



Г. Г. Верещако

**ВЛИЯНИЕ
ЭЛЕКТРО-
МАГНИТНОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ
МОБИЛЬНЫХ
ТЕЛЕФОНОВ
НА СОСТОЯНИЕ
МУЖСКОЙ
РЕПРОДУКТИВНОЙ
СИСТЕМЫ
И ПОТОМСТВО**



Геннадий Верещако

**Влияние электромагнитного
излучения мобильных
телефонов на состояние
репродуктивной
системы и потомство**

«Издательский дом “Белорусская наука”»

2015

УДК [621.395.721.5:537.531]:616.64/.69

Верещако Г. Г.

Влияние электромагнитного излучения мобильных телефонов на состояние репродуктивной системы и потомство / Г. Г. Верещако — «Издательский дом “Белорусская наука”», 2015

ISBN 978-985-08-1836-2

Монография посвящена оценке влияния электромагнитного излучения в диапазоне мобильной связи – мобильных (сотовых) телефонов, смартфонов, Интернета (Wi-Fi) на состояние мужской репродуктивной системы. В ней приводятся общие сведения об электромагнитных излучениях, строении и функции мужской репродуктивной системы, сведения о методах ее исследования. Обсуждаются данные о действии электромагнитных полей мобильных телефонов и беспроводной связи на сперматозоиды человека *in vivo* и *in vitro*, об изменении морфологических, биохимических, молекулярных показателей, ткани сперматогенного эпителия, свойств сперматогенных клеток, об эндокринном статусе самцов млекопитающих, о влиянии биологически активных веществ на семенники животных, подвергнутых экспозиции от мобильных телефонов, о состоянии потомства, полученного от облученных родителей. Для биологов, экологов, врачей, специалистов, занимающихся проблемами электромагнитной безопасности, студентов биологических и медицинских вузов и всех тех, кто интересуется проблемой влияния электромагнитного излучения на организм. Табл. 22. Ил. 7. Библиогр.: 277 назв.

УДК [621.395.721.5:537.531]:616.64/.69

ISBN 978-985-08-1836-2

© Верещако Г. Г., 2015

© Издательский дом “Белорусская
наука”, 2015

Содержание

Условные обозначения	7
Введение	9
Глава 1	12
1.1. ЭМИ: основные характеристики, классификация, источники, биологическое действие	13
1.2. Распространение мобильной (сотовой) связи и физические характеристики ЭМП базовых станций и сотовых (мобильных) телефонов	21
1.3. Особенности взаимодействия ЭМИ в диапазоне мобильной связи с биологическими объектами	27
Глава 2	29
2.1. Строение, развитие и функция мужской репродуктивной системы млекопитающих	30
2.2. Сперматогенез	35
Конец ознакомительного фрагмента.	41

Геннадий Григорьевич Верещако
Влияние электромагнитного
излучения мобильных
телефонов на состояние мужской
репродуктивной системы и потомство

© Верещако Г. Г., 2015

© Оформление. РУП «Издательский дом «Беларуская навука», 2015

* * *

Условные обозначения

- АОК-Zn – антиоксидантный комплекс, содержащий цинк
АКТГ – адренокортикотропный гормон
АСБ – андрогенсвязывающий белок
АТФ – аденозинтрифосфорная кислота
АФК – активная форма кислорода
ВОЗ – Всемирная организация здравоохранения
Вт/кг – ватт на килограмм – единица удельной поглощенной мощности; производные: мВт/г или мВт/кг
Вт/м² – ватт на квадратный метр – единица измерения плотности потока энергии (ППЭ); производные: мВт/см² или мкВт/см²
Гц – герц – единица частоты; производные: МГц, ГГц
ГЭБ – гемато-энцефалический барьер
ДГТ – 5α-дегидротестостерон
ДНК – дезоксирибонуклеиновая кислота
Кб – килобайт
КСГ – кортико-стероидсвязывающий глобулин
КФК – креатинфосфокиназа
ЛГ – лютеинизирующий гормон
ЛГ-РГ – рилизинг фактор лютеинизирующего гормона
ЛДГ – лактатдегидрогеназа
ЛЭП – линия электропередач
МДА – малоновый диальдегид
МКВ – микроволновой
НЧ – низкие частоты
ПДУ – предельно допустимый уровень
ПОЛ – перекисное окисление липидов
ППЭ – плотность потока энергии
ПСА – простатический специфический антиген
РНК – рибонуклеиновая кислота
РЧ – радиочастоты
СВ – средние волны
СВЧ – сверхвысокие частоты
СГСГ – секс-гормонсвязывающий глобулин
СОД – супероксиддисмутаза
СССГ – секс-стероидсвязывающий глобулин
ТЭСГ – тестостерон-эстрадиолсвязывающий глобулин
УВЧ – ультравысокая частота
УПМ – удельная поглощенная мощность
ФСГ – фолликулостимулирующий гормон
ЦНС – центральная нервная система
эВ – электронвольт
ЭКО – экстракорпоральное оплодотворение
ЭМИ – электромагнитное излучение
ЭМП – электромагнитное поле

CDMA (англ. – Code Division Multiple Access) – Система множественного доступа с кодовым разделением; стандарт мобильной связи.

DFI (англ. – DNA fragmentation index) – Индекс фрагментации ДНК

dUTP – дезоксиуридинтрифосфат

F₁ – первое поколение

G₂ – период – постсинтетический период клеточного цикла

GSM (англ. – Global System for Mobile Communications) – Глобальная система мобильной связи; цифровой стандарт связи

ICNIRP – Международная Комиссия по защите от неионизирующих излучений

IL-1 β – интерлейкин-1 β

IL-6 – интерлейкин-6

in vitro – вне организма

LH-RH – гонадотропин-рилизинг-гормон, или гонадолюберин (гормон гипоталамуса)

NO' – оксид азота активированный

NO_x – оксид азота

SAR (англ. – Specific Absorption Rate) – удельная поглощенная мощность

SCSA (англ. – sperm chromatin structure assay) – метод для исследования фрагментации ДНК в сперматозоидах

TNF α – фактор некроза опухоли

TUNEL assay (англ. – terminal deoxynucleotidyl transferases (TdT) dUTP assay) – метод исследования, позволяющий обнаружить разрывы ДНК в сперматозоидах

WCDMA (англ. – Wideband Code Division Multiple Access) – широкополосный множественный доступ с кодовым разделением; один из стандартов сотовой связи

Wi-Fi – (англ. – Wireless Fidelity – беспроводная точность) – беспроводная связь (Интернет)

Введение

За последнее столетие окружающая среда человека претерпела существенные изменения. Интенсивное развитие электротехники, радио, телевидения, средств связи, электро транспорта и т. д. привело к глобальному электромагнитному загрязнению [1–4]. Даже в домашних условиях, в быту за относительно небольшой период времени к существующим электромагнитным источникам (электропроводка, холодильники, радиопередающие устройства, телевизоры, пылесосы, стиральные машины) добавилось немало новых широко распространенных искусственных источников электромагнитного излучения, при работе которых возникают электромагнитные поля (ЭМП) различной интенсивности. Достаточно назвать такие излучающие приборы и системы, как компьютеры и их мониторы, СВЧ-печи, мобильные телефоны и смартфоны [5]. Значительный вклад в электромагнитное загрязнение антропогенного происхождения вносит мобильная (сотовая) связь, а также высокоскоростной Интернет, которые приобрели всеобщий характер. Считается, что за последние 10–15 лет уровень ЭМП в наших квартирах увеличился в 5–6 раз [3]. Фактически человек постоянно находится в условиях действия нового фактора окружающей среды – антропогенного электромагнитного загрязнения. ЭМП окружают нас всюду, но мы этого излучения не видим и не чувствуем, так как оно не обнаруживается органами чувств человека, чем усугубляется опасность воздействия.

Сознавая возникшую опасность и принимая во внимание обеспокоенность общественности и правительств, Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) создала в 1996 г. Международный проект по электромагнитным полям для оценки научных данных о возможных неблагоприятных последствиях их воздействия на здоровье.

В мае 2011 г. Международное агентство исследования рака ВОЗ (IARC) классифицировало ЭМП сотовых телефонов как возможный канцерогенный фактор для людей, присвоив им группу канцерогенной опасности 2В, т. е. категорию, используемую в случаях, когда взаимосвязь считается надежной, но нельзя с разумной уверенностью исключать случай, погрешность или смешивание [6]. Это решение было основано на увеличенном риске развития рака мозга глиомы, рака мозга высокой злокачественности [7].

В настоящее время ведутся исследования для наиболее полной оценки потенциальных отдаленных последствий пользования мобильными телефонами. В 2012 г. ВОЗ провела официальную оценку риска всех изученных последствий воздействия радиочастотных полей для здоровья. Полученные данные анализируются.

Очевидно, что электромагнитный фон, образуемый различными искусственными источниками электромагнитного излучения (ЭМИ), в том числе и мобильными аппаратами, многократно превышающий естественный электромагнитный фон, не может не оказывать отрицательного влияния на организм, так как он существенно изменяет физические характеристики среды его обитания. ЭМП сотовой связи является единственным источником вредного физического фактора, с которым контактирует практически все население [8]. В связи с масштабами распространения мобильной связи возникает серьезная обеспокоенность в отношении ее экологической безопасности [3, 9]. Имеет значение и то, что человек, который сам не пользуется мобильной связью, но находится рядом с человеком, разговаривающим по телефону, также подвергается облучению. Поэтому мобильный телефон как излучатель волн дециметрового диапазона с большой проникающей способностью представляет опасность не только для индивидуальных пользователей, но и для всех окружающих. Следует учитывать и то обстоятельство, что функциональные изменения в организме под действием ЭМП накапливаются и со временем могут привести к развитию патологических процессов.

ЭМП мобильного телефона, прежде всего, оказывает влияние на головной мозг, так как аппарат пользователя прикладывается к височной области к наружному уху, и находящиеся во внутреннем ухе сложные нервные образования слухового нерва, обеспечивающие нормальную деятельность слухового и вестибулярного анализаторов. Излучение захватывает и сетчатку глаз.

У отдельных людей в зависимости от продолжительности электромагнитного воздействия могут наблюдаться такие проявления, как нарушение сна, снижение памяти и познавательной функции, утомляемость, раздражительность, нарушение гематоэнцефалического барьера, цитологические изменения в нервных клетках мозга [1, 10]. При частом использовании аналоговых телефонов у пользователей отмечается высокий риск развития опухолей височной доли мозга и мозговой оболочки. Использование мобильных телефонов в детском и подростковом возрасте, начиная с 10 лет и более, может увеличить риск развития опухоли мозга у пользователей по сравнению с группой, где сотовые телефоны начали использовать лица в старшем возрасте [11, 12].

Действие ЭМП сотовых телефонов не ограничивается влиянием на головной мозг, оно затрагивает и другие системы организма. Например, известно, что мобильные телефоны, которые мужчины носят в карманах брюк, ухудшают количественные и качественные показатели спермы [13–15]. Это также относится и к Интернету. В связи с этим мужчинам рекомендуют держать подключенные Wi-Fi устройства подальше от половых органов [16].

Поэтому в настоящее время все больше внимания уделяется анализу последствий облучения ЭМП сотовых телефонов в диапазоне мобильной связи не только на головной мозг, но и на другие системы организма. Появилось немало исследований, в которых оценивается реакция на ЭМИ сотового телефона и базовых станций таких важнейших систем жизнеобеспечения организма, как иммунная, эндокринная, репродуктивная и т. д. [1, 17–25]. Отрицательные последствия излучения в диапазоне мобильной связи на здоровье значительно возрастают для детей, беременных женщин, а также для лиц, обладающих повышенной чувствительностью к электромагнитному излучению, в связи с чем для вышеназванных категорий людей использование сотовых телефонов нежелательно [1, 10].

Особый интерес заслуживают данные о влиянии ЭМП мобильной связи на состояние репродуктивной системы, так как они содержат прямые доказательства негативного воздействия на систему, которая, несомненно, играет особую роль в организме, обеспечивая размножение живых организмов, и тем самым осуществляет генетическую непрерывность поколений. Для популяции явление высокой чувствительности половых клеток к повреждающим воздействиям опасно тем, что проявляется не только на пораженной особи, но и через половые клетки последних, на потомстве [26]. Оценить реальную степень потенциальной угрозы излучения мобильных телефонов на организм и его важнейшие системы, а также для последующих поколений – главная и неотложная задача исследований в этой области.

