

УДК 613.647: 537.87
DOI: 10.21668/health.risk/2025.1.14

Читать
онлайн



Научный обзор

К ОЦЕНКЕ РИСКОВ ДЛЯ ЗДОРОВЬЯ ПРИ ВНЕДРЕНИИ СЕТЕЙ 5G

М.Е. Гошин¹, Э.В. Гарин²

¹Федеральный научный центр гигиены имени Ф.Ф. Эрисмана, Российская Федерация, 141014, г. Мытищи, ул. Семашко, 2

²Институт биологии внутренних вод имени И.Д. Папанина Российской академии наук, Российская Федерация, 152742, пос. Борок, 109

Приводится обзор литературы, посвященный анализу методологических подходов к оценке рисков для здоровья населения, ожидаемых при внедрении и развитии сетей сотовой связи 5G. Поиск литературы осуществлялся с использованием баз данных Pubmed, Scopus, Web of Science, MedLine, Global Health, РИНЦ.

Результаты исследований воздействия электромагнитных излучений радиочастот на животных демонстрируют в ряде случаев наличие канцерогенных эффектов, однако популяционные исследования людей, являющихся активными пользователями сотовой связи, проведенные на больших выборках, не выявили статистически значимых воздействий, приводящих к возникновению заболеваний. В то же время, учитывая особенности технологии 5G, такие как крайне высокая плотность сетей, новые сценарии размещения базовых станций, многочисленность устройств 5G, многодиапазонность сети (включая использование дециметровых, сантиметровых и миллиметровых волн), наряду с использованием сигналов, имеющих большую ширину спектра и новые типы модуляции, биологическое воздействие которых еще не изучено, можно предположить, что электромагнитный фон на жилых территориях подвергнется значительной трансформации в сторону возрастания интенсивности модулированных широкополосных электромагнитных излучений, обладающих сложным спектральным составом. Проведенные социологические исследования подтверждают наличие у населения озабоченности воздействием технологий 5G на здоровье. Соответственно, необходима разработка новых методологических подходов к проведению исследований, направленных на оценку риска внедрения сетей данного типа, учитывающих их технологические особенности, результаты которых должны стать основанием для разработки новых гигиенических нормативов и проведения комплекса мероприятий, направленных на обеспечение электромагнитной безопасности населения.

Ключевые слова: электромагнитная безопасность, сети 5G, обзор литературы, электромагнитные излучения радиочастот, исследования на животных, популяционные исследования, социологические исследования, восприятие рисков электромагнитных излучений.

В настоящее время внедрение нового, пятого, поколения мобильной связи 5G/IMT-2020¹ (5G) рассматривается как основа цифровой экономики [1]. В связи с этим особую актуальность приобретают вопросы, связанные с оценкой риска для здоровья населения, возникающего при использовании данных технологий. Развитие телекоммуникационных сетей и новых технологических решений ожидаемо приведет к многократному росту мобильного трафика, увеличению потребления видеослужб, значительно-

му росту числа мобильных устройств, подключенных к сети, повышению интенсивности работы с приложениями, использованию онлайн-игр и их обновлению. Одной из наиболее важных функций внедрения и развития сетей 5G является использование Интернета вещей – т.е. системы передачи данных между физическими объектами («вещами»), которые будут базироваться на специальных технологиях, обеспечивающих их взаимодействие друг с другом и с внешней средой во многих случаях без

© Гошин М.Е., Гарин Э.В., 2025

Гошин Михаил Евгеньевич – кандидат химических наук, старший научный сотрудник отдела анализа риска здоровью населения (e-mail: Goshin.ME@fncg.ru; тел.: 8 (916) 889-71-74; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7251-3938>).

Гарин Эдуард Витальевич – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории высшей водной растительности (e-mail: garinev@mai.ru; тел.: 8 (901) 050-32-93; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0199-9405>).

¹ Международная мобильная связь – 2020 (Стандарт IMT-2020) – это требования, изданные Сектором радиосвязи МСЭ (ITU-R) Международного союза электросвязи (ITU) в 2015 г. для сетей, устройств и услуг 5G.

участия человека [2, 3]. При этом планируется постоянное увеличение числа данных устройств, работающих в сети Интернет.

Сети 5G имеют архитектуру, отличную от предыдущих поколений мобильной связи. Они предполагают более высокую плотность базовых и пользовательских станций, которые генерируют электромагнитное излучение (ЭМИ) и обеспечивают разнообразные беспроводные сервисы. Развитие сетей от 4G к 5G, а затем и к 6G сопровождается увеличением числа пользовательских устройств на единицу площади. Их количество может достигать 1 млн устройств на квадратный километр в 5G-сетях (IMT-2020) и до 10 млн в будущих 6G-сетях [4]. Из-за такой высокой плотности пользовательских устройств общий электромагнитный фон сетей 5G / 6G может превысить допустимые нормы и стать опасным для здоровья [5, 6].

Целью представленного литературного обзора является анализ результатов различных типов исследований, направленных на оценку воздействия ЭМИ, с использованием инженерных знаний в области 5G, рассмотрение методических подходов к оценке риска здоровью населения от воздействия сетей 5G и обсуждение направлений совершенствования методологии для проведения исследования влияния сетей нового формата.

Материалы и методы. В данной работе применен метод литературного анализа, который использован для подготовки обзора научных публикаций, посвященных воздействию ЭМИ, включая сети пятого поколения (5G). Литературный анализ призван обеспечить систематическую оценку существующих исследований, позволяя выявить основные тенденции, критические точки и пробелы в имеющихся научных данных. Поиск и отбор источников литературы проводился с использованием следующих научных баз данных: PubMed, Scopus, Web of Science, MedLine, Global Health, Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

Для окончательного включения источников в обзор применялись следующие критерии.

Тематика: исследования, касающиеся воздействия ЭМИ, в частности сетей 5G, с фокусом на здоровье человека.

Тип исследования: включались как научные статьи, содержащие результаты эмпирических исследований, так и обзорные работы, систематические обзоры и метаанализы, опубликованные в рецензируемых журналах.

Язык публикации: включались работы, опубликованные на английском и русском языках.

Время публикации: ограничение по годам – исследования, опубликованные с 2000 г. по настоящее время, с преимущественным включением работ, опубликованных за последние пять лет, с целью учесть новейшие данные и тенденции.

В процессе отбора было проанализировано 125 научных источников, из которых 73 публикации

признаны соответствующими критериям включения и использованы в обзоре. Каждая работа была проанализирована на предмет методологии, результатов и выводов. Далее был проведен сравнительный анализ полученных результатов и обоснование выводов на основе данных, содержащихся в публикациях, в контексте различных видов исследований по ЭМИ и 5G.

Результаты и их обсуждение. Сети 5G и здоровье населения. Оценка риска для здоровья от 5G охватывает несколько дисциплин: медицину, биологию, физику, экономику, право и другие. При этом исследования в каждой конкретной дисциплине, как правило, сосредоточены на какой-то одной области. Например, медицинские исследования обычно посвящены оценке возможной взаимосвязи между воздействием 5G (а также более ранних поколений мобильной связи) и возникновением заболеваний с небольшим акцентом на осмысление условий испытаний. Однако условия экспериментов часто консервативны и далеки от формирования реальных условий воздействия радиоаппаратуры нового поколения. Поэтому оценка риска здоровью под воздействием 5G представляется непростой задачей.

Вопрос возможных последствий для здоровья из-за радиочастотного воздействия вызывает активные дискуссии в научном сообществе, однако на данный момент отсутствуют убедительные доказательства, подтверждающие наличие значимых рисков. Это подчеркивает необходимость дальнейших исследований и обсуждений в данной области. Например, высокую значимость в современном обществе приобретает возникновение заболеваний центральной нервной системы, в том числе расстройств высшей нервной деятельности, психики, а также опухолей головного мозга. Рассмотрим далее, к каким возможным последствиям для здоровья человека может приводить воздействие электромагнитных излучений радиочастотного диапазона (ЭМИ РЧ).

Рак. Основываясь на анализе результатов эпидемиологических исследований, Международное агентство по изучению рака (IARC) в 2010 г. классифицировало неионизирующие радиочастотные излучения от мобильных телефонов как «возможно, канцерогенные для человека», отнеся их к категории 2B [7, 8]. Последние исследования на крысах также продемонстрировали статистически достоверное повышение риска возникновения опухолей мозга, глиальных новообразований сердца и опухолей околушных желез при воздействии радиочастот ([9–12] и др.).

Воздействие на кожу. Радиочастотное воздействие с высокой плотностью потока энергии может приводить к повышению температуры открытых тканей тела [13]. Однако умеренное локальное тепловое воздействие может быть компенсировано системой терморегуляции человеческого организма. Высокие дозы поглощенного радиочастотного воздействия могут вызвать ощущение тепла в коже, приводя к легким ожогам кожи [14].

Поражение глаз. Воздействие радиочастотных излучений высоких уровней с достаточно высокими плотностями потока энергии может привести к поражению глаз [15], включая катаракту, повреждение сетчатки и проблемы с роговицей.

Метаболизм глюкозы. Радиочастотное излучение, возможно, влияет на метаболизм глюкозы в клетках человека [16], что может быть замечено в органах тела, на которые оказывают воздействие высокие уровни ЭМП, например, в головном мозге.

