 7,1 mm. La irradiación se efectuó durante 15, 30 y 60 minutos en las siguientes localizaciones: a) muslo izquierdo; b) muslo derecho; c) occipucio. El efecto se evaluó mediante la resistividad no específica, para lo cual se midió el contenido de peroxidasa, fosfatasas ácida y alcalina, lípidos en neutrófilos y la concentración de succinato y glicerofosfato deshidrogenasas en linfocitos.

Los datos obtenidos en este trabajo indican que, tras la exposición a radiación electromagnética con una longitud de onda de 5,6 mm durante 60 minutos, el efecto es menos pronunciado que con una duración de exposición de 15...30 minutos. En este último caso, se observó una disminución significativa del contenido de enzimas redox e hidrolíticas en neutrófilos y linfocitos, en comparación con el grupo control, durante los días 3 y 5. Los indicadores volvieron a sus valores iniciales al noveno día después de la irradiación. La adaptación a la radiación electromagnética con una longitud de onda de 7,1 mm se desarrolló más tarde y fue menos eficaz que en el caso de la irradiación a dicha longitud de onda.

5,6 mm. La localización de la exposición también modificó el efecto de las ondas electromagnéticas. La exposición durante la irradiación del occipucio fue más eficaz que la exposición de las superficies externas de los muslos.

En la mayoría de los estudios, la irradiación se realizó sobre la proyección de puntos de acupuntura. En este caso, el mecanismo de acción presentaba un carácter inespecífico que, sin embargo, no está asociado al calentamiento local. Se investigó el efecto de la radiación electromagnética con una frecuencia de 53,37 GHz sobre la presión arterial de ratas de la línea Vistar. La irradiación se aplicó en la zona del punto de acupuntura rēnchāng (tercio superior del surco vertical sobre el labio superior); la segunda zona fue la línea media del hueso nasal. La densidad de flujo de potencia incidente fue de 10 мкВт/см^2 . Los resultados del experimento mostraron que la radiación electromagnética afectaba únicamente a la presión arterial de las ratas SHR con hipertensión, pero no ejercía ningún efecto en las ratas Vistar. Через 4...6 min después del inicio de la irradiación, la presión arterial se modificaba de 147/101 a 114/62 mm. Una vez finalizada la irradiación, la presión arterial regresaba a su nivel inicial. El aumento de la densidad de flujo de potencia incidente hasta 100 μW/cm^2 provocaba un calentamiento de la zona irradiada de 3...4°C, sin que esto generase efectos adicionales. Los datos obtenidos indican que la acción de la radiación de baja intensidad en el rango de ondas milimétricas sobre los puntos de acupuntura no produce alteraciones en las funciones de un organismo sano, pero sí las normaliza en situaciones patológicas.

2.8. Conclusión

Por lo tanto, la exposición a radiación electromagnética con las características adecuadas se manifiesta en todos los sistemas del organismo. Los efectos más relevantes, desde el punto de vista biológico y médico, de la radiación electromagnética a nivel del organismo completo se recogen en la tabla 2.3.

Tabla 2.3

Efecto de la radiación de microondas en el organismo

Sistema	Lugar de exposición	Parámetros de la radiación	Resultados
Tejidos cutáneos	Área de la herida	42,96 GHz + modulación de 200 MHz	Aceleración de la cicatrización de heridas (estimulación del proceso de granulación)
	Piel del muslo		Asimetría de los efectos locales: Cambios en el flujo sanguíneo, número de mastocitos y linfocitos
	Piel en el área de la sutura	53,57 GHz, 4 mW/cm ²	Aceleración de la regeneración nerviosa
	Piel	42,25 GHz	Destrucción del citoplasma de fibras nerviosas mielinizadas y no mielinizadas
SNC	Área de la cabeza		Modificación de los parámetros del electroencefalograma: 1) Sincronización (aumento del número de oscilaciones fusiformes y ondas lentas); 2) Modificación de los biopotenciales de estructuras subcorticales (hipocampo, hipotálamo, núcleos del tálamo, núcleos reticulares del mesencéfalo)
SNC		58,0...59,6 GHz, 61,5 GHz	Desincronización del ritmo, activación de la actividad de fondo. Sensaciones sensoriales, coloración emocional positiva. Somnolencia.
SNC		42,2 GHz	Animales despiertos: sincronización. Animales narcotizados: aumento de las frecuencias altas y de los ritmos, aumento de la dinamicidad del SNC. Actividad epileptiforme, aparición de picos infrecuentes (2...4 Hz) de gran amplitud (> 300 mKB).
SNC	Punto 9.9 canal pericardá	53,596...53,613 GHz, Modulación de 0,05 Hz, <5 mW/cm ²	Aumento de la potencia de la componente espectral en el rango de los ritmos - y -, aumento de la frecuencia de seguimiento de los potenciales de acción de las fibras aferentes del nervio mediano. Sensaciones sensoriales
SNC		7,1 mm, 10 mW/cm ²	Efecto antiestrés: Normalización de los procesos de inhibición y activación (tálamo e hipotálamo).

Sistema nervioso vegetativo	Dorso de la mano	mm, 5 mW/cm ²	Cambio del ritmo cardíaco (0,05 Hz, 0,08...0,12 Hz, 0,15...0,5 Hz)
	Irradiación general	Irradiación crónica, Portadora 1GHz, Paquete 32Hz, En paquete 250Hz	Disfunciones autonómicas
	Punto джен-джан + línea media Nariz	53,52 GHz	Disminución de la presión arterial elevada
Sistema neuroendocrino		mm	Aumento brusco del nivel de serotonina y catecolaminas en los ganglios linfáticos.
Sistema simpatoadrenal	Región de la protuberancia occipital externa	5,6 mm, 7,1 mm, 10 mW/cm ²	Corrección de cambios adaptativos (modificación del metabolismo de catecolaminas y otros mediadores, indicadores citoquímicos de los linfocitos, estado morfológico de la sangre, reacción adecuada). Reacciones conductuales: efecto antiestrés en estrés no severo
Comportamiento (animales de laboratorio)		Pulso UWB. 5 kV/m, tiempo de pico 300 ps, duración 1,8 ns	Disminución del umbral de sensibilidad a la exposición ultrasónica
		M, dm, cm, 10 mW/cm ²	Retraso en la formación de reflejos condicionados
		Sinusoidal de 30 MHz. mód. 2...5 Hz, 30...120 V/m	Bloqueo de la producción de reflejos condicionados
		0,25...2,5 GHz, 5...10 ns, frecuencia rep. 60 GHz	Mejora del aprendizaje y la memoria
Operadores	Área del gran abultamiento de la superficie posterior de la cabeza	53,57 GHz, 42,25 GHz, 10 mW/cm ²	Reacciones conductuales: efecto antiestrés en estrés no severo
	Punto T [20] Conducto parietal	mm	Aumento de la capacidad de trabajo Mejora del estado funcional, aumento de la movilidad de los principales procesos nerviosos en la corteza cerebral

Correc- ción del estado fisioló- gico	Irradiación general	53,57 GHz, 42,25 GHz	Aumento de la supervivencia ante la infección por gripe letal
	In vitro	42,25 GHz	Corrección de los sistemas antioxidante y antitóxico de la sangre
	extremidades	mm	
38,96...42,31 GHz, 10 mW/cm ²			Cambio en el brote eritroide: Aumento de la cantidad de eritrocitos y leucocitos en la sangre perifé- rica.
Modifica- ción de la acción de la ra- diación io- nizante	Irradiación general	42,19 GHz, 42,19 ± 0,19 GHz	Disminución de la mortalidad tras la irradiación. Corrección del estado del sistema inmunitario.

Lista de referencias bibliográficas del capítulo

1. Alteraciones cutáneas tras la exposición a radiación electromagnética de ondas milimétricas / V.M. Perel'muter [et al.] // Actas del VII Seminario de la Unión Soviética «Aplicación de la radiación de microondas de baja intensidad en biología y medicina». Moscú, 1989 – M., 1989. – Pág. 53.
2. Krylov V.N., Oshevsky I.V. Influencia de la exposición EHF sobre el tejido muscular liso aislado del intestino de ratas // Ondas milimétricas en biología y medicina. – 2000. – N° 2. – Págs. 11–14.
3. Resultados preliminares del uso de criterios electroencefalográficos para la selección de la frecuencia terapéutica de la radiación electromagnética de rango milimétrico en el tratamiento de úlceras gastroduodenales / Alisov A.P. [et al.] // Resúmenes del VII Seminario de la Unión Soviética «Uso de radiación electromagnética de baja intensidad de rango milimétrico en biología y medicina», Moscú, 1989. – M., 1989. – P. 8.
4. Lebedeva N.N., Kotrovskaya T.I. Estudios experimentales y clínicos en el campo de los efectos biológicos de las ondas milimétricas (revisión, parte 1) // Ondas milimétricas en biología y medicina. – 1999. – N.º 4. – P. 3–13.
5. Jólodov, Yu.A. Actividad eléctrica epileptiforme del cerebro bajo la influencia de campos electromagnéticos // Campos electromagnéticos po

- y la salud humana: materiales de la II [segunda] conferencia internacional. conferencia «Problemas de seguridad electromagnética humana. Investigación fundamental y aplicada. Normalización de los campos electromagnéticos (CEM): filosofía, criterios y armonización». Moscú, 20–24 de septiembre de 1999. – M., 1999. – C. 73–74.
6. Sidorenko A.V., Tsaryuk V.V. Actividad bioeléctrica cerebral bajo irradiación de microondas en un experimento // Ondas milimétricas en biología y medicina. – 2000. – № 4. – C. 12–20.
 7. Kholodov Yu.A. Radiación milimétrica en neurobiología // Actas del X Simposio de toda Rusia «Ondas milimétricas en biología y medicina». Moscú, 24–26 de abril de 1995. – Pág. 155–156.
 8. Efecto de la radiación electromagnética de frecuencia milimétrica en la localización del impacto en ratas con diferentes características tipológicas / N.A. Temuryants [y otros] // Ondas milimétricas en biología y medicina. – 1993 – N.º 2. – Pág. 51–59.
 9. Asimetría del síndrome de adaptación que se desarrolla bajo la influencia de la radiación electromagnética de frecuencia milimétrica / V.M. Perelmutter [y otros] // Resúmenes del VII Seminario de toda la Unión «Aplicación de la radiación de microondas de baja intensidad en biología y medicina». Moscú, 1989. – M., 1989. – Pág. 63.
 10. Dependencia del efecto antiestrés de la radiación electromagnética de EHF de los parámetros de exposición / N.A. Temur'yants [et al.] // Ondas milimétricas en biología y medicina. – 1994. – № 3. – C. 11–15.
 11. Investigación del efecto estresoprotector de las ondas electromagnéticas de la banda de EHF en animales / A.Yu. Arzumanov [et al.] // Ondas milimétricas en biología y medicina. – 1994. – № 3. – C. 5–10.
 12. Lebedeva N.N., Sulimova O.P. Efecto modificador de las ondas milimétricas sobre el estado funcional del sistema nervioso central humano durante la simulación de estrés // Ondas milimétricas en biología y medicina. – 1994. – № 3. – C. 16–21.
 13. Martynyuk V.S., Temuryants N.A. Papel de la peroxidación lipídica y el intercambio tiol-disulfuro en los mecanismos de acción antiestrés de la radiación electromagnética de frecuencia extremadamente alta // Ondas milimétricas en biología y medicina. – 1995. – № 5. – C. 6–9.
 14. Influencia de la radiación electromagnética de frecuencia extremadamente alta en el estado de los sistemas endocrino, inmunitario y proteolítico en pacientes tras la extirpación quirúrgica de tumores benignos de ovario / V.N. Zaporozhan [et al.] // Actas del XI Simposio de toda Rusia «Ondas milimétricas en biología y medicina». Moscú, 21–24 de abril de 1997 – M., 1997. – Pág. 36–38.

15. Posibilidad de predicción y control del efecto estimulante de la radiación electromagnética sobre la eritropoyesis en ratones blancos no consanguíneos / N. P. Didenko [y otros]. – 7 p. – Dep. VINITI 26.11.85, n.º 8154-И85.
16. Dependencia del carácter de la reacción de los sistemas eritroide y linfoide de su estado inicial ante la exposición a oscilaciones electromagnéticas de rango milimétrico / N. P. Didenko [y otros] // «Aplicación de la radiación milimétrica de baja intensidad en biología y medicina». – M.: IRÉ AN SSSR, 1985. – Pág. 108–116.
17. Adaskevich V.P. Eficacia clínica, acción inmunorreguladora y neurohumoral de la terapia con ondas milimétricas y microondas en la dermatitis atópica // Ondas milimétricas en biología y medicina. – 1995. – N.º 6. – Pág. 30–38.
18. Rezunkov A.G., Rezunkova O.N. Estudio de la influencia modificadora de la exposición previa a microondas sobre la supervivencia en la enfermedad por radiación // Ondas milimétricas en biología y medicina. – 1993. – N.º 2. – Pág. 59–62.
19. Lebedeva N.N., Kotrovskaya E.I. Investigaciones experimentales y clínicas en el campo de los efectos biológicos de las ondas milimétricas (revisión, parte 1) // Ondas milimétricas en biología y medicina. – 1999. – N.º 3(15) – Pág. 3–13.

3. EFECTOS PATÓGENOS DE LA RADIACIÓN EM DE MICROONDAS

En el capítulo anterior se examinaron los efectos reguladores de la radiación electromagnética sobre los sistemas del organismo. Sin embargo, se debe prestar especial atención a los efectos patógenos de las ondas electromagnéticas en los sistemas de importancia vital. Estos incluyen, principalmente, los sistemas hereditario, reproductivo y neuroendocrino. También es importante comprender el grado de irreversibilidad de tales efectos y las condiciones en que sus manifestaciones son más significativas. Este capítulo se dedica a la revisión de dichos trabajos. En el § 3.1 se examina la influencia patógena de las ondas electromagnéticas sobre el genoma. En el § 3.2 se analizan los posibles mecanismos de impacto de la radiación electromagnética no térmica en el sistema reproductor del organismo. Las alteraciones en el sistema neuroendocrino, causadas por la influencia de los campos electromagnéticos, son el tema del § 3.3. El parágrafo 3.4 se dedica al estudio de la reversibilidad de los efectos patógenos de la radiación electromagnética.

3.1. Alteraciones del genoma: efecto mutágeno, malformaciones del desarrollo (influencia teratógena)

La influencia directa de la radiación electromagnética en el genoma se observó en el trabajo de G. Lay y N. Sinha [1], en el que se investigó el efecto de impulsos de microondas con una frecuencia portadora de 2,45 GHz y una densidad de flujo de potencia incidente de 2 mW/cm^2 en ratas adultas Sprague-Dawley. Se investigaron células del cerebro de las ratas mediante electroforesis en agarosa 4 horas después de una irradiación de 2 horas. Los resultados mostraron la presencia de roturas de cadena sencilla y doble en el ADN. Estas rupturas no se observaron si, antes o inmediatamente después de la exposición a la radiación, se inyectaba melatonina por vía subcutánea a las ratas o N-terc-butil- α -fenilnitrona por vía intraperitoneal como un eliminador de radicales libres.

Estos resultados sugieren que el impacto de la radiación electromagnética en el genoma es de carácter indirecto. El mecanismo esquemático de acción se muestra en la fig. 3.1. La radiación electromagnética inicia la formación de radicales libres, cuya acción sobre las moléculas de ADN conduce a rupturas en las hebras simples y dobles de estas moléculas. En esta etapa, el impacto de las ondas electromagnéticas es análogo al efecto de la radiación ionizante, si bien los mecanismos de formación de radicales libres son diferentes.

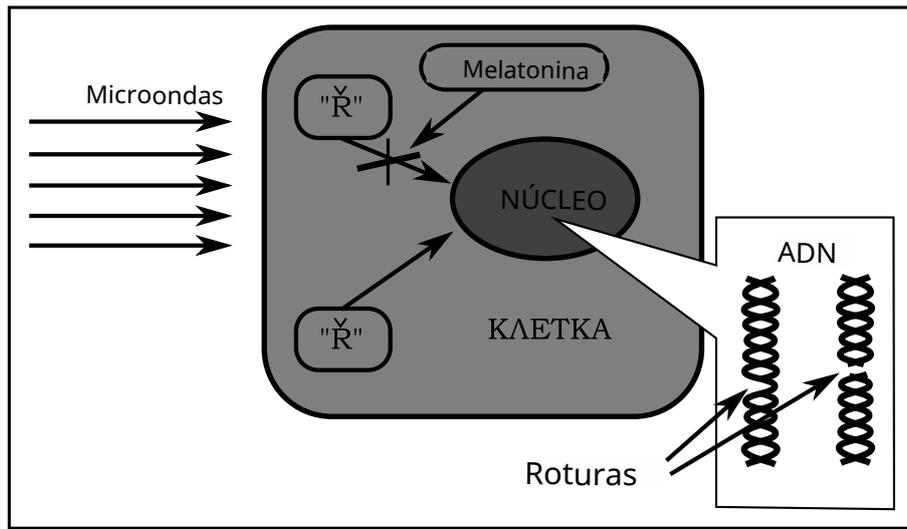


Fig. 3.1. Daño en las hebras de ADN de neuronas de ratas causado por radicales libres (R) formados tras la exposición a radiación de microondas pulsada.

Se obtuvieron resultados opuestos al utilizar dos tipos de modulación de frecuencia: radiación continua modulada en frecuencia, con una frecuencia central de 835,62 MHz, y modulación de código con un valor medio de frecuencia de 847,74 MHz y una tasa de absorción específica de potencia de 0,6 W/kg [2]. La influencia del calentamiento se excluyó manteniendo una temperatura constante de 37,0 °C. La exposición de un cultivo de células de mamífero (células de fibroblastos de ratón C3H 10T1/2 y células de glioblastoma humano – U87MG) no causa daño en el ADN, lo que se confirmó mediante los resultados del ensayo cometa alcalino.

Se realizó un estudio indirecto de los efectos de la radiación electromagnética sobre el genoma en *Drosophila* [3]. Se irradiaron embriones de *Drosophila* de 1,5 y 15 horas de edad con un flujo continuo de potencia a una frecuencia de 460 MHz. El efecto de la exposición se evaluó mediante la magnitud del desarrollo interrumpido, definido como el porcentaje de imagos no eclosionados en relación con el número de embriones, lo cual representa una medida de la manifestación extrema

de la teratogénesis. No se detectó influencia de la señal de radiofrecuencia en el porcentaje de desarrollo interrumpido de embriones de 1 y 5 horas de edad. Para embriones de 15 horas, el efecto dependía de la dosis de potencia absorbida. El porcentaje de desarrollo interrumpido aumentó 1,4 veces únicamente con una tasa de absorción específica de 6 W/kg.

La aparición de alteraciones inducidas por radiación electromagnética de radiofrecuencia en el genoma de los linfocitos de sangre periférica en personas expuestas como consecuencia de su actividad profesional, se observa en el trabajo de N.D. Deviatkov et al. [4]. La presencia de alteraciones en el genoma se determinó mediante la mayor frecuencia de micronúcleos y la modificación de la distribución celular en las clases mitóticas primera, segunda y tercera. La irradiación de linfocitos con un campo electromagnético de frecuencia 50 Hz también introduce alteraciones en el genoma de estas células. En la irradiación de linfocitos con el virus de Epstein-Barr en estado latente, se registró un aumento en el número de células que expresaban el antígeno de dicho virus [5]. Esto indica alteraciones en el ADN que modifican la lectura de la información genética, bajo la influencia de la radiación electromagnética externa. También se observan alteraciones en los cromosomas de los leucocitos en los estudios de N.P. Didenko et al. [6].