Несмотря на то что в настоящее время нет бесспорных доказательств опасности использования сотового телефона для мужской репродуктивной системы человека, тем не менее появляется все больше работ, в которых нередко выявляются те или иные отклонения свойств облученных зрелых мужских половых клеток, которые могут быть причиной снижения фертильности [25]. Исследования, проведенные на животных, также, во многих случаях, подтверждают высокую чувствительность репродуктивной системы самцов к электромагнитному воздействию в диапазоне мобильной связи, включая регуляцию ее эндокринной функции.

Массовое распространение антропогенных источников электромагнитного излучения, и прежде всего мобильной связи, вызывает необходимость совершенствования существующих методов защиты, регламентов санитарно-гигиенических нормативов и разработки новых способов, снижающих эффекты воздействия на организм. Одно из направлений таких

исследований – исследование биологически активных веществ, антиоксидантов и других веществ, которые могут быть использованы для повышения устойчивости организма к электромагнитному воздействию в диапазоне мобильной связи.

Перечисленные проблемы, которые обсуждаются в настоящей монографии, могут представлять интерес для специалистов, экологов, студентов биологических и медицинских вузов и всех тех, кто интересуется проблемой влияния электромагнитного излучения на организм.

Автор считает необходимым отметить, что повышенное внимание к проблеме биологического действия электромагнитного излучения на организм и его отдаленным последствиям уделял академик Е. Ф. Конопля (1939–2010), благодаря которому в Институте радиобиологии НАН Беларуси были начаты и получили развитие исследования в этой области. В настоящее время реализация исследований по проблеме влияния электромагнитного излучения различных диапазонов мобильной связи, промышленной частоты, системы Wi-Fi (Интернет) на состояние наиболее чувствительных систем организма получает постоянную поддержку директора Института радиобиологии НАН Беларуси, доктора биологических наук А. Д. Наумова. Большой вклад в проведение экспериментов и получение данных при изучении состояния репродуктивной и других систем организма крыс-самцов при воздействии ЭМП мобильного телефона вносят научные сотрудники лаборатории эндокринологии и биохимии Н. В. Чуешова, Г. А. Горох, Д. Р. Петренев, Д. В. Сухарева, Н. В. Гунькова (Тхорева), а также кандидат технических наук, доцент кафедры систем телекоммуникаций, заведующий лабораторией 1.4 БГУИР В. И. Шалатонин, который не только осуществляет техническое обеспечение исследований, но и активно участвует в обсуждении перспективных направлений в дальнейшей работе.

Таким образом, в настоящей монографии представлены данные исследований о влиянии электромагнитного излучения в диапазоне мобильной связи на репродуктивную систему самцов млекопитающих, в том числе человека, а также у потомства, полученного от облученных родителей. Кроме того, обсуждаются вопросы эндокринного статуса и эффективности антиоксидантов и биологически активных веществ для защиты репродуктивной системы самцов млекопитающих в этих условиях.

Автор будет признателен за конструктивные замечания читателей, которые будут учтены в дальнейшей работе.

Глава 1

Общая характеристика электромагнитного излучения. Источники ЭМП. Особенности ЭМП диапазона мобильной связи и взаимодействие с биологическими объектами

Человек и все живые объекты окружающей среды постоянно подвергаются воздействию электромагнитных полей естественного и искусственного (антропогенного) происхождения. Возникновение многочисленных искусственных источников ЭМП привело за последние 100–120 лет к резкому возрастанию интенсивности электромагнитного излучения.

Средняя интенсивность электромагнитного излучения Солнца и других внеземных источников, которые создают естественный электромагнитный фон Земли в радиочастотном и микроволновом диапазонах, изменяется в пределах от 10^{-24} (спокойное Солнце) до 10^{-12} Вт/м² (максимальная солнечная активность), в то время как общий электромагнитный фон в условиях современного города составляет $10^{-1} - 10$ Вт/м² [2]. Таким образом, суммарная интенсивность ЭМП различного происхождения на несколько порядков превышает интенсивность естественного электромагнитного фона.

Источники ЭМП антропогенного происхождения чрезвычайно разнообразны. Это линии электропередач (ЛЭП), электротранспорт, промышленные установки, телевизионные и радиовещательные станции, бытовая техника, мониторы компьютеров, радары, медицинская и научная аппаратура, системы мобильной связи, Интернет и т. д., которые являются источниками излучения электромагнитного излучения в широком диапазоне частот [1–3]. Среди перечисленных источников электромагнитного воздействия на человека наибольший вклад вносят базовые станции сотовой связи и мобильные телефоны. Суммарная экспозиция населения от ЭМП беспроводных телекоммуникационных технологий постоянно растет и сейчас составляет не менее 60 % от общей экспозиции в радиочастотном диапазоне [27]. Невероятно широкое распространение мобильных средств связи в сочетании с неопределенностями в оценке опасности для здоровья человека, по существу представляет собой небывалый по размаху эксперимент, который человечество проводит на себе [28, 29].

ЭМП, обладая высокой биологической активностью, вызывают в организме, его отдельных системах разнообразные эффекты, выраженность которых зависит от многих факторов, но, прежде всего, от энергии квантов излучения, обусловленных диапазоном частот и их интенсивностью.

Чтобы понять действие электромагнитного излучения (ЭМИ) на организм, необходимо рассмотреть физическую природу ЭМП и более подробно остановиться на его особенностях в диапазоне мобильной связи.

1.1. ЭМИ: основные характеристики, классификация, источники, биологическое действие

ЭМП – особая форма материи, посредством которой осуществляется взаимодействие между электрически заряженными частицами, представляющая собой совокупность электрического и магнитного полей. Электромагнитные волны возникают вследствие связи между изменениями электрического и магнитного полей. Всякое изменение напряженности электрического поля вызывает появление переменного магнитного поля, изменение которого, в свою очередь, порождает меняющееся электрическое поле. Именно поэтому происходит передача колебаний напряженностей электрического и магнитного полей, т. е. происходит распространение электромагнитной волны.

В вакууме ЭМП характеризуются вектором напряженности электрического поля (**E**) и магнитной индукцией (**B**), которые соответственно определяют силы, действующие со стороны поля на неподвижные и (или) движущиеся заряженные частицы. Наряду с векторами **E** и **B**, измеряемыми непосредственно, ЭМП может характеризоваться скалярным ϕ и векторным **A** потенциалами, которые определяются неоднозначно, с точностью до градиентного преобразования. В среде, например в тканях, ЭМП характеризуется дополнительно двумя вспомогательными магнитными величинами: напряженностью магнитного поля (**H**) и электрической индукцией (**D**). При ускоренном движении заряженных частиц ЭМП излучается в виде квантов (фотонов) и существует в виде электромагнитных волн, которые представляют собой взаимосвязанные изменения напряженности электрического и магнитного полей [2, 30–32].

Основными параметрами электромагнитной волны (электромагнитного излучения) являются длина волны (λ) – расстояние, на которое распространяется волна за один период (T), частота колебания (F) – число колебаний за 1 с, скорость (C) распространения электромагнитной волны, равная (λ/T) [30, 31]. Электрическая E - и магнитная H -составляющие в распространяющейся электромагнитной волне перпендикулярны друг другу и направлению распространения [2].

Действие ЭМП в зависимости от энергии квантов может вызывать или не вызывать ионизацию атомов. ЭМИ, вызывающее ионизацию атомов, является ионизирующим излучением, к числу которых относятся γ - и рентгеновское излучения. ЭМИ, не вызывающее ионизацию атомов, – неионизирующее излучение, к спектру которых принадлежат ультрафиолетовое, оптическое (видимый свет), инфракрасное, гипервысокочастотное, сверхвысокочастотное или микроволновое и радиочастотное излучения. Условной границей между ионизирующими и неионизирующими излучениями принята энергия кванта в 12 эВ, соответствующая длине 100 нм. Эта граница находится в ультрафиолетовой области электромагнитного спектра. Таким образом, неионизирующее излучение не обладает достаточной энергией для ионизации вещества. Оно характеризуется энергиями фотонов ниже 12 эВ, длиной волны выше 100 нм, частотой ниже $3 \cdot 10^{15}$ Гц. Тем не менее неионизирующее излучение обладает высокой биологической активностью, вызывая в зависимости от его интенсивности такие эффекты, как нагревание, изменение химических реакций, наведение электрических токов в тканях, информационное воздействие [2].

Согласно Международной классификации, электромагнитный спектр до 3000 ГГц в зависимости от частоты и длины волны разделяется на 12 диапазонов (табл. 1.1).

Весь спектр электромагнитных излучений, используемых в медико-биологической практике, также принято относить к низким (низкие частоты (НЧ), диапазон частот от 3 до

300 кГц), радио- (радиочастоты (РЧ), диапазон частот от 0,3 до 300 МГц) и сверхвысоким (СВЧ, диапазон частот от 0,3 до 3000 ГГц) частотам.

Различают естественные (природные) и искусственные (антропогенные, техногенные) ЭМП.

Природные источники ЭМП условно делят на две группы. К первой группе относят постоянное электрическое и постоянное магнитное поле Земли, ко второй группе – радиоволны, генерируемые космическими источниками (Солнце, звезды и др.), и атмосферные процессы (разряды молний и т. д.). Естественное электромагнитное поле Земли является источником энергии и распространяется в виде электромагнитных волн в диапазоне от 10 МГц до 10 ГГц – от инфракрасных до ультрафиолетовых лучей.

А излучение атмосферных разрядов показало, что возникающие при этом электромагнитные излучения охватывают широкий диапазон длин волн – от сверхдлинных до ультракоротких; и наконец, были открыты радиоизлучения Солнца и Галактик в диапазоне от метровых до миллиметровых волн.

Все виды магнитной активности являются результатом солнечной активности, связанной как с увеличением числа солнечных пятен, так и со вспышками на Солнце. В реальных условиях естественные ЭМП изменяются в течение суток и по сезонам, зависят от географических координат (широта, долгота, высота над поверхностью Земли) и от 11-летнего цикла активности Солнца и других факторов [3]. Поэтому естественная магнитная активность носит соответствующий периодический характер.

Таблица 1.1. Международная классификация ЭМИ по диапазонам частот и длинам волн [2]

Наименование частотного диапазона	Границы диапазона	Наименование волнового диапазона	Границы диапазона
Крайне низкие частоты, КНЧ	3–30 Гц	Декамегаметровые	100–10 Мм
Сверхнизкие частоты, СНЧ	30–300 Гц	Мегаметровые	10–1 Мм
Инфранизкие частоты, ИНЧ	0,3–3 кГц	Гектокилометровые	1000–100 км
Очень низкие частоты, ОНЧ	3–30 кГц	Мириаметровые	100–10 км
Низкие частоты, НЧ	30–300 кГц	Километровые	10–1 км
Средние частоты, СЧ	0,3–3 МГц	Гектометровые	1–0,1 км
Высокие частоты, ВЧ	3–30 МГц	Декаметровые	100–10 м
Очень высокие частоты, ОВЧ	30–300 МГц	Метровые	10–1 м
Ультравысокие частоты, УВЧ	0,3–3 ГГц	Дециметровые	1–0,1 м
Сверхвысокие частоты, СВЧ	3–30 ГГц	Сантиметровые	10–1 см
Крайне высокие частоты, КВЧ	30–300 ГГц	Миллиметровые	10–1 мм
Гипервысокие частоты, ГВЧ	300–3000 ГГц	Децимиллиметровые	1–0,1 мм

Человек, все живые существа находятся под постоянным воздействием ЭМП Земли, которое изменяется во времени. На протяжении миллиардов лет естественное ЭМП Земли, все диапазоны естественного электромагнитного спектра, являясь первичным экологическим фактором, оказывали постоянное воздействие на все объекты живой природы и это, несомненно, не могло не отразиться на процессах их жизнедеятельности.

В ходе эволюционного развития структурно-функциональная организация живых существ адаптировалась под воздействием колебаний естественного электромагнитного фона, наблюдаемых в периоды как обычной, так и повышенной солнечной активности, когда мощный корпускулярный поток вызывает резкие кратковременные изменения магнитного поля Земли.

