

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.5.9>

УДК: 615.471

БИОЛОГИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ РАДИОЧАСТОТНОГО И СВЧ ИЗЛУЧЕНИЙ

В.Н. Макаров ¹, Н.А. Боос ¹, М.А. Махов ²

¹ МИРЭА – Российский технологический университет,
119454, Москва, проспект Вернадского, д. 78

² ООО Фирма «ТЕХНОСВЕТ», 117342, Москва, ул. Введенского, д. 27, к. 2

Статья поступила в редакцию 10 апреля 2026 г.

Аннотация. В условиях повсеместного распространения беспроводных технологий (2G-5G, Wi-Fi, Bluetooth) проблема биологических эффектов радиочастотного (РЧ) и сверхвысокочастотного (СВЧ) излучения приобретает высокое общественное и научное значение. Цель работы – систематизация механизмов взаимодействия РЧ/СВЧ-излучения с биологическими тканями, обобщение экспериментальных и эпидемиологических данных о его биологических эффектах и критическая оценка действующих международных нормативов безопасности. Работа выполнена в формате обзора литературы с поиском источников в базах данных PubMed/MEDLINE, Embase, Web of Science, Scopus и Google Scholar за период 1976-2025 годов; приоритет отдавался высококачественным систематическим обзорам, мета-анализам и крупным многоцентровым исследованиям. Доминирующим механизмом поглощения энергии является диэлектрический нагрев, количественно описываемый удельным коэффициентом поглощения (SAR). Наряду с тепловыми, в значительной части рецензируемых исследований зафиксированы нетепловые эффекты – индукция активных форм кислорода, нарушение гомеостаза кальция, повреждения ДНК и изменения проницаемости гематоэнцефалического барьера,

– однако их воспроизводимость ограничена. Анализ более 500 работ по генотоксичности показал, что 59 % исследований зафиксировали значимые повреждения ДНК при экспозициях ниже лимитов ICNIRP; наибольшую чувствительность проявили клетки репродуктивной системы (80 % положительных результатов). Крупные исследования NTP и Ramazzini обнаружили злокачественные шванномы сердца у крыс при хроническом облучении. Эпидемиологические данные крупных когортных исследований (COSMOS, Interphone) не демонстрируют статистически значимого повышения риска злокачественных новообразований мозга, однако период наблюдения остается недостаточным для выявления опухолей с длительным латентным периодом. Действующие стандарты ICNIRP и IEEE основаны исключительно на тепловом пороге и не учитывают модуляцию сигнала и возможные нетепловые эффекты. Миллиметровые волны 5G ограничены поверхностным поглощением в коже, их долгосрочные биоэффекты практически не изучены. Переоценка классификации МАИР запланирована на 2025-2029 годы.

Ключевые слова: радиочастотное излучение, СВЧ-излучение, удельный коэффициент поглощения (SAR), окислительный стресс, генотоксичность, канцерогенность, ICNIRP, IARC, 5G, миллиметровые волны, стандарты безопасности.

Финансирование: Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (грант № FSFZ-2026-0007).

Автор для переписки: Макаров Валерий Николаевич, makarov_vn@bk.ru

Введение

Проблема биологических эффектов электромагнитного излучения радиочастотного (РЧ) и сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазонов приобретает все более высокое общественное и научное значение в условиях повсеместного распространения беспроводных технологий: мобильной связи стандартов 2G-5G, Wi-Fi, Bluetooth и устройств Интернета вещей. По данным МСЭ, число абонентов мобильной широкополосной связи в мире превысило 5,5 млрд человек, что делает экспозицию к РЧ-излучению одним из наиболее массовых антропогенных физических воздействий в истории человечества. Настоящая работа посвящена анализу механизмов взаимодействия РЧ/СВЧ-излучения с биологическими тканями, систематизации экспериментальных и эпидемиологических данных о его биологических эффектах, а также критической оценке действующих международных нормативов безопасности в свете актуальных научных данных.