Entre las consecuencias del efecto mutagénico de la radiación electromagnética cabe incluir la aparición de tumores, asociada a la alteración de la información genética. No obstante, el estudio de la posibilidad de un efecto carcinogénico de la radiación de microondas suele arrojar un resultado negativo. La posibilidad de un aumento en la propagación del cáncer por exposición a la radiación de radiofrecuencia se indica en el artículo de J. Goldsmith [6]. En la revisión de L. Vershaeva [7] se analizan informes en los que la mayoría de los investigadores detectaron un aumento en la frecuencia de enfermedades como la leucemia y los tumores del SNC en niños expuestos a radiación electromagnética.

Para explicar el mecanismo de los efectos de la radiación de microondas de baja potencia y los campos de radiofrecuencia en sistemas biológicos, en condiciones donde la temperatura del objeto de estudio no varía significativamente durante el experimento, se ha propuesto la hipótesis de que, que dosis no térmicas de radiación de microondas y radiofrecuencia pueden desencadenar una cascada de reacciones, en particular la peroxidación lipídica con la formación de radicales libres de oxígeno, que conducen a la mutagénesis y la carcinogénesis [8].

3.2. Efectos sobre el sistema sexual (reproductor)

Los cambios en el genoma bajo la influencia de la radiación electromagnética, considerados en el párrafo anterior, sin duda pueden tener consecuencias reproductivas. Una posible manifestación de tal influencia en el genoma es la alteración de la proporción de sexos detectada en el trabajo de V. James [9]. La exposición de madres a campos electromagnéticos de alta frecuencia resultó en una mayor proporción de nacimientos de niñas. Es significativo que esta influencia difiera de la acción de la radiación ionizante, que causa mutaciones letales ligadas al sexo.

Sin embargo, los cambios en la proporción de sexos también podrían estar relacionados con la modificación del funcionamiento del sistema reproductor. En el trabajo de M. Akdag et al. [10] se demuestra que la radiación de microondas influye sustancialmente en el sistema reproductor. En el curso de la investigación, ratas macho de la línea Sprague-Dawley fueron irradiadas con ondas electromagnéticas de una frecuencia de 9,45 GHz, con una densidad de flujo de potencia incidente de $2,65 \text{ mW/cm}^2$ y una tasa de absorción específica de $1,8 \text{ W/kg}$ diariamente durante 1 h, durante 13, 26, 39 y 52 días. Se detectó una disminución notable del líquido seminal en los epidídimos, pero solo tras una exposición de 52 días. El porcentaje de líquido seminal anómalo cambió notablemente tras 26, 39 y 52 días de irradiación, observándose también cambios significativos en el peso de los testículos y los epidídimos.

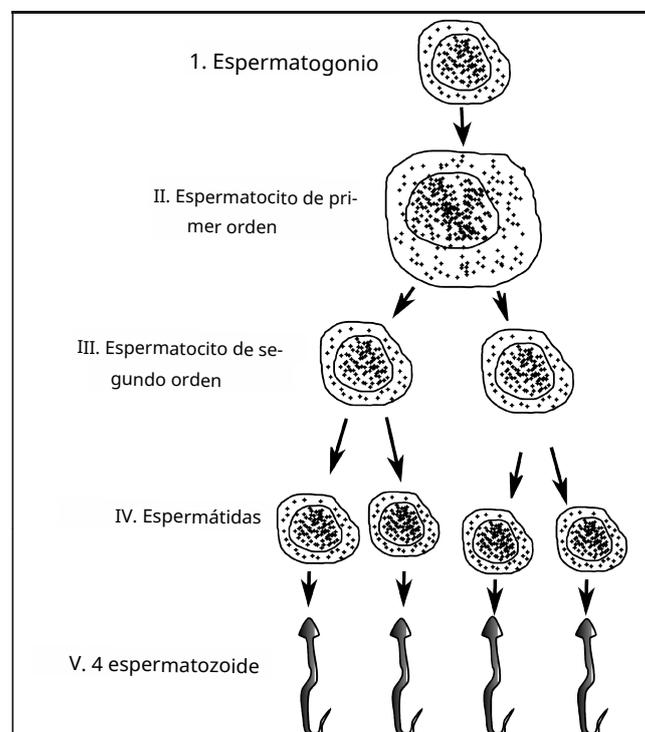


Fig. 3.2. Esquema de la espermatogénesis

En los testículos de las ratas expuestas se observaron cambios necróticos en los túbulos, edema intersticial, disminución de la espermatogénesis y, en algunos túbulos, ausencia de epitelio germinal. En la Fig. 3.2 se representa el proceso de espermatogénesis. La radiación de microondas altera la espermatogénesis en los túbulos seminíferos: en la etapa I provoca la inhibición de la diferenciación de las espermátogonias; en las etapas II–IV, necrosis de las células precursoras de los espermatozoides. En los anexos se observaron atrofia, edema intersticial, infiltración celular y una actividad aumentada de los fibroblastos.

De este modo, la exposición crónica a radiación de microondas de baja intensidad induce cambios en el estado funcional y morfológico del sistema reproductor. Aparentemente, los cambios morfofuncionales en el sistema reproductor, similares a los descritos anteriormente, conllevan un aumento de la frecuencia de resultados reproductivos adversos, especialmente abortos espontáneos.

3.3. Alteraciones de la regulación neuroendocrina

Además de los sistemas examinados anteriormente, la respuesta rápida a la exposición a la radiación electromagnética también es inherente al sistema neuroendocrino. En el trabajo de N.I. Karpikova y S.N. Lukyanova [11] se considera la influencia de la radiación de microondas modulada sobre el sistema neuroendocrino. La radiación incidente presentaba las siguientes características: frecuencia portadora: 1 GHz, frecuencia de impulsos: 250 Hz, frecuencia de ráfagas: 32 Hz, densidad de flujo de potencia incidente en los puestos de trabajo: desde 0,34 a 314 mW/cm^2 . La evaluación clínico-neurofisiológica del estado de salud del personal que trabaja en estas condiciones revela el desarrollo de cambios estadísticamente significativos en el funcionamiento del sistema nervioso. La fenomenología de estos cambios se manifiesta como un complejo sintomático de disfunciones vegetativas: síndrome de distonía neurovegetativa (DNV – 85 %), síndrome asténico (49 %), síndrome de vestibulopatía (21 %) y síndrome de polineuropatía (87 %). El desarrollo del síndrome de disfunción vegetativa depende de la antigüedad laboral: 1–5 años – DVS de tipo hipertónico, 6–25 años – DVS de tipo masivo, 26–35 años – hipertensión arterial.

Es posible una reacción general del sistema neuroendocrino a la irradiación local aguda con ondas de microondas. En el artículo de P. Marchiori [12] describe un caso de neuropatía aguda múltiple tras una exposición accidental a la radiación de un horno de microondas con un bloqueo de radiación defectuoso al abrir la puerta. La víctima introdujo la mano derecha en la cámara del horno, apoyó la izquierda en la puerta y miró al interior de la cámara abierta. A los 10 minutos, sintió entumecimiento y hormigueo en las yemas de los dedos de la mano derecha. Al día siguiente, apareció un dolor urente en la mano derecha. Posteriormente, surgieron parestesias y una disminución de la sensibilidad en la mano izquierda. Transcurridos 10 días, se intensificaron las sensaciones dolorosas y aparecieron alteraciones distróficas en las uñas de la mano derecha. Aparecieron alteraciones de la sensibilidad en la hemiface derecha, disminuyendo la agudeza visual del ojo derecho.

Las alteraciones del estado funcional del SNC también se manifiestan en condiciones de exposición a radiación de microondas con fines terapéuticos. En el trabajo de A.A. Kovalev [13] se estudió la organización espacial de los procesos corticales y la significación funcional de su dinámica bajo la influencia de la radiación electromagnética de ondas milimétricas (OEM) de intensidad atérmica. Se practicó un examen electroencefalográfico durante la exposición local a radiación EHF a 85 pacientes, con edades entre 18 y 56 años, que recibían tratamiento hospitalario por patología visceral crónica sin signos de afectación del sistema nervioso central (SNC). Se observó una reorganización de la composición coherente del EEG en áreas de banda estrecha individuales del rango alfa, sobre un fondo de indicadores psicossomáticos normales característicos del estado del organismo, o una normalización inducida por la radiación de ondas milimétricas de baja intensidad (KBЧ). En presencia de desviaciones patológicas incorregibles del estado funcional de la esfera de inervación somatovisceral, los cambios predominantes en la sincronización espacial se manifestaron en la activación de una estructura coherente de orden 15. Posiblemente, estas manifestaciones reflejan el funcionamiento del mecanismo de regulación de la homeostasis.

Tras la aplicación local de diversos campos electromagnéticos, se observó una indicación sensorial similar en humanos [14]. Las leves sensaciones que surgen sugieren la participación del sistema nociceptivo en las reacciones a la radiación electromagnética, es decir, el carácter doloroso de la reacción. En estudios de EEG en humanos, se observó una reacción de sincronización. En las reacciones a las ondas electromagnéticas, se ha observado un gran interés en las regiones anteriores del hemisferio derecho del cerebro. El predominio de la actividad de ondas lentas en el EEG concuerda con la influencia inhibidora de la radiación electromagnética sobre la actividad refleja condicionada. Los procesos de forma□

ción y conservación de reflejos condicionados son más vulnerables. El autor llega a la conclusión de que совокупность реакций мозга свидетельствует о начальной адаптационной реакции мозга на ЭМП, que desempeña un papel importante tanto en el efecto terapéutico como patógeno de las ЭМП en el organismo.

3.4. Reversibilidad de los cambios en sistemas sensibles a la exposición a la radiación electromagnética de microondas (REM) del -rango-.

En escasas investigaciones, al describir los efectos patógenos, los autores evalúan la reversibilidad de los cambios y las consecuencias tardías del uso de la radiación de microondas. Se demostró la reversibilidad de la alteración de la espermatogénesis en ratas tras una exposición prolongada (durante 3 meses) a un campo electromagnético con una longitud de onda de 8 mm y una potencia de 35 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ [15]. Tres meses después de finalizar la irradiación continua, la cantidad de espermatozoides no solo se recuperó, sino que superó el nivel inicial.

En la aplicación de terapia a 528 pacientes con diversas patologías, utilizando equipos de terapia de microondas de rango milimétrico de nivel atérmico [16], se observaron alteraciones cutáneas en 3 pacientes. Caso de la paciente M. (36 años), tratada por poliartritis reumatoide, que al quinto día de la terapia de microondas, coincidiendo con la disminución de los síntomas de la enfermedad principal, presentó una complicación: una erupción pruriginosa en la región torácica y abdominal, que al séptimo día se extendió a todo el cuerpo. Diez días después de interrumpir la terapia con microondas, la erupción desapareció. Al repetir el ciclo de terapia con microondas a los 3 meses, la complicación recidivó. Paciente Я. (46 años) recibió 2 ciclos de terapia (18 y 15 procedimientos) para el tratamiento de psoriasis. Durante cada ciclo, entre el 5.º y el 7.º día, apareció una erupción urticaria pruriginosa por todo el cuerpo, que remitía al finalizar el tratamiento. Paciente Г. (54 años) recibió 3 ciclos de terapia para el tratamiento de la úlcera duodenal. Entre el 5º y el 7º día de cada ciclo de tratamiento apareció una erupción pruriginosa de tipo urticaria en todo el cuerpo. Tras la interrupción del tratamiento, la erupción desaparecía. En todos los casos, el tratamiento de la enfermedad subyacente fue efectivo.

El análisis de los resultados de la exposición a la radiación de microondas permite concluir que la base de la acción patógena podría ser la acti-

vacación de la peroxidación lipídica con la formación de radicales libres de oxígeno. Estos últimos dañan el genoma, condicionando mutaciones que subyacen tanto a la teratogénesis (aumento del porcentaje de no eclosión de imagos de *Drosophila*) como a la carcinogénesis. Los efectos dependen en gran medida del nivel de potencia absorbida y del tiempo de exposición a la radiación de microondas. Al igual que ocurre con la acción de otros factores físicos, tóxicos y estresantes, la espermatogénesis es uno de los sistemas más sensibles a la exposición a un campo de microondas. Bajo la influencia de la radiación de microondas pulsátil, las personas pueden experimentar alteraciones significativas en el funcionamiento del SNC. Esto no resulta sorprendente, ya que incluso la exposición a la radiación de microondas con parámetros terapéuticos conlleva cambios en las características del EEG. Es importante destacar que las alteraciones detectadas en la actividad refleja condicionada presentan un carácter estereotípico, en cierta medida, y no dependen de los parámetros de la radiación electromagnética (desde las bajas frecuencias hasta los campos del rango milimétrico).

Cabe coincidir con M. Liang y V. Zang [17] en que el principal problema del estudio de la influencia de la radiación de microondas en la población humana es la falta de claridad sobre los mecanismos biológicos y la escasez de pruebas experimentales de los efectos.

Lista de referencias bibliográficas del capítulo

1. Henry L., Narendra S.P. Melatonin and a sping-trap compound block radiofrequency electromagnetic radiation-induced DNA strand breaks in rat brain cells // *Bioelectromagnetics*. – 1997. – № 6. – P. 446–454.
2. Measurement of DNA damage after exposure to 2450 MHz electromagnetic radiation / R.S. Malyapa [et al.] // *Radiat. Res.* – 1997. – № 6. – P. 608–617.
3. Bolshakov M.A. Efecto de la radiación electromagnética de 460 MHz en embriones de *Drosophila* de diferentes edades / M.A. Bolshakov, I.R. Kn-yazeva, E.V. Evdokimov // I Simposio Internacional «Fundament. Ciencias y alternativas. med.». Pushchino, 22–25 de septiembre de 1997. – Pushchino, 1997. – Pág. 52–53.
4. Garaj-Vrhovac V. Micronucleus assay and lymphocyte mitotic activity in risk assessment of occupational exposure to microwave radiation // *Chemosphere*. – 1999. – V. 39 (13). – P. 2301–2312.
5. Magnetic fields and childhood cancer – a pooled analysis of two Scandinavian studies / M. Feychting [et al.] // *Energ. Sante*. – 1996. – V. 2. – P. 303–304.

6. Goldsmith J. R. Epidemiological studies of radio-frequency radiation: Current status and areas of concern // Int. Conf. «Eff. RF-Electromagn. Radiat. Org.». Skrunđa, June 17–21 1994. – Sci. Total Environ., 1996. – № 1. – C. 3–8.
7. Verschaeve L. Can non ionizing radiation induce cancer? // J. Cancer. – 1995. – V. 5. – P. 237–249.
8. Sarkar S. Biological consequences of microwave stress: Implications for mutagenesis and carcinogenesis / S. Sarkar, W. Selvamurthy, M.M. Gupta // IETE Techn. Rev. – 1997. – V. 3. – P. 153–163.
9. James W.H. The sex ratios of offspring of people exposed to non-ionizing radiation // Occup. and Environ. Med. – 1997. – № 8. – P. 622–623.
10. Effect of chronic low-intensity microwave radiation on sperm count, sperm morphology, and testicular and epididymal tissues of rats / M.Z. Akdag [et al.] // Electro- and Magnetobiol. – 1999. – № 2. – P. 133–145.
11. Karpikova N.I., Lukyanova S.N. Estudio clínico-neurofisiológico del estado del sistema nervioso trabajando en condiciones de irradiación de microondas (CBЧ) pulsada de baja intensidad. III Congreso sobre investigación en radiación. «Radiobiol., radioekol., radiats. bezopas». Moscú, 14–17 de octubre de 1997 – Pushchino, 1997. – T. 3. – C. 188–189.
12. Acute multiple mononeuropathy after accidental exposure to oven microwaves / P.E. Marchiori [et al.] // Occup. Med. – 1995. – V. 5. – P. 276–277.
13. Kovalev A.A. Efectos no conscientes de la influencia de las radiaciones electromagnéticas no térmicas de rango milimétrico sobre los componentes integrativos de la autorregulación de la homeostasis del organismo humano / / Millimetrovye volny v biol. i med. – 1997. – № 9–10. – C. 18–24.
14. Jolodov Yu.A. Reacción adaptativa inicial del cerebro a los campos electromagnéticos // Ondas milimétricas en medicina y biología. – 1997. – Pág. 156–157.
15. Algunos indicadores de la espermatogénesis de ratas tras la exposición a microondas / A.V. Lyulko [y otros] // V Seminario de toda la Unión «Aplicación de la radiación de EHF de baja intensidad en biología y medicina». Moscú, 1989 г. – M., 1989. – Pág. 66–67.
16. Gunko V.T., Kozhina N.M. Sobre algunas complicaciones de la terapia EHF // Ondas milimétricas en biología y medicina. – 1993. – N.º 2. – Págs. 102–103.
17. Mingshan L., Wenyan Zh.. Influence of microwave radiation on superoxidodismutase and fat peroxide products of mices // Dongwuxue zazhi. – 1995. – № 6. – P. 24–27.

4. EFECTOS TERAPÉUTICOS DE LA RADIACIÓN EM DEL RANGO DE MICROONDAS

Como se demostró en el capítulo 1, la influencia de la radiación electromagnética puede tener una dirección positiva o negativa desde un punto de vista biológico. Las manifestaciones patológicas de esta influencia se examinaron detalladamente en el capítulo anterior. No obstante, numerosos estudios que han demostrado diversos efectos de la radiación de microondas en objetos biológicos de diferentes niveles de organización permiten considerarlos como base para una evaluación exhaustiva de la posibilidad de utilizar la radiación de microondas en la terapia de diversas enfermedades. Este capítulo está dedicado precisamente a las aplicaciones terapéuticas de las ondas electromagnéticas. En el § 4.1 se realiza una breve revisión de los efectos terapéuticos de la radiación electromagnética con niveles de potencia térmica. El párrafo 4.2 se dedica al análisis del efecto terapéutico de las ondas electromagnéticas con un nivel de potencia atérmico. Secciones individuales están dedicadas a la terapia de microondas aplicada a los sistemas más importantes del organismo humano. En el § 4.3 se examina la influencia terapéutica de la radiación electromagnética sobre el sistema hematopoyético. Los efectos terapéuticos de las ondas electromagnéticas en el sistema inmunitario son el tema del § 4.4. El párrafo 4.5 se centra en el impacto de la radiación electromagnética en la curación de úlceras del tracto gastrointestinal. En el § 4.6 se examinan cuestiones relativas a la estimulación electromagnética de la regeneración del tejido óseo. El párrafo 4.7 está dedicado a la determinación de la dependencia de los efectos terapéuticos de la radiación electromagnética con respecto a sus parámetros

4.1. Efectos terapéuticos de la radiación electromagnética (REM) de la banda de microondas a nivel de potencia térmica

Los efectos terapéuticos de la radiación electromagnética se relacionan con el calentamiento de los tejidos biológicos. La literatura recoge datos sobre reacciones termorreguladoras en humanos tras la irradiación total con microondas, que inducen un aumento de la temperatura en los tejidos profundos. Al determinar el umbral de percepción del impacto térmico en la región media de la espalda de hombres adultos, se observó que la sensibilidad aumenta monótonamente con el incremento de la frecuencia de la radiación de microondas en el intervalo de frecuencias de 2,5 a 94 GHz. El umbral, determinado a una frecuencia de 94 GHz, resultó ser más de un orden de magnitud inferior al obtenido a una frecuencia de 2,5 GHz, y comparable con el umbral de percepción de la radiación IR [1]. A frecuencias más bajas, los efectos asociados al impacto térmico podrían no ir acompañados de una fuerte percepción sensorial.

