

Ю.Б. КУДРЯШОВ, А.Б. РУБИН

РАДИАЦИОННАЯ БИОФИЗИКА

СВЕРХНИЗКОЧАСТОТНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИЗЛУЧЕНИЯ

*Рекомендовано УМС по биологии УМО
по классическому университетскому образованию в качестве
учебника для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по специальности 012200 Биофизика*



МОСКВА
ФИЗМАТЛИТ®
2014

УДК 539.16
ББК 22.383
К 88

Кудряшов Ю.Б., Рубин А.Б. **Радиационная биофизика. . Сверх-
низкочастотные излучения.** — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. — 216 с. —
ISBN 978-5-9221-1565-0.

Перед читателем новый учебник многотомной серии учебников по радиационной биофизике, издаваемой на протяжении ряда лет кафедрой биофизики биологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. Предлагаемая книга является первым изложением учебного курса радиационной биофизики сверхнизкочастотных (СНЧ) неионизирующих электромагнитных излучений. В первой части приведены физические характеристики собственных полей живых организмов, а также природных и искусственных источников СНЧ электромагнитных полей и излучений и особенности их биологического действия. Во второй части представлены медико-биологические аспекты действия СНЧ геомагнитных полей и гипوماгнитных условий. Описаны способы ориентации живых объектов в геомагнитном поле и способы его рецепции. Третья часть посвящена описанию физико-химических гипотез о первичных механизмах биологического действия СНЧ-полей, энергия которых намного меньше энергии теплового молекулярного движения, однако все же выше энергии цепных окислительных свободнорадикальных реакций. Представлены схемы, поясняющие роль свободных оксирадикалов как первичных элементов магнитобиологических спиновых эффектов.

Книга рекомендована УМО по классическому образованию РФ в качестве учебника для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности 012200 (биофизика).

КУДРЯШОВ Юрий Борисович
РУБИН Андрей Борисович

**РАДИАЦИОННАЯ БИОФИЗИКА.
СВЕРХНИЗКОЧАСТОТНЫЕ ИЗЛУЧЕНИЯ**

Редактор *Е.Б. Гуля*
Оригинал-макет: *Д.В. Горбачев*
Оформление переплета: *Н.Л. Лисицына*

Подписано в печать . Формат 60×90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 15. Уч.-изд. л. 13,5. Тираж экз. Заказ №

Издательская фирма «Физико-математическая литература»
МАИК «Наука/Интерпериодика»
117997, Москва, ул. Профсоюзная, 90
E-mail: fizmat@maik.ru, fmlsale@maik.ru;
http://www.fml.ru

ОГЛАВЛЕНИЕ

Список сокращений и общепринятых терминов	7
Предисловие	9
Введение	12

Часть I. Сверхнизкочастотные электромагнитные поля, их характеристика и особенности действия

Глава 1. Сверхнизкочастотные электромагнитные поля . . .	20
1.1. Характеристика СНЧП	20
1.2. Собственные частотные поля живых объектов	23
1.3. Природные и искусственные источники сверхнизкочастотных электромагнитных полей и излучений. Электрические и магнитные СНЧ-поля в средах обитания организмов.	27
Глава 2. Энергетические особенности электромагнитных полей. Нетепловые сверхнизкочастотные излучения.	42
2.1. Ионизирующие излучения	42
2.2. Тепловые неионизирующие излучения	43
2.3. Нетепловые неионизирующие излучения	48

Часть II. Медико-биологические аспекты действия сверхнизкочастотных полей

Глава 3. Острое и хроническое воздействия сверхнизкочастотных полей	49
3.1. Уровни биологического действия ЭМИ	49
3.2. Морфологические изменения в организмах и тканях млекопитающих	54
3.3. Летальные эффекты	56