Природные ЭМП совершенно необходимы для нормального протекания процессов жизнедеятельности на всех уровнях организации от субклеточного и клеточного до органов и тканевых систем. Диапазон интенсивностей естественных ЭМП является «привычным» для живых организмов, его называют зоной оптимальных условий [3]. В случае нарушения их действия возникает опасность изменения нормального функционирования организма и его систем.

Однако наряду с природными (естественными), жизненно необходимыми ЭМП в XIX в. возникли искусственные ЭМП, созданные людьми для коммуникации и передачи энергии. Они характеризуются высокой когерентностью, т. е. частотной и фазовой стабильностью, более простым частотным спектром, обладают значительной интенсивностью и большой неравномерностью локализации в пространстве [2, 3, 32, 33].

Разнообразные антропогенные источники ЭМП не только существенно повышают электромагнитный фон в местах их нахождения, поскольку электромагнитное излучение носит локальный характер, но отражаются и на общем уровне электромагнитного фона Земли, существенно увеличивая его. Это явление получило название «электромагнитное загрязнение окружающей среды», или «электромагнитный смог». В настоящее время излучение искусственных источников ЭМП, существенно превышая естественный электромагнитный фон, превратилось в опасный экологический фактор.

Спектр искусственных источников ЭМП весьма обширен и также делится на две группы.

К первой из них относятся источники низкочастотных излучений в диапазоне от 0 до 3 кГц. Эта группа включает в себя все системы производства, передачи и распределения электроэнергии (ЛЭП, трансформаторные подстанции, электростанции, различные кабельные системы), домашнюю и офисную электро- и электронную технику, в том числе и мониторы персональных компьютеров, железнодорожный транспорт и его инфраструктуру, а также метро, троллейбусный и трамвайный транспорт.

Ко второй группе искусственных ЭМП относятся источники высокочастотных излучений, частота которых составляет от 3 кГц до 300 ГГц. Сюда входят функциональные передатчики – источники электромагнитного поля в целях передачи или получения информации. Это передатчики (радио, телевидение), радиотелефоны (авто-, радиотелефоны, радио средних волн (СВ), любительские радиопередатчики, производственные радиотелефоны), направленная радиосвязь (спутниковая радиосвязь, наземные релейные станции), навигация (воздушное сообщение, судоходство, радиоточка), локаторы (воздушное сообщение, судоходство, транспортные локаторы, контроль за воздушным транспортом), беспроводная связь и т. д.

Сюда же относится различное технологическое оборудование, использующее СВЧ-излучение, переменные (50 Гц – 1 МГц) и импульсные поля, бытовое оборудование (СВЧ-печи), средства визуального отображения информации на электронно-лучевых трубках (мониторы персональных компьютеров, телевизоры и др.). Для научных исследований в медицине применяют токи ультравысокой частоты.

Основные диапазоны частот, применяемые в различных сферах деятельности человека, приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2. Основные области применения источников ЭМИ в соответствии с выделенными для этих целей диапазонами частот (длинами волн) [2]

Частота	Длина волны	Область применения
0,3–3 МГц	1–0,1 м	Радионавигация, морская радиосвязь, любительская радиосвязь, радиовещание, промышленность (диэлектрический и индукционный нагрев материалов), медицина, научные исследования
3–30 МГц	100–10 м	Международная радиосвязь, любительская радиосвязь, радиовещание, промышленность (диэлектрический и индукционный нагрев материалов), медицина (физиотерапия, ЯМР-диагностика, гипертермия), научные исследования (физиотерапия, ЯМР-диагностика, гипертермия), научные исследования
30–300 МГц	10–1 м	Радиосвязь, радиовещание, телевидение, радиолокация, медицина (физиотерапия, ЯМР-диагностика, гипертермия), научные исследования
0,3–3 ГГц	100–10 см	Радионавигация, радиолокация (гражданская и военная), телевидение, радиотелефонная, радиорелейная и сотовая связь, микроволновые печи, медицина (физиотерапия, гипертермия), научные исследования
3–30 ГГц	10–1 см	Радиолокация (гражданская и военная), радиорелейная и спутниковая связь, научные исследования
30–300 ГГц	10–1 мм	Радиолокация (гражданская и военная), спутниковая связь, научные исследования

Установлено, что в формировании ЭМП наблюдается определенная зональность. Вокруг источника электромагнитного излучения выделяют три зоны: ближнюю, или зону индукции, промежуточную, или зону интерференции, и дальнюю, или волновую зону (зону излучения).

При излучении от источников ближняя зона простирается на расстояние $\lambda/2\pi$, т. е. приблизительно на $1/6$ длины волны. Дальняя зона начинается с расстояний, равных $\lambda \times 2\pi$, т. е. с расстояний, равных приблизительно шести длинам волны. Между этими двумя зонами располагается промежуточная зона.

В ближней зоне (зоне индукции) на расстоянии $r < \lambda$ ЭМП с удалением от источника убывает по закону обратно пропорционально r^{-2} или r^{-3} . В ближней зоне, в которой еще не сформировалась бегущая электромагнитная волна, электрическое (E) и магнитное (H) поля следует считать независимыми друг от друга, их измерение проводят отдельно, поэтому эту зону можно характеризовать электрической и магнитной составляющими электромагнитного поля. Соотношение между ними в этой зоне может быть самым различным.

Для промежуточной зоны характерно наличие как поля индукции, так и распространяющейся электромагнитной волны.

Дальняя зона (или зона сформировавшейся электромагнитной волны) начинается с расстояния $r > 3 \lambda$; там интенсивность поля убывает обратно пропорционально расстоянию до источника r^{-1} и связь, существующая между электрической (E) и магнитной (H) составляющими, выражается в соответствии с формулой

$$E = 377 H,$$

где 377 – волновое сопротивление вакуума (Ом).

В волновой зоне воздействие ЭМП определяется плотностью потока энергии (ППЭ), переносимой электромагнитной волной. ППЭ характеризует количество энергии, переносимой электромагнитной волной в единицу времени через единицу поверхности, перпендикулярной направлению распространения волны. ППЭ обозначается как S , единицы измерения – ватт на квадратный метр (Вт/м^2), милливатт на квадратный сантиметр (мВт/см^2) или микроватт на квадратный сантиметр (мкВт/см^2).

Установлено, что ЭМП способно взаимодействовать с живыми организмами. Биологическое действие ЭМП на объекты определяется величиной наведения внутренних полей и электрических токов, отражением, поглощением и их распределением в теле человека и животных. Это зависит от размера, формы, анатомического строения тела, электрических и магнитных свойств тканей, содержания воды в них, ориентации объекта относительно поляризации тела, а также от характеристик ЭМП (частота, интенсивность, модуляция и др.). Биологическое действие ЭМИ также зависит от длины волны (или частоты излучения), режима генерации (непрерывный, импульсный), условий воздействия на организм (постоянное, прерывистое, общее, местное, интенсивность, длительность). Биологическая активность ЭМИ уменьшается с увеличением длины волны (или снижением частоты) излучения, поэтому наиболее активными являются метровые, дециметровые, сантиметровые и миллиметровые диапазоны [34, 35].

При взаимодействии ЭМП с живыми организмами возникают явления отражения, проведения, поглощения и преобразования электромагнитной энергии тканями и жидкостями. С увеличением частоты колебаний величина отражения энергии тканями уменьшается, а поглощение увеличивается. Однако биологический эффект обуславливается не только величиной поглощения, но и глубиной проникновения энергии. Чем больше она, тем больше вероятность поражения жизненно важных органов. Волны миллиметрового диапазона поглощаются поверхностными слоями кожи, сантиметрового – кожей и прилегающими к ней тканями, дециметровые проникают на глубину 8–10 см. В среднем глубина проникновения равняется $1/10$ длины волны [2, 32, 35].

Поглощение энергии ЭМИ в тканях существенно зависит от содержания воды. Ткани с высоким содержанием воды (кровь, мышцы, сердце, почки, мозг, семенники) обладают значительно большим коэффициентом экранирования, так как лучше поглощают энергию ЭМП. Ткани с низким содержанием воды – костная и жировая ткань [36]. Глубина проникновения для ЭМИ различных частот в некоторых биологических тканях с низким и высоким содержанием воды в диапазоне частот от 300 до 3000 МГц представлена в табл. 1.3.

Глубина проникновения ЭМИ в ткани находится в прямой зависимости от длины волны, а величина поглощения – в обратной. Воздействие излучений миллиметрового (от 30 до 300 ГГц) и сантиметрового (от 3 до 30 ГГц) вызывает в основном термические ожоги, а излучения дециметрового (от 0,3 до 3 ГГц), проникают глубже, поражая внутренние органы. В табл. 1.4 представлены данные о глубине проникновения ЭМИ в тканях человека в диапазоне 100–3000 МГц.

Исследования биологического действия антропогенных источников ЭМП в широком диапазоне частот указывают на высокую чувствительность различных систем организма к их воздействию.

Таблица 1.3. Глубина проникновения электромагнитных волн в биологических тканях с низким и высоким содержанием воды [2]

Частота, МГц	Длина волны в воздухе, λ , м	Глубина проникновения, d (см) с низким содержанием воды	Глубина проникновения, d (см) с высоким содержанием воды
300	1,0	32,1	3,89
433	0,693	26,2	3,57
750	0,4	23,0	3,18
915	0,328	17,7	3,04
1500	0,2	13,9	2,42
2450	0,122	11,2	1,70
3000	0,1	9,74	1,61

Таблица 1.4. Глубина проникновения ЭМИ в тканях человека, см [32]

Ткань	Частота, МГц				
	100	200	400	1000	3000
Костный мозг	22,9	20,66	18,37	11,90	9,92
Головной мозг	3,55	4,13	2,07	1,93	0,47
Хрусталик глаза	9,42	4,39	4,23	2,91	0,50
Кровь	2,86	2,15	1,79	1,40	0,78
Мышца	3,45	2,32	1,84	1,46	–
Кожа	3,76	2,78	2,18	1,64	0,64

Несмотря на существование различных точек зрения, наиболее распространенными являются представления о тепловой природе воздействий на живые организмы любых неионизирующих ЭМИ [37]. Поэтому сообщения о влиянии на исследуемую систему воздействий, энергия которых оказывается меньше средней тепловой энергии, т. е. при $hf \ll kT$ (h – постоянная Планка, f – частота излучения, k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура), представляются априори ложными. Тем не менее еще в 80-е годы XX в. было показано, что принципиальных теоретических запретов для такого влияния нет. При весьма низком уровне (нетепловом) ЭМП принято говорить об информационном характере воздействия на организм (к примеру, для радиочастот выше 300 МГц интенсивность такого излучения должна быть менее 1 мВт/см^2) [38]. Предполагается, что для биологических систем воздействие таких полей лежит ниже порога включения защитных биологических механизмов и способно накапливаться на субклеточном уровне, т. е. на уровне генетических процессов. Полагают также, что такие системы могут находиться в состоянии весьма далеко от равновесия и достаточно слабого (информационного) воздействия, чтобы система прошла через точку бифуркации в качественно новое состояние. Информационное воздействие приводит к формированию биологического эффекта за счет энергии самого организма, т. е. при этом передается информация, необходимая для развития той или иной реакции организма. Особенно интенсивно развиваются исследования нетепловых биологических эффектов в дециметровом – миллиметровом диапазоне длин волн. Результаты биологических исследований свидетельствуют о том, что, несмотря на чрезвычайно малые значения мощности, их излучение оказывает существенное влияние на организм. Показано, что возможные механизмы взаимодействия могут быть связаны с возбуждением элементов жидкокристалличе-

ской структуры воды и наличием у живых организмов информационно-волновой составляющей неэлектромагнитной природы [32, 39–43]. Высокая действенность слабых ЭМИ, возможно, объясняется резонансным характером их воздействия, которое способно как усиливать, так и ослаблять функциональные возможности отдельных органов [32, 44, 45].

Тепловое действие ЭМИ наблюдается при высоких интенсивностях излучения – при ППЭ порядка 10 мВт/см^2 и выше.

При слаботепловом действии ЭМИ в интервале ППЭ от 1 до 10 мВт/см^2 нагревания всего облучаемого объекта не происходит, однако возможны единичные или множественные локальные повышения температуры в отдельных его частях или точках – «горячие пятна». В этом случае говорят о «микротепловом действии». Нетепловое действие наблюдается при ППЭ менее 1 мВт/см^2 , когда облучение не вызывает повышения температуры в биологическом объекте, однако эффекты в нем выявляются [2].