Мужская фертильность. Некоторые исследования ([17–19] и др.) утверждают, что при воздействии высоких уровней ЭМИ РЧ может наблюдаться ряд негативных последствий для репродуктивного здоровья мужчин, прежде всего – снижение способности спермы к оплодотворению. Однако связь таких эффектов с радиочастотным воздействием от оборудования связи достоверно не доказана.

Электромагнитная гиперчувствительность. В некоторых работах (см., например, [20–22]), сообщается, что люди могут связывать с радиочастотным воздействием появление таких симптомов, как головная боль, стресс, усталость, нарушения сна, раздражительность, а также боли в области сердца и повышение артериального давления. В то же время другие независимые исследования (например, [23–25] и др.) не показали связей данных симптомов с уровнями радиочастотного излучения, то есть на сегодняшний день такая взаимосвязь достоверно не подтверждена.

Таким образом, воздействие ЭМИ РЧ гипотетически может приводить к нескольким типам последствий для здоровья, при этом использование оборудования 5G в реальных условиях ожидаемо не должно привести к возникновению таких эффектов, как поражение кожи, глаз и влияние на метаболизм глюкозы, поскольку эти явления наблюдаются только при уровнях ЭМИ, существенно превышающих уровни излучения оборудования 5G. Также связь 5G с мужской фертильностью и электромагнитной гиперчувствительностью не является научно доказанной [26, 27].

Далее рассмотрим медицинские исследования о влиянии ЭМИ РЧ на здоровье, проведенные на животных, а также популяционные и социологические исследования, результаты которых могут представлять интерес с точки зрения изучения внедряемых сетей 5G.

Исследования на животных. За последние десятилетия проведены сотни исследований на животных (например, на мышах и / или крысах), в которых имитировалось воздействие источников ЭМИ РЧ. По результатам данных экспериментов анализировалось, какие потенциальные последствия для здоровья может иметь воздействие ЭМИ РЧ ([28–31] и др.). Однако надо заметить, что большинство этих исследований имеет ряд ограничений, к которым можно отнести, во-первых, малое количество использованных животных для обеспечения статисти-

чески значимых результатов [32, 33], а также их недостаточную продолжительность [33, 34], что ставит под сомнение полученные данные как имеющие значение в долгосрочной перспективе. С целью предотвращения подобных проблем при участии различных международных организаций (например, ВОЗ, Национальная токсикологическая программа (NTP) и т.д.) были разработаны руководящие принципы, в соответствии с которыми должны проводиться исследования на животных, связанные с изучением возникновения серьезных заболеваний (особенно рака) [35–39]. Данные рекомендации включают такие параметры, как минимальное количество животных, необходимых для проведения эксперимента (не менее 50 особей в каждой группе), оптимальная длительность опытов (от 2 до 3 лет), минимальное количество уровней интенсивности ЭМИ (не менее трех) [40].

В контексте текущих и актуальных исследований, соответствующих вышеуказанным критериям, можно выделить исследования, проводимые в рамках Национальной токсикологической программы NTP США [9, 10], а также исследования, проводимые Институтом Рамазини [11].

Исследования NTP [9, 10] представляют на сегодняшний день одни из наиболее продолжительных экспериментов, направленных на оценку воздействия ЭМИ РЧ на животных. Данные исследования касались технологии 2G, однако к их результатам нередко апеллируют противники развертывания сетей 5G. В экспериментах NTP животные (крысы) были разделены на несколько групп, каждая из которых подвергалась воздействию различных уровней ЭМИ РЧ по несколько часов в день, вплоть до естественной смерти. Эксперимент длился два года и включал начальную оценку после первых 28 дней и конечную оценку после завершения исследования. Используемое радиочастотное оборудование для генерации ЭМИ воспроизводило частоты в субгигагерцевом диапазоне для условий, изложенных в [9], и в среднем диапазоне (1–6 ГГц) для условий, изложенных в [10]. Излучаемая мощность радиочастотного оборудования была настроена для удовлетворения заданного уровня экспозиции в камере. Кроме того, в каждой камере осуществлялся регулярный контроль генерируемых уровней ЭМИ на соответствие заданным показателям, условиям проведения эксперимента.

По результатам исследования на субгигагерцевой частоте [9] выявлена канцерогенная активность у самцов крыс Sprague – Dawley, которая проявлялась, прежде всего, в виде появления злокачественной шванномы сердца, а также других опухолей (например, злокачественной глиомы головного мозга). В то же время данные эффекты не отмечены для самок крыс. В эксперименте на средних частотах [10] не обнаружено четких признаков появления новообразований у самцов или самок крыс. Важно также заметить, что в работе [41] приведен анализ результатов исследований [9, 10], в результате чего делается вы-

вод, что радиочастотное воздействие может способствовать увеличению повреждений ДНК.

Исследовательская работа Института Рамазини была направлена на оценку воздействия радиочастотного облучения на крыс Sprague-Dawley [11]. В частности, крысы подвергались воздействию ЭМИ РЧ в течение нескольких часов в день, начиная с внутриутробного периода и до смерти. По словам авторов, их выводы подтверждают результаты исследований NTP [9, 10] и предыдущие эпидемиологические исследования по сотовым телефонам ([42, 43] и др.), что делает необходимым пересмотр классификации IARC радиочастотного облучения [8].

Теперь рассмотрим проведенные исследования на *животных с точки зрения связи 5G*. 5G будет работать в трех основных диапазонах частот:

- 1) субгигагерцевый диапазон (< 1 ГГц);
- 2) среднечастотный диапазон (1–6 ГГц);
- 3) миллиметровые волны (30 ГГц и более).

Исследования NTP [9, 10] проведены на частотах, относящихся к субгигагерцевому диапазону и к среднечастотному диапазону. Следует подчеркнуть, что частота 900 МГц, используемая в работе [9], очень близка к той, которая применяется в субгигагерцевом диапазоне 5G. Например, в Италии эта частота установлена на 700 МГц. В то же время исследование [10] проведено на частоте 1900 МГц, которая используется для услуг 5G в некоторых странах мира (например, США), однако другие (например, Италия) используют иные частоты. Частота, используемая в исследовании Института Рамазини [11], составляет 1800 МГц и может быть сравнима с частотами 5G в среднечастотном диапазоне.

Наконец, важно отметить, что ни одно из исследований [9–11] *не анализирует влияние частот в миллиметровом волновом диапазоне*. В данном диапазоне воздействие радиоволн характеризуется некоторыми специфическими особенностями. Например, они в меньшей степени обладают способностью проникать во внутренние ткани, по сравнению с микроволнами. Однако исследования [9–11] ориентированы на использование технологий 2G (не 5G), для которых не представляется возможным использование частот в диапазоне миллиметровых волн. Таким образом, мы можем утверждать, что результаты исследований [9–11] лишь частично могут быть использованы для оценки воздействия технологий 5G. Многие параметры исследований [9–11] представляются совершенно иными и / или далекими от тех, которые применяются в оборудовании 5G.

К таким отличиям относятся:

- очень короткие расстояния между источником опасности и реципиентом при использовании сетей 5G;
- очень высокие уровни ЭМИ, высокий уровень излучаемой мощности;
- очень длительное время экспозиции;
- основные схемы передачи и модуляции;
- уровни SAR², рассчитываемые для всего тела, не сопоставимые напрямую с локальными SAR при использовании реальных смартфонов.

Как следствие, выводы о влиянии ЭМИ РЧ на здоровье, полученные в рассмотренных исследованиях, нельзя однозначно экстраполировать для ситуации реального развертывания сетей 5G.

Поэтому ICNIRP³ в специальной заметке указал [43], что исследования [9–11] не дают последовательной, надежной и обобщаемой совокупности доказательств для пересмотра экспозиции. Соответственно, необходимо проведение дальнейших исследований, направленных на устранение данных ограничений.

Популяционные исследования. Исследования в этой категории направлены на изучение связи между наличием тяжелых заболеваний (таких как опухоли головного мозга) у людей и уровнем облучения от базовых станций и мобильных телефонов. Мы не фокусируемся на популяционных исследованиях, направленных на изучение воздействия базовых станций, в связи с тем, что в исследованиях, проведенных для более ранних поколений мобильной связи, показано, что степень облучения от базовых станций намного ниже, чем от мобильных устройств ([44, 45] и др.), влияние базовых станций существенно уменьшается по мере удаления пользователей от станции ([46–48] и др.). Кроме того, предыдущие популяционные исследования ([49] и др.) Американского онкологического общества [50] не обнаружили причинно-следственной связи между воздействием базовых станций и увеличением риска развития опухолей. Тем не менее, учитывая внедрение технологии 5G, характеризующейся возрастанием количества базовых станций и их расположением на близком расстоянии друг от друга [51, 52], важно отметить, что вопросы о воздействии таких станций на здоровье населения требуют дальнейшего научного анализа. Прогресс в этой области настоятельно подчеркивает необходимость исследования и обсуждения потенциальных последствий общего облучения.

Хорошо известно, что аппараты мобильной связи представляют собой источники воздействия

² SAR (Specific Absorption Rate) – это удельный коэффициент поглощения электромагнитной энергии. Этот показатель определяет, какое количество излучения получил человек за одну секунду во время контакта с источником ЭМИ (например, телефоном). Уровень SAR стандартизирован в большинстве стран и используется для оценки потенциальных рисков для здоровья.

³ ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) – независимая организация, официально признанная Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ). Ее основная цель – исследовать риски для здоровья, связанные с воздействием неионизирующей радиации, и предоставить рекомендации по ограничению воздействия для минимизации потенциальных рисков для здоровья.

ЭМИ РЧ вблизи пользователей (см., например, [44, 45]). Поэтому мы остановимся на популяционных исследованиях, которые направлены на поиск причинно-следственных связей между возникновением опухолей и воздействием мобильных телефонов. Основные работы, выполненные в прошлом, актуальны и в контексте 5G.

Исследование *INTERPHONE* [53, 54] координировалось IARC. Исследование, основанное на подходе «случай – контроль», было выполнено в 13 странах мира в 2000–2012 гг. Цель проекта состояла в том, чтобы изучить влияние использования мобильных телефонов на людей, страдающих тяжелыми заболеваниями (например, глиома, менингиома и акустическая невринома). Большое значение имело количество людей, вовлеченных в исследование: более 5000 пациентов, имеющих диагноз глиомы или менингиомы, и 1000 пациентов с диагнозом акустической невриномы. Кроме того, рассматривалась также контрольная группа, в которую входили люди, не имеющие ни одного из данных типов опухолей.

Исследование базировалось на таких методах, как персональные интервью и контрольные проверки, направленные на получение максимально точных данных об использовании мобильных устройств, включая длительность и частоту разговоров, а также другую информацию, которая могла бы иметь значение (например, оператор связи, модель телефона, место совершения звонков, подвижность пользователей, применение гарнитуры или функции громкой связи).

Результаты исследований [53, 54] не обнаружили значительной связи между использованием сотовых телефонов и риском появления глиомы, менингиомы или акустической невриномы. При этом отмечено некоторое повышение риска возникновения глиомы при высоких уровнях воздействия ЭМИ РЧ. Однако ряд погрешностей в данных затруднил более детальную интерпретацию полученных результатов.

Датское когортное исследование [55] было направлено на выявление возможного повышения рисков развития опухолей у людей, которые имеют подписку на оператора сотовой связи. В качестве группы сравнения выступало остальное население, не имеющее такой подписки. Исследование включало несколько этапов, начиная с первой волны в 1982–1995 гг. [40] и заканчивая последней, охватывающий период 1990–2007 гг. [55]. Несмотря на очень большую выборку (число подписчиков, приведенное в [55], превышает 380 тысяч человек), исследование не показало никакой связи между использованием аппаратов мобильной связи – даже на протяжении более 13 лет – и риском развития опухолей центральной нервной системы.

Широкомасштабный проект под названием «*Миллион женщин*» [56] предполагал заполнение анкеты, отправляемой по почте. В результате было опрошено 1,3 млн женщин среднего возраста в Великобритании в разное время в течение 1999–2009 гг. Опрос включал вопросы, направленные на оценку воздействия мобильных телефонов, которые задавались дважды в течение рассматриваемого периода. Результаты исследования [56] не показали значимых связей между частотой использования мобильных телефонов и увеличением заболеваемости опухолями центральной нервной системы или глиомой, менингиомой.

Далее рассмотрим популяционные исследования [53–56] с точки зрения *перспективы оценки влияния техники связи 5G*. В таблице приведены основные параметры, принятые в предыдущих исследованиях, и как такие показатели должны быть (в конечном счете) изменены или дополнены при рассмотрении оборудования 5G.

Отметим, что оценка проводилась с использованием традиционных методов, таких как анкетирование, личные / дистанционные интервью и (в отдельных случаях) анализ журнальных файлов, доступных операторам мобильных сетей [53–56]. Однако

Сравнение основных параметров, используемых в популяционных исследованиях [53–56], с имеющими значение в контексте 5G

Параметр	Популяционное исследование	Связь 5G
Оценивание	Анкетирование, личные интервью, дистанционное интервью, журнал мобильного оператора	Облачное приложение, журнал мобильного оператора
Частота оценивания	Однократное, периодическое	Непрерывное
Тип активности	Звонки	Звонки, потоковое видео, социальные сети, обмен мгновенными сообщениями
Интенсивность активности	Количество звонков	Количество минут, потраченных на каждое приложение, количество загруженного контента
Связь	Номер телефона, оператор	Номер телефона, оператор, используемые интерфейсы, используемые частоты, информация о передаче
Положение телефона	Расстояние от головы, использование устройств громкой связи	Близость телефона относительно пользователя, захват телефона
Местонахождение телефона	Страна, место жительства	Страна, место жительства, мобильность пользователей
Информация о телефоне	Модель устройства	Модель устройства

спектр услуг 5G охватывает множество различных функций, таких как обмен данными и голосовая связь, поэтому измерение активности мобильных устройств не может основываться исключительно на данных, полученных в результате проведения анкетирования и / или интервью. Для получения такой информации целесообразно устанавливать специальные пользовательские приложения на телефонах, которые автоматически будут передавать измеренные данные в контролируемом облаке. Когда же этот подход не может быть реализован (например, из-за проблем с конфиденциальностью), следует использовать файлы, предоставленные мобильными операторами.

Другие исследования [53–56], сфокусированные на частоте оценки, предполагают, что информация об активности пользователей извлекается либо в конце рассматриваемого периода, либо на периодической основе. В отличие от этого, 5G требует непрерывного мониторинга активности, что обусловлено сильными временными изменениями количества данных, которыми обмениваются в приложениях, установленных на смартфоне с 5G.

Наконец, стоит отметить, что методология приведенных исследований сфокусирована преимущественно на контроле продолжительности звонков. В связи с этим представляется важным, что, хотя технологии с использованием сетей 5G по-прежнему предоставляют услуги голосовой связи, перечень функций, востребованных современными пользователями, является значительно более широким, в то время как голосовая связь в последнее время уже утрачивает свои лидирующие позиции. Соответственно, исследования должны контролировать время, затрачиваемое не только на продолжительность вызова, но и, например, на такие функции, как потоковое видео, социальные сети и обмен мгновенными сообщениями. Получение таких данных позволит создать максимально точный профиль пользователя, в который будет включена информация о воздействии для каждого типа услуг. В контексте исследований 5G представляется крайне важным фиксировать количество времени, проведенное в каждом приложении, с отслеживанием объема передаваемых данных.

Популяционные исследования обычно принимают во внимание основные характеристики, такие как номер телефона и оператор мобильной связи. В контексте исследований 5G эту информацию следует дополнить за счет учета времени использования каждого стандарта (например, 5G, 4G, Wi-Fi). Еще одна важная характеристика связана с используемыми частотами (например, менее ГГц, средняя частота, миллиметровые волны), а также индикаторами проведенных передач (которые могут повлиять на воздействие).

Исследования [53–56] применяют простые метрики, такие как расстояние до головы и использование громкой связи. Если рассматривать 5G, то

важно учитывать расположение телефона относительно головы / грудной клетки или других частей тела. Кроме того, поскольку мобильные аппараты используются по-разному (например, разговор, просмотр видео, текстовые сообщения, запись самого себя, и др.), также важно учитывать способ удержания телефона (например, одной рукой, двумя руками, вертикальное или горизонтальное расположение). В конечном счете, при проведении исследований данного типа фиксируется местоположение пользователя (в контексте страны проживания). Эти данные затем используются, например, для разделения пользователей по типу территории (городские / сельские). В контексте 5G ключевую роль играет мобильность пользователей – важно обязательно учитывать также этот фактор. И, наконец, при осуществлении популяционных исследований следует принимать во внимание модель мобильного устройства. Так как воздействие телефона меняется в зависимости от модели, эти данные также должны быть зарегистрированы при рассмотрении 5G-оборудования.

Таким образом, несмотря на то что были проведены масштабные популяционные исследования для оценки воздействия от мобильных устройств в сетях устаревшего поколения, их выводы нельзя полностью экстраполировать и на 5G. Следовательно, необходим новый набор популяционных исследований, специально ориентированных на 5G. Этот шаг потребует радикально изменить методологию проведения исследований с учетом параметров, которые необходимо принимать во внимание при проведении измерений и обработки получаемых данных.

Социологические исследования. Информирование общественности о рисках для здоровья традиционно базировалось на расчете оценок смертности и публикации полученных данных в надежде, что такие действия могут уменьшить беспокойство. Однако во многих случаях, даже когда эксперты и население видели результаты одних и тех же оценок, они по-прежнему не соглашались с величиной предполагаемых рисков. Такое несогласие возникало вследствие того, что представители общественности в своем восприятии рисков исходили из воздействия множества факторов в дополнение к объективно изучаемым воздействиям.

Исследование [57] проведено с целью выявления таких факторов, влияющих на общественное восприятие рисков ЭМИ от базовых станций сети 5G. Показано, что электромагнитные волны от базовых станций 5G воспринимались как имеющие умеренные риски для здоровья; величина воспринимаемого риска была близка к восприятию риска ЭМИ от мобильных телефонов, большей, чем восприятие риска воздействия бытовой химии, но меньшей, чем от курения сигарет. Кроме того, восприятие риска электромагнитных волн от базовых станций 5G было наиболее тесно ассоциировано с ЭМИ от мобильных телефонов и наименее – с восприятием риска от загрязнения питьевой воды.