4.2. Efectos terapéuticos de la radiación electromagnética de microondas (REM) en el -rango de potencia atérmica-.

En una publicación de 1998, Una revisión de la OMS analizó en 1998 los efectos biológicos de los campos electromagnéticos de radiofrecuencia (de 10 MHz a 300 GHz) de baja intensidad [2]. En ella se identificaron numerosas lagunas de conocimiento en este campo, lo que requiere investigaciones adicionales. Asimismo, se señaló la existencia de publicaciones sobre la aplicación terapéutica de la radiación electromagnética de baja intensidad.

Se ha evaluado la posibilidad de tratar patologías de la glándula tiroidea utilizando radiación de baja intensidad en el rango de ondas milimétricas [3]. La terapia de 284 pacientes con bocio tóxico difuso, bocio difuso no tóxico y formas nodulares de bocio produjo una disminución del volumen glandular en la mayoría de los pacientes. Como resultado de la terapia, en pacientes con bocio difuso tirotoxicósico se normalizaron los niveles séricos de linfocitos T_3 y T_4 , y se resolvió el síndrome de tirotoxicosis. En ninguno de los grupos de observación, los autores detectaron efectos secundarios negativos asociados a la terapia con ondas milimétricas.

La exposición de puntos de acupuntura a radiación milimétrica de baja intensidad en pacientes (16 días, 5 minutos en 5...7 puntos) con ictus isquémico produjo efectos terapéuticos notables [4]. Se observó una recuperación del habla más temprana, y la evolución de la enfermedad se complicó con el desarrollo de neumonía con una frecuencia casi 3,5 veces menor.

Para el tratamiento de la hiperplasia prostática benigna (HPB) y la prostatitis crónica (PC), en combinación con la oxigenación hiperbárica, se utilizaron 10 procedimientos de radiación de microondas (CBЧ) de rango milimétrico con longitudes de onda de 5,6 y 7,1 mm, en modo de modulación de frecuencia y con una densidad de flujo de potencia de 10 mW/cm² [5]. A pesar de que el tratamiento no produjo una disminución del volumen prostático, en pacientes con una combinación de HPB y PC se logró no solo mejorar los parámetros de la micción, sino también reducir la intensidad de la reacción inflamatoria. Esto último se evidenció por una disminución de más del doble en el número de leucocitos en la secreción prostática. En la HPB aislada, no se observó efecto terapéutico.

4.3. Estimulación de la hematopoyesis

La radiación electromagnética puede ejercer un efecto estimulante sobre el sistema hematopoyético humano. Así, en el tratamiento de pacientes quemados bajo la influencia de ondas electromagnéticas con una longitud de onda de 7,1 mm, se observó un aumento en el número de reticulocitos en los grupos con quemaduras faciales de menos del 10 % de la superficie corporal y con quemaduras en el tronco de hasta el 20 % de la superficie corporal [6]. En el grupo con quemaduras de tronco con una superficie del 10 al 30 %, no se observó ningún efecto. Este efecto clínico de estimulación de la eritropoyesis concuerda con los resultados que demuestran un aumento de la repoblación medular por células madre en ratones híbridos de las líneas CBA y C57B16 (F1) tras la irradiación con radiación electromagnética de 7,1 mm de longitud de onda [7].

Las condiciones de estimulación de la formación de eritrocitos en la médula ósea de animales han sido estudiadas en el artículo de N. P. Didenko et al. [8]. Se ha establecido que la reacción del sistema circulatorio depende de su estado inicial y del lugar de exposición a la radiación electromagnética (REM). Considerando estas condiciones, resultó posible predecir y controlar el efecto estimulante de la REM sobre la eritropoyesis, tanto en animales intactos [9] como en la corrección de la anemia tras una pérdida de sangre [10].

4.4. Estimulación del sistema inmunitario

La capacidad de la radiación de microondas (CBЧ) para influir en el metabolismo celular y, por otro lado, para alterar el estado del sistema neuroendocrino, sugiere la posibilidad de modulación del sistema inmunitario. Se registraron alteraciones en el estado inmunitario tras la terapia con microondas en 16 pacientes con infarto agudo de miocardio, a los que se irradió la piel de la pierna durante 60 minutos con radiación de microondas de 5,6 mm de longitud de onda [11]. En total, se realizaron 14 procedimientos. Se observó una tendencia al aumento de linfocitos T y B, manteniéndose sin cambios el número de linfocitos T-helper, mientras que disminuyó el de linfocitos T-supresores. Aumentó la concentración de inmunoglobulinas IgG e IgM, mientras que la de IgA disminuyó. Estos cambios en los parámetros inmunitarios se acompañaron de una mejoría en el cuadro clínico: disminución de la intensidad y la frecuencia de los episodios de dolor retroesternal, así como una dinámica electrocardiográfica positiva más rápida.

El efecto inmunomodulador de la radiación de microondas se basa en la formación de radicales libres. Esto se demuestra con datos del estudio del efecto de campos electromagnéticos débiles (8...18 GHz, $1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$), bajo cuya influencia se incrementó la inducción del factor de necrosis tumoral en macrófagos de ratones. La aplicación de ubiquinonas, que actúan como antioxidantes, reduce los efectos de los campos electromagnéticos en el rango de radiación de microondas [12].

4.5. Influencia en la cicatrización de úlceras del tracto gastrointestinal

La enfermedad ulcerosa sigue siendo un problema actual en medicina, y se buscan constantemente métodos de tratamiento más eficaces para su resolución. No es sorprendente que la úlcera gástrica y duodenal fuera una de las primeras enfermedades en las que se exploró la posibilidad de utilizar la terapia de microondas. Е.С. Тимофеева [13] resume los resultados de la terapia con radiación electromagnética de longitudes de onda de 7,1 y 5,6 mm en 534 pacientes con úlcera péptica. Se irradiaron puntos biológicamente activos (de 1 a 4 áreas por sesión) durante 40 minutos. Dos tercios eran pacientes con una evolución moderada o grave de la enfermedad. Dependiendo de la variante de com-

binación de la terapia electromagnética con los esquemas de tratamiento tradicionales , se выделено 4 grupos de pacientes. La eficacia del tratamiento se контролировали mediante fibrogastroduodenoscopia e investigación histológica de biopsias de los bordes de la úlcera. Los resultados permitieron al autor concluir sobre la alta eficacia de la terapia de ondas milimétricas (КВЧ-терапии) en la úlcera péptica. Asimismo, la monoterapia con ondas electromagnéticas no mostró diferencias significativas en eficacia con respecto a la combinación con esquemas de tratamiento farmacológico. No obstante, se observó una mala tolerancia a la terapia electromagnética en 6 pacientes, lo que motivó la interrupción del tratamiento. En 17 pacientes, el efecto positivo de la КВЧ-терапии fue nulo o se produjeron recidivas tempranas de la enfermedad. Se observó que todos estos pacientes presentaban variantes complicadas en la evolución de la úlcera péptica.

El uso de ondas electromagnéticas con una frecuencia de 62 GHz y una densidad de flujo de potencia de hasta 3 mW/cm² en modo de generación continua o en modo de generación de impulsos produjo un efecto positivo en el tratamiento de la úlcera gástrica y duodenal, incluidas las formas complicadas de estas enfermedades [14].

El tratamiento integral de las úlceras duodenales con terapia electromagnética, según los resultados del estudio histológico, redujo la intensidad de la infiltración inflamatoria y la formación de tejido conectivo en la zona ulcerosa. Simultáneamente, en la mayoría de los pacientes se lograba la eliminación completa de *Helicobacter pylori* y la estimulación de los procesos regenerativos, incluyendo la normalización del estado de los elementos endocrinos de la mucosa intestinal [15].

Con el fin de dilucidar la naturaleza del efecto terapéutico de la radiación electromagnética y descartar el papel preponderante de los procesos psicofisiológicos relacionados con la expectativa de un efecto positivo por parte del paciente (efecto placebo), se llevó a cabo una evaluación comparativa entre una simulación y la exposición «verdadera» a ondas milimétricas de baja intensidad [16]. Se demostró que el efecto terapéutico de la imitación de la terapia de ondas milimétricas se manifestaba en un 75 % con la curación completa o incompleta de úlceras gastroduodenales. El impacto real de la radiación de ondas milimétricas sobre los puntos de acupuntura o las zonas de Zakharyin-Geda produjo un aumento del 20-30 % en la tasa de curación completa de las úlceras

4.6. Estimulación de la regeneración del tejido óseo

Se observó un efecto favorable de la terapia electromagnética en la evolución del proceso de cicatrización de heridas en pacientes con lesiones en las extremidades, complicadas con infección purulenta, especialmente en aquellos con una evolución desfavorable ante la ausencia de fármacos y otros recursos necesarios para el tratamiento [17]. La terapia electromagnética ha demostrado ser útil en la terapia combinada de la osteoartritis deformante [18].

Los efectos terapéuticos de los campos eléctricos y magnéticos se han estudiado, principalmente, con el objetivo de aplicarlos a la regeneración de tejidos conectivos. Los métodos más estudiados se refieren a la regeneración ósea y permiten reducir los tiempos de tratamiento de fracturas recientes, pseudoartrosis, complicaciones en el trasplante de tejido óseo, osteoporosis y osteonecrosis. Se ha informado sobre la aplicación de efectos del campo electromagnético para la regeneración de cartílago y tejidos fibrosos blandos. En todos estos trabajos experimentales y aplicaciones clínicas, se observó una síntesis acelerada de la matriz extracelular y una reducción en los tiempos de curación de los tejidos [1

Existe abundante evidencia de que en el hueso vivo se generan corriente continua y un campo eléctrico alterno debido, respectivamente, a procesos metabólicos y deformaciones mecánicas. La corriente continua externa se aplica en el tratamiento de la pseudoartrosis como un medio para estimular la mitosis y la reparación de células osteogénicas, posiblemente a través de reacciones electroquímicas en la interfaz electrodo-tejido. Los campos electromagnéticos variables también se utilizan para el tratamiento de pseudoartrosis, osteonecrosis y osteoartritis, así como para la estabilización de implantes [20].

Los campos electromagnéticos pulsados influyen en el crecimiento de huesos y cartílagos in vitro, lo que sugiere su potencial utilidad en el tratamiento de la artritis. La estimulación con estos campos es ya un método probado en el tratamiento de fracturas de consolidación tardía y presenta perspectivas de aplicación para el tratamiento de osteoartritis, osteonecrosis, osteoporosis y heridas. Los imanes permanentes pueden, en determinadas circunstancias, proporcionar una reducción temporal del síndrome doloroso [2

4.7. Dependencia de los efectos terapéuticos de la tasa de absorción específica, la frecuencia, el tiempo de acción de la radiación, los modos continuo e impulsado, considerando la duración de los impulsos, la frecuencia de repetición y los parámetros de la forma de los impulsos de radiación electromagnética en la banda de microondas.

A pesar de la importancia de estudiar la dependencia del efecto terapéutico de la terapia de microondas con respecto a los parámetros de la radiación electromagnética, este aspecto continúa siendo el menos estudiado. Se comparó la eficacia de diferentes variantes de terapia electromagnética en 23 pacientes con angina de pecho progresiva [22]. En el primer grupo, se utilizó una fuente de radiación con una longitud de onda de 7,1 mm. La duración del procedimiento fue de 60 minutos durante 10 días. En el segundo grupo de pacientes, se irradió durante 5 días con una fuente de longitud de onda de 5,6 mm y durante otros 5 días con una longitud de onda de 7,1 mm. Potencia de radiación de 10 mW/cm^2 . La influencia de las ondas electromagnéticas produce una disminución del ritmo cardíaco. El resultado no dependió de la longitud de onda ni del esquema de utilización de la terapia de ondas de frecuencia extremadamente alta (EHF).

Investigación de la influencia de la radiación electromagnética de baja intensidad ($1...2 \text{ мкВт/см}^2$) en el rango de frecuencias de 26 a 140 GHz sobre el organismo humano mediante el método de diagnóstico electroacupuntural (EAD) según R. Foll. Un estudio del método de R. Foll reveló la existencia de cuatro rangos biológicamente activos, separados por intervalos de frecuencia relativamente tranquilos y que difieren en el tipo de interacción de la radiación con el organismo [23]. A saber: el rango de 8 mm se caracteriza por un efecto tónico general constitucional; el de 5 mm, por un efecto normalizador local; el de 4 mm, por un efecto sedante general constitucional; y el de 2,5 mm, por un efecto normalizador local.

4.8. Conclusión

Los resultados de la terapia de microondas (СВЧ--терапии) demuestran su cierta eficacia en la corrección del estado de los sistemas hematopoyético e inmunitario, así como en la estimulación de la regeneración de defectos ulcerosos en el estómago y el duodeno, y en el tejido óseo y conectivo (tabla 4.1). No obstante, resulta evidente la insuficiente definición de las indicaciones y contraindicaciones para la terapia de microondas (СВЧ--терапии). Por lo general, los parámetros físicos de la radiación

en el tratamiento de una u otra enfermedad se seleccionan sin la debida justificación y sin intentar encontrar el régimen óptimo de exposición. No se tiene debidamente en cuenta el estado inicial de los sistemas fisiológicos, los cuales, en condiciones patológicas, reaccionan a la exposición a la radiación de microondas, determinando en gran medida el resultado. La resolución de estos problemas podría ser prometedora para aumentar la eficacia de la terapia de microondas.

Tabla 4.1

Efectos terapéuticos de la radiación de microondas

Sistema	Lugar de exposición	Parámetros de la radiación	Resultados
Sistema endocrino		mm	Reducción del volumen de la glándula tiroidea en pacientes con bocio tóxico difuso y normalización de los niveles de linfocitos T3 y T4.
Sistema inmunitario	Pierna	5,6 mm	Cambio del estado inmunitario en pacientes con infarto agudo (aumento del número de linfocitos T y B, IgG e IgM, disminución del nivel de IgA) – mejora del cuadro clínico.
Tracto gastrointestinal	Puntos biológicamente activos	7,1 mm, 5,6 mm	Alta eficacia en el tratamiento de la úlcera gástrica y duodenal (no complicadas).
		62 GHz, 3 mW/cm ²	Tratamiento de la úlcera gástrica y duodenal, incluidas las complicadas, disminución del infiltrado inflamatorio, aceleración de la regeneración, normalización del estado de los elementos endocrinos de la mucosa intestinal.
Sistema cardiovascular		mm < 10 mW/cm ²	Reducción de los tiempos de recuperación, disminución de la probabilidad de complicaciones del ictus (neumonías).
Sistema genitourinario		5,6 mm; 7,1 mm 10 mW/cm ²	Mejora de la eficacia terapéutica y disminución de la inflamación en el tratamiento simultáneo de la hiperplasia prostática y la prostatitis crónica.
Sistema hematopoyético	Pierna	7,1 mm	Estimulación de la eritropoyesis en la enfermedad por quemaduras (aumento del número de reticulocitos).
Sistema musculoesquelético		53,53 GHz 42,96 GHz, modulación	Aceleración de la cicatrización de heridas, activación de la reacción inflamatoria, estimulación del proceso de formación de cicatrices y activación de la síntesis de proteínas extracelulares. Mejoras en la terapia combinada de la osteoporosis deformante, fracturas y osteonecrosis.

Lista de referencias bibliográficas del capítulo

1. Human sensory and thermoregulatory responses to microwave irradiation / D.W. Blick [et al.] // Abstr. 67th Annu. Sci. Meet. Aerospace Med. Assoc., Atlanta, Ga, May 5–9 1996. – 1996. – V. 7. – P. 690.
2. Repacholi M.H. Low-level exposure to radiofrequency electromagnetic fields: health effects and research needs. // Bioelectromagnetics. – 1998. – № 19(1). – P. 1–19.
3. Uso del método de terapia de ondas milimétricas en el tratamiento de enfermedades de la glándula tiroides / A.I. Gulyaev [et al.] // Ondas milimétricas en biología y medicina. – 2001. – № 3 (24). – C. 35–43.
4. Aplicación de nuevos métodos de reflexoterapia basados en el complejo de diagnóstico y tratamiento «Шарм» en el tratamiento de pacientes con trastornos de la circulación cerebral / N.D. Deviatkov [et al.] // Ondas milimétricas en biología y medicina. – 1996. – № 8. – C. 5–13.
5. Uso del efecto terapéutico de ondas electromagnéticas de la banda EHF junto con OHB en pacientes con HBP y en su combinación con prostatitis crónica / O.B. Loran [et al.] // Ondas milimétricas en biología y medicina. – 1996. – N.º 8. – Pág. 13–16.
6. Influencia de la radiación electromagnética de la banda milimétrica en el curso de la anemia por quemaduras / N.P. Didenko [et al.] // VII Seminario de toda la Unión «Aplicación de la radiación EHF de baja intensidad en biología y medicina». Moscú, 1989 – M., 1989. – Pág. 19.
7. Influencia de la radiación milimétrica de baja intensidad sobre el potencial de repoblación de células madre hematopoyéticas / L.P. Ignasheva [et al.] // VII Seminario de toda la Unión «Aplicación de la radiación de EAF de baja intensidad en biología y medicina». Moscú, 1989 – M., 1989. – Pág. 59.
8. Influencia de las oscilaciones electromagnéticas de rango milimétrico en el sistema sanguíneo de animales, en función de su estado inicial y zona de irradiación / N.P. Didenko [et al.] // Biofísica. – 1986. – T. 31 (3). – C. 88 2–850.
9. Posibilidad de predicción y control del efecto estimulante de la radiación electromagnética sobre la eritropoyesis en ratones albinos exogámicos / N.P. Didenko [y otros.] – NIIYAF TPU. – Tomsk, 1985. – 7 p. – Dep. en VINITI 26.11.85 № 8154-B-85.
10. Estimulación de la eritropoyesis en la anemia posthemorrágica en ratones bajo la influencia de la radiación de microondas / N.P. Didenko [y otros.]. – NIIYAF TPU. – Tomsk, 1985. – 9 p. – Dep. en VINITI 26.11.85, № 8155-B-85.
11. Golovacheva. Modificación del sistema inmunitario durante la terapia EHF en pacientes con infarto agudo de miocardio / Golovacheva, V.Yu Ushakov, V.M. Pavlyuk // VII Seminario de toda la Unión «Aplicación de radiación EHF de baja intensidad en biología y medicina». Moscú, 1989 – M., 1989. – Pág. 15.