3.4. Онкологические заболевания	58
3.5. Клинические проявления нелетального действия СНЧ-полей и излучений	63
Глава 4. Реакции центральной нервной системы на дей- ствие сверхнизкочастотных полей	66
4.1. Электрические поля СНЧ — субсенсорные раздражители для выработки условных рефлексов	66
4.2. Поведенческие реакции	67
4.3. Амплитудо-частотные окна при действии на головной мозг сверхнизкочастотных электрических полей	68
4.4. Биоэлектрическая активность головного мозга человека — «мозговые ритмы (волны)»	69
4.5. Биологическое действие магнитных полей СНЧ	70
Глава 5. Реакции сердца, системы крови, обмена веществ на воздействие сверхнизкочастотных полей и излучений	77
5.1. Реакция сердечно-сосудистой системы	78
5.2. Реакция системы крови и кроветворения. Нейрогуморальная регуляция	79
5.3. Биохимические изменения в органах и тканях	84
Глава 6. Реакции иммунной системы	87
6.1. Неспецифическая резистентность	87
6.2. Специфический иммунитет и аутоиммунные процессы	91
Глава 7. Реакции эндокринной системы	96
Глава 8. Реакции птиц на слабые электромагнитные поля	104
8.1. Перелеты птиц	104
8.2. Геомагнитная ориентация птиц в перелетах	106
8.3. Участие криптохрома в ориентации птиц	109
Глава 9. Реакции животных — обитателей водной среды на сверхнизкочастотные поля и излучения	111
9.1. Магниторецепция у животных — обитателей морских и ма- териковых вод	111

Глава 10. Реакции насекомых на воздействие сверхнизко- частотных магнитных полей и излучений	118
10.1. Влияние ПМП и ПеМП и излучений на поведение и другие биологические показатели у насекомых	118
10.2. Влияние СНЧ ЭМИ и полей на шелкопряда	123

Глава 11. Влияние сверхнизкочастотных полей и излу- чений на растения	124
11.1. Влияние слабых магнитных полей на ростовые и формообра- зовательные процессы у растений	125
11.2. Накопление наночастиц магнетита в растениях	127

Глава 12. Реакции микроорганизмов на сверхнизкочастот- ные электромагнитные поля и излучения	129
12.1. Гены магнитотаксиса	129

Часть III. Гипотезы о механизмах биологического действия природных и техногенных сверхнизкочастотных полей

Глава 13. Гипотезы циклотронных и параметрических ре- зонансов. Интерференция связанных ионов	133
--	-----

Глава 14. Гипотеза омагничивания водных растворов.	138
---	-----

Глава 15. Специфические механизмы биологического дей- ствия сверхнизких частот (геомагнитные поля).	143
15.1. Магнитосомный механизм	143
15.2. Криптохромный механизм	149
15.3. Рецепция СНЧ МП	159

Глава 16. Активные кислородсодержащие соединения в норме и при внешних воздействиях.	161
16.1. Свободные радикалы и реактивные молекулы в живых си- стемах	161
16.2. Свободные окислительные радикалы и реактивные молекулы в ненасыщенных липидах клетки.	167

Глава 17. Цепные реакции перекисного окисления липидов и их продукты	174
17.1. Продукты перекисного окисления липидов и ДНК	179
Глава 18. Синдром липопероксидации. Общая неспецифическая реакция организма	184
18.1. Собственная защита клетки от избыточного накопления активных кислородсодержащих соединений	185
18.2. Неспецифический оксидативный токсический эффект	190
18.3. Низкочастотные поля и лучевой стресс	191
Заключение	194
Список литературы	196
Предметный указатель	211

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И ОБЩЕПРИНЯТЫХ ТЕРМИНОВ

- АДФ — аденозиндифосфорная кислота
АКСС — активные кислородсодержащие соединения
АТФ — аденозинтрифосфорная кислота
АФК — активные формы кислорода
БМ — биологические мембраны
ВДБ — волны де Бройля
ВОЗ — Всемирная организация здравоохранения
ГеоМП — геомагнитное поле
ГипоМУ — гипомагнитные условия
ГОСТ — Государственный стандарт
ИК — инфракрасное (излучение)
Ил-2 — интерлейкин 2
ЛЭП — линия электропередачи
МБЭ — магнитобиологический эффект
МП — магнитное поле
МКВ — микроволны
НЧ — низкие частоты
ОНРО — общая неспецифическая реакция организма
ПДУ — предельный допустимый уровень
ПМП — постоянное магнитное поле
ПеМП — переменное магнитное поле
ПОЛ — перекисное окисление липидов
ППОЛ — продукты перекисного окисления липидов
ППЭ — плотность потока энергии
СВЧ — сверхвысокочастотные (электромагнитные волны)
СНЧ — сверхнизкочастотное (электромагнитное поле, излучение)

- СНЧИ — сверхнизкочастотное излучение
СНЧП — сверхнизкочастотное поле
СНЧПИ — сверхнизкочастотные поля и излучения
СРО — свободнорадикальное окисление
УПМ — удельная поглощенная мощность
УФ — ультрафиолетовое (излучение)
ФГА — митоген фитогемагглютинин
цАМФ — циклический аденозинмонофосфат
цГМФ — циклический гуанонозинмонофосфат
ЦНС — центральная нервная система
ЧСС — частота сердечных сокращений
ЭМВ — электромагнитная волна
ЭМИ — электромагнитное излучение
ЭМП — электромагнитное поле
ЭП — электрическое поле
ЭПР — электронный парамагнитный резонанс

ПРЕДИСЛОВИЕ

Перед читателем новый учебник — последний в многотомной серии вышедших из печати в предыдущие годы учебников по радиационной биофизике, издаваемых кафедрой биофизики биофака МГУ им. М. В. Ломоносова.