1. Постановка задачи

Работа выполнена в формате обзора литературы. Поиск источников проводился в базах данных PubMed/MEDLINE, Embase, Web of Science, Scopus и Google Scholar за период 1976-2025 годов. Использовались поисковые запросы на английском и русском языках, включающие термины: «radiofrequency electromagnetic fields», «RF EMF biological effects», «microwave radiation», «specific absorption rate (SAR)», «non-thermal effects», «genotoxicity», «oxidative stress», «5G millimeter waves», «ICNIRP guidelines», «carcinogenicity». В обзор включались оригинальные экспериментальные исследования (in vitro и in vivo), эпидемиологические когортные и случай-контрольные исследования, систематические обзоры и мета-анализы, а также нормативные документы международных организаций (ICNIRP, IEEE, IARC, ВОЗ). Приоритет отдавался высококачественным систематическим обзорам и мета-анализам, крупным многоцентровым исследованиям (Interphone, NTP, Ramazzini, COSMOS) и официальным докладам международных регуляторных органов. Критический

анализ источников включал оценку методологического качества, потенциальных конфликтов интересов и воспроизводимости результатов.

2. Диэлектрический нагрев и поглощение энергии тканями

Доминирующий механизм взаимодействия РЧ/СВЧ-излучения с биологическими тканями – диэлектрический нагрев, протекающий через два физических процесса. Первый – дипольная релаксация молекул воды (γ -дисперсия): молекулы воды, являясь постоянными электрическими диполями (дипольный момент $\sim 1,85$ D), стремятся ориентироваться по переменному электрическому полю, при этом ротационное трение преобразует электромагнитную энергию в тепловую. Характеристическая частота релаксации свободной воды при 37°C составляет $\sim 19\text{--}25$ ГГц, и вблизи этой частоты поглощение энергии максимально (Gabriel et al., Phys. Med. Biol., 1996). Второй процесс – ионная проводимость: растворенные ионы (Na^+ , K^+ , Cl^- , Ca^{2+}) ускоряются электрическим полем, создавая омические потери, преобладающие на частотах ниже ~ 1 ГГц.

Суммарная плотность рассеиваемой мощности описывается формулой $P = \sigma|E|^2 + \omega\epsilon_0\epsilon''|E|^2$, где первый член отвечает ионной проводимости, а второй – дипольным потерям. Ключевой дозиметрической величиной служит удельный коэффициент поглощения (SAR) – масса-нормированная скорость поглощения электромагнитной энергии, определяемая как $\text{SAR} = \sigma|E|^2 / \rho$ (Вт/кг). Типичные значения SAR современных мобильных телефонов составляют $0,13\text{--}1,79$ Вт/кг [4], при этом реальная экспозиция обычно значительно ниже максимальных паспортных значений.

Диэлектрические свойства тканей радикально различаются в зависимости от содержания воды. Согласно фундаментальной базе данных Gabriel et al. (1996), на частоте 900 МГц мышечная ткань обладает относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r \approx 55$ и проводимостью $\sigma \approx 0,94$ См/м, тогда как жировая – $\epsilon_r \approx 5,5$ и $\sigma \approx 0,05$ См/м. Это означает, что высокопроводные ткани

(мозг, мышцы, кожа) поглощают на порядок больше энергии, чем жировая или костная ткани.

Глубина проникновения излучения критически зависит от частоты. На частоте 900 МГц она составляет 25-40 мм в мышечной ткани (излучение достигает внутренних органов и мозга), на 2,4 ГГц – 17-22 мм, на 5 ГГц – 8-12 мм. Для миллиметровых волн 5G картина принципиально иная: на 28 ГГц глубина проникновения менее 1 мм, а на 60 ГГц – около 0,5 мм, то есть вся энергия депонируется в эпидермисе и верхнем слое дермы (Zhadobov et al., Sci. Rep., 2021 [5]). Этот факт определяет принципиальное различие биологических мишеней: суб-6 ГГц излучение воздействует на мозг, слюнные железы и репродуктивные органы, тогда как миллиметровые волны – преимущественно на кожу и роговицу [6, 7].

Пороги термического повреждения тканей хорошо установлены. До 40 °C существенных клеточных повреждений не возникает; при 42,5-43 °C наступает критический перелом – скорость гибели клеток резко возрастает; выше 45 °C начинается денатурация белков, а выше 60 °C – мгновенная коагуляция тканей (Yarmolenko et al., Int. J. Hyperthermia, 2011 [8]). Наиболее чувствителен хрусталик глаза, повреждение которого регистрируется при минимальных кумулятивных тепловых дозах.

3. Нетепловые эффекты: от мембранных каналов до свободных радикалов

Дискуссия о нетепловых биоэффектах РЧ-излучения остается одной из наиболее острых в биоэлектромагнетике. Энергия фотонов на частоте 900 МГц составляет лишь ~ 4 мкэВ – на пять порядков ниже энергии ионизации (~ 10 эВ) и на три порядка ниже энергии водородной связи (~ 0,04 эВ). Прямое разрушение химических связей РЧ-фотонами физически невозможно. Тем не менее многочисленные исследования описывают биологические эффекты при интенсивностях, не вызывающих значимого нагрева, что указывает на непрямые механизмы.