12. Antioxidantes naturales e inmunidad celular en condiciones de radiación ionizante y no ionizante / V.R. Makar [et al.] // II Abierto. montaña. Conf. cient. jóvenes científicos de la ciudad de Pushchino, 1997 – Pushchino, 1997. – Pág. 107–108.
13. Timofeeva E.S. Eficacia de la aplicación de la terapia de ondas milimétricas en combinación con fármacos en pacientes con úlcera péptica // Ondas milimétricas en biología y medicina. – 1994. – N.º 3. – Pág. 91–93.
14. Briskin B.S. Sobre la terapia EHF para úlceras gastroduodenales complicadas / B.S. Briskin, V.N. Bukatko, A.N. Nikitin // Ondas milimétricas en biología y medicina. – 1996. – N.º 7. – Pág. 26–30.
15. Chizh A.G., Osadchuk M.A. Algunos aspectos patogénicos en la aplicación de radiación electromagnética de rango milimétrico en la terapia compleja de pacientes con úlcera duodenal // Ondas Milimétricas en Biología y Medicina. – 2000. – № 1 (17). – C. 34–38.
16. Rodshtat I.V. Efectos terapéuticos del placebo y criterios objetivos de curación // Ondas Milimétricas en Biología y Medicina. – 2001. – № 3 (24). – C. 16–23.
17. Kamenev Yu.F. Aplicación de la radiación electromagnética en traumatología y ortopedia // Ondas milimétricas en biología y medicina. – 1999. – № 2 (14). – Pág. 20–24.
18. Justificación del uso de radiación EHF para la estabilización de alteraciones degenerativo-distróficas en el cartílago articular en la osteoartritis deformante / Yu.F. Kamenev [y otros] // Ondas milimétricas en biología y medicina. – 1996. – № 7. – Pág. 30–35.
19. Aaron R.K., Ciombor D.M. Therapeutic effects of electromagnetic fields in the stimulation of connective tissue repair // J Cell Biochem. – 1993. – V. 52(1). – P. 42–46.
20. Otter M.W. Effects of electromagnetic fields in experimental fracture repair / M.W. Otter, K.J. McLeod, C.T. Rubin // Clin. Orthop. – 1998. – (355 Suppl). – S90-10. – P. 14.
21. Trock D.H. Electromagnetic fields and magnets. Investigational treatment for musculoskeletal disorders // Rheum Dis. Clin. North Am. – 2000. – V. 26(1). – P. 51–62.
22. Cambio de los indicadores hemodinámicos y de la función contráctil del miocardio en pacientes con cardiopatía isquémica bajo la influencia de la radiación de ondas milimétricas / N.D. Deviatkov [et al.] // VII Seminario de la Unión Soviética «Aplicación de la radiación de ondas milimétricas de baja intensidad en biología y medicina». Moscú, 1989. – M., 1989. – Pág. 14.
23. Resonancias de órganos humanos en el rango de ondas milimétricas desde la perspectiva del método de R. Voll / I.L. Brandt [et al.] // XI Simposio Ruso con participación internacional «Ondas milimétricas en medicina y biología». Moscú, 21–24 de abril de 1997. – M., 1997. – T. 1. – Pág. 100–101.

5. DEPENDENCIA DE LA INFLUENCIA DE LA RADIACIÓN DE MICROONDAS (REM) EN EL ORGANISMO, EN FUNCIÓN DEL ESTADO FUNCIONAL DE SUS SISTEMAS FISIOLÓGICOS

Las características del impacto de la radiación electromagnética en objetos biológicos de diferente nivel de organización, examinadas en los capítulos anteriores, evidencian la multifactorialidad y la diversa direccionalidad de los efectos del campo electromagnético. Por otro lado, los resultados de numerosas observaciones indican que la radiación de microondas (CBЧ), especialmente la de baja intensidad, no posee la capacidad de «imponer» un tipo cualitativo y cuantitativo específico de respuesta en los sistemas funcionales correspondientes, sino que solo es capaz de provocar una «respuesta» que depende tanto del estado inicial de dichos sistemas como del organismo en su conjunto. Por lo tanto, en este capítulo se considera el papel del estado inicial y la asimetría del organismo en la formación de la respuesta a la exposición electromagnética. El párrafo 5.1 está dedicado a la revisión de trabajos que estudian la dependencia de la reacción del organismo a la radiación electromagnética en función del estado inicial de sus sistemas fisiológicos. En el § 5.2 se considera la influencia de la asimetría de los sistemas orgánicos representados por órganos pares en la formación de la respuesta a la irradiación con ondas electromagnéticas. Finalmente, en el § 5.3 se analiza la posibilidad de predecir los efectos biológicos de la radiación electromag-

5.1. El papel del nivel basal de actividad de los sistemas fisiológicos

La tesis de que el resultado de la acción de la radiación electromagnética a nivel del organismo completo depende en gran medida del estado fisiológico de los sistemas «respondientes», se confirma con los resultados de varios estudios. Si la reacción de un sistema funcional no dependiera de su estado inicial, la irradiación debería causar en todos los animales cambios idénticos en el aparato receptor de la piel; deberían excitarse señales aferentes del mismo tipo; y los sistemas «respondientes» recibir señales eferentes reguladoras idénticas. Como resultado, sería esperable una reacción similar a la exposición. No obstante, según datos de investigaciones, solo una parte de los animales responde a la irradiación con ondas electromagnéticas.

Así, se descubrió [1] que la irradiación de ratones no consanguíneos durante una hora con radiación electromagnética con una longitud de onda de 7,09...7,20 mm y una densidad de flujo de potencia incidente no superior a 10 mBT/cm^2 provocaba cambios desiguales en el linaje eritroide de la hematopoyesis de la médula ósea en los animales experimentales. Se observó que, tras tres días, la estimulación local del linaje eritroide se registraba únicamente en animales con un recuento inicial bajo de leucocitos (inferior a $12 \cdot 10^9 \text{ l}^{-1}$) o en ratones con un alto porcentaje de linfocitos en sangre periférica. No se observaron cambios en el linaje eritroide en ratones con leucocitosis inicial elevada. Los autores sugirieron que es posible discutir el papel del estado inicial del sistema adaptativo (neuroendocrino) en la respuesta del linaje eritroide a la radiación electromagnética, puesto que el recuento de linfocitos en sangre periférica refleja el grado de actividad glucocorticoidea.

El valor del nivel basal de activación del brote eritroide se estudió en un experimento separado [2]. Según el estado inicial, los ratones de la línea CBA se dividieron en dos grupos con un número de eritrocitos inferior y superior a $8 \cdot 10^{12} \text{ л}^{-1}$ (animales «hipoeritrocíticos» e «hipereritrocíticos»). La irradiación se realizó con ondas electromagnéticas en un rango de frecuencia de 42,10...42,35 GHz, con una densidad de flujo de potencia incidente de aproximadamente 10 mW/cm^2 . La conclusión principal de los autores es que es posible inducir la estimulación de la eritropoyesis en determinadas áreas del sistema de médula ósea en ambos grupos de animales, siempre y cuando a los animales con recuento eritrocitario bajo se les irradie la extremidad posterior izquierda, y a los animales con recuento eritrocitario alto, la derecha.

Para precisar los resultados de las investigaciones anteriores, se

llevó a cabo un estudio comparativo de la hematopoyesis en ratones de las líneas CBA y C57BL/10, las cuales difieren en el recuento de leucocitos en sangre periférica en casi dos veces [3]. La consideración simultánea del nivel basal, tanto de leucocitos como de eritrocitos en sangre periférica, permitió a los autores demostrar que en ratones con un recuento inicial de leucocitos inferior a $12 \cdot 10^9 \text{ л}^{-1}$ y de eritrocitos inferior a $8 \cdot 10^{12} \text{ л}^{-1}$, se producía una alteración de la eritropoyesis en la médula ósea del fémur izquierdo y del esternón. En el resto de los animales se observó una estimulación de la eritropoyesis en la médula ósea del fémur derecho.

A pesar de la escasez extrema de estudios sobre la importancia del estado inicial del organismo en su conjunto y de sus sistemas funcionales individuales en el desarrollo de la reacción a la irradiación con radiación electromagnética, cabe señalar la importancia y la necesidad de tener en cuenta este factor al estudiar los efectos patógenos y terapéuticos de dicha radiación.

5.2. Significado de la asimetría funcional de los sistemas representados por órganos pares.

Una influencia débil, como la radiación electromagnética de baja intensidad, difiere poco, en cuanto a su intensidad, de la influencia de las condiciones de realización del experimento. En este sentido, para distinguir los efectos intrínsecos de la radiación electromagnética de las reacciones del organismo a las condiciones concomitantes de la exposición, es importante tener en cuenta los patrones sutiles de funcionamiento de los sistemas fisiológicos «respondedores». Una de las características de los sistemas representados por órganos pares es su asimetría funcional.

La importancia de la asimetría funcional basal (así como del estado inicial) se ha demostrado en varios estudios [4–6]. Los autores han estudiado la reacción del sistema tímico-adrenal de ratones a la exposición a radiación electromagnética con una longitud de onda de 7,1 mm y una potencia de radiación inferior a 10 mW/cm^2 . Con el fin de excluir la influencia de las condiciones experimentales, el estado de los sistemas estudiados en los animales del grupo experimental se comparó con un grupo de referencia de ratones intactos y con animales de un grupo control, que permanecieron en la cámara de irradiación durante una hora. Se detectaron cambios inmediatamente después de una hora de

exposición. El aislamiento de los animales en la cámara de irradiación (control) constituyó un estímulo estresor. Esto se evidencia por la hipertrofia de las células de la zona fascicular de las glándulas suprarrenales. Además, el grado de hipertrofia fue mayor en la glándula suprarrenal izquierda, que inicialmente estaba menos activada. Debido a esto, se invirtió el signo de la asimetría. A pesar de la hipertrofia de las células de la zona fascicular, los cambios involutivos en los timos fueron poco pronunciados.

Transcurrida 1 hora, la hipertrofia de los adrenocorticocitos persistía, y sobre este fondo se produjo una disminución del número total de timocitos en el timo izquierdo. Transcurrido un día, se observó una normalización del volumen de los adrenocorticocitos de la zona fascicular. Aún más, en comparación con un fondo ya bastante activado, se produjo una disminución de la actividad de los adrenocorticocitos de la glándula suprarrenal derecha. Debido a esto, al igual que en los tiempos anteriores, se conserva el signo del coeficiente de asimetría. En ambos timos se observó un incremento de la celularidad específica

La irradiación de la piel del muslo izquierdo del ratón inmediatamente después de una hora de exposición indujo cambios en los adrenocorticocitos similares a los del grupo control. No obstante, los cambios involutivos fueron más pronunciados en el timo izquierdo. Transcurridas una hora y veinticuatro horas, los cambios en los adrenocorticocitos y el timo apenas difirieron de los del grupo control.

La irradiación del área del muslo derecho resultó en un estrés menos pronunciado, ya que, pese a la hiperfunción de los adrenocorticocitos de la zona fasciculada, no se produjo involución de los timos en ningún momento de la observación. Si la irradiación desde la izquierda incrementaba ligeramente y aceleraba las alteraciones involutivas del timo izquierdo observadas en los animales del grupo de control, la irradiación desde la derecha las anulaba. Los resultados de las mediciones efectuadas durante el estudio de la influencia de la asimetría del sistema tímico-adrenal en la respuesta del organismo a la exposición electromagnética se muestran esquemáticamente en la fig. 5.1.

Por lo tanto, en condiciones de aislamiento de los animales en la cámara y exposición a la radiación electromagnética, se produjo la activación de los adrenocorticocitos de la zona fascicular, en mayor medida en la glándula suprarrenal izquierda. Los cambios involutivos ocurrieron únicamente en el timo izquierdo. La involución regular del timo izquierdo, que conduce al predominio del timo derecho, se combinó con una asimetría del lado derecho en la actividad de la zona fasciculata, independientemente de los valores absolutos de actividad de las glándulas suprarrenales derecha e izquierda. La irradiación del muslo izquierdo exacerbaba el efecto estresor de la cámara (involución del timo izquierdo). La irradiación del muslo derecho, por el contrario, mitiga el efecto estresor de la cámara.

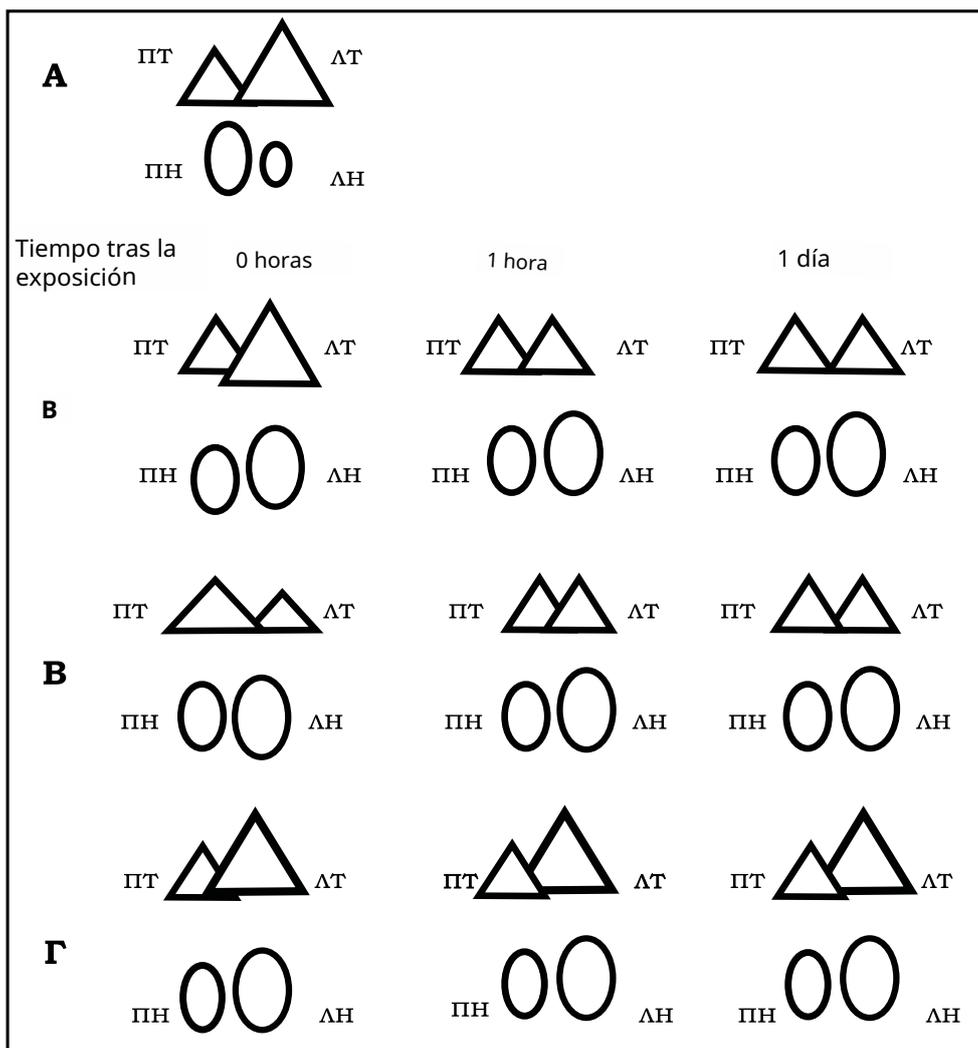


Fig. 5.1. Dependencia de la reacción del timo y las glándulas suprarrenales de la asimetría funcional inicial del sistema tímico-adrenal y el lado de exposición: A – «fondo»; B – «control»; B – irradiación del muslo izquierdo; Γ – irradiación del muslo derecho; «ΠΤ» y «ΔΤ» – timo derecho e izquierdo; «ΠΗ» y «ΔΗ» – glándula suprarrenal derecha e izquierda.

La consideración de la asimetría funcional del sistema tímico-adrenal estudiado permitió a los autores interpretar correctamente los resultados obtenidos, evitando conclusiones incorrectas tanto sobre la ausencia de efecto de la radiación electromagnética (en caso de que se estudiara accidentalmente solo el timo derecho o solo la irradiación desde la derecha), como la atribución errónea de los efectos de las condiciones experimentales a la acción de las ondas electromagnéticas.

5.3. Predicción de los efectos biológicos de la radiación electromagnética en la banda de microondas (CBЧ)

El análisis de la literatura científica revela que, al estudiar la acción biológica de la radiación CBЧ, generalmente no se enfatiza la variabilidad en la manifestación de la respuesta en los individuos expuestos. Sin investigaciones de esta índole, resulta imposible predecir las consecuencias de la exposición a la radiación electromagnética, ni determinar las indicaciones y contraindicaciones para su aplicación. En este contexto, se comprende la extrema escasez de intentos de corrección individualizada y dirigida del estado de sistemas funcionales específicos.

En uno de estos estudios [7], tras inducir una anemia posthemorrágica (reducción del 30...40 % respecto al nivel inicial), el animal fue irradiado en la extremidad posterior izquierda durante una hora, en dos ocasiones, sin considerar su estado basal. La frecuencia de la radiación fue de $(4,25 \pm 0,1)$ GHz; la densidad de flujo de potencia incidente no superó los 10 mW/cm^2 . El impacto resultó ineficaz, puesto que solo se detectó un aumento insignificante en el número de reticulocitos en sangre periférica. En la siguiente serie de observaciones, animales con anemia posthemorrágica fueron expuestos a radiación electromagnética (REM) con los mismos parámetros, considerando el estado inicial (previo a la anemización) del linaje eritroide. En ratones con un recuento inicial de eritrocitos inferior a $8 \cdot 10^{12} \text{ л}^{-1}$ se irradió la extremidad posterior izquierda; en aquellos con un recuento superior, se irradió la derecha. Un enfoque similar demostró ser efectivo. Esto se manifestó en un aumento significativo de la concentración de hemoglobina y un incremento más pronunciado, en comparación con la primera serie, del número de reticulocitos en animales de ambos grupos. Además, el contenido de metahemoglobina se redujo casi 3,5 veces, lo que evidenció un curso más óptimo de los procesos redox en los eritrocitos bajo la influencia de la radiación de microondas.

Como otro ejemplo, basado en la capacidad de predecir efectos, se puede citar el intento de utilizar la radiación de microondas con el fin de mitigar las manifestaciones de la enfermedad por radiación al irradiar animales con neutrones [8]. Se irradiaron animales con un flujo de neutrones rápidos a dosis de 4,0; 5,25; 6,5; 7,75; y 9,0 Gy en el ciclotrón Y120 del Instituto de Investigación de Física Nuclear (Tomsk), donde la energía media de los neutrones en el aire fue de 6 MeV. Los ratones del grupo experimental fueron tratados con radiación electromagnética de intensidad atérmica de una frecuencia específica (no especificada), 50 minutos antes de la irradiación con neutrones. Me

El tiempo de irradiación con ondas electromagnéticas se seleccionó de tal manera que se intensificara la reacción de estrés en las primeras 24 horas tras la exposición. El período de observación fue de 30 días. Los resultados indicaron que la selección de un régimen individual de acción protectora mediante radiación electromagnética aumentó la resistencia de los animales a la irradiación con neutrones en un 70 % (factor de modificación de la dosis: 1,7). Asimismo, se modificó el espectro de complicaciones por radiación en los animales que murieron.

Los resultados presentados demuestran el potencial de las investigaciones dirigidas al desarrollo de regímenes individualizados de exposición a la radiación electromagnética de ondas centimétricas y milimétricas, capaces de inducir los efectos positivos deseados. En particular, considerando las características individuales del operador (el estado inicial de sus sistemas funcionales más importantes, incluyendo las manifestaciones de asimetría funcional de los órganos pares) y variando el punto de exposición, es posible, mediante radiación electromagnética de baja intensidad y una frecuencia determinada, «ajustar» los parámetros funcionales del organismo para minimizar las consecuencias negativas de factores externos, incluida la radiación electromagnética con parámetros desfavorables que induce efectos patógenos.