Оценки восприятия риска показали значимую взаимосвязь с полом испытуемых, оценкой эффективности реализуемой государственной политики, а также субъективной оценкой степени потенциальных угроз и последствий для здоровья, связанных с воздействием ЭМИ. Так, F. Freudenstein и др. [58] обнаружили, что более высокий уровень восприятия воздействия ЭМИ РЧ связан с повышенным восприятием риска. При этом было показано также, что женщины склонны оценивать риски как более серьезные, чем мужчины. Меньший уровень доверия к государственной политике также связан с повышенным восприятием риска от источников ЭМИ. Кроме того, исследование K. Kim et al. [59] показало, что люди, давшие более высокие оценки по таким параметрам, как «личные знания» и «серьезность риска для будущих поколений», также продемонстрировали повышенные оценки риска восприятия ЭМИ от мобильных телефонов.

Также были идентифицированы факторы, связанные со снижением восприятия риска ЭМИ от базовых станций сети 5G. Оценки восприятия риска были ниже среди возрастной группы 20–29 лет, нынешних курильщиков и лиц, никогда не употребляющих алкоголь. Также было обнаружено [60], что пожилые люди оценивают риски для здоровья как более серьезные, чем молодые. Кроме того, повышенное чувство управляемости было связано со снижением восприятия риска [61]. В исследовании [57] была выдвинута гипотеза о том, что размещение мобильного зарядного устройства телефона поблизости во время сна будет связано с более низким восприятием риска, поскольку такое поведение наводит на размышления о безразличии к воздействию электромагнитных волн; однако значимой зависимости выявлено не было.

М.-Е. Cousin и М. Siegrist [62] показали, что чтение горожанами в Швейцарии буклета о мобильной связи способствовало улучшению их объективных знаний, но за счет одновременного увеличения беспокойства. Однако L. Claassen et al. [63] сообщили, что предоставление общественности информации о воздействии ЭМИ способствовало улучшению знаний и снижению восприятия риска. Авторами исследования [57] была построена множественная линейная регрессия, показавшая, что более высокий уровень знаний был связан с повышенным воспри-

ятием риска. То есть, по-видимому, испытуемые с более высоким восприятием риска были более активны в сборе релевантной информации, полагаясь на авторитетные и проверенные источники.

Методические подходы к оценке риска здоровью населения от воздействия сетей 5G. Основным нормативным документом, регламентирующим проведение оценки риска здоровью населения от воздействия ЭМИ, является МР 2.1.10.0061-12⁴. Данные методические рекомендации включают систематизированный подход к оценке воздействия электромагнитных полей на здоровье человека и могут быть полезными для первичной оценки риска от воздействия ЭМИ сетей 5G. Тем не менее важно принимать во внимание некоторые уточнения и ограничения при их использовании в данной области.

МР 2.1.10.0061-12 охватывают диапазон частот до 300 ГГц, который включает частоты, используемые в сетях 5G. Таким образом, основные методологические подходы, изложенные в этих рекомендациях, могут быть применимы к оценке воздействия 5G. Однако надо учитывать, что 5G используют диапазоны частот, которые варьируются в широком спектре, включая более высокие частоты, нежели те, которые использовались в предыдущих поколениях мобильной связи. Параметры и особенности сетей 5G существенно отличаются от предыдущих поколений мобильной связи [52, 64]. Так, эти сети используют технологии, такие как ММО⁵ и малые ячейки, которые могут приводить к совершенно другим характеристикам распространения и концентрации ЭМИ. Отмечается также [65], что массивно-параллельная обработка сигналов и точное формирование луча, а также использование более высоких частотных диапазонов, могут привести к тому, что существующие методы измерений будут давать значительно завышенные результаты при их применении в сетях 5G.

Таким образом, для более точной и обоснованной оценки рисков важно проводить дополнительные исследования с учетом уникальных параметров 5G, а также включать в анализ новые данные, полученные в результате мониторинга и эпидемиологических исследований [64–66]. Как следствие, научная и методическая база может изменяться по мере появления новых данных, что потребует адаптации подходов, описанных в МР 2.1.10.0061-12.

⁴ МР 2.1.10.0061-12. Оценка риска для здоровья населения при воздействии переменных электромагнитных полей (до 300 ГГц) в условиях населенных мест: методические рекомендации / утв. Руководителем Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации Г.Г. Онищенко 13 апреля 2012 г. [Электронный ресурс] // КОДЕКС: электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200095226> (дата обращения: 18.05.2024).

⁵ ММО (англ. multiple-input and multiple-output) – метод пространственного кодирования сигнала, позволяющий увеличить полосу пропускания канала, в котором передача данных и прием данных осуществляются системами из нескольких антенн. Передающие и приемные антенны разносят так, чтобы интерференция между соседними антеннами была слабой.

На сегодняшний день практически отсутствуют публикации, содержащие четкие методические подходы к оценке риска здоровью населения от воздействия сетей 5G. Руководящие принципы Международной комиссии по защите от неионизирующего излучения (ICNIRP) были использованы для разработки алгоритмов на основе нечеткой логики для оценки рисков, связанных с неионизирующим излучением, в среде 5G [67]. Стандарты безопасности были адаптированы с учетом новых технологических разработок, а недавние обновления стандартов ICNIRP и IEEE C95.1⁶ устранили опасения по поводу частот миллиметрового диапазона [68]. Оценка риска для здоровья от воздействия сетей 5G должна включать несколько ключевых этапов. Основываясь на МР 2.1.10.0061-12 и имеющихся литературных данных, посвященных проблеме воздействия сетей 5G на население, можно предложить следующий примерный алгоритм.

Определение источника воздействия. Идентификация источников ЭМИ, связанных с сетями 5G, включая базовые станции, малые ячейки, пользовательские устройства и т.д.

Оценка экспозиции. Оценка уровней ЭМИ, которые могут возникать в различных сценариях эксплуатации 5G (например, в городских, сельских и внутренних условиях) как в данный момент времени, так и длительность их сохранения. С развитием адаптивных антенных технологий в сетях 5G на международном уровне в области гигиенической оценки ЭМИ становится актуальным применение статистических подходов к оценке максимальных уровней воздействия от базовых станций, отраженных в международных документах [64]. Для России этот метод, сосредоточенный на анализе реальных условий экспозиции, является новым и требует обновления регуляторной базы, а также проведения комплексных исследований в сотрудничестве с операторами мобильной связи, включая апробацию методов экстраполяции результатов селективных измерений.

Анализ исследований воздействия на здоровье. Обзор и анализ имеющихся научных данных о потенциальных физиологических и биохимических эффектах излучения 5G, включая эпидемиологические, популяционные исследования и исследования на животных [69, 70].

Оценка «доза – ответ». Изучение взаимосвязи между уровнем экспозиции (дозой) и наблюдаемыми эффектами для здоровья. Этот шаг включает в себя выявление пороговых значений, выше которых могут проявляться негативные эффекты.

Оценка неопределенности. Нельзя игнорировать растущую обеспокоенность по поводу радиочастотных электромагнитных полей, когда из-за высокой плотности передатчиков, необходимых для

систем 5G, население подвергается более высокому уровню воздействия [71]. Основными источниками неопределенности являются недостаточные и неточные сведения о потенциальных факторах опасности, сложности установления пороговых уровней воздействия на человека и неоднородность данных о длительности и экранировании ЭМИ, что влияет на достоверность итоговых оценок.

Итоговая оценка риска. Синтез данных и информации о воздействии, чтобы оценить общую степень риска для населения. Данный этап может включать разработку моделей, показывающих, как эффект может варьироваться в зависимости от уровня экспозиции, времени воздействия и других факторов.

Рекомендации по управлению рисками. Формулирование рекомендаций и стратегий по минимизации рисков для здоровья, таких как установление предельных значений экспозиции, осуществление мониторинга здоровья населения и образовательные инициативы по безопасному использованию технологий. Данные рекомендации представляются лицам, принимающим управленческие решения.

Осуществление мониторинга и пересмотра. Создание системы мониторинга для отслеживания изменений в уровне технологии и ее потенциального воздействия на здоровье, с регулярным пересмотром оценок риска по мере накопления новых данных.

Таким образом, процесс оценки риска для здоровья от воздействия сетей 5G является многогранным и требует интеграции знаний различных дисциплин, прежде всего – радиофизики, биологии, медицины, эпидемиологии и социологии. Представленный алгоритм полезен для формулирования обоснованных рекомендаций и политики использования технологий 5G, обеспечивая единообразный подход к оценке потенциальных рисков для здоровья населения.

Выводы. Проведение исследований, направленных на оценку воздействия сетей 5G (а в дальнейшем и 6G) на здоровье населения, требует разработки новой методологии, исходя из рассмотренных особенностей сетей нового поколения. Соответственно, прямое использование методологических подходов, используемых для сетей 2G, 3G и 4G, не представляется возможным [72]. Это ставит новые задачи перед гигиенической наукой в части разработки теории гигиенического нормирования ЭМИ РЧ в условиях сложной электромагнитной обстановки с обоснованием новых единых гигиенических нормативов. Последующие исследования должны уделять особое внимание дозиметрии и контролю температуры среды при проведении эксперимента; кроме того, крайне важно отслеживать долгосрочные последствия для здоровья населения, связанные с беспроводными теле-

⁶ IEEE C95.1 – это стандарт уровней безопасности по отношению к воздействию на организм человека электрических, магнитных и электромагнитных полей. Он был разработан международным комитетом по электромагнитной безопасности IEEE и выпущен в 2005 г. Стандарт покрывает спектр сигналов от 3 кГц до 300 ГГц.