Следует отметить, что СНЧ — нижняя часть в шкале диапазона ЭМИ со свойственными только ей особенностями физических и радиобиологических характеристик. Несмотря на широкую распространенность этого вида излучений в окружающей человека среде и в живой материи, соответствующая область знаний до последнего времени относилась к наименее изученной с позиций биофизики и потому не имеющей специальных, проверенных временем и педагогической практикой, учебников.

Биофизика СНЧ-полей и излучений относится, пожалуй, к одной из самых сложных и наименее изученных областей радиационной биофизики. Сложной и наименее изученной потому, что ее становление и восприятие научной общественностью происходило в стесненных условиях: ей пришлось преодолевать ряд серьезных барьеров, первым из которых было категорическое отрицание самой возможности существования биологического действия «слабых» излучений.

Так, сравнительно недавно, в начале восьмидесятых годов прошлого столетия, попытки исследования действия СНЧ ЭМИ на живые системы и объекты рассматривались как тупиковые, подобные поискам изобретения вечного двигателя. И действительно, трудно было представить, чтобы ничтожная энергия кванта СНЧ (миллионные и миллиардные доли эВ), не способная изменить даже тепловые колебания элементарных частиц, смогла бы вызвать нарушение каких-либо биологических процессов. Имеет значение и то обстоятельство, что многокилометровые длины волн СНЧ несоизмеримы с относительно малыми размерами биологических объектов и поэтому характер взаимодействия с ними труднопредставим.

Все это укрепляло парадигму о неспособности СНЧ вызывать какие-либо биологические эффекты.

Однако следует отметить, что тридцатилетняя история изучения радиационной биофизикой биологического действия СНЧ завершилась преодолением атмосферы недоверия и неверия.

Настойчивые исследования биологов уже в 1980-е и последующие годы показали, что биологические эффекты СНЧ все же существуют, иногда они весьма значительны. Структурно-функциональные изменения можно наблюдать на всех уровнях организации живого.

Так, в связи с обнаружением реальных биологических изменений, вызываемых СНЧ ЭМИ, был преодолен первый барьер в становлении радиационной биофизики слабых (сверхнизкочастотных) излучений. Это привело к тому, что в течение последних тридцати лет были осуществлены интенсивные исследования проявлений биологического действия СНЧ (биофизических, биохимических, физиологических и др.), а также механизмов, лежащих в основе наблюдаемых эффектов указанных излучений.

В то же время при накоплении большого фактического материала биологи не могли не обратить внимания на необычную особенность ответных реакций живых объектов и систем на воздействие СНЧ ЭМИ. Особенность эта состояла в отсутствии прямой монотонной зависимости биологических эффектов от интенсивности и частоты ЭМИ и в трудной воспроизводимости получаемых результатов. Часто ответная реакция на облучение как бы следовала закону «все или ничего». Даже незначительные изменения частоты или интенсивности воздействий излучений приводило к исчезновению биологической реакции. В связи с этим в литературе появлялись казалось бы противоречивые данные, на основании которых авторы приходили к ошибочному выводу об отсутствии достоверных сведений в действии слабых излучений и артефактах в действии СНЧ.

Так возникла еще одна трудность в исследованиях СНЧ ЭМИ: «Хотя эффект и наблюдается, но он не всегда воспроизводится». На рубеже прошлого и настоящего веков нашлось объяснение и этому феномену. Благодаря классическим работам Росса Эйди и многих других авторов, стало ясно, что эффекты СНЧ-излучений характеризуются амплитудно-частотными окнами узких спектров биологического действия, предположительно вследствие «резонансноподобных» взаимодействий излучений с объектом.