Lista de referencias bibliográficas del capítulo

1. Posibilidad de predicción y control del efecto estimulante de la radiación electromagnética sobre la eritropoyesis en ratones blancos exogámicos / N.P. Didenko [y otros]. – NIIYaF TPU. – Tomsk, 1985. – 7 p. – Dep. En VINITI 26.11.85, № 8154B85.
2. Dependencia del carácter de la reacción de los sistemas eritroide y linfoide de su estado inicial al ser sometidos a oscilaciones electromagnéticas de rango milimétrico / N.P. Didenko [y otros] // Aplicación de la radiación milimétrica de baja intensidad en biología y medicina. – M., 1985. – P. 108–116.
3. Influencia de las oscilaciones electromagnéticas de rango milimétrico en el sistema sanguíneo de animales, en función de su estado inicial y la zona de irradiación / N.P. Didenko [y otros] // Biofizika. – 1986. – T. 31 (5). – C. 882–885.
4. Perelmuter V.M. Reflejo de la asimetría funcional del sistema tímico-adrenal en el estado de la zona reticular de las glándulas suprarrenales durante la

homotransplatación de la mitad derecha o izquierda del timo // Byull. eksper. biol. i med. – 1997. – № 11. – C. 577–579.

5. Asimetría de las reacciones del sistema adaptativo a la radiación EHF / V.M. Perel'muter [y otros]. – Tomsk, 1993. – 7 p. – Dep. en VINITI 01.07.93, № 1825-B 93.
6. Dinámica de los cambios morfofuncionales tempranos de las glándulas suprarrenales bajo la influencia de la radiación EHF / Yu.V. Paderov [y otros] . – Tomsk, 1993. – 7 p. – Dep. en VINITI 01.07.93, № 1817-B 93.
7. Estimulación de la eritropoyesis en la anemia posthemorrágica en ratones bajo la influencia de la radiación de microondas / N.P. Didenko [y otros.]. – NIIYAF TPU. – Tomsk, 1985. – 9 p. – Dep. en VINITI 26.11.85, № 8155-B-85.
8. Influencia de la radiación electromagnética de frecuencia milimétrica en la supervivencia de animales durante la irradiación con neutrones / N.P. Didenko [y otros] // Aspectos médico-biológicos de la radiación milimétrica. – M., 1987. – P. 74–78.

6. MECANISMOS SUBYACENTES AL EFECTO DE LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA EN LA BANDA DE MICROONDAS

Las particularidades de los efectos biológicos de la radiación electromagnética consideradas en los capítulos anteriores demostraron que incluso los campos de baja intensidad pueden provocar cambios significativos en los procesos biológicos y, por consiguiente, una alteración del estado del organismo. Al mismo tiempo, como se señaló en el § 0.1, es fundamental el hecho de que la exposición se lleva a cabo mediante radiación cuya energía cuántica es muy inferior a kT . Por lo tanto, es importante distinguir entre los efectos térmicos y no térmicos de la exposición; estos aspectos se abordan en las secciones 6.1 y 6.2. La recepción de la radiación electromagnética a nivel celular se manifiesta en una alteración del funcionamiento del sistema nervioso humano. Los mecanismos de la reacción directa del organismo a la exposición a la radiación de microondas se examinan en la sección 6.3. Íntimamente ligada a la reacción del sistema nervioso está la cuestión de la percepción sensorial de las ondas electromagnéticas incidentes. En la § 6.4 se examinan los posibles sistemas sensoriales de los mamíferos.

6.1. Mecanismos físicos de la acción de la radiación de nivel térmico

La base de la interacción de la radiación electromagnética con los objetos biológicos reside en su absorción por dichos objetos. En otras palabras, la interacción posee un carácter energético. Esta afirmación no contradice siquiera la hipótesis del impacto «informativo» de las ondas milimétricas de baja intensidad [1], puesto que incluso una señal informativa debe aportar consigo una cierta energía para provocar una respuesta en el receptor. Desde un punto de vista termodinámico, la absorción de energía en un sistema biológico se corresponde con dos áreas diferenciadas de manifestación del efecto [2], que se ilustran en la fig. 6.1.

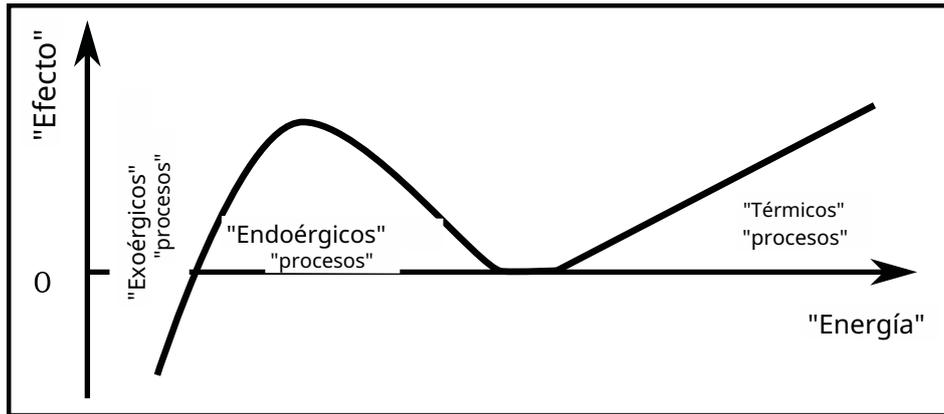


Fig. 6.1. Relación entre los efectos biológicos isotérmicos y térmicos de la radiación electromagnética.

En la parte izquierda de la figura se muestra el área de bioefectos donde la energía absorbida de la radiación electromagnética externa induce la sincronización de las oscilaciones internas, lo que provoca procesos endotérmicos no térmicos (isotérmicos) en los sistemas biológicos. Resulta pertinente establecer una analogía con los amplificadores de microondas de tubo de ondas viajeras, donde una señal de entrada relativamente débil, al actuar dentro de la banda de frecuencia resonante, induce la autoorganización de un medio interno del dispositivo energéticamente mucho más potente, lo que resulta en una señal de salida de gran intensidad. En cierto modo, esta interacción puede considerarse «informativa», ya que una señal débil induce la transición del sistema a un nuevo estado. La energía necesaria para esta transición no proviene de la señal externa, sino que está presente en el propio sistema. En el siguiente párrafo se presenta una revisión de los mecanismos de tal interacción, y en este consideraremos únicamente el impacto térmico de la radiación electromagnética, cuya área se muestra en la Fig. 6.1 en la parte derecha.

La absorción de energía de las ondas electromagnéticas en los tejidos biológicos se produce a través de la componente eléctrica del campo electromagnético. A bajas frecuencias, las pérdidas de energía del campo electromagnético se deben principalmente a las corrientes iónicas, mientras que, en el rango de microondas, el mecanismo predominante son las pérdidas por polarización de la sustancia. Las polarizaciones electrónica e iónica tienen tiempos de relajación de $10^{-16} \dots 10^{-14}$ y $10^{-14} \dots 10^{-12}$ s, respectivamente. Por lo tanto, en el rango de frecuencias que nos interesa, solo tiene sentido considerar la polarización dipolar, cuyo tiempo de relajación es comparable al período de oscilación de las ondas electromagnéticas incidentes

En los tejidos biológicos, el principal componente en la interacción con la radiación electromagnética en el rango de centímetros y milímetros

de las ondas métricas es el agua. En primer lugar, las moléculas de agua en estado libre poseen un momento dipolar significativo. En segundo lugar, el tiempo de relajación de esta molécula a la temperatura corporal es de $\sim 6 \cdot 10^{-12}$ s.

En tercer lugar, el agua es el componente principal de los tejidos biológicos. Los organismos vivos contienen entre un 65 % y un 98 % de agua. Los tejidos y órganos del cuerpo humano presentan un elevado contenido de agua. Por ejemplo, el cerebro contiene alrededor del 70 % de agua, la sangre el 83 %, los pulmones y el corazón alrededor del 79 %, el hígado el 69 %, los músculos el 75 % y la piel el 72 %, entre otros.

El agua es un objeto físico complejo que contiene, además de moléculas de agua libres, clústeres hexagonales.

Las pérdidas de energía de las ondas electromagnéticas en la banda de microondas se relacionan, principalmente, con la polarización dipolar de las moléculas de agua libres, dado que en los clústeres hexagonales los momentos dipolares de las moléculas de agua que los conforman se equilibran. Al aumentar la temperatura, la cantidad de moléculas libres se incrementa debido a la desintegración de los clústeres. En consecuencia, aumentan las pérdidas específicas.

La dependencia frecuencial de la permitividad dieléctrica, como es bien sabido, se describe mediante la fórmula de Debye:

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_{\infty} + \frac{\epsilon_0 - \epsilon_{\infty}}{1 + i\omega\tau}, \quad (1)$$

donde ω – frecuencia del campo electromagnético externo; i – la unidad imaginaria; τ – el tiempo de relajación; $\epsilon_{\infty} = 4 \dots 5$ – permitividad dieléctrica en el límite de las altas frecuencias. El agua en los tejidos biológicos se encuentra en forma de disoluciones, donde sus moléculas establecen enlaces de hidrógeno con otras moléculas. Puesto que el tiempo de relajación se modifica ligeramente, en lugar de un único tiempo de relajación en la expresión (1), es necesario sustituirlo por una función de distribución de tiempos de relajación $G(\tau)$. Así, las pérdidas de energía de las ondas electromagnéticas en los tejidos biológicos estarán determinadas por la parte imaginaria de la expresión (1):

$$\epsilon''(\omega) = \int_0^{\infty} G(\tau) \frac{d}{1 + \omega^2 \tau^2}.$$

La dependencia de las pérdidas debidas a la polarización de las moléculas de agua tendrá la forma que se muestra en la fig. 6.2. Según la figura, en el rango de interés, y especialmente en la región de altas frecuencias, la absorción de energía de las ondas electromagnéticas en el componente acuoso de los tejidos biológicos es cercana al máximo. Cuando el nivel de potencia de la radiación electromagnética es suficientemente alto, se produce un calentamiento rápido del tejido biológico,

principalmente del componente acuoso. Esto puede conllevar una alteración de la estructura del agua, la modificación de los enlaces de sus moléculas con las moléculas proteicas y, por consiguiente, una alteración de la actividad funcional de las enzimas, lo que provocará cambios en los procesos metabólicos de las células. En el límite, el calentamiento puede conducir a la desnaturalización de las proteínas, es decir, a la pérdida total de sus propiedades funcionales. Incluso la pérdida parcial de las propiedades funcionales de las proteínas lleva a la muerte celular. Esta circunstancia se utiliza en el método de diatermia para el tratamiento del cáncer, donde el calentamiento por microondas provoca la muerte de las células tumorales. Los efectos térmicos de la radiación electromagnética son peligrosos para todos los sistemas del organismo, pero los más sensibles son el sistema reproductor, los ojos y el sistema de coagulación sanguínea.

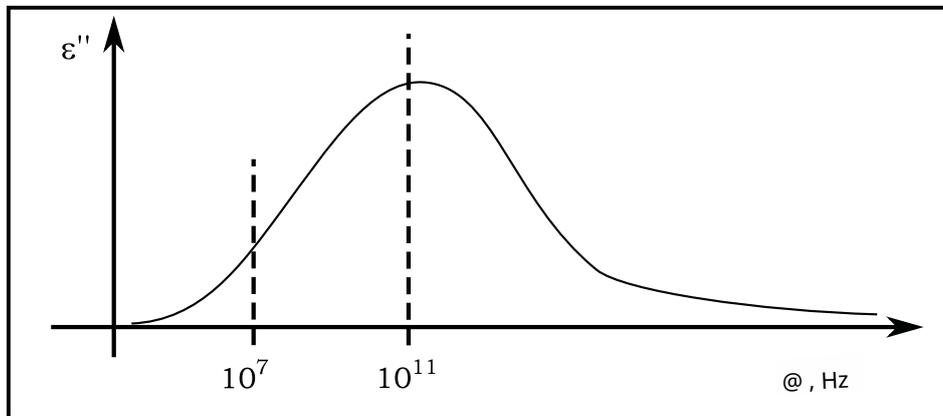


Fig. 6.2. Dependencia de las pérdidas en tejidos biológicos con la frecuencia.

6.2. Mecanismos físicos probables de la acción de la radiación de nivel no térmico

Como se mencionó anteriormente, el principal problema físico de la interacción de la radiación electromagnética con objetos biológicos a niveles de potencia no térmicos es el mecanismo de acumulación de energía para posibles transiciones estructurales en estructuras biológicas, lo que conlleva un cambio en su actividad funcional. Se ha demostrado que dicha acumulación puede producirse en las oscilaciones mecánicas de las biomacromoléculas. Para comprender el mecanismo de la recepción física de la radiación electromagnética, es importante identificar los objetos físicos primarios en los tejidos biológicos que interactúan con las ondas electromagnéticas.

El objeto directo de la acción de la radiación electromagnética son las cargas eléctricas (electrones e iones) y los dipolos, representados tanto por moléculas como por grupos separados de macromoléculas con grados de libertad mecánicos. Uno de los principales candidatos a receptor físico que interactúa directamente con la radiación electromagnética es la molécula de agua, que posee un elevado momento dipolar ($\sim 1,8D$).

El espectro de frecuencias de los movimientos rotacionales y libracionales de las moléculas de agua se sitúa en la región de las ondas centimétricas y milimétricas. Asimismo, el estado dinámico de los sistemas acuosos, tanto orgánicos como inorgánicos, depende de la influencia de diversos electrolitos y no electrolitos, lo que se manifiesta en alteraciones en sus espectros de microondas y ondas milimétricas [3]. Por consiguiente, los valores de las frecuencias a las que puede producirse la interacción de ondas electromagnéticas con las moléculas de agua en los tejidos biológicos dependen de la composición específica de la fase líquida de dichos tejidos. El agua, como reactivo químico, puede modificar su propia actividad bajo la acción de ondas electromagnéticas [3]. La actividad del agua, alterada por la radiación electromagnética, puede provocar un cambio en la hidratación de las moléculas proteicas, y su actividad fisiológica depende en gran medida del grado de hidratación de dichas moléculas [5] (Fig. 6.3).

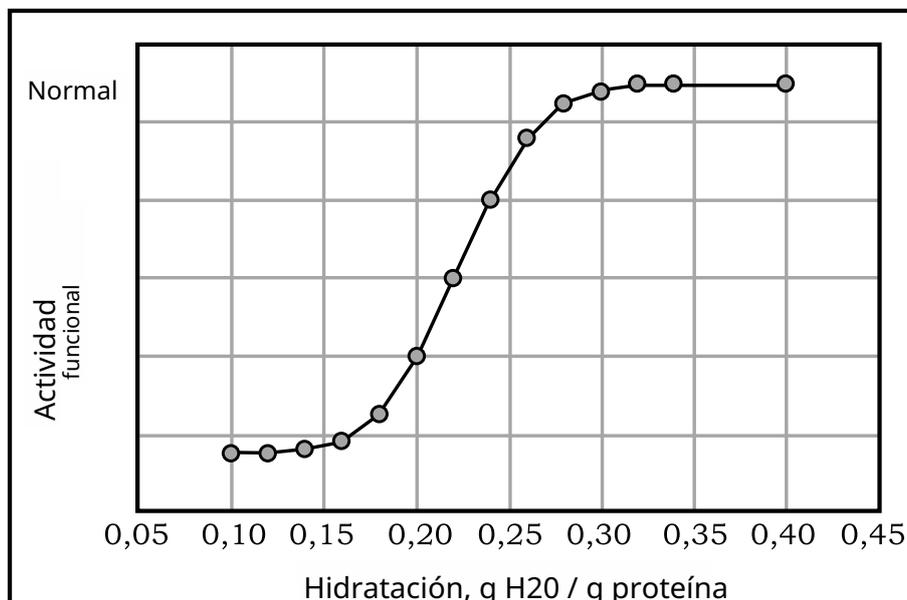


Fig. 6.3. Dependencia de la actividad funcional de las moléculas proteicas del grado de hidratación.

La hidratación de las moléculas proteicas puede modificarse no solo por cambios en la actividad química del agua en el entorno de la capa de hidratación de la molécula proteica, sino también por la interacción directa de la radiación con las moléculas de agua en dicha capa. La energía de las ondas electromagnéticas se transforma en energía cinética de traslación o rotación molecular. La energía de los movimientos de las moléculas de agua libres se disipa en calor en un tiempo de $10^{-10} \dots 10^{-9}$ s; no obstante, incluso con estos valores de disipación, dichos movimientos pueden alterar el grado de hidratación de las moléculas proteicas [6].

Así, el mecanismo de recepción primaria de la radiación electromagnética por los objetos biológicos, mediante la interacción con las moléculas de agua, se plantea de la siguiente manera [6]. Las ondas electromagnéticas activan ciertos grados de libertad de las moléculas de agua en la fase líquida de los tejidos biológicos. Al mismo tiempo, el aumento de la actividad del agua incrementa el intercambio entre el medio y las capas de hidratación de las biomacromoléculas. En consecuencia, se estimula la actividad química de las estructuras macromoleculares (principalmente membranas), lo que modula las propiedades funcionales de las proteínas enzimáticas, de transporte y receptoras, influyendo así en los procesos metabólicos celulares. Las moléculas de agua enlazadas realizan movimientos de oscilación bajo la acción de las ondas electromagnéticas y pueden actuar como transductores que convierten las oscilaciones electromagnéticas en mecánicas, cuya energía se transmite a las estructuras biológicas.

La interacción de ondas electromagnéticas con el agua puede ocurrir no solo a nivel de moléculas individuales, sino también con clústeres de agua. En el artículo de V.I. Petrosyan et al. [7] se investigaron las resonancias físicas de la interacción del campo electromagnético en la banda de microondas (4...120 GHz) con objetos biológicos y agua. La presencia de resonancia se determinó por el aumento de la energía de ruido de la propia radiación del objeto irradiado, debido a la disipación de energía de la onda de bombeo. Los resultados mostraron la presencia de dichas resonancias y la identidad de las frecuencias de resonancia para el agua, los tejidos del organismo humano y animal. Esto, según los autores, indica una naturaleza física unificada en la interacción de la radiación electromagnética con bioobjetos, relacionada con la estructura molecular del agua. Las ondas electromagnéticas en el rango de 30...100 GHz pueden interactuar de forma resonante con las moléculas de agua presentes en cúmulos con estructura hexagonal, las cuales realizan vibraciones (angulares) en direcciones radial y axial [8]. Cuando la frecuencia electromagnética

tica de la onda coincide con la frecuencia de resonancia de los cúmulos de agua, la onda no puede propagarse profundamente en los tejidos. Al incidir sobre cúmulos moleculares de agua, cuyas frecuencias son cercanas a la resonancia, un campo electromagnético externo puede inducir un desplazamiento de las frecuencias de resonancia hacia el valor de la frecuencia aplicada, sincronizándolas e influyendo así en el estado de las estructuras biológicas, lo que podría originar un efecto biológico.

También se ha propuesto un mecanismo en el que la estructura y las propiedades del agua se modifican indirectamente por la radiación electromagnética, debido a la interacción con una biomolécula. Una molécula de adenosín monofosfato cíclico podría actuar como uno de estos receptores. A. P. Zhukovsky et al. [9] consideran esto posible debido a que: 1) está presente en casi todas las células; 2) los espectros de los movimientos rotacionales de esta molécula se sitúan en la región del rango de ondas milimétricas; 3) el tiempo de relajación volumétrica durante la transición rotacional de esta molécula en agua, bajo la acción de ondas electromagnéticas, es comparable al cambio en la magnitud del período de rotación y mucho menor que el propio período de rotación, lo que asegura la transferencia efectiva de excitación a las moléculas de agua que se encuentran alrededor de la molécula de adenosín monofosfato cíclico, tanto en estado libre como en cúmulos. Las perturbaciones de la estructura del agua se manifiestan en su interacción con los bioobjetos dentro de la célula, modificando los procesos metabólicos [10].