коммуникациями [73]. Полученные результаты будущих исследований создадут базу для разработки эффективных мероприятий, направленных на обеспечение электромагнитной безопасности населения и защиту от возможного негативного воздействия сетей 5G. Оценка и управление рисками для здоровья от воздействия сетей 5G представляют собой многогранный и постоянно развивающийся процесс, требующий междисциплинарного подхода, вовлечения научных, медицинских и технических сообществ, а также прозрачного обсуж-

дения с общественностью. Ключевым моментом является интеграция новых научных данных в стратегии управления рисками, чтобы обеспечить безопасность и благополучие населения в условиях быстрого технологического прогресса.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках государственного задания № 1023032300263-5-3.3.5 и 124032100076-2.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

1. Бородин А.С., Кучерявый А.Е. Сети связи пятого поколения как основа цифровой экономики // *Электросвязь*. – 2017. – № 5. – С. 45–49.
2. Волков А.Н., Кучерявый А.Е. Идентификация трафика сервисов в сетях связи IMT-2020 и последующего поколения на основе метаданных потоков и алгоритмов машинного обучения // *Электросвязь*. – 2020. – № 11. – С. 21–28. DOI: 10.34832/ELSV.2020.12.11.001
3. Rauniyar A., Engelstad P., Østerbø O.N. RF energy harvesting and information transmission based on NOMA for wireless powered IoT relay systems // *Sensors (Basel)*. – 2018. – Vol. 18, № 10. – P. 3254. DOI: 10.3390/s18103254
4. 6G Wireless Networks: Vision, Requirements, Architecture, and Key Technologies / Z. Zhang, Y. Xiao, Z. Ma, M. Xiao, Z. Ding, X. Lei, G.K. Karagiannidis, P. Fan // *IEEE VT Magazine*. – 2019. – Vol. 14, № 3. – P. 28–41. DOI: 10.1109/MVT.2019.2921208
5. Mordachev V. Estimation of Electromagnetic Background Intensity Created by Wireless Systems in Terms of the Prediction of Area Traffic Capacity // 2019 International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMC EUROPE. – Barcelona, Spain, September 2–6, 2019. – P. 82–87. DOI: 10.1109/EMCEurope.2019.8871529
6. Маслов М.Ю., Сподобаев Ю.М., Сподобаев М.Ю. Электромагнитная безопасность: критические характеристики сетей 5G // *Электросвязь*. – 2019. – № 4. – С. 53–58.
7. IARC classifies radiofrequency electromagnetic fields as possibly carcinogenic to humans: Press release 208 [Электронный ресурс] // International Agency for Research on Cancer. – Lyon, France, May, 2011. – URL: https://www.iarc.who.int/wp-content/uploads/2018/07/pr208_E.pdf (дата обращения: 25.05.2024).
8. IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans Non-ionizing radiation, Part 2: Radiofrequency electromagnetic fields // *IARC Monogr. Eval. Carcinog. Risks Hum.* – 2013. – Vol. 102, Pt 2. – P. 1–460.
9. National Toxicology Program. Toxicology and carcinogenesis studies in Sprague Dawley (Hsd: Sprague Dawley SD) rats exposed to whole-body radio frequency radiation at a frequency (900 MHz) and modulations (GSM and CDMA) used by cell phones // *Natl Toxicol. Program Tech. Rep.* – 2018. – № 595. – P. NTP-TR-595. DOI: 10.22427/NTP-TR-595
10. National Toxicology Program. Toxicology and carcinogenesis studies in B6C3F1/N mice exposed to whole-body radio frequency radiation at a frequency (1,900 MHz) and modulations (GSM and CDMA) used by cell phones // *Natl Toxicol. Program Tech. Rep.* – 2018. – № 596. – P. NTP-TR-596. DOI: 10.22427/NTP-TR-596
11. Report of final results regarding brain and heart tumors in Sprague-Dawley rats exposed from prenatal life until natural death to mobile phone radiofrequency field representative of a 1.8 GHz GSM base station environmental emission / L. Falcioni, L. Bua, E. Tibaldi, M. Lauriola, L. De Angelis, F. Gnudi, D. Mandrioli, M. Manservigi [et al.] // *Environ. Res.* – 2018. – Vol. 165. – P. 496–503. DOI: 10.1016/j.envres.2018.01.037
12. Study on potential effects of “902-MHz GSM-type wireless communication signals” on DMBA-induced mammary tumours in Sprague-Dawley rats / R. Hruby, G. Neubauer, N. Kuster, M. Frauscher // *Mutat. Res.* – 2008. – Vol. 649, № 1–2. – P. 34–44. DOI: 10.1016/j.mrgentox.2007.07.016
13. Skin heating effects of millimeter-wave irradiation-thermal modeling results / D.A. Nelson, M.T. Nelson, T.J. Walters, P.A. Mason // *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* – 2000. – Vol. 48, № 11. – P. 2111–2120. DOI: 10.1016/10.1109/22.884202
14. Roelands R. Cellular phones and the skin // *Dermatology*. – 2003. – Vol. 207, № 1. – P. 3–5. DOI: 10.1159/000070932
15. Elder J. Ocular effects of radiofrequency energy // *Bioelectromagnetics*. – 2003. – Suppl. 6. – P. S148–S161. DOI: 10.1002/bem.10117
16. Effects of cell phone radiofrequency signal exposure on brain glucose metabolism / N.D. Volkow, D. Tomasi, G.-J. Wang, P. Vaska, J.S. Fowler, F. Telang, D. Alexoff, J. Logan, C. Wong // *JAMA*. – 2011. – Vol. 305, № 8. – P. 808–813. DOI: 10.1001/jama.2011.186
17. Effect of radiofrequency radiation on reproductive health / R. Singh, R. Nath, A.K. Mathur, R.S. Sharma // *Indian J. Med. Res.* – 2018. – Vol. 148, Suppl. 1. – P. S92–S99. DOI: 10.4103/ijmr.IJMR_1056_18
18. Effects of electromagnetic radiation from a cellular phone on human sperm motility: an in vitro study / O. Eroglu, E. Oztas, I. Yildirim, T. Kir, E. Aydur, G. Komesli, H.C. Irkilata, M.K. Irmak, A.F. Peker // *Arch. Med. Res.* – 2006. – Vol. 37, № 7. – P. 840–843. DOI: 10.1016/j.arcmed.2006.05.003
19. Effects of cellular phone emissions on sperm motility in rats / J.-G. Yan, M. Agresti, T. Bruce, Y.H. Yan, A. Granlund, H.S. Matloub // *Fertil. Steril.* – 2007. – Vol. 88, № 4. – P. 957–964. DOI: 10.1016/j.fertnstert.2006.12.022
20. Изучение реакций мозга человека на электромагнитные поля нетепловой интенсивности / С.Н. Лукьянова, Н.И. Карпикова, Ю.Г. Григорьев, И.А. Веселовский // *Гигиена и санитария*. – 2017. – Т. 96, № 9. – С. 848–854. DOI: 10.18821/0016-9900-2017-96-9-848-854