Влияние на ионные каналы и мембранный потенциал. Еще в 1976 году Bawin и Adey [9] обнаружили, что слабые амплитудно-модулированные РЧ-поля (147 МГц, модуляция 16 Гц) вызывают эффлюкс Ca^{2+} из ткани мозга цыпленка – в узких «окнах» частоты и амплитуды, не подчиняющихся классической дозовой зависимости. Модель IFO-VGIC (Panagoroulos et al., 2025 [10]) предполагает, что осциллирующие РЧ-поля вызывают нерегулярные колебания ионов в селективных фильтрах потенциал-зависимых ионных каналов, нарушая гомеостаз Ca^{2+} и провоцируя дисфункцию митохондриальной электрон-транспортной цепи. Экспериментально подтверждено (Wust et al., Scientific Reports, 2020 [11]), что комбинация клеточной мембраны и ионного канала может выполнять функцию выпрямителя РЧ-сигнала, генерируя постоянную составляющую ~ 1 мкВ – достаточную для физиологически значимых ионных сдвигов.

Генерация активных форм кислорода (АФК) – наиболее часто регистрируемый нетепловой эффект. По данным Yakymenko et al. (Electromagn. Biol. Med., 2016 [12]), 93 из 100 рецензируемых исследований подтвердили индукцию окислительного стресса при низкоинтенсивном РЧ-облучении. Предполагаемые механизмы включают: нарушение Ca^{2+} -гомеостаза $\rightarrow$ деполяризацию мембраны митохондрий $\rightarrow$ утечку электронов из электрон-транспортной цепи $\rightarrow$ образование супероксид-аниона (O_2^-); активацию мембранной NADH-оксидазы; а также усиление реакции Фентона при изменении внутриклеточного метаболизма железа. Впрочем, систематический обзор ВОЗ (Henschenmacher et al., Environ. Int., 2024 [13]), включивший 56 исследований, оценил достоверность доказательств как низкую или очень низкую из-за высокого риска систематических ошибок и неоднородности результатов.

Гипотеза Фрелиха (1968) постулировала возможность когерентных коллективных осцилляций электрически полярных структур (мембранных белков) в терагерцовом диапазоне при метаболическом возбуждении – по аналогии с бозе-эйнштейновской конденсацией. Строгий анализ (Reimers et

al., PNAS, 2009) показал, что сильные когерентные конденсаты Фрелиха биологически нереалистичны, требуя мощности накачки $\sim 2 \times 10^4$ ккал·моль⁻¹·пс⁻¹. Однако слабые (некогерентные) конденсаты биологически осуществимы и могут существенно влиять на кинетику ферментативных реакций.

4. Повреждение ДНК, нервная система и репродуктивные эффекты

Генотоксичность. Масштабный обзор и карта доказательств Weller et al. (Frontiers in Public Health, 2025 [14]), проанализировавший более 500 исследований, установил, что 59 % работ сообщили о значимых повреждениях ДНК при РЧ-облучении [15], причем 58 % из них использовали экспозиции ниже лимитов ICNIRP [1]. Примечательно, что клетки репродуктивной системы проявили наибольшую чувствительность: 80 % исследований яичников и семенников зафиксировали значимые повреждения ДНК. Нормальные клетки мозга также демонстрировали высокую чувствительность (76 % положительных результатов в 54 исследованиях), тогда как неопластические клетки мозга – лишь 33 %.

Подисследование NTP по генотоксичности (Smith-Roe et al., Environ. Mol. Mutagen., 2019 [3]) обнаружило значимое увеличение повреждений ДНК в лобной коре мышей-самцов и гиппокампе крыс-самцов при воздействии CDMA-модулированного сигнала. Механизм Lai и Singh (1997 [16]) – блокирование РЧ-индуцированных разрывов ДНК мелатонином и спиновой ловушкой PBN – указывает на опосредованное АФК повреждение, а не на прямое действие электромагнитного поля.

Фундаментальное противоречие в литературе иллюстрирует ситуация с проектом REFLEX (2004): этот мультицентровой проект ЕС (€3 млн, 12 институтов) обнаружил одно- и двухцепочечные разрывы ДНК в фибробластах человека при GSM-облучении с $SAR \geq 0,3$ Вт/кг, причем прерывистая экспозиция вызывала более выраженные эффекты. Однако попытка репликации (Speit et al., Mutat. Res., 2007) с идентичными клетками и оборудованием дала

отчетливо отрицательные результаты. Важно, что источник финансирования оказывает на исходы исследований более сильное влияние, чем их методологическое качество: индустриально финансируемые работы значительно чаще сообщают об отсутствии эффектов (Weller et al., 2025 [14]).