Las biomoléculas que interactúan con ondas electromagnéticas pueden no solo actuar como receptoras de dichas ondas y transmisoras de efectos físicos a otras estructuras biológicas, sino también responder a la interacción mediante reestructuraciones conformacionales y la modificación de su función biológica. Esto se aplica, principalmente, a las moléculas proteicas. La posibilidad de acumulación de energía durante la interacción con la radiación electromagnética y, en consecuencia, las transiciones conformacionales, se examina detalladamente en los apartados § 1.1–1.3. Como ejemplo de estas reestructuraciones de la estructura de las moléculas proteicas y los cambios en su actividad funcional, se pueden citar los resultados de un estudio sobre la dependencia del contenido de adenosín trifosfato y la movilidad electroforética de los eritrocitos de ratas, en función de la duración de la exposición de los animales a un campo electromagnético en el rango de ondas milimétricas [11]. Se ha registrado que el contenido de adenosín trifosfato aumenta en un 37 % al quinto día de irradiación, y la movilidad electroforética de los eritrocitos se incrementa en un 23 %. Los cambios en el contenido de adenosín trifosfato pueden explicarse por la modificación de los pro-

cesos de glicólisis mediante ondas milimétricas, es decir, por una alteración en la actividad de toda una serie de enzimas. Las alteraciones en la movilidad electroforética de los eritrocitos son posibles debido a la modificación de la distribución de cargas en la superficie de las membranas eritrocitarias, lo que sugiere una interacción de las ondas milimétricas con receptores moleculares en la membrana celular.

Otro posible mecanismo de recepción de la radiación electromagnética es la excitación de ondas acústicas en estructuras supramoleculares, en particular, en membranas [5]. Al propagarse ondas electromagnéticas desde el aire a un medio condensado con una permitividad dieléctrica ϵ , la frecuencia permanece constante, mientras que la longitud de onda disminuye en un factor de $\epsilon^{1/2}$. Así, a una frecuencia de $3 \cdot 10^{10}$ Hz, la permitividad dieléctrica ϵ de los tejidos biológicos es 25, y la longitud de onda resulta ser de 2 mm . La longitud de onda acústica es aproximadamente 10^5 veces menor. Por lo tanto, los microobjetos biológicos (macromoléculas, membranas) que participan en las oscilaciones acústicas se encontrarán, de hecho, en un campo eléctrico homogéneo que varía periódicamente en el tiempo, con una frecuencia cercana a la frecuencia propia de los osciladores biológicos. Consideremos un posible mecanismo de generación de ondas acustoelectricas en la membrana [12]. Representemos una célula con un radio R con un grosor de la parte hidrofóbica de la membrana de Δ_M m (Fig. 6.4).

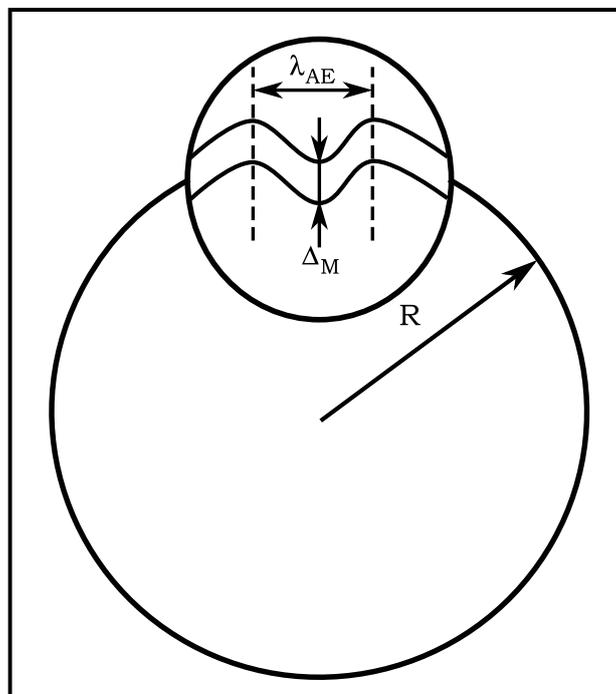


Fig. 6.4. Esquema de excitación de ondas acustoelectricas en la membrana.

En un campo homogéneo de una onda electromagnética incidente en la célula, surge una onda acustoeléctrica en la membrana, debido a una cierta presión excesiva del citoplasma en el interior de la célula y a fuerzas de interacción opuestas entre las cargas en la membrana y el componente eléctrico de la onda electromagnética. En este caso, las frecuencias de la onda electromagnética y acústico-eléctrica λ_{EM} y λ_{AE} son iguales. Entonces, la longitud de onda acústico-eléctrica λ_{AE} es igual a:

$$\lambda_{AE} = \lambda_{EM} n \frac{a}{c},$$

donde $n = 1,3$ – índice de refracción para los tejidos biológicos,

$$a = \sqrt{\frac{k}{\rho_m}}. \text{ Aquí } k = 0,45 \text{ N/m} - \text{módulo de elasticidad; } \rho = 800 \text{ kg/m}^3 -$$

densidad y $\rho_m = 3 \cdot 10^{-9} \text{ m}$ – espesor de la parte hidrófoba de la membrana; $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ – velocidad de la luz de la onda electromagnética en el vacío.

De aquí $\lambda_{AE} = 1,7 \dots 17 \text{ nm}$ con una longitud de onda $EM = 1,10 \text{ cm}$. Si el diámetro celular es de $0,5 \dots 10 \mu\text{m}$, entonces, como mínimo, se disponen 30 longitudes de onda acústico-eléctricas en la membrana. La frecuencia de resonancia, cuando se excita un número entero de oscilaciones de la onda acústico-eléctrica en la membrana, dependerá del tamaño y de las propiedades elásticas de la membrana, incluyendo la densidad de moléculas proteicas en la superficie y la cantidad de canales iónicos.

Ideológicamente, este enfoque se remonta al conocido trabajo de G. Fröhlich [13], donde, partiendo de consideraciones biofísicas generales, se justificó la posibilidad de la existencia de oscilaciones acústico-eléctricas en las membranas, cuya frecuencia se encuentra en el rango de $10^{11} \dots 10^{12} \text{ Hz}$. Sobre la base de esta idea, se desarrolló un enfoque «informativo» de la acción biológica de las ondas electromagnéticas de baja intensidad en el rango milimétrico [1], según el cual las células sanas poseen oscilaciones acústico-eléctricas propias en sus membranas. El papel de estas oscilaciones posiblemente se reduce a un cierto «masaje» de la membrana, asegurando el grado necesario de permeabilidad de los canales de transporte. Ante cualquier alteración en el proceso de la actividad vital celular, estas oscilaciones cambian la amplitud o la frecuencia, lo que afecta a la permeabilidad de las membranas. La influencia electromagnética externa en la frecuencia propia normal de la membrana puede sincronizar las oscilaciones de secciones individuales de esta o amplificar las oscilaciones atenuadas, lo que conduce a la corrección deseada del metabolismo celular

Además de la recepción a nivel molecular y de estructuras supramoleculares, la respuesta biológica a la exposición a la radiación electromagnética puede deberse también a efectos macroscópicos. Al irradiar un organismo con ondas electromagnéticas, es posible que se produzca interferencia en las heterogeneidades de los parámetros biofísicos de los tejidos. En este caso, pueden surgir gradientes de temperatura debido a la diferencia en la dosis absorbida entre áreas adyacentes de los tejidos. Con un nivel de potencia incidente de hasta 10^{-5} W/cm², pueden surgir gradientes de hasta 5 grados/mm [6]. Dichos gradientes pueden provocar una alteración en los procesos bioquímicos, modificar la transmisión de los impulsos nerviosos y, por consiguiente, inducir la aparición de señales nerviosas aferentes y humorales.

La ubicación de los máximos locales es muy sensible a la frecuencia de la onda electromagnética incidente. Un cambio de frecuencia de 200 MHz en el rango milimétrico puede conducir a una alteración cualitativa en el patrón de calentamiento. La respuesta a la exposición electromagnética puede mostrar un carácter de resonancia aguda, y el «factor de calidad equivalente» puede alcanzar un valor de 500 o superior [14]. La velocidad de calentamiento en los máximos del campo excede la media en un orden de magnitud o más; por lo tanto, es posible una reacción sensorial no específica del organismo, aunque esto ya compete a la fisiología. Los aspectos fisiológicos de la recepción de radiación electromagnética se examinan en el siguiente apartado.

6.3. Mecanismos fisiológicos de la recepción de radiación electromagnética a nivel del organismo completo

Los mecanismos físicos de la recepción de radiación electromagnética, considerados en el apartado anterior, permiten comprender cómo la actividad funcional de las biomacromoléculas y las estructuras supramoleculares se modifica bajo la acción de las ondas electromagnéticas. Surge la pregunta de cómo se manifiestan estos cambios en la fisiología del organismo y qué reacciones provoca en él la exposición directa a la radiación de baja intensidad. En este párrafo se ofrece una revisión de los resultados de las investigaciones sobre este tema.

N.N. Lebedeva [15] examina la diferencia entre los mecanismos neurofisiológicos de los efectos biológicos de las ondas electromagnéticas

de frecuencia infrabaja (ILF, $f = 1...50$ Hz) y frecuencia extremadamente alta (EHF, 30...100 GHz). Las diferencias encontradas en las reacciones EEG a los campos ILF y EHF se resumen en lo siguiente. Bajo la acción de campos ILF, los cambios en los procesos eléctricos cerebrales se producen en las regiones frontocentrales, así como en la región parietal del hemisferio contralateral (aumento de los ritmos). Y la reacción al campo de radiación de ondas milimétricas se manifiesta en un aumento de la potencia del ritmo en las regiones occipitales. Estos resultados evidencian la diferencia entre los mecanismos neurofisiológicos que modulan estas reacciones: la participación predominante del sistema sensorial lemniscal específico en el caso de campos de frecuencia extremadamente baja, y el extralemniscal no específico ante la acción de la radiación de ondas milimétricas. Posiblemente, estas diferencias estén determinadas por las propiedades físicas de las ondas electromagnéticas: los campos de frecuencia extremadamente baja penetran profundamente en los tejidos del organismo, involucrando en la reacción al sistema vascular y las fibras musculares, actuando directamente sobre las fibras nerviosas, mientras que la radiación de ondas milimétricas se absorbe casi por completo en la piel, actuando solo sobre los receptores superficiales, por lo que el mecanismo de acción en este caso es de tipo reflejo.

El carácter de la actividad bioeléctrica del neocórtex, resultante de la exposición prolongada a campos de ondas de frecuencia extremadamente alta (EHF) y extremadamente baja (ELF), indica el desarrollo de una reacción de activación no específica, es decir, un aumento del tono de la corteza cerebral. Uno de los mecanismos fisiológicos que asegura el efecto de las ondas milimétricas, cuya profundidad de penetración en los tejidos biológicos es muy pequeña, sobre los órganos internos, podría ser la mediación a través de los linfocitos. I.V. Rodshtat [16] presenta datos sobre la modulación de los tejidos cerebrales mediante radiación EHF. Se sabe que aproximadamente el 50 % de los linfocitos puede circular desde la sangre al tejido linfoide y viceversa. La mayoría de los linfocitos recirculantes se encuentra en los ganglios linfáticos regionales. Estas células inmunocompetentes pueden influir en el cerebro a través de la acción inhibidora de mediadores solubles que liberan.

La acción de las ondas milimétricas en el cerebro humano y animal se caracteriza por su asimetría. La irradiación de la mitad izquierda del cuerpo se dirige preferentemente al hemisferio derecho en humanos y, en animales de experimentación, se acompaña de un aumento de la población de linfocitos longevos en los ganglios linfáticos del lado irradiado [17]. El efecto observado al irradiar el lado derecho del cuerpo consiste en un aumento de la población de linfocitos de vida corta en los órganos linfoides, lo que se explica por un direccionamiento más uniforme del impacto en ambos hemisferios. Se puede suponer que, tras la irradiación de la mitad izquierda

del cuerpo con radiación de ondas milimétricas (KBЧ), la modulación de la actividad cerebral se produce a través de mecanismos nerviosos y humorales. La señal nerviosa se dirige principalmente al hemisferio derecho, mientras que la humoral lo hace al hipotálamo. La respuesta a la irradiación de la mitad derecha del cuerpo se debe, fundamentalmente, a mecanismos nerviosos, con señales dirigidas de forma más equitativa a ambos hemisferios.

Al considerar los mecanismos fisiológicos de la recepción de la radiación electromagnética, es necesario, en primer lugar, determinar las dianas fisiológicas primarias que se encuentran en la zona de acción de las ondas electromagnéticas. Aparentemente, la totalidad de la banda de frecuencias puede ser recibida por estructuras próximas a la superficie cutánea. N.N. Lebedeva [18] identifica cinco dianas fisiológicas primarias que se encuentran en la zona de acción directa de la radiación electromagnética: 1) receptores del sistema nervioso central (mecanorreceptores, terminaciones nerviosas libres); 2) células del sistema neuroendocrino difuso, en particular mastocitos y células de Merkel; 3) células del sistema inmunitario – depósitos cutáneos de linfocitos T; 4) lecho microcapilar del sistema circulatorio; 5) puntos biológicamente activos (PBA).

Estas cinco dianas primarias determinan la participación de los sistemas correspondientes en la realización de los efectos biológicos de la radiación electromagnética. Tras el «inicio» de estos sistemas, comienza un complejo proceso de acción mediada sobre otros sistemas (circulatorio, humoral, nervioso vegetativo) y órganos internos. Las características de la reacción en esta etapa están determinadas tanto por las propiedades de la radiación electromagnética y el régimen de irradiación, como por el estado inicial del organismo. El efecto general se manifiesta como una reacción de aumento de la resistencia inespecífica del organismo, lo que, a su vez, está relacionado con reacciones antiestrés de alto nivel de reactividad [18].

En una investigación sobre el impacto de la radiación electromagnética de baja intensidad en el rango de ondas milimétricas (5,6 mm) sobre el estado funcional de la corteza cerebral [19], se obtuvieron los siguientes datos:

1. El estado funcional de la corteza cerebral se modifica a los 20 ms tras el inicio de la irradiación electromagnética de la piel en el área del tercio distal de la proyección esternal.
2. Los procesos que se desarrollan bajo la acción de la radiación electromagnética de ondas milimétricas (KBЧ) en la neocorteza, incluida la zona de proyección primaria del analizador visual, no solo preceden, sino que también pueden invertir el signo del componente cortical inicial de los potenciales evocados visuales obtenidos en respuesta a un destello de luz sincronizado con el inicio de la irradiación electromagnética.

3. Una condición necesaria para la manifestación del efecto de la irradiación KBЧ es la sincronización preferente de los potenciales corticales en una de las subbandas del ritmo (máxima eficacia a una frecuencia de 11 Hz), debiendo estar ausente la aferencia consciente.

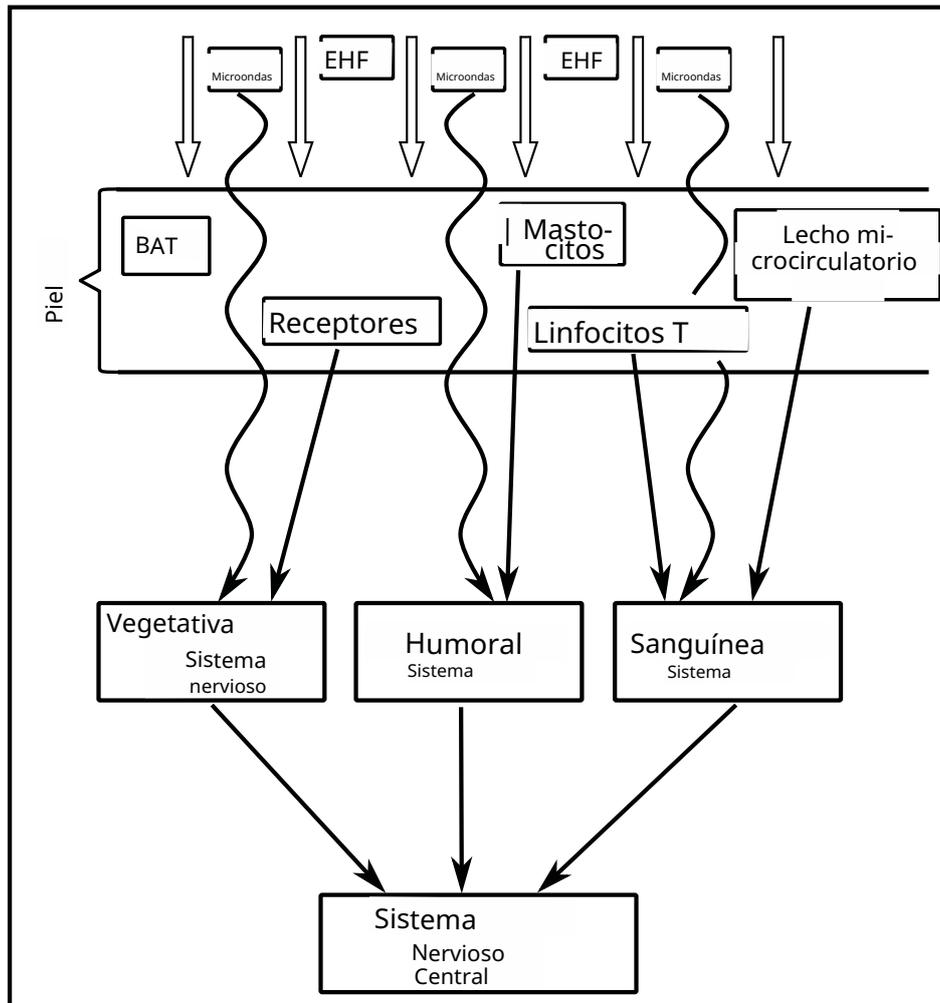


Fig. 6.5. Mecanismos fisiológicos probables de la influencia de las ondas electromagnéticas en el SNC.

Como mecanismo más probable de la reacción de la corteza cerebral a la influencia electromagnética, A.A. Kovalev y O.V. Presnyakov [19] proponen la modulación de la actividad impulsiva de fondo de las neuronas presentes en los ganglios espinales, causada por la absorción de ondas electromagnéticas en los receptores. En este caso, la actividad de fondo de las neuronas provoca la propagación constante de potenciales hacia el cerebro (aferencia) a lo largo de las fibras de los cordones posteriores de la médula espinal y del sistema lemniscal medial (grupo A), que conducen la excitación más rápidamente. La radiación electromagnética

Al influir en los receptores cutáneos, cambia el carácter de estas señales aferentes espontáneas y constantemente transmitidas, traduciendo el neocórtex a un estado diferente, lo que modifica la reacción a los impulsos luminosos que actúan simultáneamente.

En la investigación de las reacciones sensoriales a la exposición a ondas electromagnéticas de baja intensidad en el rango milimétrico [20], se descubrió que la percepción humana de dicha exposición depende de las características individuales de cada persona. Las personas que mejor perciben tales estímulos son aquellas en las que se observó la mayor potencia de los ritmos EEG en la región de las derivaciones parietooccipitales. Presentaban un umbral del dolor más bajo a la corriente eléctrica y el valor más alto de la frecuencia crítica de parpadeo. Se ha observado que el reconocimiento de la señal electromagnética requería un tiempo considerable (más de 400 ms). Aparentemente, la consciencia de la significación del estímulo y su adscripción a una clase específica de objetos requiere la interacción de sistemas sensoriales y no sensoriales, utilizando un aparato conceptual. Los sistemas sensoriales que permiten reconocer la radiación electromagnética se examinan en el apartado siguiente.