21. Jakusova V., Hamza Sladicekova K. Electromagnetic Fields as a Health Risk Factor // *Clinical Social Work and Health Intervention*. – 2022. – Vol. 13, № 6. – P. 49–57.
22. Хорсева Н.И., Григорьев П.Е. Электромагнитные поля сотовой связи как фактор риска для здоровья детей и подростков (обзор) // *Анализ риска здоровью*. – 2023. – № 2. – С. 186–193. DOI: 10.21668/health.risk/2023.2.18
23. Electromagnetic hypersensitivity [Электронный ресурс] // WHO. – 2005. – URL: <https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/radiation-and-health/non-ionizing/hypersensitivity> (дата обращения: 24.05.2024).
24. Rubin G.J., Munshi J.D., Wessely S. Electromagnetic hypersensitivity: a systematic review of provocation studies // *Psychosom. Med.* – 2005. – Vol. 67, № 2. – P. 224–232. DOI: 10.1097/01.psy.0000155664.13300.64
25. The effects of radiofrequency electromagnetic fields exposure on human self-reported symptoms: A systematic review of human experimental studies / X. Bosch-Capblanch, E. Esu, C.M. Oringanje, S. Dongus, H. Jalilian, J. Eysers, C. Auer, M. Meremikwu, M. Rössli // *Environ. Int.* – 2024. – Vol. 187. – P. 108612. DOI: 10.1016/j.envint.2024.108612
26. Radiation: Electromagnetic fields [Электронный ресурс] // WHO. – 2016. – URL: <https://www.who.int/peh-emf/about/WhatisEMF/en/index1.html> (дата обращения: 23.05.2020).
27. Electromagnetic fields and public health [Электронный ресурс] // WHO. – URL: <https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/radiation-and-health/non-ionizing/emf> (дата обращения: 23.05.2020).
28. Lack of teratogenicity after combined exposure of pregnant mice to CDMA and WCDMA radiofrequency electromagnetic fields / H.-J. Lee, J.-S. Lee, J.-K. Pack, H.-D. Choi, N. Kim, S.-H. Kim, Y.-S. Lee // *J. Radiat. Res.* – 2009. – Vol. 172, № 5. – P. 648–652. DOI: 10.1667/RR1771.1
29. Hussein S., El-Saba A.-A., Galal M.K. Biochemical and histological studies on adverse effects of mobile phone radiation on rat's brain // *J. Chem. Neuroanat.* – 2016. – Vol. 78. – P. 10–19. DOI: 10.1016/j.jchemneu.2016.07.009
30. Long-term study on the effects of housing C57BL/6Ncrl mice in cages equipped with wireless technology generating extremely low-intensity electromagnetic fields / C. Recordati, M.D. Maglie, G. Marsella, G. Milite, A. Rigamonti, S. Paltrinieri, E. Scanziani // *Toxicol. Pathol.* – 2019. – Vol. 47, № 5. – P. 598–611. DOI: 10.1177/0192623319852353
31. Effect of cell phone radiation on neutrophil of mice / P. Yinhuai, G. Hui, L. Lin, A. Xin, T. Qinyou // *Int. J. Radiat. Biol.* – 2019. – Vol. 95, № 8. – P. 1178–1184. DOI: 10.1080/09553002.2019.1607605
32. Lin J.C. Carcinogenic Effect of Wireless Communication Radiation in Rodents // In book series: *Advances in Electromagnetic Fields in Living Systems*. – 2009. – Vol. 5. – P. 35–82. DOI: 10.1007/978-0-387-92736-7_2
33. Яргин С.В. О биологическом действии электромагнитного излучения радиочастотного диапазона // *Сибирский научный медицинский журнал*. – 2019. – Т. 39, № 5. – С. 52–61. DOI: 10.15372/SSMJ20190506
34. Slesin L. Comments on “Extremely low frequency electric fields and cancer: assessing the evidence” by Kheifets et al. // *Bioelectromagnetics*. – 2010. – Vol. 31, № 2. – P. 102–103. DOI: 10.1002/bem.20558
35. Huff J., Jacobson M.F., Davis D.L. The limits of two-year bioassay exposure regimens for identifying chemical carcinogens // *Environ. Health Perspect.* – 2008. – Vol. 116, № 11. – P. 1439–1442. DOI: 10.1289/ehp.10716
36. Specifications for the conduct of studies to evaluate the toxic and carcinogenic potential of chemical, biological, and physical agents in laboratory animals for the national toxicology program. – NTP Research Triangle Park, NC, 2011.
37. Scientific considerations for evaluating cancer bioassays conducted by the Ramazzini institute / J.S. Gift, J.C. Caldwell, J. Jinot, M.V. Evans, I. Cote, J.J. Vandenberg // *Environ. Health Perspect.* – 2013. – Vol. 121, № 11–12. – P. 1253–1263. DOI: 10.1289/ehp.1306661
38. Test no. 453: Combined chronic toxicity/carcinogenicity studies [Электронный ресурс] // OECD. – 2018. – URL: <https://tinyurl.com/y86zk5kj> (дата обращения: 27.05.2024).
39. Inhalation toxicity studies: OECD guidelines in relation to REACH and scientific developments / J.H.E. Arts, H. Muijsers, D. Jonker, J.J.M. van de Sandt, P.M.J. Bos, V.J. Feron // *Exp. Toxicol. Pathol.* – 2008. – Vol. 60, № 2–3. – P. 125–133. DOI: 10.1016/j.etp.2008.01.011
40. The contribution of in vivo mammalian studies to the knowledge of adverse effects of radiofrequency radiation on human health / A. Vornoli, L. Falcioni, D. Mandrioli, L. Bua, F. Belpoggi // *Int. J. Environ. Res. Public Health*. – 2019. – Vol. 16, № 18. – P. 3379. DOI: 10.3390/ijerph16183379
41. Evaluation of the genotoxicity of cell phone radiofrequency radiation in male and female rats and mice following sub-chronic exposure / S.L. Smith-Roe, M.E. Wyde, M.D. Stout, J.W. Winters, C.A. Hobbs, K.G. Shepard, A.S. Green, G.E. Kissling [et al.] // *Environ. Mol. Mutagen.* – 2020. – Vol. 61, № 2. – P. 276–290. DOI: 10.1002/em.22343
42. Location of gliomas in relation to mobile telephone use: a case-case and case-specular analysis / S. Larjavaara, J. Schuz, A. Swerdlow, M. Feychting, C. Johansen, S. Lagorio, T. Tynes, L. Klaeboe [et al.] // *Am. J. Epidemiol.* – 2011. – Vol. 174, № 1. – P. 2–11. DOI: 10.1093/aje/kwr071
43. ICNIRP Note on Recent Animal Carcinogenesis Studies [Электронный ресурс] // ICNIRP. – 2018. – URL: <https://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPnote2018.pdf> (дата обращения: 09.04.2024).
44. Comparison of personal radio frequency electromagnetic field exposure in different urban areas across Europe / W. Joseph, P. Frei, M. Roosli, G. Thuróczy, P. Gajsek, T. Trcek, J. Bolte, G. Vermeeren [et al.] // *Environ. Res.* – 2010. – Vol. 110, № 7. – P. 658–663. DOI: 10.1016/j.envres.2010.06.009
45. EMF monitoring—concepts, activities, gaps and options / G. Durrenberger, J. Frohlich, M. Roosli, M.-O. Mattsson // *Int. J. Environ. Res. Public Health*. – 2014. – Vol. 11, № 9. – P. 9460–9479. DOI: 10.3390/ijerph110909460
46. Not in my neighborhood: A user equipment perspective of cellular planning under restrictive EMF limits / L. Chiaraviglio, J. Galan-Jimenez, M. Fiore, N. Blefari-Melazzi // *IEEE Access*. – 2019. – Vol. 7. – P. 6161–6185. DOI: 10.1109/access.2018.2888916
47. Is it safe living in the vicinity of cellular towers? Analysis of long-term human EMF exposure at population scale / L. Chiaraviglio, C. Di Paolo, G. Bianchi, N. Blefari-Melazzi // 2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring). – Antwerp, Belgium, May, 2020. DOI: 10.1109/vtc2020-spring48590.2020.9129577