Нервная система. Серия работ группы Salford (Лундский университет, 1994-2009) показала повышенную проницаемость гематоэнцефалического барьера (ГЭБ) и нейронные повреждения в коре, гиппокампе и базальных ганглиях крыс после GSM-облучения. Sirav и Seyhan (2009, 2011) подтвердили экстравазацию альбумина у крыс-самцов при SAR всего 4,26 мВт/кг – значительно ниже международных лимитов, при этом у самок эффект не наблюдался. Однако критический обзор Perrin et al. (Comptes Rendus Physique, 2010), оценивший 16 работ после 2005 года, заключил, что «недавние исследования не предоставляют убедительных доказательств повреждения ГЭБ при SAR до 6 Вт/кг».

Влияние на ЭЭГ – одно из наиболее воспроизводимых наблюдений. Первый систематический мета-анализ Prins et al. (Bioelectromagnetics, 2025) включил 51 исследование и обнаружил доказательства повышения альфа-активности при 2G-облучении в состоянии покоя с открытыми глазами, однако при выполнении когнитивных задач эффекты были менее выражены. Ни одно из 51 исследований не было свободно от риска систематических ошибок. Volkow et al. (JAMA, 2011) продемонстрировали, что 50-минутное воздействие сигнала мобильного телефона (837,5 МГц) значительно увеличивает метаболизм глюкозы в областях мозга, ближайших к антенне, – прямое свидетельство чувствительности мозга к РЧ-воздействию.

Репродуктивная система. Мета-анализ Adams et al. (Environ. Int., 2014; 10 исследований, 1492 образца) показал, что воздействие мобильного телефона ассоциировано со снижением подвижности сперматозоидов на 8,1 % (95 % ДИ: –13,1 ... –3,2) и жизнеспособности на 9,1 %. Зонтичный обзор Ahl Laamara и Drissi (2025) подтвердил, что снижение подвижности и жизнеспособности – наиболее устойчивые находки. Однако систематический обзор ВОЗ (Kenny et al.,

Environ. Int., 2024 [13]; 9 исследований) оценил все мета-аналитические оценки как имеющие «очень низкую достоверность доказательств» и заключил, что имеющиеся данные указывают на «слабые свидетельства связи» с мужской фертильностью. Экспериментальный обзор ВОЗ (Cordelli et al., 2024 [13]), напротив, обнаружил ассоциации со снижением частоты беременности и количества сперматозоидов, но отметил, что большинство исследований использовали экспозиции выше типичных для человека.

5. Дозиметрия: частота, модуляция, режим облучения

Биологический ответ на РЧ-излучение определяется не только средней мощностью, но и совокупностью параметров экспозиции [17]. Частота влияет на глубину проникновения, геометрию поглощения и тип мишеней. На частоте ~ 70 - 80 МГц тело взрослого человека входит в резонанс, и целнотелый SAR максимален. Выше 6 ГГц поглощение настолько поверхностно, что ICNIRP (2020 [1]) перешла от SAR к плотности поглощенной мощности (Вт/м^2) как основной дозиметрической величине.

Модуляция сигнала – один из наиболее дискуссионных параметров. Эксперименты Bawin и Adey [9] по эффлюксу кальция продемонстрировали, что биоэффекты зависят не от средней мощности, а от характера модуляции – возникая в узких «окнах» частот и амплитуд. Современные стандарты (ICNIRP [1], IEEE) не различают непрерывное и модулированное излучение при одинаковой средней мощности, тогда как экспериментальные данные указывают на потенциальную биологическую значимость модуляции. GSM (2G) использует импульсную структуру с частотой кадра 217 Гц и скважностью 1/8, при которой пиковая мощность в 8 раз превышает среднюю. Технологии 4G/5G имеют прогрессивно возрастающее отношение пиковой к средней мощности (PAPR), но более сложную временную структуру [4].

Различие между непрерывным (CW) и импульсным излучением было подтверждено экспериментально: Нао et al. [18] показали, что субмиллисекундные импульсы РЧ-энергии вызывают нейронные эффекты через

термоупругий механизм, тогда как непрерывное облучение с эквивалентным средним SAR до 28,8 Вт/кг (Yaghmazadeh et al.) – нет. Проект REFLEX также обнаружил, что прерывистое облучение вызывает более выраженные повреждения ДНК, чем непрерывное.