Поглощение электромагнитной энергии живыми тканями сопровождается повышением их температуры, если поглощаемая мощность превосходит мощность рассеяния тепловой энергии. Последняя определяется теплоотдачей, которая осуществляется с поверхности тела посредством излучения, конвекции, теплопроводности и испарения влаги. Отведение тепловой энергии от глубоких тканей к поверхности тела обеспечивается кровообращением. Механизмы теплоотдачи функционируют в организме непрерывно, поскольку ему свойствен постоянный высокий уровень производства теплоты в ходе обмена веществ. Нарушение теплового гомеостаза в организме в результате облучения ЭМИ наступает в тех случаях, когда возникшая в результате этого дополнительная тепловая нагрузка, по меньшей мере, вдвое превышает уровень основного обмена [2].

Легко подвержены тепловому действию ЭМП паренхиматозные органы (печень, поджелудочная железа), полые органы, содержащие жидкости (мочевой пузырь, желчный пузырь, желудок). Нагревание указанных органов может обострить хронически протекающие в них воспалительные процессы, провоцировать возникновение язв, кровотечения, прободений. При интенсивном общем облучении повышается температура тела и наступает смерть. Пороговые интенсивности теплового действия электромагнитных волн находятся в пределах $10\text{--}15 \text{ мВт/см}^2$.

При низком уровне ЭМИ (как, например, при излучении мобильного телефона) характер воздействия носит преимущественно нетепловой – информационный характер. В этом случае величина кванта энергии у ЭМИ слишком низка, чтобы влиять непосредственно на какую-нибудь химическую связь, даже водородную, энергия которой мала по сравнению с другими. Однако и низкоинтенсивное ЭМИ способно вызывать биологические эффекты в различных тканях организма, которые можно характеризовать как сигнальные, регулирующие и дестабилизирующие. Сигнальное действие происходит при величинах ЭМИ, сопоставимых с уровнем естественных источников излучения, и воспринимается организмом как сигнал, несущий определенную информацию. Регулирующее действие наблюдается у биологических объектов различных уровней организации способностью изменять их функциональное состояние. При дестабилизирующем действии ЭМИ низкого уровня может происходить увеличение отклонений некоторых изучаемых показателей в облученном организме по сравнению с интактным контролем [2].

При нетепловом действии (нетепловая концепция) биологическую реакцию вызывает не энергия ЭМИ. В этом типе взаимодействий ответная реакция осуществляется за счет собственных энергетических ресурсов организма, а ЭМИ является только инициирующим сигналом. Нетепловое действие для ЭМИ радиочастотных и микроволновых диапазонов (РЧ- и МКВ-диапазонов) начинается с величины ППЭ $\sim 10\text{--}12 \text{ Вт/м}^2$, которая является минимальным порогом чувствительности для многих биологических объектов. Тепловые взаи-

модействия для ЭМИ РЧ- и МКВ-диапазонов наблюдаются на всех уровнях биологической организации – от организма до молекул, тогда как нетепловые, несмотря на крайне низкие интенсивности, проявляются преимущественно на уровне целого организма [2].

Функциональные изменения в организме под действием ЭМП могут накапливаться, но являются обратимыми до достижения определенных величин, если это излучение прекращается. Биологические эффекты ЭМП в условиях длительного многолетнего воздействия накапливаются с возможным развитием отдаленных последствий, включая дегенеративные процессы, нарушения регуляторных процессов в нейроэндокринной системе.

Критическими органами и системами для электромагнитного воздействия являются головной мозг, нервная, репродуктивная, иммунная системы, глаза [1, 2, 18, 27]. Отмечается более высокая чувствительность развивающегося организма к ЭМП. Получены также данные об изменениях кроветворной, сердечно-сосудистой, репродуктивной и нейроэндокринной систем, иммунитета, обменных процессов, сообщается об индуцирующем влиянии ЭМИ на процессы канцерогенеза [1, 10, 12, 17, 24, 27, 46–48].

ЭМП характеризуются не только негативными эффектами на организм. Установлено, что определенные частоты ЭМИ диапазона радиочастот (РЧ) и микроволн (МКВ) оказывают терапевтическое действие. Эти свойства некоторых частот ЭМП с успехом применяются в лечебной практике [31, 49]. Основным лечебный эффект при применении в терапии ЭМИ РЧ- и МКВ-диапазонов заключается в образовании в облучаемых тканях и органах тепла и сопровождается усилением кровотока, увеличением скорости биохимических реакций, интенсификацией метаболизма и т. д., что является причиной возникновения в результате облучения терапевтического эффекта [2]. Кроме того, электромагнитные излучения нашли применение в медицинской диагностике, в том числе в РЧ- и МКВ-плетизмографии – регистрации объемных изменений кровенаполнения органов и томографии, позволяющей получить реальное изображение внутренних органов, включая их отдельные сечения и слои.

1.2. Распространение мобильной (сотовой) связи и физические характеристики ЭМП базовых станций и сотовых (мобильных) телефонов

Первый прототип мобильного телефона Motorola DynaTAC был создан в 1973 г. Мартином Купером. Этот телефон весил около 1,15 кг и имел размер 22,5×12,5×3,75 см. Однако первый коммерческий сотовый телефон появился на рынке только через десять лет в марте 1983 г. Он весил гораздо меньше прототипа – всего полкилограмма – и продавался за три с половиной тысячи долларов. А вскоре компания Motorola первой начала массовый выпуск мобильных телефонов и длительный период времени определяла развитие в мире беспроводной телефонной связи. Количество мобильных телефонов в мире начало стремительно увеличиваться. В 1983 г. число пользователей сотовых телефонов достигло 1 млн, а в 1990 г. – 11 млн. Распространение сотовых технологий сделало этот сервис все более дешевым, качественным и доступным. Уже в 2000 г. во всем мире насчитывалось 720 млн владельцев сотовых телефонов, а в 2010 г. их число превысило 5 млрд [50, 51]. В конце 2012 г. во всем мире насчитывалось около 6 млрд подписчиков мобильной сотовой связи, т. е. 86 абонентов на 100 жителей планеты. В настоящее время (2014 г.) эта величина превышает более 7 млрд. Что касается Интернета, то к концу 2013 г. в глобальной сети насчитывалось 2,7 млрд человек, что составляет 40 % населения мира [52].

В табл. 1.5 приводятся данные о количестве мобильных телефонов в некоторых странах мира и абонентов мобильной связи на 100 человек [53].

Республика Беларусь по обеспеченности услугами мобильной связи находится на достаточно высоком уровне, где количество зарегистрированных пользователей в настоящее время превышает население республики. Количество абонентов, подключенных к сетям сотовой подвижной электросвязи, к концу 2012 г. достигло 10676,5 тыс., в том числе стандарта GSM – 10 668,3 тыс. и IMT-MC-450 – 8,2 тыс. Проникновение сотовой связи в Беларуси достигало 108 %. Связь обеспечивают 15 042 базовые станции сотовых операторов. Услуги сотовой подвижной электросвязи охватывают 98,1 % территории республики, на которой проживает 99,7 % населения. По количеству сотовых телефонов Беларусь превышает или практически находится на одном уровне с развитыми странами мира. Беларусь по Индексу развития информационно-коммуникационных технологий (ИКТ) в мире занимала в 2013 г. итоговое 41-е место со значением индекса, равным 6,11, а среди стран СНГ она уступала только России [52].

ЭМП, генерируемые мобильными (сотовыми) телефонами, относятся к диапазону ультравысоких частот, дециметровым волнам. Основные элементы системы мобильной связи – базовые станции и мобильные (сотовые) радиотелефоны. Базовые станции поддерживают радиосвязь с мобильными радиотелефонами, вследствие чего они являются источниками электромагнитного излучения в УВЧ-диапазоне.

Базовые станции являются источниками излучений в диапазоне 463–1880 МГц. Антенны базовых станций устанавливают на высоте 15–100 м от поверхности Земли, на уже существующие постройки или на специально сооруженных мачтах. Они излучают ежедневно и круглосуточно (в ночное время мощность излучения, как правило, снижается) ЭМП радиочастот, на протяжении уже почти 15 лет постоянно подвергают облучению все население (детей, подростков, взрослых и пожилых людей, беременных и развивающийся плод, больных и гиперчувствительных лиц). Это облучение приобрело детерминирующий характер, т. е. объективную закономерность. ЭМП базовых станций мобильной связи осуществляют тотальное облучение всего организма.

Таблица 1.5. Количество мобильных телефонов и % охвата населения мобильной связью в некоторых странах мира [53]

№ п/п	Страна	Население (млн человек)	Число аппаратов (млн штук)	Охват % населения	Дата информации, год
1	Россия	143,459	256,116	155,0	2013
2	Украина	49,976	46,398	107,7	2006
3	Беларусь	9,468	11,100	117,2	2014
4	Казахстан	16,442	25,24	153,5	2011
5	Литва	4,100	3,600		2013
6	Латвия	2,248	2,306	102,4	2010
7	Эстония	1,340	1,982	147,8	2009
8	Польша	38,2	46,000	120,2	2010
9	Германия	82,210	101,500	123,5	2008
10	Великобритания	60,975	70,000	116,0	2007
11	Франция	56,719	65,630	115,7	2007
12	США	327,577	316,866	103,9	2013
13	Япония	127,628	121,247	95,1	2013
14	КНР	1349,586	1150,000	85,21	2013
15	Индия	1220,800	867,800	70,72	2013

С каждым годом число базовых станций увеличивается, так как каждый оператор сети радиосвязи старается предоставить населению все более усовершенствованные условия для связи, а в результате суммарный фон ЭМП в окружающей среде повышается. Одновременно используются несколько технологий и стандартов беспроводной связи, что приводит к возникновению многочисленных источников ЭМП, максимально приближенных к населению, но излучающих ЭМП значительно меньшей интенсивности, чем «традиционные источники» радиочастотного диапазона, как теле- и радиостанции, для которых и разрабатывались ныне действующие гигиенические нормативы. Однако в современных условиях радиочастотный диапазон задействован максимально, и каждый городской житель гарантированно находится под воздействием ЭМП радиочастот нескольких источников [54]. Среди установленных в одном месте антенн базовых станций имеются как передающие (или приемопередающие), так и приемные антенны, которые не являются источниками ЭМП. Измеренные значения ППЭ ЭМП вблизи базовых станций сотовой связи в местах возможного доступа людей (населения) составляют от 0,17 до 471 мкВт/см². Максимально измеренные значения фиксируются на кровле зданий, на которых размещены антенны базовых станций. Значения, превышающие 10 мкВт/см², фиксировались также в помещениях зданий, удаленных не далее 100 м от антенны и расположенных по азимуту проекции главных лучей диаграммы направленности антенны. На территории жилой застройки при измерениях на высоте 2 м от уровня земли не зафиксировано превышения значения 10 мкВт/см² ни в одной из точек. Тем не менее максимальные измеренные значения могут достигать нескольких сотен мкВт/см² [27].

Мобильный (сотовый) радиотелефон представляет собой малогабаритный приемопередатчик. В зависимости от стандарта телефона передача ведется в широком диапазоне

частот в пределах 450-1785 МГц до 2,0 ГГц. Мощность излучения сотового телефона является величиной переменной, в значительной степени зависящей от состояния канала связи «мобильный радиотелефон – базовая станция», т. е. чем выше уровень сигнала базовой станции в месте приема, тем меньше мощность излучения сотового телефона. Максимальная мощность находится в границах 0,125-1,0 Вт, однако в реальной обстановке она обычно не превышает 0,05-0,2 Вт. Наибольшей выходной мощностью сотовый телефон обладает при максимальном удалении от базовой станции или при уменьшении сигнала в результате эффекта экранирования [32].

В последнее время широкое распространение получили также смартфоны (англ. smartphone – умный телефон) – мобильные телефоны, дополненные функциональностью карманного персонального компьютера. Смартфоны отличаются от обычных мобильных телефонов наличием достаточно развитой операционной системы, открытой для разработки программного обеспечения сторонними разработчиками (операционная система обычных мобильных телефонов закрыта для сторонних разработчиков). Установка дополнительных приложений позволяет значительно улучшить функциональность смартфонов по сравнению с обычными мобильными телефонами. Сейчас граница между «обычными» мобильными телефонами и смартфонами все больше стирается, новые телефоны (за исключением самых дешевых моделей) давно обзавелись функциональностью, некогда присущей только смартфонам.