В 1991 г. радиобиологи провели первый симпозиум о достоверном биологическом действии гипоМП на человека и различ-

ные биологические объекты (Ю.Г. Григорьев, 1991, 1-й Международный симпозиум по биологическому действию гипотензивных полей). Предполагалось, что в результате воздействия гипоМП у большинства людей возникает так называемый ситуационный хронический стресс.

Таким образом, преодолевался второй барьер в исследованиях особенностей радиационной биофизики СНЧ ЭМИ — необычность зависимости эффекта от дозы и невоспроизводимость данных.

Все же в оценке механизмов действия слабых СНЧ-излучений оставался неясным еще один принципиально важный вопрос — каким образом очень низкая энергия излучений ($E \ll kT$) «обретает силу» и при взаимодействии с биологической системой слабейший первичный акт приумножается во времени?

Возникший третий барьер — «парадокс kT » и необходимость объяснения зависимости развития эффекта от времени привлекли внимание многих физиков и биофизиков.

В настоящее время имеется ряд фактических данных и модельных построений, объясняющих последовательность развития первичных процессов усиления энергии СНЧ ЭМИ — зависимости биологического эффекта от времени воздействия и после воздействия.

Задача данного учебника — попытаться последовательно осветить упомянутые проблемы радиационной биофизики СНЧЭМ-полей и излучений.

Авторы благодарят всех биофизиков и радиобиологов, принявших участие в обсуждении настоящего учебника, в том числе профессоров М. Ф. Ломанова, В. К. Мазурика, С. В. Мамихина, И. И. Пелевину, А. В. Рубановича. Приносим также глубокую благодарность за замечания и помощь в редактировании книги сотрудникам Института общей физики им. А. М. Прохорова РАН доктору физико-математических наук В. Н. Бинги и кандидату биологических наук Р. М. Саримову. Особую благодарность за постоянную помощь при написании и оформлении учебника приносим научным сотрудникам кафедры биофизики кандидатам биологических наук С. К. Пирутину и А. И. Юсиповичу.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, радиационная биофизика изучает механизмы биологического действия электромагнитных полей и излучений широкого спектра энергий — от высокоэнергетических γ -лучей до низкочастотных электромагнитных излучений. Ее основной задачей является исследование вызываемых ими радиационных изменений в биоматерии, начиная от взаимодействия радиации с отдельными биомолекулами до сложных нарушений жизнедеятельности, наблюдаемых в облученной клетке, организме и экосистеме.

В настоящее время имеется ряд официальных классификаций шкалы ЭМИ. Наиболее распространены радиотехническая (регламент радиосвязи), медицинская (документы ВОЗ) и электротехническая (предложенная Международным комитетом по электротехнике).

В приводимой нами табл. 1 представлена биофизическая классификация ЭМИ всех известных частотных диапазонов — от высокочастотных γ -излучений до медленных периодических изменений электрических и магнитных полей Земли.

Основными физическими характеристикам ЭМИ являются длина волны λ , частота f , а также энергия кванта излучения E . Последняя обратно пропорциональна длине волны. Все единицы измерений ЭМИ принято выражать в системе СИ. Длины волн выражают в метрах, частоты — в герцах (Гц), а энергии квантов излучений — в электронвольтах (эВ), которые составляют энергию одного электрона в поле с разностью потенциала в 1 В.

При наиболее высоких частотах ЭМИ энергия их достаточна для ионизации молекул или атомов облучаемого вещества, а при более низких энергия значительно снижается, вплоть до миллионных и миллиардных долей эВ.

В зависимости от величины энергии ЭМИ подразделяются на ионизирующие и неионизирующие излучения. Условной границей между ними принята энергия кванта в 12 эВ (потенциал ионизации или энергия ионизации), соответствующая длине волны около 100 нм — вблизи границы рентгеновского и ультрафиолетового излучений.