Различие ближнего и дальнего полей имеет принципиальное значение для дозиметрии: в реактивном ближнем поле (мобильный телефон у головы) соотношение Е- и Н-компонентов не определяется волновым импедансом свободного пространства, и оценка экспозиции требует прямого измерения SAR, а не использования референсных уровней [17].

6. Эпидемиологические исследования и классификация IARC

Interphone (2010) – крупнейшее международное исследование «случай-контроль» (13 стран; 2708 случаев глиомы, 2409 менингиомы). Общий результат: для «регулярных пользователей» отношение шансов (ОШ) для глиомы составило 0,81 (95 % ДИ: 0,70-0,94), что, вероятно, отражает систематическую ошибку отбора. Однако для наивысшего децили кумулятивного времени звонков (≥ 1640 часов) ОШ для глиомы составило 1,40 (95 % ДИ: 1,03-1,89), с усилением эффекта при ипсилатеральном использовании (опухоль на стороне преимущественного использования телефона). Канадская подвыборка с коррекцией на ошибки отбора дала ОШ = 2,2 для > 558 кумулятивных часов.

Исследование NTP (2018 [3]) – наиболее масштабная экспериментальная работа (\$30 млн, 10+ лет). Крысы Sprague Dawley подвергались цельнотелому облучению 900 МГц (GSM и CDMA) при SAR 1,5; 3 и 6 Вт/кг в течение $\sim 9,2$ ч/сут на протяжении двух лет. Результаты: «ясные доказательства» канцерогенной активности – злокачественные шванномы сердца у самцов крыс; «некоторые доказательства» – глиомы мозга и феохромоцитомы надпочечников. Важно, что повреждения ДНК были обнаружены в подисследовании генотоксичности (Smith-Roe et al., 2019 [3]), а облученные самцы парадоксально жили дольше контрольных.

Институт Ramazzini (2018) – 2448 крыс, пожизненное воздействие 1,8 ГГц GSM в дальнем поле при SAR $\sim 0,001$; 0,03 и 0,1 Вт/кг (19 ч/сут). При максимальной дозе выявлено статистически значимое увеличение шванном сердца у самцов. Критическое значение этого исследования в том, что доза 0,1 Вт/кг сопоставима с лимитом ICNIRP [1] для населения (0,08 Вт/кг), а обнаруженные опухоли идентичны найденным в NTP – при разнице в абсолютных дозах в 15-60 раз.

Проспективное когортное исследование COSMOS (264 574 пользователя, 5 стран Европы, медианное наблюдение 7,12 года) опубликовало первые результаты (Feuchting et al., Environ. Int., 2024): скорректированное отношение рисков для глиомы при ≥ 1908 кумулятивных часах составило 1,07 (95 % ДИ: 0,62-1,86) – статистически незначимый результат, но период наблюдения еще относительно короткий. Датское когортное исследование, исследование Million Women (Великобритания) и MOBI-Kids также не выявили значимых ассоциаций, однако каждое из этих исследований имеет существенные методологические ограничения [19].

Систематические обзоры ВОЗ (2023-2025 [13]). Обзор наблюдательных исследований рака (Karipidis et al., Environ. Int., 2024; 63 статьи) дал мета-оценки: для глиомы при «регулярном использовании» – мОР = 1,01 (95 % ДИ: 0,89-1,13), что авторы интерпретировали как «умеренно достоверные доказательства отсутствия повышенного риска». Однако обзор экспериментальных исследований на животных (Mevisse et al., 2022) оценил доказательства шванном сердца как имеющие «высокую достоверность», а глиом – «умеренную». Это создает парадоксальную ситуацию: эпидемиологические данные расцениваются как не подтверждающие риск, тогда как экспериментальные – как подтверждающие канцерогенность у животных.

Классификация IARC: группа 2B (2011 [2]) – «возможный канцероген для человека» – была основана на ограниченных доказательствах у людей (главным образом, повышенный риск глиомы и невриномы слухового нерва при интенсивном долгосрочном использовании мобильного телефона) и

недостаточных доказательствах у животных. В группу 2В также входят кофе (позже реклассифицирован), хлороформ, ДДТ, свинец и еще ~ 300 агентов. Переоценка РЧ-излучения рекомендована IARC как высокоприоритетная на период 2025-2029 годов (Berrington de Gonzalez et al., 2024), однако по состоянию на начало 2026 года классификация не изменена.