Как показывают эксперименты, лишь 30 % излучения мобильного телефона служат для установления связи с базовой станцией. Остальные 70 % поглощаются телом абонента.

Мощность излучения мобильного телефона различается в зависимости от его режима: в режиме ожидания (стенд-бай), при «дозвоне» и во время разговора. Она минимальна в позиции «стенд-бай» и максимальна в момент вызова. Кроме того, нельзя не отметить тот факт, что самое сильное излучение исходит от телефона в период «дозвона», когда оператор связи производит поиск мобильного устройства в зоне покрытия.

Необходимо иметь в виду, что степень воздействия сотового телефона на организм зависит от разного рода факторов. Она может зависеть от длительности воздействия аппарата на организм, от того, где телефон находится на протяжении этого времени. Воздействие телефона в активном состоянии зависит от стандарта связи и частоты вещания. Если же телефон находится в режиме ожидания, то здесь решающую роль играет ЭМП деталей аппарата. Следовательно, степень влияния телефона на организм зависит как от оператора мобильной связи, так и от модели телефона.

Вопрос о влиянии на здоровье человека телефонов, находящихся в режиме ожидания, до сих пор остается почти неизученным. Он не вызывает должного интереса в ученой среде и уступает таким проблемам, как влияние работающего телефона на головной мозг и воздействие ЭМП на организм человека, источником которого является современная бытовая и оргтехника. Конечно, ЭМИ от сотового телефона в режиме ожидания достаточно низкое. Однако тот факт, что у большинства пользователей аппараты располагаются вблизи тела (на поясе, в карманах и т. д.) в течение почти всего дня, говорит о необходимости исследований в данной сфере.

Интересен тот факт, что локальное излучение, действующее на человека во время «дозвона» и на всем протяжении разговора по телефону, достигает пределов установленных в настоящее время допустимых уровней.

Нормируемым параметром ЭМП, в том числе для сотового телефона, является ППЭ, которая выражается в $\text{мкВт}/\text{см}^2$. ППЭ характеризует количество энергии, переносимой электромагнитной волной в единицу времени через единицу поверхности, перпендикулярную направлению распространения волны.

Предельно допустимая энергетическая экспозиция в диапазоне частот 300 МГц – 300 ГГц (область, к которой также относится и мобильная связь) по ППЭ составляет 200 мкВт/см², а предельно допустимые уровни ЭМИ для населения, рабочих мест лиц, не достигших 18 лет, и женщин в период беременности составляют 10,0 мкВт/см² [54а].

Предельно допустимый уровень (ПДУ) его при воздействии на пользователей сотового телефона не должен превышать 100 мкВт/см². В момент вызова сотовый телефон излучает ЭМП наибольшей величины, постепенно уменьшаясь по мере нахождения и установления связи с запрашиваемым абонентом, поддерживаются невысокие величины ППЭ. В момент вызова величины ППЭ могут превышать ПДУ в десятки раз, особенно на большом удалении от базовой станции или в труднодоступных для радиосигнала местах.

Для характеристики значения ЭМП, создаваемого сотовым телефоном, взаимодействующего с телом человека, используется значение поглощенной дозы, т. е. того значения энергии поля, которое поглощается единицей массы ткани – удельная поглощенная мощность (УПМ). Эту величину выражают в ваттах на килограмм (Вт/кг) или милливаттах на грамм (мВт/г) и обозначают как SAR (англ. – Specific Absorption Rate) – уровень излучения энергии ЭМП, выделяющейся в тканях тела человека за 1 с. Обычно SAR определяют для ткани массой 1 или 10 г за интервал 6 мин. Для того чтобы поля радиочастот могли вызвать негативные последствия для здоровья, величина УПМ должна превышать 4 Вт/кг.

Значение SAR определяется при работе телефона на максимальной мощности, а в реальных условиях мощность передатчика телефона зависит от конкретных условий, при этом, как правило, чем лучше качество связи в точке местонахождения абонента, тем меньше мощность. Хотя в действительности уровень мощности передатчика на мобильном телефоне управляется с базовой станции GSM. Диапазон регулировки пиковой мощности в GSM-телефонах – примерно от 2 Вт до 20 мВт, т. е. разница между максимальной и минимальной мощностью около ста раз. SAR бывает различной у различных телефонов, кроме того, на ее величину влияет тип антенны. Выделяют такие три типа антенн, как: встроенная (обозначается буквой В), диполь (D), спиральная (H). Чем меньше значение SAR, тем меньшее воздействие оказывает ЭМП мобильного телефона на организм человека. В табл. 1.6 приведены данные значений SAR некоторых моделей мобильных телефонов и смартфонов [55].

В качестве предельно допустимого для условий профессионального воздействия принято значение SAR, равное 0,4 Вт/кг для тотального воздействия на тело реципиента и 10 Вт/кг для локального воздействия на его голову и торс. Для условий непрофессионального воздействия – 0,08 и 2 Вт/кг соответственно.

Системы мобильной связи эволюционировали в очень короткое время. Рассматривая вопросы их эволюции, приходим к понятию «поколений». Системы первого поколения (1G) были аналоговыми, реализованными на достаточно надежных сетях, но с ограниченной возможностью предложения услуг абонентам. Кроме того, они не позволяли осуществлять роуминг между сетями, т. е. абонент с одной и той же SIM-картой не мог получать услуги в сетях разных операторов. К системам первого поколения относятся: NMT (частота 453–457,5 МГц) и AMPS (824–848 МГц) и некоторые другие.

Таблица 1.6. Значения SAR некоторых моделей мобильных телефонов и смартфонов [55]

Модель	SAR, Вт/кг	Модель	SAR, Вт/кг
<i>Мобильные телефоны</i>			
Alkatel 511	0,34	Samsung SGH-A100	0,69
Alkatel 310, 311	0,60	Samsung SGH-A300	0,76
Ericsson T18s	0,61	Samsung SCH6100	1,27
Ericsson T20s	0,79	Samsung SCH3500	1,38
Nokia 3210	0,73	Samsung SCH8500	1,49
Nokia 3310	0,67	Siemens S35i	0,81
Nokia 3330	0,65	Siemens M35i	0,88
Nokia 6210	0,77	Siemens S40	0,36
Nokia 8310	0,85	Siemens SL42	0,89
Panasonic EB-GD35	0,86	Siemens SL45i	0,89
Panasonic EB-GD75	0,67	Siemens C45	0,93
Panasonic EB-GD92	0,59	Siemens S45	0,94
Panasonic EB-GD93	0,52	Siemens ME45	1,00
<i>Смартфоны</i>			
Motorola Bravo	1,59	Sony Ericsson Satio	1,56
Motorola Droid 2 Global	1,58	Sony Ericsson Xperia X10 Mini Pro	1,55
Motorola i576	1,44	Kyocera Jax S1300	1,55

Системы мобильной связи второго поколения (2G) являются цифровыми. У них появились существенные преимущества, которые позволили предоставить абонентам усовершенствованные услуги, которые заключались в повышении емкости и качества. Наиболее распространенным стандартом этого поколения является GSM (Глобальная система мобильной связи – Global System for Mobile Communications). С 1991 г. был внедрен единый общеевропейский стандарт GSM (GSM 900 – диапазон 900 МГц). В настоящее время большинство мобильных телефонов работают на стандарте второго поколения GSM-1800, который, имея более широкую рабочую полосу частот в сочетании с меньшими размерами ячеек (сот), по сравнению с GSM 900 позволяет строить сотовые сети значительно большей емкости.

Необходимо также упомянуть и такой источник электромагнитного излучения, как система Wi-Fi (от англ. Wireless Fidelity – беспроводная точность), необходимая для беспроводного подключения ко всемирной электронной паутине (Интернет), действующая на частоте 2,4 ГГц при мощности излучения 100 мВт. Эта область телекоммуникационных систем развивается быстрыми темпами. Широкое распространение этой системы в настоящее время вызывает необходимость оценки действия излучения этого источника на состояние организма человека и другие объекты окружающей среды.

В последние годы обращается повышенное внимание на потенциальную опасность излучения мобильных телефонов, смартфонов, системы Wi-Fi для организма, особенно в связи с исследованиями, в которых представлены данные о вероятном риске развития канцерогенеза в различных отделах головного мозга при длительном воздействии ЭМИ от указанных источников. Появилось также несколько публикаций, в которых сообщается о негативном влиянии электромагнитного излучения в диапазоне 900–1800–2450 МГц и на другие системы организма.

ЭМП указанного диапазона является возможным канцерогеном для различных систем организма, но особое значение оно имеет для структур головного мозга [7]. В серии эпи-

демиологических исследований шведскими онкологами было выявлено достоверное увеличение риска развития невриноом слухового нерва и глиом у постоянных пользователей мобильных и радиотелефонов [56–60]. Риск развития невриноом слухового нерва возрастал у последних в 3,5 раза при ипсилатеральном (одностороннем) пользовании мобильным телефоном в течение 10 лет и более. Риск развития глиом у пользователей мобильной связи (10 лет и более, ипсилатерально) увеличивался более чем пятикратно по сравнению с контрольной группой. При двустороннем пользовании мобильным телефоном возрастание рисков было менее выражено, хотя также достоверно превышало показатели контрольных групп [17, 59]. Риск развития опухолей был более выражен у молодых пользователей мобильными телефонами [60].

В рамках масштабного международного проекта Interphone было выявлено, что при суммарном времени пользования мобильным телефоном свыше 1640 ч, если это время набиралось пользователями в течение 1–4 лет, риск развития глиом возрастал у последних в 3,77 раза, а риск развития менингиом – в 4,8 раза по сравнению с контрольными группами [61].

В обзоре [17] проанализированы данные исследований влияния излучения базовых станций на рост онкозаболеваний у лиц, которые подвергаются этому воздействию. Установлены достоверные изменения в состоянии здоровья людей, живущих вблизи базовых станций мобильной связи. Так, за 10 лет работы базовых станций в г. Нейла (Германия) уровень онкозаболеваний у жителей региона (до 400 м от станции) вырос в 3,1 раза по сравнению с жителями отдаленных районов города [62]. В Израиле (г. Нетанья) ввод в эксплуатацию мощной базовой станции только за 1 год ее работы привел к росту уровня онкозаболеваний в районе станции (до 300 м) в 4,15 раза [63]. У жителей районов вблизи базовой станции выявлено достоверное ухудшение психофизических параметров самочувствия [64–66].

Выявленные эффекты влияния ЭМИ, излучаемых сотовыми телефонами, вызывают повышенный интерес к изучению биологического действия электромагнитных излучений, а также особенностей этого воздействия не только на головной мозг, но и на другие системы организма, среди которых репродуктивная система является наиболее приоритетной областью для исследования.

1.3. Особенности взаимодействия ЭМИ в диапазоне мобильной связи с биологическими объектами

Уровень излучения ЭМП диапазона мобильной связи, как уже отмечалось ранее, низкий и носит преимущественно информационный характер. Поэтому длительное время, главным образом в США, где признавались только тепловые эффекты ЭМИ, отрицали возможность существования иных путей влияния на организм этого воздействия. Только после получения неопровержимых, достоверно зарегистрированных фактов концепция о биологическом действии ЭМИ нетепловых интенсивностей получила признание.

При нетепловом действии биологическую реакцию вызывает не энергия ЭМИ: в этом типе взаимодействий ответная реакция осуществляется за счет собственных энергетических ресурсов организма, а ЭМИ является только инициирующим сигналом. Нетепловое действие для ЭМИ РЧ- и МКВ-диапазонов начинается с величины ППЭ $\sim 10^{-12}$ Вт/м², которая является минимальным порогом для многих биологических объектов [2].

Энергия кванта в диапазоне от 300 МГц до 3,0 ГГц (дециметровый диапазон) составляет всего от 1,24 до 12,4 мэВ. При таком низком уровне ЭМП действие излучения не может вызывать прямого нарушения структуры макромолекул (например, дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК)) непосредственно в клетке, ведь для разрыва самой слабой водородной связи требуется энергия не менее 80 мэВ. Поэтому электромагнитное излучение в основном влияет на растворенные в воде клетки молекулы веществ. Ткани организма состоят из клеток, в которых преобладает вода. Под влиянием ЭМП в клетках происходит поляризация цепей макромолекул и ориентация их вдоль силовых линий электрического поля, что приводит к разрыву внутренних и межмолекулярных связей, коагуляции молекул и т. д.