6.4. Sistemas sensoriales de mamíferos.

Papel de la organización estructural de la piel en la recepción de la radiación electromagnética (REM)

Los trabajos experimentales que utilizan radiación electromagnética de un amplio espectro de frecuencias han demostrado que, incluso a baja intensidad de los campos electromagnéticos, los humanos y los animales perciben este efecto. ¿Existen receptores específicos para ello? Si estas sensaciones no son específicas y están condicionadas únicamente por campos electromagnéticos, ¿qué representan los sistemas que «traducen» las influencias electromagnéticas al «lenguaje» de las sensaciones no específicas? Consideremos esta cuestión.

La investigación de los mecanismos de recepción de la radiación electromagnética se lleva a cabo activamente desde la década de 1970. del siglo pasado, sobre todo en relación con los receptores específicos. Puesto que el campo electromagnético posee componentes magnéticas y eléctricas, se alude tanto a la magnetorrecepción como a la electrorrecepción. Entre las áreas más desarrolladas en

direcciones aplicables a mamíferos terrestres, cabe destacar dos: la magnetorrecepción directa, fundamentada en la presencia de partículas de magnetita en los tejidos, y la magnetorrecepción indirecta, basada en la ley de Faraday, que en la práctica es electrorrecepción.

Los trabajos realizados inicialmente por J.L. Kirschvink [21, 22] confirman que todos los tejidos y órganos humanos contienen partículas de magnetita. Se ha detectado una cantidad especialmente alta en los tejidos cerebrales [23], las glándulas suprarrenales y el tejido óseo del seno esfenoidal etmoidal [24]. La hipótesis, basada en el uso de magnetita para la magnetorrecepción en animales, sugiere que la sensibilidad a la dirección del campo puede explicarse por la presencia de unas pocas estructuras, similares a magnetosomas, unidas a células ciliadas (como ocurre en bacterias ferroproteicas). Sin embargo, no se han identificado estructuras que pudieran ser responsables de la implementación del mecanismo de recepción mediado por partículas de magnetita. Se desconoce el mecanismo de funcionamiento detallado del sistema sensorial basado en magnetita.

Otra vía posible de magnetorrecepción es la magnetorrecepción indirecta, que se observa, en particular, en peces elasmobranquios. En animales terrestres, esta sería factible si se cumplen una serie de requisitos para el posible órgano de recepción de radiación electromagnética [25]: el órgano debería ser similar a una bobina, compuesta por una o varias espiras de un conductor, y sus dimensiones deberían ser de al menos varios milímetros. La estructura que cumple estos requisitos se ha encontrado en mamíferos y corresponde a un sistema de líneas de Voigt [26]. El sistema de líneas de Voigt está formado por folículos pilosos dispuestos de forma ordenada, que configuran un sistema de líneas perpendiculares al eje longitudinal del cuerpo del animal [27] (Fig. 6.6).

La imagen obtenida se corresponde idealmente con un solenoide, cuyas espiras están formadas por la estructura cutánea del animal. Como «conductores» actúan, por un lado, las líneas de Voigt, que consisten en grupos de folículos pilosos dispuestos secuencialmente, con una red de capilares que los envuelven y que presentan una mayor conductividad en comparación con el tejido conectivo del espacio que separa las líneas de Voigt, el cual desempeña el papel de aislamiento entre las espiras del solenoide.

Las líneas de Voigt, que forman las espiras de un «solenoides», según se postula, representan un sistema físico [28] capaz de generar una señal perceptible por el organismo animal. Este sistema puede operar en un rango de frecuencias muy amplio, desde continua hasta extremadamente alta (EHF), de forma análoga a un sistema de circuitos oscilatorios acoplados. A bajas frecuencias, incluso en presencia de un campo magnético constante, durante el movimiento del animal a través de las líneas de Voigt, a modo de espiras de un

En el linoide, se inducirán corrientes eléctricas. Y en el caso de campos de ondas milimétricas (Ondas KVC), el sistema de líneas actúa como una rejilla de difracción, modulando la transmisión de la onda hacia las capas subcutáneas. En las frecuencias intermedias, de acuerdo con la multimodalidad de la característica de frecuencia del sistema oscilatorio considerado («solenoide» – líneas de Voigt), pueden surgir resonancias (modos de oscilación). La señal inducida en las frecuencias bajas e infrabajas puede conducir a la aparición de un impulso nervioso aferente, y en las frecuencias altas, hasta las ondas milimétricas (Ondas KVC), la mediación puede llevarse a cabo mediante los efectos de la exposición a la radiación electromagnética a nivel molecular.

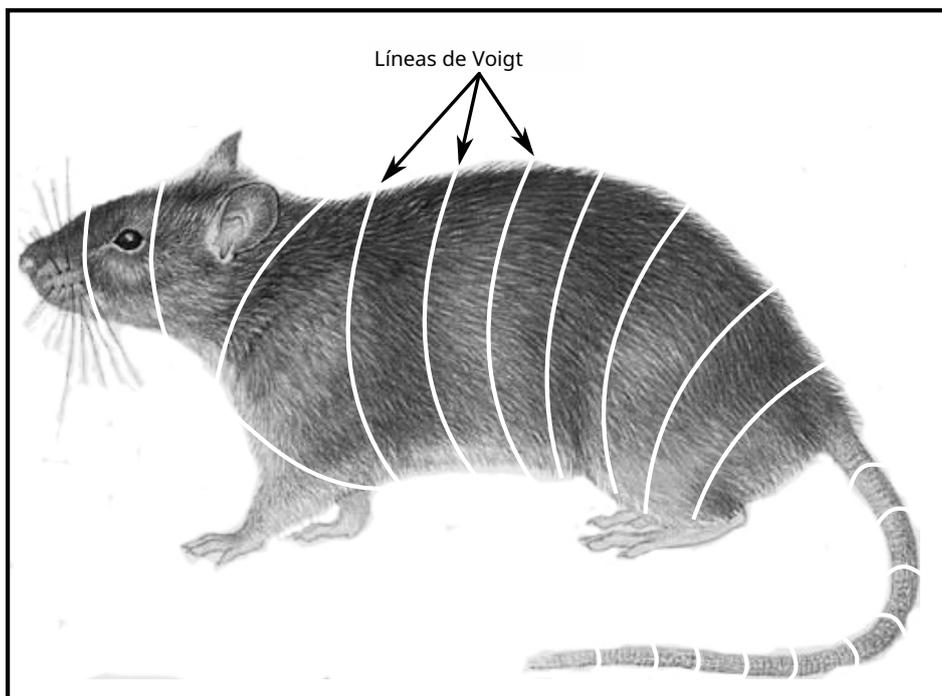


Fig. 6.6. Ubicación de las líneas de Voigt en el cuerpo del animal.

La confirmación experimental de la validez de estos razonamientos reside en los resultados obtenidos al irradiar ratones con radiación electromagnética de ondas milimétricas en la región del muslo [29]. Las mediciones de la absorción de oscilaciones EHF en el rango de frecuencias de 41,0 a 43,0 GHz, tanto en la piel de ratones intactos como en animales con colgajo cutáneo creado quirúrgicamente, mostraron que existe una dependencia lineal entre el nivel de absorción de la radiación EHF y la distancia entre líneas de Voigt adyacentes. Estos resultados concuerdan con la hipótesis de que las líneas de Voigt, en este rango de frecuencias de radiación electromagnética (REM), actúan como una rejilla de difracción. Finalmente, la confirmación de que las líneas de Voigt actúan como un transductor primario sensible a la REM es

la dependencia frecuencial observada de la ROE (relación de onda estacionaria), asociada a la absorción de radiación por la piel, cuyos parámetros físicos están determinados por la presencia de los denominados «conductores» y «aislantes», formados por las líneas de Voigt [30].

De los resultados obtenidos en experimentos con ratones [31] se deduce que los animales reaccionan a la dirección del vector del campo geomagnético (CGM). Según las representaciones actuales, cuanto mayor sea el área del cuerpo del animal que se encuentre perpendicular al vector del campo magnético, mayor será el valor esperado de la señal inducida y, por consiguiente, la reacción del animal. Los resultados de experimentos en un campo magnético constante (CMC) [32] también demostraron que las reacciones conductuales de los ratones tras la exposición, en comparación con las iniciales, dependen de la posición del animal en el campo experimental. El mayor efecto se observó cuando la dirección del eje principal del cuerpo del animal coincidía con el vector de intensidad del campo, es decir, cuando el vector es perpendicular a las «espiras del solenoide» formado por las líneas de Foit.

Los autores de la hipótesis del sistema sensorial de percepción de la radiación electromagnética (REM) [28] proponen que, independientemente del mecanismo y del sustrato material que asegure la mediación, lo más esencial en la recepción de REM es la aparición de una señal aferente que conduzca a un cambio en el grado de activación del sistema hipotálamo-hipófiso-suprarrenal. En esencia, los animales, gracias a un sistema similar, poseen la capacidad de modificar su estado adaptativo y, de este modo, mantenerlo en un tono determinado que resulta óptimo para responder a cualquier impacto al que puedan enfrentarse.

Un punto importante en el debate de la hipótesis propuesta es la existencia de asimetría en el sistema de líneas de Voigt. En todos los ratones investigados se observó una asimetría de las líneas de Voigt entre el lado derecho y el izquierdo, lo que, en opinión de los autores, contribuye a aumentar la sensibilidad a la señal en fase. La asimetría proporciona, por analogía con diversos sistemas diferenciales técnicos (empezando por el amplificador diferencial), una mayor sensibilidad a la diferencia de señal.

Al moverse, el ratón atraviesa las líneas de fuerza del campo geomagnético. Esto puede inducir corrientes en los «conductores», cuya magnitud depende de la velocidad de cambio del flujo magnético a través del circuito conductor y la resistencia de los «conductores» ($F = HS \sin \alpha$, donde F – flujo de inducción magnética; S – área del circuito; α – ángulo entre el plano del circuito y la dirección de las líneas de fuerza del campo).

De este modo, el desplazamiento lineal del ratón, los movimientos respiratorios del animal, así como los giros y elevaciones pueden inducir corrientes de inducción.

Corrientes de inducción. Así, cuando el animal se sitúa de este a oeste o de oeste a este, los movimientos respiratorios no inducen corrientes. Cuando el ratón se mueve perpendicularmente a la componente horizontal del vector del CGM, se induce una fuerza electromotriz en las superficies dorsal (dors), ventral (ventr) y laterales (side), que induce la aparición de las corrientes correspondientes:

$$U_h^{side} = \frac{dl}{dt} k H_h;$$

$$U_v^{dors} = U_v^{ventr} = \frac{dl}{dt} k H_v,$$

donde H_h – componente horizontal del campo geomagnético; H_v – componente vertical del campo geomagnético; V – velocidad de movimiento del ratón; I_h^r – corrientes inducidas al cruzar la componente horizontal del CGM durante la respiración del animal; I_v^m – corrientes inducidas al cruzar la componente vertical del CGM durante el movimiento del animal; ΔS – cambio en el área de la sección transversal del tórax del ratón durante la espiración.

Al moverse el ratón a lo largo de la componente horizontal del vector del CGM, se induce una fuerza electromotriz en las superficies dorsal y ventral, lo que induce la aparición de las corrientes correspondientes:

$$\Delta U^m = U_v^{dors} = U_v^{ventr}.$$

Con una disposición similar del ratón, sus movimientos respiratorios, que provocan una variación en el área de la sección transversal del tórax, inducen una FEM en toda la superficie corporal. La dirección de las corrientes inducidas depende de la dirección de la variación del área de la sección transversal, es decir, la inspiración y la espiración dan lugar a corrientes de direcciones opuestas:

$$\Delta U^r = (\Delta U_h^{dors} = \Delta U_h^{ventr} = 2\Delta U_h^{side}).$$

Sumando el resultado de la acción del movimiento y la respiración, obtenemos (inspiración):

$$\Delta U = 2\Delta U_h^{side} = (\Delta U_h^{dors} = \Delta U_v^{dors}) = (\Delta U_h^{ventr} = \Delta U_v^{ventr});$$

$$\Delta U = 2 \frac{dS^{side}}{dt} k H_h = \frac{dS^{ventr}}{dt} k H_h = \frac{dl^{ventr}}{dt} k H_v =$$

$$= \frac{dS^{dors}}{dt} k H_h = \frac{dl^{dors}}{dt} k H_v.$$

Por lo tanto, las corrientes inducidas en las superficies laterales dependen de los movimientos respiratorios. Las corrientes inducidas en la superficie dorsal

son máximas durante la exhalación y mínimas durante la inhalación. Las corrientes inducidas en la superficie ventral son máximas durante la inhalación y mínimas durante la exhalación.

La investigación sobre la percepción de radiación electromagnética en humanos [33] lleva a T.I. Kotrovskaya a concluir que no existen formaciones específicas. En sus trabajos, se basan en la posible participación de receptores conocidos. Las investigaciones sobre las reacciones sensoriales humanas a las débiles exposiciones electromagnéticas han demostrado que, según los informes subjetivos de los sujetos de prueba, las modalidades de las sensaciones resultantes se distribuyen de la siguiente manera: hormigueo – 38,2 %, presión – 29 %, calor-frío – 12 %, tacto – 9,2 %, vibración, pulsación – 5,2 %, dolor, distensión – 3 %, picor, dolor, ardor – 3 % [34]. A juzgar por la modalidad de las sensaciones emergentes, en la recepción del estímulo electromagnético participan mecanorreceptores o terminaciones nerviosas libres: fibras eferentes no mielinizadas sin estructuras corpusculares en el extremo [35, 36].

Puesto que para la recepción de estímulos tan débiles como los campos electromagnéticos de baja intensidad se necesitan receptores de adaptación lenta, o receptores con actividad de fondo, o preferiblemente ambos, de los mecanorreceptores, solo las terminaciones de Ruffini, los discos táctiles y los discos de Merkel cumplen estos requisitos. Los receptores del dolor (nociceptores) de la piel también cumplen estos requisitos. Son terminaciones nerviosas libres con fibras nerviosas mielinizadas o amielínicas delgadas, y se caracterizan por las siguientes propiedades: poliespecificidad con respecto a los estímulos; modalidad de sensaciones, como hormigueo o ardor, que los especialistas interpretan como «predolor»; desaparición de la sensibilidad electromagnética tras el tratamiento de la piel con cloroetilo, que «desactiva» los receptores del dolor; respuesta sensorial en el órgano afectado al irradiar los dermatomas correspondientes (convergencia de aferentes nociceptivos desde los dermatomas de órganos internos hacia las mismas neuronas de las vías del dolor, manifestándose hipersensibilidad cutánea debido a que los impulsos viscerales aumentan la excitabilidad de las interneuronas, generándose facilitación, es decir, «alivio»).

Las investigaciones sobre la percepción de señales electromagnéticas han demostrado la existencia de un período latente prolongado en su reconocimiento, lo que, según los autores, está relacionado con el contenido del proceso perceptivo [34]. Este último se puede dividir convencionalmente en tres etapas: 1) análisis de las característi

cas características del estímulo; 2) síntesis de la información sensorial y no sensorial sobre el estímulo; 3) identificación del estímulo, es decir, su asignación a una clase determinada de objetos. Se ha descubierto que la sensación surge solo en la segunda etapa del proceso sensorio-perceptivo. En este caso, el objeto externo aparece en la conciencia como un conjunto de sus características físicas. La conciencia del estímulo ocurre en la tercera etapa.

A cada etapa le corresponde un tipo de respuesta diferente: la primera, un reflejo condicionado automatizado con una latencia de aproximadamente 100...200 ms desde el momento del estímulo; la segunda, una reacción en respuesta a la sensación (200...400 ms); la tercera, respuestas del organismo que se forman sobre la base de una plena conciencia de la importancia del estímulo. Las reacciones de este tipo tienen una latencia ilimitada, puesto que la respuesta puede producirse incluso después de un largo tiempo [37]. Es probable que la reacción de reconocimiento de la señal electromagnética sea del tipo 3, con un período latente 3 órdenes de magnitud mayor que el tiempo de reacción en los sistemas sensoriales visual y auditivo, y que sea de 40...50 s.

Considerando las posibles causas del retraso de la señal en las reacciones sensoriales, se distinguen cuatro bloques principales en el arco reflejo: campo receptivo → vías de conducción → bloque subcortical de análisis de estímulos → bloque cortical de análisis, formación de sensaciones y verbalización [38]. En el primer bloque no debería haber retrasos; en el segundo bloque, los retrasos son posibles debido a un gran número de conmutaciones sinápticas, la conducción de señales aferentes por fibras nerviosas no mielinizadas y la inclusión de componentes humorales. En el tercer y cuarto bloque podrían surgir retrasos significativos debido a las dificultades para identificar una señal como un campo electromagnético.

Un estudio detallado de los cambios en la actividad cerebral inducidos por la radiación electromagnética (REM) reveló que los campos de microondas (CBЧ) provocan la aparición de una reacción de sincronización electroencefalográfica (EEG) difusa (en todas las áreas del cerebro) y no específica (independiente de los parámetros), que se manifiesta en un aumento del número de ondas lentas y husos en el EEG [39]. Según otros datos, se identificó la reacción más intensa en los grandes hemisferios cerebrales, el hipotálamo y los núcleos inespecíficos del tálamo [40]. Existen informes sobre la gradación de la intensidad de la reacción del EEG al campo de microondas, siendo mayor en el hipotálamo y disminuyendo en el siguiente orden: corteza, tálamo, hipocampo, formación reticular [41]. Los datos experimentales obtenidos [33] sobre la indicación sensorial de radiación EHF demostraron la influencia de esta en la organización espacio-temporal de los biopotenciales cerebrales humanos. Estos datos no permiten atribuir las vías

de conducción de la señal procedente del impacto electromagnético a vías específicas.

A su vez, un sistema no específico se caracteriza porque sus entradas aferentes no están tan claramente definidas; el sistema puede excitarse mediante señales que convergen desde todas las superficies sensoriales (convergencia polimodal o polisensorial). Las características de la percepción y conducción de la señal electromagnética permitieron sugerir [38] que esta se lleva a cabo, principalmente, a través del sistema somatosensorial no específico (extralemniscal). Las funciones principales del sistema inespecífico son la coloración emocional de la percepción, el control del estado de consciencia y las reacciones de orientación.

6.5. Conclusiones

Las principales características de la radiación electromagnética en los organismos, consideradas en los § 6.1–6.3, pueden resumirse brevemente en forma de tablas. A continuación, en las tablas 6.1–6.3, se presentan aquellas manifestaciones de los mecanismos físicos y fisiológicos de *воздействии* sobre los sistemas del organismo que tienen una importancia directa para la salud humana. El análisis de estos datos se realizó en la conclusión general de la revisión. En lo que respecta a los sistemas sensoriales que podrían proporcionar una percepción de la radiación electromagnética, existen muy pocos estudios específicos al respecto, la mayoría de ellos relacionados con el campo de las bajas frecuencias. Por lo tanto, las conclusiones extraídas de la revisión de las publicaciones disponibles son de carácter especulativo. La tesis principal es que el sistema sensorial contiene sensores inespecíficos (mecanorreceptores, nociceptores, terminaciones nerviosas), cuyas señales se forman debido al cambio del estado de las estructuras biológicas a nivel micro. Las líneas de Foit podrían considerarse como un macrosistema que contribuye a la formación de tales señales mediante la amplificación del efecto del campo electromagnético en los sen-

Tabla 6.1

Efectos térmicos

1	Mecanismo de acción de la radiación de nivel térmico.	1. Calentamiento de tejidos biológicos debido a las pérdidas por polarización en el componente acuoso.
2	Efectos a nivel celular	1. Alteración de la actividad química del agua y los electrolitos. 2. Alteración de la actividad funcional de las proteínas, incluidas las enzimas. 3. Alteración de los procesos metabólicos, disminución del nivel de actividad vital de las células. 4. Muerte celular.
3	Consecuencias a nivel del organismo.	1. Depresión y descoordinación del funcionamiento de los sistemas del organismo. 2. Disminución de la inmunidad. 3. Enfermedades crónicas.