48. Radio frequency electromagnetic fields exposure assessment in indoor environments: A review / E. Chiaramello, M. Bonato, S. Fiocchi, G. Tognola, M. Parazzini, P. Ravazzani, J. Wiart // *Int. J. Environ. Res. Public Health*. – 2019. – Vol. 16, № 6. – P. 955. DOI: 10.3390/ijerph16060955
49. Cell phone towers [Электронный ресурс] // American Cancer Society. – 2020. – URL: <https://www.cancer.org/cancer/causes/radiation-exposure/cellular-phone-towers.html> (дата обращения: 16.03.2024).
50. Mobile phone base stations and early childhood cancers: case-control study / P. Elliott, M.B. Toledano, J. Bennett, L. Beale, K. de Hoogh, N. Best, D.J. Briggs // *BMJ*. – 2010. – Vol. 340. – P. c3077. DOI: 10.1136/bmj.c3077
51. Jazyah Y.H. Thermal and Nonthermal Effects of 5 G Radio-Waves on Human's Tissue // *Scientific World Journal*. – 2024. – Vol. 2024. – P. 3801604. DOI: 10.1155/2024/3801604
52. Особенности архитектуры сетей 5G. Вероятностное прогнозирование воздействия электромагнитных полей радиочастот на население (обзор литературы) / В.Н. Никитина, Н.И. Калинина, Г.Г. Ляшко, Е.Н. Дубровская, В.П. Плеханов // *Гигиена и санитария*. – 2021. – Т. 100, № 8. – С. 792–796. DOI: 10.47470/0016-9900-2021-100-8-792-796
53. INTERPHONE Study Group. Brain tumour risk in relation to mobile telephone use: results of the INTERPHONE international case-control study // *Int. J. Epidemiol.* – 2010. – Vol. 39, № 3. – P. 675–694. DOI: 10.1093/ije/dyq079
54. INTERPHONE Study Group. Acoustic neuroma risk in relation to mobile telephone use: results of the interphone international case-control study // *Cancer Epidemiol.* – 2011. – Vol. 35, № 5. – P. 453–464. DOI: 10.1016/j.canep.2011.05.012
55. Use of mobile phones and risk of brain tumours: update of Danish cohort study / P. Frei, A.H. Poulsen, C. Johansen, J.H. Olsen, M. Steding-Jessen, J. Schuz // *BMJ*. – 2011. – Vol. 343. – P. d6387. DOI: 10.1136/bmj.d6387
56. Mobile phone use and risk of brain neoplasms and other cancers: prospective study / V.S. Benson, K. Pirie, J. Schuz, G.K. Reeves, V. Beral, J. Green, Million Women Study Collaborators // *Int. J. Epidemiol.* – 2013. – Vol. 42, № 3. – P. 792–802. DOI: 10.1093/ije/dyt072
57. Factors affecting risk perception of electromagnetic waves from 5G network base stations risk / T.H. Koh, J.W. Choi, M. Seo, H.-D. Choi, K. Kim // *Bioelectromagnetics*. – 2020. – Vol. 41, № 7. – P. 491–499. DOI: 10.1002/bem.22290
58. Freudenstein F., Wiedemann P.M., Brown T.W.C. Exposure perception as a key indicator of risk perception and acceptance of sources of radio frequency electromagnetic fields // *J. Env. Publ. Health*. – 2015. – P. 198272. DOI: 10.1155/2015/198272
59. Risk perception and public concerns of electromagnetic waves from cellular phones in Korea / K. Kim, H.-J. Kim, D.J. Song, Y.M. Cho, J.W. Choi // *Bioelectromagnetics*. – 2014. – Vol. 35, № 4. – P. 235–244. DOI: 10.1002/bem.21836
60. Morgan J., Reidy J., Probst T. Age group differences in household accident risk perceptions and intentions to reduce hazards // *Int. J. Environ. Res. Public Health*. – 2019. – Vol. 16, № 12. – P. 2237. DOI: 10.3390/ijerph16122237
61. How do disaster characteristics influence risk perception? / M.-C. Ho, D. Shaw, S. Lin, Y.-C. Chiu // *Risk Anal.* – 2008. – Vol. 28, № 3. – P. 635–643. DOI: 10.1111/j.1539-6924.2008.01040.x
62. Cousin M.-E., Siegrist M. Cell phones and health concerns: Impact of knowledge and voluntary precautionary recommendations // *Risk Anal.* – 2011. – Vol. 31, № 2. – P. 301–311. DOI: 10.1111/j.1539-6924.2010.01498.x
63. Claassen L., van Dongen D., Timmermans D.R.M. Improving lay understanding of exposure to electromagnetic fields; the effect of information on perception of and responses to risk // *J. Risk Res.* – 2017. – Vol. 20, № 9. – P. 1115–1131. DOI: 10.1080/13669877.2015.1031268
64. Перов С.Ю., Белая О.В., Рубцова Н.Б. Перспективы совершенствования подходов к контролю электромагнитных полей радиочастотного диапазона при внедрении технологий беспроводной связи пятого поколения // *Медицина труда и промышленная экология*. – 2022. – Т. 62, № 6. – С. 388–396. DOI: 10.31089/1026-9428-2022-62-6-388-396
65. Pawlak R., Krawiec P., Żurek J. On measuring electromagnetic fields in 5G technology // *IEEE Access*. – 2019. – Vol. 7. – P. 29826–29835. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2902481
66. Харченко С., Жижин Н. Пятое поколение сетей беспроводной связи (5G): проблемы и риски // *Экология и промышленность России*. – 2020. – Т. 24, № 12. – С. 58–65. DOI: 10.18412/1816-0395-2020-12-58-65
67. Pantelić S., Vulević B., Milić S. Fuzzy Decision Algorithm for Health Impact Assessment in a 5G Environment // *Appl. Sci.* – 2023. – Vol. 13, № 11. – P. 6439. DOI: 10.3390/app13116439
68. Markovic V. 5G EMF Exposure: Overview of Recent Research and Safety Standard Updates // 2021 15th International Conference on Advanced Technologies, Systems and Services in Telecommunications (TELSIKS). – 2021. – P. 359–365.
69. Гигиеническая оценка влияния сетей сотовой связи 5G/IMT-2020 на здоровье населения / А.М. Егорова, Л.А. Луценко, А.В. Сухова, В.В. Коллока, Р.В. Турдыев // *Гигиена и санитария*. – 2021. – Т. 100, № 9. – С. 929–932. DOI: 10.47470/0016-9900-2021-100-9-929-932
70. Health Effects of 5G Base Station Exposure: A Systematic Review / T. Sofri, A. Rahim, H. Abdulmalek, M. Rani, K.A. Omar, M.H. Yasin, M. Jusoh, P.J. Soh // *IEEE Access*. – 2022. – Vol. 10. – P. 41639–41656.
71. Frank J.W. Electromagnetic fields, 5G and health: what about the precautionary principle? // *J. Epidemiol. Community Health*. – 2021. – Vol. 75, № 6. – P. 562–566.
72. Канцуров А. ГКРЧ-2020: 5G, спутниковый интернет IoT // *Электросвязь*. – 2020. – № 12. – С. 4–8.
73. 5G mobile networks and health – a state-of-the-science review of the research into low-level RF fields above 6 GHz / K. Karipidis, R. Mate, D. Urban, R. Tinker, A. Wood // *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.* – 2021. – Vol. 31, № 4. – P. 585–605. DOI: 10.1038/s41370-021-00297-6

Гошин М.Е., Гарин Э.В. К оценке рисков для здоровья при внедрении сетей 5G // *Анализ риска здоровью*. – 2025. – № 1. – С. 144–158. DOI: 10.21668/health.risk/2025.1.14

UDC 613.647: 537.87

DOI: 10.21668/health.risk/2025.1.14.eng

Read
online

Research article

ON ASSESSING HEALTH RISKS RELATED TO IMPLEMENTATION OF 5G NETWORKS

M.E. Goshin¹, E.V. Garin²¹F.F. Erisman Federal Research Center of Hygiene, 2 Semashko St., Mytishchi, 141014, Russian Federation²Papanin Institute for Biology of Inland Waters Russian Academy of Sciences, 109 Borok settlement, 152742, Russian Federation

This review covers publications with their focus on analyzing methodological approaches to assessing health risks that might occur due to implementation and development of 5G communication networks. Publications were sought in such databases as Pubmed, Scopus, Web of Science, MedLine, Global Health, and Russian Science Citation Index.

Results obtained by examining exposure to electromagnetic radiofrequency radiation in animal studies have revealed carcinogenic effects in some cases. However, population studies involving large samples of humans who are active mobile communication users have not established any significant effects that may cause health impairments. At the same time, some peculiar features of the 5G technology should be considered including extremely high network density, new scenarios of locating base stations, multiplicity of 5G-devices, networks relying on multiple different ranges (including use of decimeter-, centimeter- and millimeter-long waves). All this, together with use of signals having a great range width and new modulation types with their biological effects still remaining unknown, makes it possible to assume that an electromagnetic background in residential areas will undergo significant transformation involving growing intensity of modulated wideband electromagnetic radiation with a complex spectral structure. Conducted social surveys confirm people's concerns about health effects produced by 5G technologies. Accordingly, it is necessary to develop new methodological approaches to accomplishing investigations aimed at assessing health risks associated with implementation of such networks. This research work should consider technological peculiarities of 5G networks; results of such studies should give grounds for developing new safe standards and implementing relevant activities aimed at providing electromagnetic safety of the country population.

Keywords: electromagnetic safety, 5G networks, literature review, electromagnetic radiofrequency radiation, animal studies, population studies, sociological surveys, perception of risks associated with electromagnetic radiation.

References

1. Borodin A.S., Kucheryavy A.E. Fifth generation networks as a base to the digital economy. *Elektrosvyaz'*, 2017, no. 5, pp. 45–49 (in Russian).
2. Volkov A.N., Kucheryavy A.E. Identification of service traffic in IMT2020 and subsequent generation communication networks based on flow metadata and machine learning algorithms. *Elektrosvyaz'*, 2020, no. 11, pp. 21–28. DOI: 10.34832/ELSV.2020.12.11.001 (in Russian).
3. Rauniyar A., Engelstad P., Østerbø O.N. RF energy harvesting and information transmission based on NOMA for wireless powered IoT relay systems. *Sensors (Basel)*, 2018, vol. 18, no. 10, pp. 3254. DOI: 10.3390/s18103254
4. Zhang Z., Xiao Y., Ma Z., Xiao M., Ding Z., Lei X., Karagiannidis G.K., Fan P. 6G Wireless Networks: Vision, Requirements, Architecture, and Key Technologies. *IEEE VT Magazine*, 2019, vol. 14, no. 3, pp. 28–41. DOI: 10.1109/MVT.2019.2921208
5. Mordachev V. Estimation of Electromagnetic Background Intensity Created by Wireless Systems in Terms of the Prediction of Area Traffic Capacity. *2019 International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMC EUROPE*, Barcelona, Spain, September 2–6, 2019, pp. 82–87. DOI: 10.1109/EMCEurope.2019.8871529
6. Maslov M.Yu., Spodobaev Yu.M., Spodobaev M.Yu. Electromagnetic safety: critical features of 5G networks. *Elektrosvyaz'*, 2019, no. 4, pp. 53–58 (in Russian).

© Goshin M.E., Garin E.V., 2025

Mikhail E. Goshin – Candidate of Chemical Sciences, Senior Researcher at the Department of Public Health Risk Analysis (e-mail: Goshin.ME@fncg.ru; tel.: +7 (916) 889-71-74; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7251-3938>).

Eduard V. Garin – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher at the Laboratory of Higher Aquatic Vegetation (e-mail: garinev@mai.ru; tel.: +7 (901) 050-32-93; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0199-9405>).