Таблица 1

Спектр электромагнитных излучений

Излучения		Диапазон длин волн (λ), м	Полоса частот (f), Гц	Энергии квантов (E), эВ	Природные источники
Тип	Вид				
Ионизирующие	γ -Излучения	10^{-10} – 10^{-15} и менее	$3 \cdot 10^{18}$ – $3 \cdot 10^{23}$ и более	$1,2 \cdot 10^4$ – $1,2 \cdot 10^9$ и более	Космические источники, вторичные космические лучи; взаимодействие ускоренных частиц с атомами; радиоактивный распад радионуклидов, ядерные реакции и космические процессы
	Рентгеновские	10^{-7} – 10^{-11}	$3 \cdot 10^{15}$ – $3 \cdot 10^{19}$	12,4– $1,2 \cdot 10^5$	
Оптические	Ультрафиолетовые	$4 \cdot 10^{-7}$ – 10^{-8}	$7,5 \cdot 10^{14}$ – $3 \cdot 10^{16}$	$3,1$ – $1,2 \cdot 10^2$	Солнце и Луна, звезды и туманности, другие космические источники; земные объекты; излучение молекул и атомов, излучение возбужденных атомов; любое нагретое тело
	Видимые	$7,6 \cdot 10^{-7}$ – $4 \cdot 10^{-7}$	$3,95 \cdot 10^{14}$ – $7,5 \cdot 10^{14}$	1,6–3,1	
	Инфракрасные	10^{-3} – $7,6 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{11}$ – $3,95 \cdot 10^{14}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$ – 1,6	
Микроволновые (МКВ)	Милли- и дециметровые	10^{-3} – 10^{-4}	$3 \cdot 10^{11}$ – $3 \cdot 10^{12}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$ – $1,2 \cdot 10^{-2}$	Солнце и Луна, планеты, звезды и др. космические объекты; разряды молний, полярные сияния; любые электрические и магнитные воздействия Земли, живые организмы и т. д.
Радио	Высокочастотные	10^2 – 10^{-3}	$3 \cdot 10^6$ – $3 \cdot 10^{11}$	$1,2 \cdot 10^{-8}$ – $1,2 \cdot 10^{-3}$	
Частотные (РЧ)	Среднечастотные	10^3 – 10^2	$3 \cdot 10^5$ – $3 \cdot 10^6$	$1,2 \cdot 10^{-9}$ – $1,2 \cdot 10^{-8}$	
Сверхнизкочастотные (СНЧ)	Километровые, многокилометровые	10^8 – 10^3	0 – $3 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^{-14}$ – $1,2 \cdot 10^{-9}$	

Таким образом, к ионизирующим ЭМИ относят γ - и рентгеновское излучения, а к неионизирующим — более низкочастотные (и, соответственно, более длинноволновые): ультрафиолетовое, видимый свет, инфракрасное, микроволновое, радиочастотное и низкочастотные излучения.

При характеристике электромагнитной обстановки используют термины «электрическое поле», «магнитное поле», «электромагнитное поле».

Электрическое поле (ЭП) создается электрическими зарядами. Электрическое поле, возникающее в окрестности электрически заряженного тела, является векторной величиной. Абсолютную величину этого вектора — силу, с которой поле действует на единичный заряд в данной точке пространства, — называют напряженностью электрического поля, буквенное обозначение E , единица измерения напряженности электрического поля вольт на метр (В/м). За направление вектора напряженности принимают направление, в котором будет двигаться в этом поле положительный заряд. А траектории движения таких зарядов, помещенных в тот или иной участок поля, называют электрическими силовыми линиями.

Для оценки величины электромагнитного поля, частота которого ниже 300 МГц, используют силовую характеристику электрической составляющей последнего — напряженность электрического поля. При частоте колебаний выше 300 МГц поле оценивается энергетической характеристикой — плотностью потока энергии (ППЭ), измеряемой в единицах ватт на метр в квадрате (Вт/м²). ППЭ характеризует количество энергии, переносимой электромагнитной волной в единицу времени через единицу площади поверхности, перпендикулярной направлению распространения волны, и обозначается как S .

Магнитное поле (МП) возникает обычно вокруг проводника с током или в окрестности постоянного магнита. Оно также является векторной величиной. Напряженностью магнитного поля H называют силу, с которой поле действует на элемент тока, помещенный в данную точку.

Величина силы (интенсивности) магнитного поля характеризуется напряженностью магнитного поля H , единица измерения ампер на метр (А/м), но иногда физики используют в измерениях внесистемную единицу в $10^3/4\pi$ раз большую, называемую эрстедом (буквенный символ Э).

При измерении сверхнизкочастотных (СНЧ) ЭМП используется понятие магнитная индукция B , единица измерения которой тесла (Тл); одна миллионная часть Тл — мкТл — равна 1,25 А/м. Траектории движения элемента тока (или направления ориентации обыкновенного магнетика) в магнитном поле называют магнитными силовыми линиями.

Электромагнитное поле (ЭМП) и электромагнитные волны (ЭМВ). Всякое изменение во времени электрического поля сопровождается появлением магнитного поля и наоборот — МП порождает ЭП. Обе компоненты, E и H , непрерывно изменяясь, возбуждают друг друга. Такие связанные между собой и взаимно превращающиеся поля называют электромагнитным полем.