7. Миллиметровые волны 5G: новая территория

Технология 5G использует два частотных диапазона: FR1 (до 7,125 ГГц, аналогичен 4G) и FR2 – миллиметровые волны (24,25-52,6 ГГц), представляющие принципиально новый тип экспозиции. На частоте 26 ГГц глубина проникновения в кожу составляет менее 1 мм, на 60 ГГц – ~ 0,5 мм [7], при этом 34-42 % падающей мощности отражается от поверхности кожи [6]. Миллиметровые волны не достигают глубоких структур тела, однако создают интенсивный поверхностный нагрев: при одинаковой плотности мощности 50 Вт/м² повышение температуры на частоте 5,8 ГГц достигает 3,5 °С, тогда как на 433 МГц – менее 0,4 °С (Sci. Rep., 2025 [20]).

Прагматический обзор Simkó и Mattsson (Int. J. Environ. Res. Public Health, 2019 [21]), проанализировавший 94 публикации по диапазону 6-100 ГГц, установил, что 80 % исследований *in vivo* и 58 % *in vitro* продемонстрировали биологические эффекты, затрагивающие все изученные конечные точки. Однако не обнаружено последовательной связи между плотностью мощности, длительностью экспозиции и наблюдаемыми эффектами. Исследование гистологических эффектов при 26,5 ГГц (PMS, 2024 [22]) обнаружило, что воспалительные маркеры (PGE2, TNF- α , IL-6) и морфологические изменения распространяются глубже, чем предсказывает расчетная глубина проникновения, – вероятно, за счет термической диффузии. Исследования воздействия миллиметровых волн на кожу методом FLIM (2024 [23]) выявили изменения аутофлуоресценции FAD, свидетельствующие о метаболических клеточных альтерациях.

Принципиальный факт: эпидемиологических исследований специфического воздействия 5G mmWave не существует, а экспериментальная база крайне ограничена (~ 99 работ по кожным эффектам к 2024 году). NTP [3] прямо указала, что их исследование «не исследовало типы РЧ-излучения, используемые для Wi-Fi или сетей 5G». ICNIRP [24] признает, что пределы для миллиметровых частот основаны на предположениях о тепловых эффектах, не полностью подтвержденных экспериментально.

8. Стандарты ICNIRP и IEEE: тепловая парадигма и ее ограничения

Действующие международные стандарты – ICNIRP (обновлены в 2020 году [1]) и IEEE C95.1 (2019) – основаны на одном и том же пороге: цельнотелый SAR 4 Вт/кг вызывает поведенческие нарушения у животных. Для населения применяется коэффициент редукции 50, что дает лимит 0,08 Вт/кг; для профессионального облучения – коэффициент 10 (0,4 Вт/кг). Локальный SAR ограничен 2 Вт/кг (усреднение по 10 г ткани, ICNIRP) или 1,6 Вт/кг (по 1 г, FCC/старый IEEE) для головы и туловища. Различие в массе усреднения имеет практическое значение: при усреднении по 1 г пиковые значения SAR выше, и устройство, соответствующее ICNIRP, может не пройти сертификацию FCC.

Ключевые изменения в ICNIRP 2020 по сравнению с 1998 годом [25] включают: переходную частоту от SAR к плотности мощности, сниженную с 10 до 6 ГГц; введение поглощенной (а не падающей) плотности мощности выше 6 ГГц; уменьшение площади усреднения с 20 до 4 см² (и 1 см² выше 30 ГГц); введение ограничений для кратковременных экспозиций (< 6 мин) на частотах выше 400 МГц; увеличение времени усреднения для цельнотелого SAR с 6 до 30 минут.

ICNIRP [24] однозначно декларирует: «Единственным обоснованным эффектом РЧ-ЭМП, релевантным для здоровья, является нагрев облучаемых тканей». Стандарты не учитывают возможные нетепловые эффекты и не различают непрерывное и модулированное излучение при одинаковой средней мощности.