Несмотря на то что энергии кванта электромагнитной волны ЭМИ дециметрового диапазона недостаточно для разрыва химических связей, в литературе сообщается о ряде биологических эффектов при воздействии такого низкого (нетемпературного) уровня ЭМП [67–69]. Такие эффекты были выявлены в нескольких независимых экспериментах в разных лабораториях [70]. Эти исследования ставят под сомнение как гипотезу о термической природе биологических эффектов, так и принятые сегодня уровни безопасности ЭМП. К таким эффектам при воздействии низкого уровня ЭМП относят повышение проницаемости гематоэнцефалического барьера (ГЭБ), изменение экспрессии генов теплового шока, нарушение гомеостаза кальция, снижение синтеза мелатонина и др.

Вместе с тем ряд эффектов, выявляемых в тканях облученного организма в диапазоне мобильной связи, главным образом, обусловлен возникновением таких маркеров окислительного стресса, как активная форма кислорода (АФК), NO', продуктов перекисного окисления липидов (ПОЛ), белков теплового шока и др., что, вероятно, свидетельствует о наличии тепловой компоненты при действии ЭМП сотового телефона [71].

Другим видом изменений, вызываемых воздействием ЭМП мобильного телефона, смартфона, является изменение регуляторной функции центральной нервной системы (ЦНС) и эндокринной системы, что приводит к нарушению интенсивности физиологических и биохимических процессов.

Итак, мобильная связь появилась сравнительно недавно, но ее стремительное распространение, безусловно, вызывает обоснованное беспокойство, вызванное возможным влиянием этого вида излучения на здоровье человека. В связи с этим вопрос об оценке последствий действия этого излучения на организм приобретает все большую актуальность. Исследования биологического действия ЭМП мобильного телефона, а также при частоте 2,45 ГГц (Интернет и другие источники) все более расширяются и носят систематический

и многоплановый характер, что проявляется в количестве публикаций, посвященных этой проблеме. Несмотря на противоречивость имеющихся данных и все еще ограниченность таких исследований, особенно в отношении отдаленных эффектов электромагнитного воздействия в диапазоне мобильной связи на организм, в том числе на репродуктивную систему самцов, их анализ представляет значительный интерес. Однако чувствительность органов мужской репродуктивной системы к действию ЭМИ носит избирательный характер, что обусловлено особенностями их функционирования. Наиболее высокая поражаемость характерна для процесса воспроизводства клеточных популяций сперматогенных клеток, эндокринной регуляции функции семенников, некоторых свойств эпидидимальных сперматозоидов (подвижность, жизнеспособность, целостность структуры ДНК, акросомная реакция и др.), что отражается на их оплодотворяющей способности. Для лучшего понимания изменений, происходящих в репродуктивной системе самцов млекопитающих, включая человека, вызванных электромагнитным воздействием в диапазоне мобильной связи и при 2450 МГц, следует рассмотреть ее строение, функцию и регуляцию.

Глава 2

Мужская репродуктивная система млекопитающих: структура, функция, регуляция, методы анализа

Репродуктивная система самцов млекопитающих, в том числе и человека, – это совокупность органов, предназначенных для воспроизводства (размножения) себе подобных особей. У большинства млекопитающих репродуктивная система самцов имеет сходный план строения, а продукция семенников (яичек) – основного органа репродуктивной системы самцов – зрелые половые клетки или сперматозоиды (спермии) близки по строению и свойствам. В процессе эволюции эти органы развивались из частей мочевыделительной системы или в тесной связи с ними, поэтому эти системы являются близко связанными и часто носят объединенное название – мочеполовая система. По расположению половых органов они подразделяются на внутренние и наружные. Внутренние органы самцов млекопитающих предназначены для образования и выведения специальных половых клеток – сперматозоидов. Наружные половые органы являются органами совокупления. Основным органом мужской репродуктивной системы являются парные половые железы – семенники (или яички) с придатками (эпидидимисами). Особенностью функционирования семенников является сочетание внешних (генеративных) и внутрисекреторных (выработка половых стероидных гормонов) функций, которые во взаимодействии с гипоталамо-гипофизарной системой регулируют развитие и функционирование мужской репродуктивной системы в целом. Строение внутренних органов мужской репродуктивной системы, к числу которых кроме семенника с придатками относятся семявыносящие протоки, семенные пузырьки, предстательная железа (простата), бульбоуретральные (куперовы) железы, на современном уровне подробно рассматривается в ряде монографий и учебников, изданных в последние годы [72–76].

2.1. Строение, развитие и функция мужской репродуктивной системы млекопитающих

Мужская репродуктивная (половая) система млекопитающих представляет собой совокупность органов системы размножения у самцов. Половые органы самцов, в том числе мужчин, разделяют на внутренние и наружные. К наружным половым органам относятся мошонка и половой член. Внутренние органы мужской репродуктивной системы можно условно разделить на три группы:

- 1) семенники, или яички с придатками (эпидидимисами);
- 2) семявыносящие протоки;
- 3) добавочные железы: семенные пузырьки, предстательная железа (простата), бульбоуретральные (куперовы) железы.

Семенники (яички) – парная мужская половая железа – основной орган репродуктивной (половой) системы самца. В онтогенезе семенники закладываются на вентро-медиальной поверхности первичной почки в поясничной области брюшной полости. У большинства млекопитающих в процессе развития семенники опускаются в паховую область и отсюда через паховое кольцо – в семенниковый мешок (мошонку). Семенник подвешен на семенниковом канатике и сращен с придатком семенника [77]. Особенность функционирования семенника – температура в полости мошонки, которая ниже, чем температура тела, на 2–3 °С, что создает более благоприятные условия для сперматогенеза и переживаемости спермиев.

Семенник имеет яйцевидную форму. У человека яички имеют длину 4–5 см, ширину 2,5–3,5 см и весят 20–30 г. У половозрелых крыс масса семенников колеблется в пределах 1,5–2,0 г. Это парная дольчатая паренхиматозная трубчатая железа с экзо-и эндокринной функциями, в которой одновременно осуществляется и сперматогенез, т. е. выработка сперматозоидов, и происходит образование половых стероидных гормонов, главным образом – тестостерона, регулирующего дифференцировку пола, проявление половых признаков самца и стимулирующего развитие половых рефлексов. Семенники или яички – основное место образования простагландинов, влияющих на сократительную способность гладкой мускулатуры половых путей и повышение подвижности сперматозоидов [72–76].

Снаружи семенники покрыты брюшиной. Под ней располагается белочная оболочка, образованная из плотной соединительной ткани. Белочная оболочка, продолжаясь в ткань яичка, формирует средостение яичка – неполную вертикальную перегородку и лучеобразные перегородки, расходящиеся из средостения как из центра. Эти перегородки делят яичко примерно на 250 долек (рис. 2.1).

В каждой дольке находится 1–4 извитых семенных канальца – длинные, сильно извитые трубчатые образования, выстланные эпителием и образующие паренхиму яичка (рис. 2.2). Семенные канальцы имеют цилиндрическую форму, диаметр которых составляет от 120 до 140 мкм. В них происходит сперматогенез – образование сперматозоидов из стволовых сперматогенных клеток. Каждое яичко содержит порядка тысячи извитых семенных канальцев. На своем протяжении семенные канальцы многократно складываются (отчего и называются извитыми). Общая длина семенных канальцев очень велика. В яичке человека количество извитых семенных канальцев – 300–450, в вытянутом состоянии длина одного канальца – 30–70 см, а общая протяженность всех семенных канальцев в обоих яичках достигает 400–500 м. Длина семенных канальцев семенников многих животных не менее значительна, например, у взрослого кабана она составляет более 3000 м.

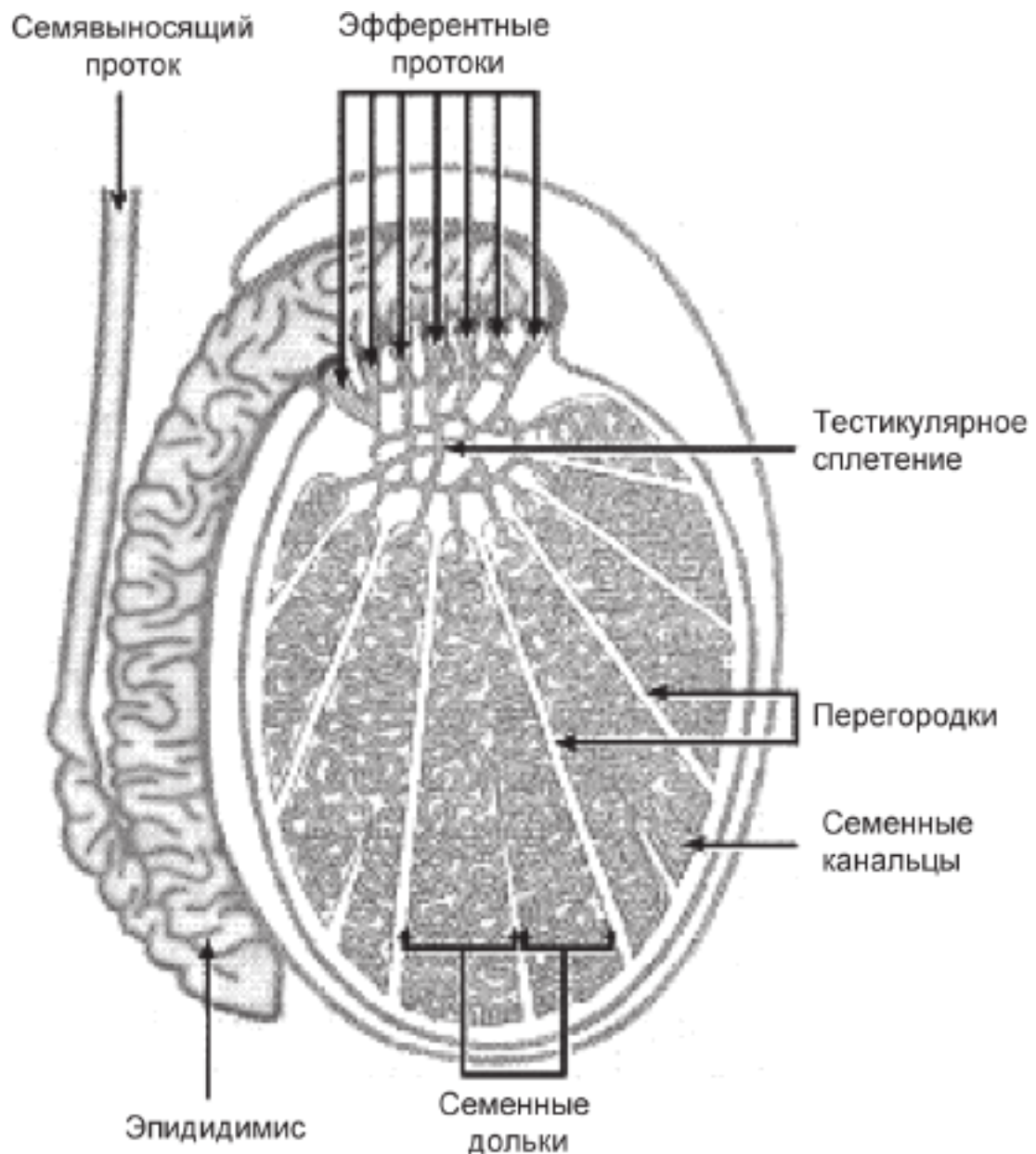


Рис. 2.1. Яичко и эпидидимис

Каждый извитой каналец семенника покрыт соединительнотканной оболочкой. Внутреннюю выстилку семенных канальцев, обращенную к просвету канальца и составляющую основную часть толщины стенки, образует эпителиосперматогенный слой (или так называемый сперматогенный эпителий), расположенный на базальной мембране. В нем содержатся две основные популяции клеток: сперматогенные клетки, находящиеся на различных стадиях дифференцировки (стволовые клетки, сперматогонии, сперматоциты 1-го и 2-го порядка, сперматиды и сперматозоиды), и поддерживающие клетки – клетки Сертоли, или сустентоциты, в которых вырабатываются полипептиды – ингибин и активин. Клетки Сертоли также синтезируют многие другие вещества, в том числе транспортные белки – андрогенсвязывающий белок (АСБ), трансферрин, кальмомодулин, тестикулярный альбумин, эстрогены, интерлейкины. Клетки Сертоли в постэмбриональном периоде не способны к делению, с чем, вероятно, связана их устойчивость к неблагоприятным воздействиям.