По определению ЭМП — это особое состояние материи, посредством которого осуществляется взаимодействие между электрическими заряженными частицами.

ЭМП неподвижных или равномерно движущихся заряженных частиц неразрывно связано с этими частицами. При ускоренном движении заряженных частиц ЭМП «отрывается» от них и существует независимо в форме электромагнитной волны (ЭМВ), не исчезая с устранением источника (например, радиоволны не исчезают и при отсутствии тока в излучившей их антенне).

В зависимости от длины волны (частоты) излучения, а следовательно, и энергии кванта, существенно меняется проникающая способность и характер взаимодействия ЭМИ с веществом (биоструктурами, биомолекулами).

Важная особенность ЭМП — это деление его на так называемые ближнюю и дальнюю зоны.

В ближней зоне (или зоне индукции), на расстоянии от источника $r \ll \lambda$, ЭМП можно считать квазистатическим. Здесь оно быстро убывает с расстоянием. В «ближней» зоне излучения электромагнитная волна еще не сформирована.

Дальняя зона — зона сформировавшейся электромагнитной волны, начинается с расстояния $r \gg \lambda$. В дальней зоне интенсивность поля убывает обратно пропорционально расстоянию до источника.

Для плоской волны ЭМП устанавливается связь между напряженностью электрической и магнитной составляющей поля: $E = 377H$, где 377 — коэффициент волнового сопротивления вакуума. Волна НЧ ЭМП формируется в дальней зоне, а это километры, десятки и сотни тысяч километров. В удобной для био-

логического использования ближней зоне электрическая и магнитная составляющие низких частот ЭМП не перпендикулярны друг другу и их величины сильно зависят от формы излучателя. Для сверхнизкочастотного и, следовательно, длинноволнового излучения характерно, что, например, при 50 Гц первые 6 км — это МП и только затем ЭМИ.

Поэтому для низкочастотного электромагнитного поля (НЧ ЭМП) измерения переменного электрического поля и магнитного поля производятся раздельно.

Таким образом, из вышесказанного видно, что масштаб задачи (т.е. объект воздействия) намного меньше длины волн рассматриваемого излучения. В связи с этим, в некоторых случаях, с точки зрения физики, правильнее было бы вместо ЭМИ писать ЭМП, а с точки зрения радиобиологи указывать, какая именно составляющая поля — магнитная или электрическая — воздействует на живой объект. Но в различных источниках литературы, на которые мы ссылаемся, часто пишется ЭМИ и при этом неизвестно, какая именно составляющая излучения воздействует на объект, поэтому мы также используем этот термин.

Ионизирующие электромагнитные излучения — это наиболее проникающие, коротковолновые, высокочастотные излучения, кванты которого несут огромную энергию, достигающую многих тысяч и миллионов электронвольт. В более широком смысле ионизирующие излучения — это не только электромагнитные рентгеновское и γ -излучения, но и корпускулярные излучения высоких энергий.

К последним относят заряженные частицы β -частицы (электроны и позитроны); ядра атомов водорода (протоны), дейтерия (дейтроны), гелия (α -частицы) и других химических элементов; ядерные частицы, не имеющие заряда, — нейтроны, а также многие нестабильные частицы, например π^+ -, π^- -, и π^0 -мезоны и др. Все эти виды излучения способны при действии на молекулы прямо или косвенно вызывать ионизацию и образование активных радикалов, которые могут инициировать окислительные свободнорадикальные процессы в клетках и организме.

Поскольку ионизирующие излучения высокочастотные и коротковолновые, то они «завязывают» ЭМП сразу (в отличие от НЧ и СНЧ); в данном случае не приходится задумываться, это магнитное поле или электрическое.

В зависимости от характера воздействия могут возникать разнонаправленные биологические эффекты: облучение в больших

дозах способно вызывать неустранимые лучевые повреждения и гибель организма, а в малых дозах — эффекты «горемизиса», т. е. стимуляции клеточного деления, роста, развития организма и активации ряда биохимических и физиологических процессов.

Неионизирующие излучения (оптический диапазон, микроволновые, радиочастотные и низкочастотные излучения) из-за присущей им низкой энергии не способны к ионизации молекул. При взаимодействии с живыми объектами неионизирующие излучения способны к тепловому и нетепловому механизмам передачи энергии веществу.