Принцип предосторожности применяется рядом стран, устанавливающих лимиты в 10-100 раз ниже ICNIRP [1]. Швейцария ограничивает облучение в местах чувствительного использования (жилье, школы) до 4 В/м при 900 МГц (против ~ 41 В/м по ICNIRP); Италия – до 6 В/м (плотность мощности $\sim 0,1$ Вт/м² против ~ 10 Вт/м²); Россия и Китай – до $\sim 0,1$ Вт/м² (10 мкВт/см²). Российские нормативы исторически основаны на концепции нетепловых биоэффектов, разработанной в советской школе гигиены, и оперируют понятием дозы (плотность мощности $\times$ время). Доклад BioInitiative (2007, обновлен 2012) рекомендовал предельно низкие лимиты – 0,003-0,006 мкВт/см² ($\sim$ в 100 000 раз ниже ICNIRP), однако был отвергнут подавляющим большинством национальных и международных экспертных комиссий как не основанный на взвешенной оценке доказательств.

Заключение

Тепловые эффекты РЧ/СВЧ-излучения физически понятны, количественно описываемы и служат надежной основой международных стандартов безопасности [1]. Нетепловые эффекты зафиксированы в значительной части рецензируемых исследований [12, 14], однако страдают от низкой воспроизводимости, методологической гетерогенности и влияния источника финансирования на результат. Парадокс текущей ситуации в том, что экспериментальные данные на животных (NTP [3], Ramazzini) указывают на канцерогенность при хроническом облучении, тогда как эпидемиологические когортные исследования (COSMOS, датская когорта) не обнаруживают значимого повышения риска – однако их период наблюдения может быть недостаточен для выявления опухолей с длительным латентным периодом [19].

Миллиметровые волны 5G представляют принципиально иной паттерн экспозиции (поверхностное поглощение в коже) по сравнению с суб-6 ГГц технологиями [20, 21], и их долгосрочные эффекты остаются практически не изученными. Ожидаемая переоценка IARC [2] в 2025-2029 годах, с учетом результатов NTP [3], Ramazzini и систематических обзоров ВОЗ [13], может

привести к изменению классификации. Ключевой методологический вызов для будущих исследований – стандартизация протоколов экспозиции [17], длительные проспективные наблюдения и независимое финансирование, свободное от конфликтов интересов как промышленных, так и активистских групп.

Финансирование: Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (грант № FSPZ-2026-0007).

Литература

1. Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz) // Health physics. 2020. – V. 118. – №. 5. – P. 483-524. <https://doi.org/10.1097/hp.0000000000001210>
2. IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, International Agency for Research on Cancer. IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. – IARC, 1988. – V. 99.
3. NTP U.S. Technical report on the toxicology and carcinogenesis studies in Hsd: Sprague Dawley Sd rats exposed to Whole-Body radio frequency radiation at a frequency (900MHz) and modulations (GSM and CDMA) used by cell phones. Research Triangle Park, North Carolina; National Toxicology Program, National Institutes of Health // Public Health Service, US Department of Health and Human Services, NTP TR. – 2018. – V. 595. <https://doi.org/10.22427/NTP-TR-595>
4. Bailey W.H. et al. Synopsis of IEEE Std C95. 1™-2019 “IEEE standard for safety levels with respect to human exposure to electric, magnetic, and electromagnetic fields, 0 Hz to 300 GHz” // Ieee Access. – 2019. – V. 7. – P. 171346-171356. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2954823>
5. Sacco G., Pisa S., Zhadobov M. Age-dependence of electromagnetic power and heat deposition in near-surface tissues in emerging 5G bands // Scientific Reports. – 2021. – V. 11. – №. 1. – P. 3983. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82458-z>

6. Adekola S.A., Amusa K.A., Biowei G. Impact of 5G mmWave radiation on human tissue using skin, cornea (eye) and enamel (tooth) as study candidates // Journal of Engineering and Applied Science. – 2025. – V. 72. – №. 1. – P. 51. <https://doi.org/10.1186/s44147-025-00617-9>
7. Jennings J., Chen D., Feldman D. Transcriptional response of dermal fibroblasts in direct current electric fields // Bioelectromagnetics: Journal of the Bioelectromagnetics Society, The Society for Physical Regulation in Biology and Medicine, The European Bioelectromagnetics Association. – 2008. – V. 29. – №. 5. – P. 394-405. <https://doi.org/10.1002/bem.20408>
8. Yarmolenko P.S. et al. Thresholds for thermal damage to normal tissues: an update // International Journal of Hyperthermia. – 2011. – V. 27. – №. 4. – P. 320-343. <https://doi.org/10.3109/02656736.2010.534527>
9. Bawin S.M., Adey W.R. Sensitivity of calcium binding in cerebral tissue to weak environmental electric fields oscillating at low frequency // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 1976. – V. 73. – №. 6. – P. 1999-2003.
10. Panagopoulos D.J. et al. Human-made electromagnetic fields: Ion forced-oscillation and voltage-gated ion channel dysfunction, oxidative stress and DNA damage // International Journal of Oncology. – 2021. – V. 59. – №. 5. – P. 1-16. <https://doi.org/10.3892/ijo.2021.5272>
11. Wust P., Stein U., Ghadjar P. Non-thermal membrane effects of electromagnetic fields and therapeutic applications in oncology // International Journal of Hyperthermia. – 2021. – V. 38. – №. 1. – P. 715-731. <https://doi.org/10.1080/02656736.2021.1914354>
12. Yakymenko I. et al. Oxidative mechanisms of biological activity of low-intensity radiofrequency radiation // Electromagnetic biology and medicine. – 2016. – V. 35. – №. 2. – P. 186-202. <https://doi.org/10.3109/15368378.2015.1043557>
13. Varrella S. et al. A comprehensive assessment of non-indigenous species requires the combination of multi-marker eDNA metabarcoding with classical taxonomic identification // Environment International. – 2025. – V. 199. – P. 109489. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2025.109489>