Рис. 2.2. Строение сперматогенного эпителия

По первичной структуре АСБ идентичен глобулину, связывающему половые гормоны, но отличается от него углеводными остатками. Кроме того, глобулин, связывающий половые гормоны, образуется преимущественно в печени и выбрасывается в кровь, а АСБ поступает из клеток Сертоли непосредственно в половые клетки и в просвет извитых семенных канальцев, что сопровождается переносом тестостерона (в высокой концентрации) из клеток Лейдига, где он образуется, к месту, в котором происходит сперматогенез. Концентрация АСБ максимальна в головке придатка яичка. Функции АСБ: трансмембранный и внутриклеточный транспорт андрогенов в половых клетках; стимуляция созревания сперматоцитов 2-го порядка; депонирование андрогенов в извитых семенных канальцах; транспорт андрогенов из извитых семенных канальцев в сеть яичка и придаток яичка.

Между петлями извитых канальцев находится рыхлая соединительная ткань – интерстиций, в которой, вблизи капилляров, расположены интерстициальные клетки – клетки Лейдига (гланулоциты), продуцирующие мужские половые стероидные гормоны (тестостерон, дигидротестостерон и андростендион), а также эстрогены (80 % эстрогенов, вырабатываемых в мужском организме). Помимо половых стероидных гормонов клетки Лейдига синтезируют нейропептиды, β -эндорфин, метэнкефалин, которые обладают паракринным действием на клетки Сертоли и сперматогенные клетки [74]. Клетки Лейдига синтезируют также интерлейкин-1 и окситоцин, который вызывает сокращение семенных канальцев.

Извитые семенные канальцы, приближаясь к средостению, сливаются и становятся прямыми. Прямые канальцы переходят в сеть канальцев, находящуюся в средостении. От нее берут начало выносящие протоки (канальцы), которые переходят в придаток яичка. Выносящие протоки вместе с прямыми канальцами и сетью канальцев средостения яичка образуют часть отводящих путей мужской половой железы.

Придатки яичек (эпидидимисы) служат для проведения, созревания и накопления сперматозоидов. Они состоят из головки, тела и хвоста и являются андрогензависимыми секреторно-активными органами. Головка образована 12–15 выносящими канальцами, которые сливаются в проток придатка. Придатки яичек прилегают к верхней поверхности яичек. В канале придатка спермии накапливаются в больших количествах (например, у быка 20–40 млрд). Здесь они претерпевают дальнейшие морфофункциональные изменения («дозревают») в течение 8–20 дней. В кислой бескислородной среде канала придатка спермии впадают в состояние, подобное анабиозу, приобретают уплотненную липопротеидную оболочку и отрицательный заряд, что предохраняет их от действия кислых продуктов и от агглютинации в половых путях самки. В придатке изменяются также антигенные свойства поверхности спермиев. Оплодотворяющую способность спермии сохраняют в придатках семенника до 2–3 мес. Достигшие каудального отдела придатка спермии обладают высокой оплодотворяющей способностью и могут высвободиться при эякуляции из каудальной части («хвоста») придатка семенника. Находящиеся в придатке яичка спермиофаги играют важную роль в утилизации старых и нежизнеспособных форм сперматозоидов. Маркер функции придатка яичек – содержание гиалуронидазы в сперме.

Семявыносящие протоки являются продолжением протоков придатков: они начинаются от нижнего конца (хвоста) придатков, затем идут вверх и через паховый канал – в брюшную полость, здесь достигают мочевого пузыря и впадают в верхнюю (предстательную) часть мочеиспускательного канала.

Сперматозоиды, закончившие формирование, попадают в систему семявыводящих путей. Внутри семенника – это прямые канальцы, сеть семенника и выносящие канальцы семенника, выстланные однослойным плоским эпителием; вне семенника – канал придатка и семявыводящий проток.

Добавочные железы включают семенные пузырьки, бульбоуретральные железы и предстательную железу (простату). Все добавочные железы вырабатывают специфические секреты, основное предназначение которых заключается в химической нейтрализации кислой реакции мочи выделяемым ими щелочным секретом (слизью) и в дальнейшем благоприятном прохождении по каналу и выживаемости сперматозоидов.

Семенные пузырьки – парные добавочные железы репродуктивной системы самцов. Они располагаются за мочевым пузырем, возле его дна, имеют вид сильно изогнутой трубки с резко суженным концом. Последний сливается с конечной частью семявыносящего протока; после этого единый проток вступает в толщу простаты, где открывается в мочеиспускательный канал. Семенные пузырьки секретируют жидкость, разбавляющую сперму, в которой содержится фруктоза, являющаяся источником питания сперматозоидов. Уровень фруктозы является маркером функции семенных пузырьков и андрологическим эквивалентом андрогенной насыщенности мужского организма. Нормальное содержание фруктозы в сперме человека составляет 10–60 ммоль/л. Снижение содержания фруктозы в сперме приводит к астенозооспермии (снижение подвижности сперматозоидов) и бесплодию. Эпителий семенных пузырьков образует простагландины, которые относятся к «местным», или клеточным, гормонам, азотистые вещества, белки, инозит, аскорбиновую кислоту и др. Секрет пузырьков имеет слабощелочную реакцию, pH которого 7,3, составляет до 50–60 % жидкой части спермы, смешиваясь с секретом яичек, играет роль защитного коллоида, придавая сперматозоидам большую сопротивляемость и устойчивость.

Предстательная железа (простата) – непарный орган, который находится сразу под дном мочевого пузыря, окружая начальную часть мочеиспускательного канала – ту, в которую открываются семявыносящие протоки и семенные пузырьки. Простата является одновременно и железистым, и мышечным органом, т. е. представляет собой совокупность отдельных 30–50 простатических железок трубчато-альвеолярного строения, окруженных

мышечной и соединительно-тканной стромой. Как экзокринная железа простата продуцирует секрет, поставляющий 30–40 % жидкой части спермы; в ней также синтезируются простагландины, простатический специфический антиген (ПСА), фибринолизин и фиброгеназа, необходимые для разжижения эякулята, в ней происходит также синтез лимонной кислоты, цинка, кислой и щелочной фосфатазы. В секрете предстательной железы содержится значительное содержание спермина, который придает эякуляту специфический запах. В предстательной железе происходит метаболизм тестостерона, который под действием 5 α -редуктазы превращается в 5 α -дигидротестостерон. Мышечные элементы простаты во время эякуляции выбрасывают секрет из железок и образуют произвольный сфинктер мочеиспускательного канала. Уровни цинка и цитрата в сперме являются маркерами состояния простаты.

Бульбоуретральные (куперовы) железы – это две небольшие железки (у человека величиной с горошину) в толще мочеполовой диафрагмы. Концевые отделы – альвеолярно-трубчатого типа. Протоки открываются в мочеиспускательный канал. Куперовы железы секретируют слизистую (и потому вязкую) жидкость (секрет), имеющую щелочную реакцию, защищающую стенки мочеиспускательного канала от раздражения мочой и спермой. В ней содержатся сиалопротеиды и аминоксахара, которые, очевидно, участвуют в кондиционировании и трофике сперматозоидов, а также служат для смазки уретры перед эякуляцией.

2.2. Сперматогенез

Образование мужских половых клеток (сперматогенез) протекает в извитых семенных канальцах и включает 4 последовательные стадии или фазы: размножение, рост, созревание и формирование. Продолжительность сперматогенеза у человека примерно 75 дней, у мыши – 35, у крысы – 50, кролика – 41, собаки – 56, у петуха – 25 дней.

Сперматогенез у половозрелого организма – это продолжение общего процесса, который начинается еще на самых ранних стадиях эмбриогенеза. В этом процессе можно выделить три стадии.

Первая стадия гоноцитов (первичных половых клеток). Развитие первичных половых клеток идет в сторону мужских половых клеток. После этого клетки, которые теперь называются пресперматогонии, вступают в длительный период покоя. В возрасте 7–8 лет у мальчиков пресперматогонии начинают интенсивно делиться, что приводит к образованию большого количества изолированных сперматогоний. В отличие от последующих сперматогенных клеток изолированные сперматогонии не связаны друг с другом цитоплазматическими мостиками.

Изолированные сперматогонии вновь вступают на несколько лет в период покоя до достижения половозрелости.

Начальной фазой сперматогенеза является размножение сперматогоний, которые занимают наиболее периферическое (базальное) положение в сперматогенном эпителии (рис. 2.3). Деление сперматогоний у самцов совершается непрерывно в течение всей репродуктивной жизни [78]. Согласно современным представлениям, среди сперматогоний можно выделить два типа клеток: 1) стволовые сперматогонии типа А, которые подразделяются на две субпопуляции: долгоживущие, резервные стволовые клетки и быстро обновляющиеся полустволовые клетки, которые делятся один раз в течение цикла сперматогенного эпителия, 2) дифференцирующиеся сперматогонии типа А и типа В.

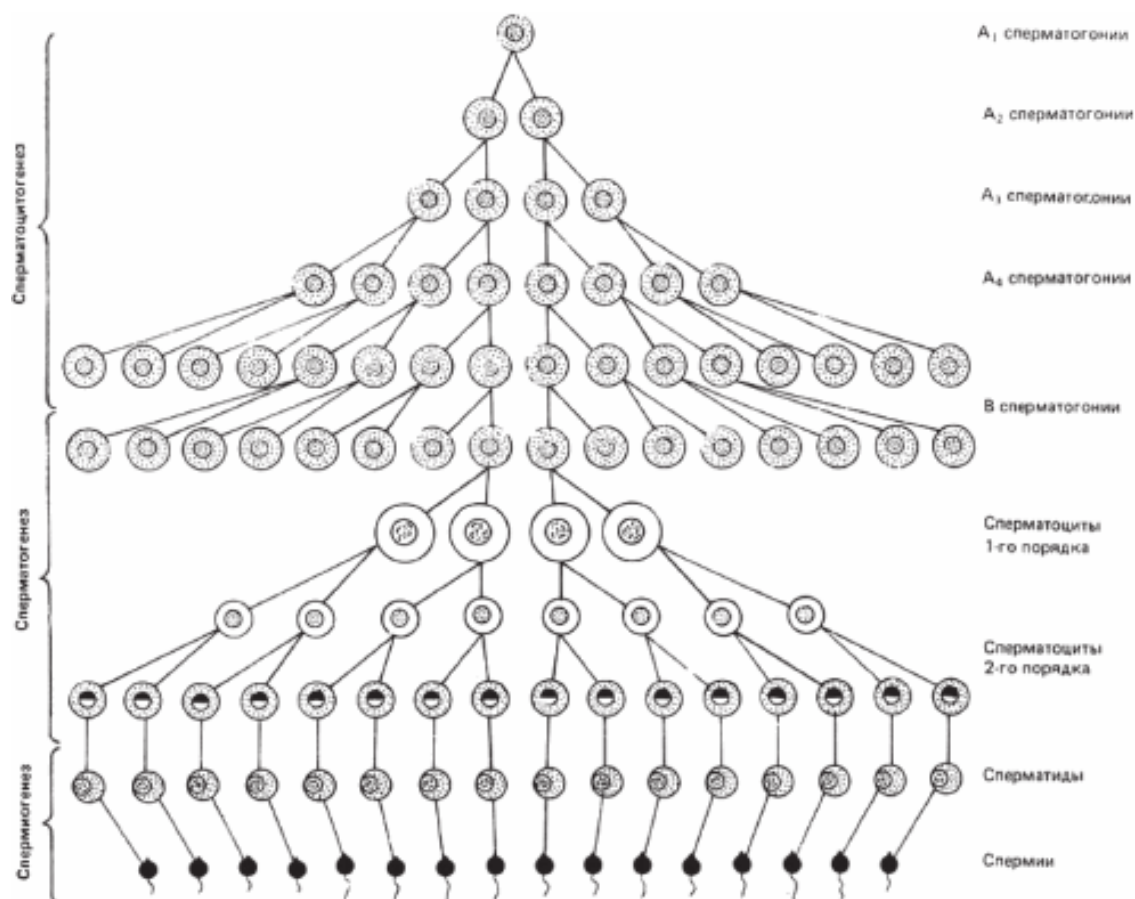


Рис. 2.3. Схема сперматогенеза [74]

Стволовые клетки расположены в базальной части канальца изолированно от других сперматогоний. Морфологически в популяции стволовых А-сперматогоний различают светлые и темные клетки. Для обеих клеток характерно преобладание в ядрах деконденсированного хроматина и расположение ядрышек около ядерной оболочки. Однако в темных клетках типа А степень конденсации хроматина большая, чем в светлых клетках. Темные клетки относят к «резервным» медленно обновляющимся стволовым клеткам, а светлые – к полустволовым быстро обновляющимся клеткам. Для стволовых клеток характерно наличие овальных ядер с диффузно распределенным хроматином, одного или двух ядрышек, большое содержание в цитоплазме рибосом и полисом, малое количество других органелл.