Конечный результат эффектов облучения живых объектов проявляется как в разрушающем молекулы и структуры действии излучений больших интенсивностей, так и в разнонаправленных (повреждающих и стимулирующих) структурно-функциональных изменениях при хроническом и остром низкоинтенсивных воздействиях.

Повышения температуры при СНЧ-облучении не происходит (слишком мала энергия квантов), поэтому СНЧ — это чисто нетепловые излучения.

Исходя из характера биологических эффектов при действии разных типов излучений оформились научные дисциплины, тесно связанные с радиационной биофизикой. Это радиационная биология, исследующая эффекты ионизирующих излучений; фотобиология, предметом изучения которой являются исследования действия излучений оптического диапазона; радиобиология радиочастотных (обычно в шкале радиочастот выделяют еще и микроволновое излучение) и сверхнизкочастотных (слабых) ЭМИ.

По этой причине и соответствующие области радиационной биофизики имеют названия по типам ЭМИ: 1) радиационная биофизика ионизирующих излучений, 2) биофизика фотобиологических процессов, 3) радиационная биофизика радиочастотных и микроволновых ЭМИ и 4) радиационная биофизика ЭМИ низких частот (НЧ) и сверхнизких частот (СНЧ). Современное состояние первых трех научных дисциплин подробно изложено в учебниках. Радиационная биофизика ЭМИ СНЧ, в связи с ее малой изученностью, еще не могла быть представлена. Этот пробел мы попытались восполнить в данном учебнике.

Различные виды электромагнитных и корпускулярных излучений — важнейший инструмент познания живой материи. Современная биология немыслима без методов радиационной

биофизики: рентгеноструктурного анализа, ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной спектроскопии, радиоспектроскопии, лучевой ультрамикрометрии, световой, а также сканирующей атомной, электронной и протонной микроскопии, широкого использования радиоактивных изотопов.

Исключительно важное значение приобретает изучение характера воздействия излучений с биологическими структурами на атомном, наноуровне. Хорошо известно, что многие наиболее впечатляющие успехи в познании структуры и свойств живой материи достигнуты благодаря широкому внедрению методов исследования радиационной биофизики. Такие исследования требуют комплексного подхода, основанного, с одной стороны, на учете физических принципов передачи энергии излучений, их дискретной природы и характера взаимодействия с атомами и молекулами биологических структур, а с другой — на знании уникальных особенностей сложной структурной и функциональной организации живого и механизмов реализации его ответов на воздействие агентов разной природы.

Актуальность исследования биологического действия излучений продиктована многими научными и социальными задачами.

Известно, например, что все живое постоянно подвергается действию природных излучений — естественного электромагнитного фона. Более того, суммарная напряженность ЭМП в различных точках земной поверхности уже сейчас в результате человеческой деятельности увеличена по сравнению с природным фоном в сотни и десятки тысяч раз и может достигать величин 10^{-1} – 10 Вт/м². Бытует мнение, что очень скоро на планете не останется ни одного человека, который в той или иной степени не подвергался бы воздействию ЭМП и ЭМИ от искусственных источников. Возможное вредное действие возрастающего техногенного фона ЭМП в сочетании с другими загрязнениями среды, в условиях больших городов и промышленных производств, может существенно влиять на экологию биоты и состояние здоровья и качество жизни человека.

Таким образом, существует необходимость углубленных исследований в области радиоэкологии ЭМ-излучений, главная задача которой — выработка норм безопасных уровней облучения.

Наряду с отрицательным влиянием ЭМИ, хорошо известно их применение на пользу человеку. Широкое использование ЭМИ получили в медицинской практике в качестве диагностических и терапевтических средств при многочисленных забо-

леваниях. Применение и дальнейшие разработки в области радиационной терапии невозможны без глубоких знаний в области радиационной биофизики всего спектра ЭМИ — механизмов взаимодействия всех видов излучений с веществом и последующих изменений клеток, тканей и целостного организма.