Tabla 6.2

Efectos de la radiación electromagnética no térmica

Pos.	Objeto de acción	Mecanismo físico posible	Consecuencias biológicas relevantes
1	Moléculas de agua	Excitación de oscilaciones en clústeres de agua a) por interacción directa con la radiación electromagnética; b) Debido a la interacción con biomoléculas del tipo ATP.	<ul style="list-style-type: none"> • Modificación de la actividad química del agua y los electrolitos. • Modificación del grado de hidratación de las proteínas, y consecuente alteración de su actividad funcional.
2	Biomacromoléculas	Sincronización y acumulación de energía en modos vibracionales en estructuras encadenadas de proteínas y ADN.	<ul style="list-style-type: none"> • Transiciones conformacionales en moléculas proteicas y, como consecuencia, alteración de la actividad funcional: <ol style="list-style-type: none"> a) Enzimas; b) Proteínas de compuerta; c) Proteínas de transporte. • Ruptura de las hebras de ADN. • Alteración de la estructura terciaria de los cromosomas y modificación de la transcripción.
3	Membranas	Excitación de ondas acustoelectricas.	<ul style="list-style-type: none"> • Alteración de la distribución de carga en la membrana. • Transiciones conformacionales en moléculas proteicas integradas en la membrana y alteración de sus propiedades funcionales.
4	Biotextos.	Calentamiento local en los vientres de ondas estacionarias durante la interferencia de ondas electromagnéticas.	Alteración de la actividad de los procesos metabólicos.

Mecanismos fisiológicos de recepción

		Tipo de manifestación
1	Recepción de la radiación	1. Mecanorreceptores: a) Corpúsculos de Ruffini; b) Discos de Merkel. 2. Receptores del dolor. 3. Células inmunocompetentes: a) Mastocitos; b) Linfocitos
2	Mediación aferente	1. Señal nerviosa: a) Modulación del potencial de acción; b) Generación del potencial de acción. 2. Señal humoral. 3. Respuesta vasovegetativa
3	Reacción del SNC	1. Corteza cerebral – evaluación integral de la información somatosensorial aferente. 2. Hipotálamo: reacciones de los centros de regulación de las funciones vegetativas, incluida la reacción del sistema de regulación del nivel de corticosteroides en sangre.
4	Respuesta eferente	1. Neurohumoral. 2. Nervioso. 3. Vasomotor: a) Cambio de tono; b) Cambio del suministro sanguíneo a los tejidos.

Lista de referencias bibliográficas del capítulo

1. Devyatkov N.D. Ondas milimétricas y su papel en los procesos de la actividad vital / N.D. Devyatkov, M.B. Golant, O.V. Betsky. – M.: Radio y Comunicación, 1991. – 169 p.
2. Chukova Yu.P. Procesos isotérmicos de interacción del campo electromagnético con bioobjetos // Ondas milimétricas en Biología y Medicina. – 1996. – № 8. – C. 48–61.
3. Espectroscopia de absorción milimétrica de sistemas acuosos / Yu.Y. Khurgin [et al.] // Advances in Chemical Physics. – 1994. – V. 87. – P. 483.
4. Khurgin Yu.I. Sobre el papel de la activación del agua en la terapia medicinal y EHF / Yu.I. Khurgin, O.V. Lebedev, E.Yu. Maksareva // Ondas milimétricas en biología y medicina. – 1994. – № 4. – C. 28–32.
5. Betsky O.V., Lebedeva N.N. Representaciones modernas sobre los mecanismos de impacto de las ondas milimétricas de baja intensidad en biología

- lógicos // Ondas milimétricas en biología y medicina.
– 2001. – № 3. – C. 5–19.
6. Betsky O.V. Mecanismos de recepción primaria de ondas milimétricas de baja intensidad en humanos // Actas del X Simposio Ruso «Ondas milimétricas en medicina y biología». Moscú, 24–26 de abril de 1995. – M., 1995. – Pág. 135–138.
 7. Física de la interacción de ondas milimétricas con objetos biológicos / V.I. Petrosyan [y otros] // Actas del X Simposio Ruso «Ondas Milimétricas en Medicina y Biología». Moscú, 24–26 de abril de 1995 – M., 1995. – Págs. 140–143.
 8. Papel de los procesos resonantes moleculares-ondulatorios en la naturaleza y su uso para el control y la corrección del estado de los sistemas ecológicos / V.I. Petrosyan [y otros] // Radioelectrónica Biomédica. – 2001. – N.º 5–6. – Págs. 62–127.
 9. Sobre el mecanismo biofísico de la influencia de la radiación de ondas milimétricas en los procesos biológicos / A.P. Zhukovsky [et al.] // Actas del X Simposio Ruso «Ondas Milimétricas en Medicina y Biología». Moscú, 24–26 de abril de 1995. – M., 1995. – Pág. 152–153.
 10. Sobre el mecanismo bioquímico de la influencia de la radiación de ondas milimétricas en los procesos biológicos / A.P. Zhukovsky [et al.] // Ondas Milimétricas en Biología y Medicina. – 1993. – № 2. – Pág. 36–42.
 11. Sobre los mecanismos biofísicos de los efectos del campo electromagnético de frecuencia extremadamente alta en las membranas celulares / M. Kuzmanova [et al.] // Informes del X Simposio Ruso «Ondas Milimétricas en Medicina y Biología». Moscú, 24–26 de abril de 1995. – M., 1995. – Pág. 157.
 12. Mecanismo biofísico de la aparición de ondas acústico-eléctricas en la membrana celular / A.N. Volobuev [et al.] // Ondas milimétricas en biología y medicina. – 1995. – N.º 5. – Pág. 14–17.
 13. Frohlich H. Bose condensation of strongly excited longitudinal electric modes // Phys. Lett. – 1968. – V. 26A. – P. 402.
 14. Khizhnyak E.P., Ziskin M.S. Mecanismos de interacción de la radiación electromagnética de rango milimétrico con objetos biológicos // Recopilación de informes del XI Simposio Ruso «Ondas Milimétricas en Medicina y Biología». Moscú, 2–12 de abril de 1997. – M., 1997. – C. 128–131.
 15. Lebedeva N.N. Mecanismos neurofisiológicos de los efectos biológicos tras la exposición periférica a campos no ionizantes de baja intensidad en humanos // Informes del X Simposio Ruso «Ondas Milimétricas en Medicina y Biología». Moscú, 24–26 de abril de 1995 – M., 1995. – Pág. 138–140.

16. Rodstat I.V. Mecanismos fisiológicos de la modulación EHF (ondas de frecuencia extremadamente alta) de tejidos inmunorreactivos y nerviosos según datos de trabajos experimentales y clínicos // Informes del X Simposio Ruso «Ondas milimétricas en medicina y biología». Moscú, 24–26 de abril de 1995 – M., 1995. – Pág. 145–147.
17. Gurevich M.E. Reacción de los ganglios linfáticos de ratones a la radiación de microondas de rango milimétrico, en función del lugar de exposición y el estado inicial de los animales: resumen de tesis doctoral / M.E. Gurevich; Instituto Médico de Tomsk. – Tomsk, 1987.
18. Lebedeva N.N. Mecanismos fisiológicos de los efectos biológicos de las ondas electromagnéticas de baja intensidad en el rango milimétrico // Actas del XI Simposio Ruso «Ondas Milimétricas en Medicina y Biología», Moscú, 2–12 de abril de 1997. – M., 1997. – Pág. 126–128.
19. Kovalev A.A, Presnyakov O.V. Mecanismo de la influencia primaria sobre la corteza cerebral humana de las manifestaciones de la transformación en su organismo de la radiación externa de baja energía EHF // Ondas Milimétricas en Biología y Medicina. – 1999. – № 2(14). – Pág. 25–36.
20. Lebedeva N.N., Kotrovskaya T.N. Recepción electromagnética y características individuales del ser humano // Ondas milimétricas en biología y medicina. – 1996. – № 7. – C. 14–19.
21. Magnetit in human tissues: the mechanism for biological effects of weak ELF magnetic fields / J.L. Kirschvink [et al.] // Bioelectromagnetics. – 1992. – V. 1. – P. 101–103.
22. Kirschvink J.L., Gould J.L. Biogenic magnetit as a basis for magnetic field detection in animals // BioSystems. – 1981. – V. 13. – P. 181.
23. Kirschvink J.L. Magnetit biomineralization in a human brain / J.L. Kirschvink, A. Kobayashi-Kirschvink, B.J. Woodford // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. – 1992. – V. 89 (16). – P. 7683–7687.
24. Bäcker R. Robin. Magnetorrecepción en humanos y otros primates / Magnetita biogénica y magnetorrecepción. – M.: Mir, 1989. – T. 2. – C. 342–374.
25. Rosenblum B. Limitaciones al considerar la hipótesis de inducción de la magnetorrecepción / B. Rosenblum, R.L. Jungerman, L. Лонгфел-лоу // Magnetita biogénica y magnetorrecepción. – M.: Mir, 1989. – T. 1. – C. 293–305.
26. Калантаевская К.А. Morfología y fisiología de la piel humana. – Kiev, 1972. – C. 267.
27. Чуприкова Е.М., Перельмутер В.М. Particularidades de la disposición de los folículos pilosos en la piel de ratón // Problemas actuales de la biología médica. – Tomsk: SGMU, 2002. – C. 54–55.

28. Hipótesis: «Líneas de Voigt (disposición ordenada de los folículos pilosos): sistema sensorial de radiaciones electromagnéticas» / V.I. Zelentsov [et al.] – Producto intelectual n.º 72200200008, registrado en VNTIC el 06.03.2002.
29. Shalovay V.V. Característica morfofuncional de la piel de ratones bajo la influencia de radiación de EHF de baja intensidad en el rango milimétrico: resumen de tesis ... cand. med. sci. / V.V. Shalovay. – Tomsk, 1995. – 29 p.
30. Shalovay V.V. Relación de los parámetros de las líneas de Voigt con un sistema adaptativo / V.V. Shalovay, V.M. Perel'muter, Z.I. Rzhhevskaya. – Tomsk, 1993. – 9 p. – Dep. En VINITI, 01.07.93, n.º 1816-B93.
31. Método de registro de la acción biológica de campos electromagnéticos débiles / V.I. Zelentsov [y otros]. – M., 1999. – Patente de invención de 10.09.99 n.º 98102648/14(992080).
32. Chuprikova E.M. El papel del estatus jerárquico de los animales experimentales en la respuesta a estímulos débiles // Colección de artículos de jóvenes científicos y estudiantes «Problemas modernos de la medicina fundamental y clínica». – Tomsk, 1999. – pp. 39–40.
33. Kotrovskaya T.I. Reacciones sensoriales del ser humano a la acción de un estímulo electromagnético débil // Ondas milimétricas en biología y medicina. – 1994. – № 3. – C. 32–38.
34. Lebedeva N.N. Reacción del sistema nervioso central humano a campos electromagnéticos con diferentes parámetros biótropos: dis. ... dñ pa biol. nauk en forma de informe científ. / N.N. Lebedeva. – M., 1992. – 48 p.
35. Korinevskaya I.V. Correlatos EEG del ser humano ante una exposición periférica diversa a un campo magnético variable / I.V. Korinevskaya, Yu.A. Kholodov, A.V. Korinevsky // Fisiología humana. – 1993. – T. 19(3). – C. 71–79.
36. Ivanitsky A.M. Procesos informativos del cerebro y actividad psíquica / A.M. Ivanitsky, V.B. Strelets, I.A. Korsakov. – M.: Nauka, 1984. – 201 p.
37. Jolodov Yu.A., Lebedev N.N. Reacciones del sistema nervioso humano a los campos electromagnéticos. – M.: Nauka, 1992. – Pág. 96.
38. Rodstat I.V. Enfoque psicofísico para la evaluación de algunas reacciones del organismo durante el efecto terapéutico de las ondas milimétricas. – Preprint № 11(52). – M.: IRÉ AN URSS, 1989. – Pág. 21.

CONCLUSIÓN

Los efectos biológicos de la radiación electromagnética revisados en este estudio ofrecen una visión general de la importancia de este factor físico para la salud humana. Las ondas electromagnéticas, incluso con potencias no térmicas e intensidades del nivel del ruido o de la radiación parásita emitida por dispositivos domésticos y tecnológicos, ejercen un impacto en las estructuras biológicas, desde las biomoléculas hasta el organismo en su totalidad.

Los principales resultados observables del impacto de la radiación electromagnética de intensidad no térmica en objetos biológicos de diferente nivel de organización, los más importantes desde el punto de vista de la salud humana, pueden resumirse en la siguiente tabla generalizada.

Tabla

Efectos biológicos de la radiación electromagnética

Objeto de Exposición	Rango de Frecuencias	Resultado de la exposición
Moléculas de agua en el bioobjeto		
Moléculas de agua en un bioobjeto	1...150 GHz	a) Alteración de la estructura de los clústeres de agua; b) alteración de la actividad química del agua; c) alteración de la hidratación de moléculas proteicas. Biomoléculas
ADN	1...80 GHz	ruptura de la cadena, bloqueo de la lectura
Enzimas		alteración del estado conformacional, con la consecuente modificación de la actividad funcional
Proteínas de membrana		alteración de la eficacia del transporte de iones y moléculas a través de las membranas
Proteínas de transporte		modulación de la afinidad por las moléculas transportadas
Membranas		
Membranas	50...80 GHz	a) aumento de la estabilidad de las membranas
	50...80 GHz	b) alteración de la distribución de carga en la superficie, modificación del potencial de membrana
	50...80 GHz, impulsos ultracortos con una portadora $f = 10$ GHz	c) alteración de la permeabilidad para los iones Na^+ y K^+ , moléculas de agua
	40...60 GHz	d) alteración de la conducción del impulso nervioso

Células		
Células	1... 70 GHz	1. Alteración de la resistencia de las membranas. 2. Alteración de la dinámica y estructura del sistema proteico en la superficie de las membranas; alteración de las propiedades funcionales de las células inmunocompetentes. 3. Modificación de los procesos metabólicos. 4. Inhibición o estimulación de la división celular. 5. Muerte celular programada
Tejidos		
Tejidos	40...60 GHz	Estimulación de la regeneración tisular
Sistemas funcionales del organismo		
Sistema nervioso	1... 60 GHz	1. Activación de la actividad espontánea de los receptores. 2. Reacción de sincronización del SNC durante la vigilia. 3. Aumento de la dinamicidad del SNC, desde un estado de inhibición hasta la actividad epileptiforme
Sistema endocrino		Reacción adaptativa que conduce a la corrección de la concentración de hormonas en el sistema endocrino
Sistema reproductor		Cambio del estado funcional del sistema reproductor, aumento del número de resultados reproductivos adversos y abortos espontáneos
Organismo íntegro		
Organismo íntegro	1...70 GHz	a) Aparición de sensaciones de ardor, hormigueo, presión, etc.; b) alteraciones del comportamiento; c) alteración de la memoria; d) desarrollo de enfermedades;

La revisión efectuada de los trabajos dedicados al estudio de la influencia de la radiación electromagnética en objetos biológicos permite extraer las siguientes conclusiones.

1. Los efectos biológicos de la radiación electromagnética en las bandas centimétrica y milimétrica se manifiestan incluso a niveles de intensidad no térmica.
2. La base de estos efectos radica en las interacciones resonantes de la onda electromagnética con moléculas de agua en estructuras biológicas, así como con biomacromoléculas y membranas.
3. A pesar de que la energía del cuanto del campo electromagnético en el rango de frecuencias de 1...150 GHz es pequeña en comparación con la energía térmica del medio biológico kT , las características estructurales de las moléculas biológicas y las membranas permiten la acumulación de energía en fenómenos acústi-

oscilaciones eléctricas para la realización de transiciones estructurales (conformacionales).

4. Tales transiciones modifican las posibilidades funcionales de las biomacromoléculas, lo que a su vez altera el curso de los procesos biológicos (metabolismo, transporte, conducción de impulsos, etc.).
5. El cambio en la dinámica de los procesos biológicos puede tener un carácter tanto estimulante como inhibidor, dependiendo de los parámetros de la radiación electromagnética incidente, y en primer lugar, de su frecuencia.
6. La eficacia del impacto está determinada no solo por los parámetros de la radiación, sino también por la correspondencia entre esta frecuencia y las frecuencias propias de las estructuras biológicas, cuyo espectro puede variar entre diferentes objetos. Esto explica, en gran medida, la baja reproducibilidad de los resultados experimentales.
7. El resultado del impacto a nivel del organismo completo depende del estado inicial de los sistemas funcionales y del lugar de aplicación (debido a la existencia de asimetría funcional).
8. Los efectos patológicos y terapéuticos descritos de la radiación electromagnética se observaron, por lo general, tras una irradiación múltiple o crónica. No obstante, los datos disponibles no son suficientes para determinar las frecuencias y los regímenes de radiación más eficaces o peligrosos.
9. Esto es especialmente cierto para los impulsos de microondas (más cortos que los utilizados en radiolocalización) y las señales de banda ultra ancha. Solo existen algunos trabajos experimentales en animales que estudian el efecto biológico de dichos impulsos.
10. Dado que el espectro de radiación de tales señales, calculado en el capítulo, y el rango de frecuencias en el que se observan los efectos biológicos se solapan, es esperable la influencia de dichos impulsos en la salud humana, incluyendo efectos patológicos. Sin embargo, la extrapolación directa de los resultados obtenidos con otros parámetros de radiación para predecir el riesgo de las señales de banda ultraancho no está justificada actualmente debido a la insuficiencia de datos. Se necesitan más investigaciones, preferiblemente utilizando generadores de impulsos de microondas ultracortos.

Publicación educativa

PERELMUTER, Vladimir Mikhailovich
CHA, Vladimir Alexandrovich
CHUPRIKOVA, Elena Mikhailovna

ASPECTOS MÉDICO-BIOLÓGICOS DE LA INTERACCIÓN DE ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS CON EL ORGANISMO

Manual de estudio

Editor
Composición
Diseño de la cubierta

A.V. Vysotskaya
O.Yu. Arshinova
O.Yu. Arshinova
O.A. Dmitriev

Firmado para su impresión el 17.07.2009. Formato 60x84/16. Papel «Snegurochka».
Impresión XEROX. Pliegos de imprenta: 7,44. Pliegos de edición: 6,73.
Pedido 830/09. Tirada: 200 ejemplares.



Universidad Politécnica de Tomsk
Sistema de gestión de la calidad
El sistema de gestión de la calidad de la Universidad Politécnica de Tomsk está certificado.
ASEGURAMIENTO NACIONAL DE LA CALIDAD según la norma ISO 9001:2008



EDITORIAL  TPU . 634050, Tomsk, Avenida Lenin, 30. Tel./fax: 8(3822) 56/35/35, www.tpu.ru

Documento traducido al español por el equipo de M-Power Translations.

Canal de Telegram:

<https://t.me/mpowertranslations>