Часть стволовых клеток типа А при делении не завершают цитокинез и остаются соединенными цитоплазматическими мостиками, т. е. образуют синцитий. Появление таких спаренных сперматогоний свидетельствует о начале процессов дифференцировки мужских половых клеток. Дальнейшее деление таких клеток приводит к образованию цепочек или групп сперматогоний, соединенных цитоплазматическими мостиками. Клетки типа В имеют более крупные ядра, хроматин в них не дисперсный, а собран в глыбки.

В следующий период (период роста) сперматогонии перестают делиться митозом, увеличиваются в объеме и вступают в первое деление мейоза. Это начало их дифференцировки в сперматоциты 1-го порядка, и начало уже третьего периода – периода созревания. Синцитиальные группы сперматогоний начинают перемещаться в адлюминальную зону сперматогенного эпителия.

В I клеточном цикле мейоза происходит ряд событий, которые его значительно отличают от обычного клеточного цикла. После вступления в I цикл созревания сперматоциты 1-го порядка синтезируют ДНК, ее количество удваивается, так же как удваивается за счет

репликации количества хромосом. Следовательно, после S-периода эти клетки нужно считать тетраплоидными. После короткого G₂-периода наступает профазы первого мейотического деления, которая резко отличается от обычной митотической профазы. В течение профазы первого деления происходят специальная перестройка и аранжировка хромосом в ядрах созревающих половых клеток. В связи с этим принято профазу первого мейотического деления подразделять на пять стадий: каждая из которых имеет свои характерные особенности:

лептотена – стадия тонких нитей – хромосомы несколько конденсируются до состояния тонких нитей;

зиготена – стадия сливающихся нитей – гомологичные хромосомы объединяются, конъюгируют друг с другом;

пахитена – стадия толстых нитей – между хромосомами выявляются синаптонемальные комплексы, после этого хромосомы, видимо, частично деконденсируются. И в таком состоянии они обмениваются гомологичными участками (кроссинговер);

возможно, подвергаются суперрепарации, восстанавливают активный синтез рибонуклеиновой кислоты (РНК), что ведет к значительному увеличению объема ядер и клетки;

диплотена – стадия двойных нитей – хромосомы начинают расходиться и между ними выявляются хиазмы – перекресты в местах происшедшего кроссинговера;

диакинез – стадия расхождения (обособления) двойных нитей – расхождение хромосом завершается, хиазмы исчезают.

Затем следует метафаза первого деления и последующие фазы деления клетки, наступает следующий, II цикл, в конечном счете приводящий к появлению зрелых половых клеток.

Из всех стадий профазы мейоза быстро дифференцирующихся мужских половых клеток человека и животных самой длительной является пахитена, в ряде случаев она занимает до 50 % времени. Так, у человека при спермиогенезе стадия лептотены с зиготеной занимают 6,5 сут, пахитена – 15 сут, диплотена и диакинез – 0,8 сут.

После завершения профазы первого мейотического деления следует метафаза первого деления и последующие фазы деления клетки – анафаза и телофаза.

Особенность первого мейотического деления заключается в том, что в анафазе полюсам расходятся не идентичные хромосомы, а гомологичные двуххроматидные хромосомы. Поэтому каждый сперматоцит 2-го порядка получает не по 46 однохроматидных хромосом, а по 23 двуххроматидные хромосомы [76].

Вслед за телофазой первого деления следует короткая интерфаза, в которой не происходит синтеза ДНК и клетки приступают к следующему делению, почти сразу после окончания первого. Поэтому на препаратах сперматоциты 2-го порядка почти не встречаются, время их жизни очень мало. Второе деление мейоза по морфологии и последовательности не отличается от митотического деления: парные сестринские хроматиды, связанные в центромерных участках, проходят профазу и метафазу; в анафазе они разъединяются и расходятся по одной в дочерние клетки. Таким образом, при втором мейотическом делении клетка с 2с количеством ДНК и 2n числом хроматид, делясь, дает начало двум клеткам с гаплоидным содержанием ДНК и хромосом. В отношении числа структурных единиц, хроматид, второе деление является редукционным. В результате всего процесса мейоза после двух делений из одной клетки образуется четыре гаплоидных сперматозоида, каждый из которых отличается по своей генетической конституции [76, 79].

В первом делении мейоза в клетках происходит конъюгация гомологичных хромосом и кроссинговер. В каждой из двух дочерних клеток – сперматоцитов 2-го порядка содержится гаплоидное число хромосом (например, у человека 23).

Второе деление созревания начинается сразу вслед за первым и происходит как обычный митоз без редупликации хромосом. В анафазе второго деления созревания диады сперматочитов 2-го порядка разъединяются на монады, или одиночные хроматиды, расходящиеся к полюсам. В результате сперматиды получают столько же монад, сколько было диад в ядрах сперматочитов 2-го порядка, т. е. гаплоидное число. Сперматочиты 2-го порядка имеют меньшие размеры, чем сперматочиты 1-го порядка, и располагаются в средних и более поверхностных слоях эпителиосперматогенного слоя.

Таким образом, каждая исходная сперматогония дает начало 4 сперматидам с гаплоидным набором хромосом. Сперматиды больше не делятся, но путем сложной перестройки превращаются в зрелые сперматозоиды. Эта трансформация составляет четвертую фазу сперматогенеза – период формирования, или спермиогенеза.

Сперматиды представляют собой небольшие округлые клетки со сравнительно крупными ядрами. Скапливаясь около верхушек поддерживающих клеток, сперматиды частично погружаются в их цитоплазму, что создает условия для формирования сперматозоидов из сперматид. Различают сперматиды продолговатые, округлые, удлинённые. Происходит это путем постепенного вытяжения клетки, изменения, удлинения ее формы, в результате чего клеточное ядро сперматиды образует головку сперматозоида, а оболочка и цитоплазма – шейку и хвост. В последней фазе развития головки сперматозоидов тесно примыкают к клеткам Сертоли, получая от них питание до полного созревания. В процессе созревания сперматиды сильно уплотняются благодаря замене гистонов на еще более основные белки – протамины, содержащие аргинин.

В сперматиде около ядра располагаются аппарат Гольджи, центросома и скапливаются мелкие митохондрии. Процесс формирования сперматозоида начинается с образования в зоне аппарата Гольджи уплотненной гранулы – акробласта, прилежащего к поверхности ядра. В дальнейшем акробласт, увеличиваясь в размерах, в виде шапочки охватывает ядро, а в середине акробласта дифференцируется уплотненное тельце. Такую структуру называют акросомой. Она лежит в том конце трансформирующей сперматиды, который обращен к поддерживающей клетке. Центросома, состоящая из двух центриол, перемещается в противоположный конец сперматиды. Проксимальная центриоль прилегает к поверхности ядра, а дистальная разделяется на две части. От передней части дистальной центриоли начинает формироваться жгутик (flagellum), который затем становится осевой нитью развивающегося сперматозоида. Задняя же половина дистальной центриоли принимает вид колечка. Смещаясь вдоль жгутика, это колечко определяет заднюю границу средней или связывающей части сперматозоида. Цитоплазма по мере роста хвоста сползает с ядра и сосредоточивается в связывающей части. Митохондрии располагаются спиралеобразно между проксимальной центриолей и колечком.

Цитоплазма сперматиды во время ее превращения в спермий сильно редуцируется. В области головки она сохраняется только в виде тонкого слоя, покрывающего акросому; небольшое количество цитоплазмы остается в области связывающего отдела, и, наконец, она очень тонким слоем покрывает жгутик. Часть цитоплазмы сбрасывается и распадается в просвете семенного канальца либо поглощается поддерживающими клетками. Кроме того, эти клетки вырабатывают жидкость, накапливающуюся в просвете извитого семенного канальца. В эту жидкость попадают, высвобождаясь из верхушек поддерживающих клеток, сформировавшиеся сперматозоиды и вместе с ней уходят в дистальные части канальца.

После этого сперматозоиды теряют связь со стенкой канальца, уже зрелые, попадают в просвет канальца яичка и далее в придаток, где происходит их накопление, созревание в течение 1–3 недель и выведение из организма во время семяизвержения.

Сперматозоид – высокоспециализированная и высокоорганизованная клетка, которая не способна развиваться. Ее главное назначение – транспортировка наследственного матери-

ала к яйцеклетке. В сперматозоиде очень малое количество цитоплазмы, поэтому у нее высокое ядерно-цитоплазматическое отношение. Размеры зрелой половой клетки колеблются: у человека ~ 60 мкм, у быка ~ 65 мкм, у морской свинки ~ 100 мкм.

Сперматозоид человека и млекопитающих состоит из трех основных анатомических составляющих: головки, средней части, или шейки, и жгутика (рис. 2.4). Весь сперматозоид окружен плазматической мембраной. Головка содержит хроматин, плотно упакованный с помощью протаминов, которые замещают гистоны во время сперматогенеза. В норме по завершению сперматогенеза протамины (у человека) составляют не менее 85 % белков нуклеосом [80]. Плотная упаковка необходима для более компактной формы клетки и, как следствие, уменьшения энергетических затрат на продвижение сперматозоидов по половому тракту. Головка сперматозоида имеет акросому – мембранный «мешочек» с протеолитическими ферментами, такими, как гиалуронидаза, нейраминадаза, кислая фосфатаза, протеаза, необходимыми для проникновения через оболочки ооцита в процессе оплодотворения. Таким образом, акросома представляет собой специализированный тип лизосомы. Нарушение акросомы до момента связывания с оболочкой ооцита приводит к неспособности сперматозоида проникнуть в лучистый венец и прозрачную оболочку структур, которые окружают ооцит, и соответственно оплодотворить его. Под акросомой расположена постакрсомальная пластинка, которая является точкой инициации слияния мембран ооцита и сперматозоида. Ядро сперматозоида, содержащее гаплоидный набор хромосом, «лежит» на так называемой базальной пластинке у основания головки – место соединения головки шейки.



Рис. 2.4. Строение сперматозоидов млекопитающих (схема)

Шейка содержит проксимальную центриоль, которая расположена ниже базальной пластинки и организована микротрубочками, формирующими кольцо, внутри которого расположен плотный материал. Проксимальная центриоль сперматозоида и плотный перичентриольный материал формируют структуру – центросому. В шейке сперматозоида находятся митохондрии, спиралевидно расположенные вокруг аксонемы, они обеспечивают

энергией, необходимой для движения жгутика. Нарушения в митохондриальной спирали может вести к неспособности сперматозоида двигаться и оплодотворять ооцит. Источником энергии для сперматозоида является фруктоза, которая секретируется семенными пузырьками. Нормальное содержание фруктозы в сперме здорового человека 13–15 ммоль/л [74, 80].

Жгутик, имеющий плотное строение, обеспечивает подвижность сперматозоидов. Морфологическая основа жгутика – аксонема, построенная из микротрубочек.

Конец ознакомительного фрагмента.

Текст предоставлен ООО «ЛитРес».

Прочитайте эту книгу целиком, [купив полную легальную версию](#) на ЛитРес.

Безопасно оплатить книгу можно банковской картой Visa, MasterCard, Maestro, со счета мобильного телефона, с платежного терминала, в салоне МТС или Связной, через PayPal, WebMoney, Яндекс.Деньги, QIWI Кошелек, бонусными картами или другим удобным Вам способом.