14. Weller S.G. et al. A scoping review and evidence map of radiofrequency field exposure and genotoxicity: assessing in vivo, in vitro, and epidemiological data // *Frontiers in Public Health*. – 2025. – V. 13. – P. 1613353. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2025.1613353>
15. Speit G., Schütz P., Hoffmann H. Genotoxic effects of exposure to radiofrequency electromagnetic fields (RF-EMF) in cultured mammalian cells are not independently reproducible // *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*. – 2007. – V. 626. – №. 1-2. – P. 42-47. <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2006.08.003>
16. Lai H., Singh N.P. Melatonin and a spin-trap compound block radiofrequency electromagnetic radiation-induced DNA strand breaks in rat brain cells // *Bioelectromagnetics: Journal of the Bioelectromagnetics Society, The Society for Physical Regulation in Biology and Medicine, The European Bioelectromagnetics Association*. – 1997. – V. 18. – №. 6. – P. 446-454.
17. López I. et al. It is mandatory to review environmental radiofrequency electromagnetic field measurement protocols and exposure regulations: An opinion article // *Frontiers in Public Health*. – 2022. – V. 10. – P. 992645. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.992645>
18. Yaghmazadeh O. Pulsed high-power radio frequency energy can cause non-thermal harmful effects on the brain // *IEEE Open Journal of Engineering in Medicine and Biology*. – 2024. – V. 5. – P. 50-53. <https://doi.org/10.1109/OJEMB.2024.3355301>
19. Wu T., Rappaport T.S., Collins C.M. Safe for generations to come: Considerations of safety for millimeter waves in wireless communications // *IEEE microwave magazine*. – 2015. – V. 16. – №. 2. – P. 65-84. <https://doi.org/10.1109/MMM.2014.2377587>
20. Gasmelseed A. Parametric analysis of electromagnetic wave interactions with layered biological tissues for varying frequency, polarization, and fat thickness // *Scientific Reports*. – 2025. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-33460-2>

21. Simkó M., Mattsson M.O. 5G wireless communication and health effects - A pragmatic review based on available studies regarding 6 to 100 GHz // International journal of environmental research and public health. – 2019. – V. 16. – №. 18. – P. 3406. <https://doi.org/10.3390/ijerph16183406>
22. Ijima E. et al. Histological and inflammatory effects of 26.5 GHz quasi-millimeter wave exposure on rat skin // Frontiers in Public Health. – 2025. – V. 13. – P. 1580155. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2025.1580155>
23. Foroughimehr N., Clayton A.H. A., Yavari A. Exploring skin interactions with 5G millimeter-wave through fluorescence lifetime imaging microscopy // Electronics. – 2024. – V. 13. – №. 9. – P. 1630. <https://doi.org/10.3390/electronics13091630>
24. Valberg P.A. Electromagnetic waves (EMF and RF) and health effects // Hamilton & Hardy's Industrial Toxicology. – 2015. – P. 1069-1086. <https://doi.org/10.1002/9781118834015.ch101>
25. Neufeld E., Kuster N. Systematic derivation of safety limits for time-varying 5G radiofrequency exposure based on analytical models and thermal dose // Health physics. – 2018. – V. 115. – №. 6. – P. 705-711. <https://doi.org/10.1097/HP.0000000000000930>

Для цитирования:

Макаров В.Н., Боос Н.А., Махов М.А. Биологические эффекты радиочастотного и СВЧ излучений // Журнал радиоэлектроники. – 2026. – №. 5. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.5.9>