Современное состояние радиационной биофизики показывает, что это комплексная фундаментальная наука. Она требует объединенных усилий не только радиобиологов и биофизиков, но также и физиков, химиков, математиков, специалистов буквально всех классических биологических и медицинских направлений. В связи с этим в настоящее время развиваются такие прикладные научные дисциплины, как радиационная экология и радиационная генетика, радиационная биохимия и цитология, радиационная медицина (включая гигиену) и др. В этом ряду радиационная биофизика заняла ведущее место, так как ее основная задача — выяснение фундаментальных физико-химических и молекулярных механизмов первичных процессов изменений, протекающих в атомах и молекулах, с момента поглощения ими энергии электромагнитных излучений до появления видимых структурных и функциональных изменений в живой системе на разных уровнях ее организации. Для решения такой задачи необходим тщательный и углубленный анализ процессов, происходящих на каждом этапе «размена энергии» исследуемого излучения в живой системе, описание этих этапов в терминах молекулярных изменений и создание единой картины, отражающей всю последовательность реакций, приводящих, в зависимости от типа воздействующего излучения и дозы облучения, к закономерным изменениям: повреждениям при остром облучении, нарушениям или стимуляции нормальных механизмов (так называемый эффект гормезиса) биологических процессов при действии излучений в малых дозах и при хронических воздействиях.

При этом следует особо отметить, что, несмотря на более чем вековой опыт фундаментальных исследований в общей радиобиологии и имеющиеся в ней несомненные значительные научно-практические достижения, все еще недостаточно полно представлена молодая область этой науки — радиационная биофизика сверхнизкочастотных электромагнитных полей и излучений.

Часть I

СВЕРХНИЗКОЧАСТОТНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ, ИХ ХАРАКТЕРИСТИКА И ОСОБЕННОСТИ ДЕЙСТВИЯ

Глава 1

СВЕРХНИЗКОЧАСТОТНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ

1.1. Характеристика СНЧП

1.1.1. Классификация СНЧП. В соответствии с Международным регламентом радиосвязи (1979 г.) «физическая» шкала низкочастотных электромагнитных полей поделена на 5 диапазонов частот, из них только II-й диапазон (30–300 Гц) условно отнесен к сверхнизкочастотным излучениям (табл. 1.1).

По рекомендации ВОЗ (2007 г.) в медицинских исследованиях сверхнизкие частоты составляют более широкий спектр — от 0 Гц до 100 кГц.

В радиобиологии и в данном учебнике диапазон СНЧ принят еще более широким — от 0 Гц до 300 кГц (табл. 1.2). По этой классификации следующий более высокочастотный — радиочастотный (РЧ) — спектр начинается от 300 кГц (Кудряшов, Перов, Рубин, 2008).

1.1.2. Зоны ЭМ-волны. В ЭМ-волне, в зависимости от расстояния от ее источника, различают три зоны — ближнюю (зона индукции), промежуточную (зона интерференции) и дальнюю (зона сформировавшейся ЭМ-волны). Исходя из расстояния r от источника ЭМИ выделяют ближнюю зону

$$0,62a^2/\lambda \ll r2a^2/\lambda$$

Таблица 1.1

Классификация низкочастотных ЭМ излучений по диапазонам частот и длинам волн

№ диапазона частот	f Диапазоны частот, Гц	Обозначение частот по регламенту радиосвязи	λ Длины волн, км	Обозначения длин волн
I	0–30 Гц	Крайне низкие частоты (КНЧ)	10^5 – 10^4 км	Декаметровые
II	30–300 Гц	Сверхнизкие частоты (СНЧ)	10^4 – 10^3 км	Мегаметровые
III	0,3–3 кГц	Инфранизкие частоты (ИНЧ)	10^3 – 10^2 км	Гектакилометровые
IV	3–30 кГц	Очень низкие частоты (ОНЧ)	100–10 км	Мириаметровые
V	30–300 кГц	Низкие частоты (НЧ)	10–1 км	Километровые

Таблица 1.2

Диапазоны частот и длин волн сверхнизкочастотных (СНЧ) ЭМП, применяемые в радиационной биофизике

f Диапазон частот, Гц	Обозначения частот в радиационной биофизике	λ Длины волн, км	Обозначения длин волн
0–300 кГц	Сверхнизкочастотные (СНЧ)	10^5 –1 км	Многокилометровые–километровые

и дальнюю зону

$$r \gg 2a^2/\lambda,$$

где a — максимальный линейный размер антенны источника излучения.

Ближняя зона источника ЭМИ характеризуется тем, что размеры a облучаемых биологических объектов (антенны) и расстояния r между ними несоразмерно малы по сравнению с длинами волн λ СНЧ. Поэтому в ближней зоне ЭМ-поля еще не могут образоваться и облучаемые объекты находятся еще в не зависящих друг от друга переменных электрических (E) или магнитных (H) полях с частотой ЭМИ.

Промежуточная зона не имеет резких границ и переход в нее от ближней зоны к дальней плавный.