7. IARC classifies radiofrequency electromagnetic fields as possibly carcinogenic to humans: Press release 208. *International Agency for Research on Cancer*, Lyon, France, May, 2011. Available at: https://www.iarc.who.int/wp-content/uploads/2018/07/pr208_E.pdf (May 25, 2024).
8. IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans Non-ionizing radiation, Part 2: Radiofrequency electromagnetic fields. *IARC Monogr. Eval. Carcinog. Risks Hum.*, 2013, vol. 102, pt 2, pp. 1–460.
9. National Toxicology Program. Toxicology and carcinogenesis studies in Sprague Dawley (Hsd: Sprague Dawley SD) rats exposed to whole-body radio frequency radiation at a frequency (900 MHz) and modulations (GSM and CDMA) used by cell phones. *Natl Toxicol. Program Tech. Rep.*, 2018, no. 595, pp. NTP-TR-595. DOI: 10.22427/NTP-TR-595
10. National Toxicology Program. Toxicology and carcinogenesis studies in B6C3F1/N mice exposed to whole-body radio frequency radiation at a frequency (1,900 MHz) and modulations (GSM and CDMA) used by cell phones. *Natl Toxicol. Program Tech. Rep.*, 2018, no. 596, pp. NTP-TR-596. DOI: 10.22427/NTP-TR-596
11. Falcioni L., Bua L., Tibaldi E., Lauriola M., De Angelis L., Gnudi F., Mandrioli D., Manservigi M. [et al.]. Report of final results regarding brain and heart tumors in Sprague-Dawley rats exposed from prenatal life until natural death to mobile phone radiofrequency field representative of a 1.8 GHz GSM base station environmental emission. *Environ. Res.*, 2018, vol. 165, pp. 496–503. DOI: 10.1016/j.envres.2018.01.037
12. Hruby R., Neubauer G., Kuster N., Frauscher M. Study on potential effects of “902-MHz GSM-type wireless communication signals” on DMBA-induced mammary tumours in Sprague–Dawley rats. *Mutat. Res.*, 2008, vol. 649, no. 1–2, pp. 34–44. DOI: 10.1016/j.mrgentox.2007.07.016
13. Nelson D.A., Nelson M.T., Walters T.J., Mason P.A. Skin heating effects of millimeter-wave irradiation-thermal modeling results. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, 2000, vol. 48, no. 11, pp. 2111–2120. DOI: 10.1016/10.1109/22.884202
14. Roelands R. Cellular phones and the skin. *Dermatology*, 2003, vol. 207, no. 1, pp. 3–5. DOI: 10.1159/000070932
15. Elder J. Ocular effects of radiofrequency energy. *Bioelectromagnetics*, 2003, suppl. 6, pp. S148–S161. DOI: 10.1002/bem.10117
16. Volkow N.D., Tomasi D., Wang G.-J., Vaska P., Fowler J.S., Telang F., Alexoff D., Logan J., Wong C. Effects of cell phone radiofrequency signal exposure on brain glucose metabolism. *JAMA*, 2011, vol. 305, no. 8, pp. 808–813. DOI: 10.1001/jama.2011.186
17. Singh R., Nath R., Mathur A.K., Sharma R.S. Effect of radiofrequency radiation on reproductive health. *Indian J. Med. Res.*, 2018, vol. 148, suppl. 1, pp. S92–S99. DOI: 10.4103/ijmr.IJMR_1056_18
18. Eroglu O., Oztas E., Yildirim I., Kir T., Aydur E., Komesli G., Irkilata H.C., Irmak M.K., Peker A.F. Effects of electromagnetic radiation from a cellular phone on human sperm motility: an in vitro study. *Arch. Med. Res.*, 2006, vol. 37, no. 7, pp. 840–843. DOI: 10.1016/j.arcmed.2006.05.003
19. Yan J.-G., Agresti M., Bruce T., Yan Y.H., Granlund A., Matloub H.S. Effects of cellular phone emissions on sperm motility in rats. *Fertil. Steril.*, 2007, vol. 88, no. 4, pp. 957–964. DOI: 10.1016/j.fertnstert.2006.12.022
20. Lukyanova S.N., Karpikova N.I., Grigoryev Yu.G., Veselovskiy I.A. The study of responses of the human brain to electromagnetic field of non-thermal intensity. *Gigiena i sanitariya*, 2017, vol. 96, no. 9, pp. 848–854. DOI: 10.18821/0016-9900-2017-96-9-848-854 (in Russian).
21. Jakusova V., Hamza Sladicekova K. Electromagnetic Fields as a Health Risk Factor. *Clinical Social Work and Health Intervention*, 2022, vol. 13, no. 6, pp. 49–57.
22. Khorseva N.I., Grigoriev P.E. Electromagnetic fields of cellular communication as a health risk factor for children and adolescents (review). *Health Risk Analysis*, 2023, no. 2, pp. 186–193. DOI: 10.21668/health.risk/2023.2.18.eng
23. Electromagnetic hypersensitivity. *WHO*, 2005. Available at: <https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/radiation-and-health/non-ionizing/hypersensitivity> (May 24, 2024).
24. Rubin G.J., Munshi J.D., Wessely S. Electromagnetic hypersensitivity: a systematic review of provocation studies. *Psychosom. Med.*, 2005, vol. 67, no. 2, pp. 224–232. DOI: 10.1097/01.psy.0000155664.13300.64
25. Bosch-Capblanch X., Esu E., Oranganje C.M., Dongus S., Jalilian H., Eyers J., Auer C., Meremikwu M., Rössli M. The effects of radiofrequency electromagnetic fields exposure on human self-reported symptoms: A systematic review of human experimental studies. *Environ. Int.*, 2024, vol. 187, pp. 108612. DOI: 10.1016/j.envint.2024.108612
26. Radiation: Electromagnetic fields. *WHO*, 2016. Available at: <https://www.who.int/peh-emf/about/WhatisEMF/en/index1.html> (May 23, 2020).
27. Electromagnetic fields and public health. *WHO*. Available at <https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/radiation-and-health/non-ionizing/emf> (May 23, 2020).
28. Lee H.-J., Lee J.-S., Pack J.-K., Choi H.-D., Kim N., Kim S.-H., Lee Y.-S. Lack of teratogenicity after combined exposure of pregnant mice to CDMA and WCDMA radiofrequency electromagnetic fields. *J. Radiat. Res.*, 2009, vol. 172, no. 5, pp. 648–652. DOI: 10.1667/RR1771.1
29. Hussein S., El-Saba A.-A., Galal M.K. Biochemical and histological studies on adverse effects of mobile phone radiation on rat's brain. *J. Chem. Neuroanat.*, 2016, vol. 78, pp. 10–19. DOI: 10.1016/j.jchemneu.2016.07.009
30. Recordati C., Maglie M.D., Marsella G., Milite G., Rigamonti A., Paltrinieri S., Scanziani E. Long-term study on the effects of housing C57BL/6NCRl mice in cages equipped with wireless technology generating extremely low-intensity electromagnetic fields. *Toxicol. Pathol.*, 2019, vol. 47, no. 5, pp. 598–611. DOI: 10.1177/0192623319852353
31. Yinhui P., Hui G., Lin L., Xin A., Qinyou T. Effect of cell phone radiation on neutrophil of mice. *Int. J. Radiat. Biol.*, 2019, vol. 95, no. 8, pp. 1178–1184. DOI: 10.1080/09553002.2019.1607605
32. Lin J.C. Carcinogenic Effect of Wireless Communication Radiation in Rodents. In book series: *Advances in Electromagnetic Fields in Living Systems*, 2009, vol. 5, pp. 35–82. DOI: 10.1007/978-0-387-92736-7_2
33. Jargin S.V. On the biological effects of radiofrequency electromagnetic fields. *Sibirskii nauchnyi meditsinskii zhurnal*, 2019, vol. 39, no. 5, pp. 52–61. DOI: 10.15372/SSMJ20190506 (in Russian).

34. Slesin L. Comments on “Extremely low frequency electric fields and cancer: assessing the evidence” by Kheifets et al. *Bioelectromagnetics*, 2010, vol. 31, no. 2, pp. 102–103. DOI: 10.1002/bem.20558
35. Huff J., Jacobson M.F., Davis D.L. The limits of two-year bioassay exposure regimens for identifying chemical carcinogens. *Environ. Health Perspect.*, 2008, vol. 116, no. 11, pp. 1439–1442. DOI: 10.1289/ehp.10716
36. Specifications for the conduct of studies to evaluate the toxic and carcinogenic potential of chemical, biological, and physical agents in laboratory animals for the national toxicology program. NTP Research Triangle Park, NC, 2011.
37. Gift J.S., Caldwell J.C., Jinot J., Evans M.V., Cote I., Vandenberg J.J. Scientific considerations for evaluating cancer bioassays conducted by the Ramazzini institute. *Environ. Health Perspect.*, 2013, vol. 121, no. 11–12, pp. 1253–1263. DOI: 10.1289/ehp.1306661
38. Test no. 453: Combined chronic toxicity/carcinogenicity studies. *OECD*, 2018. Available at: <https://tinyurl.com/y86zk5kj> (May 27, 2024).
39. Arts J.H.E., Muijsers H., Jonker D., van de Sandt J.J.M., Bos P.M.J., Feron V.J. Inhalation toxicity studies: OECD guidelines in relation to REACH and scientific developments. *Exp. Toxicol. Pathol.*, 2008, vol. 60, no. 2–3, pp. 125–133. DOI: 10.1016/j.etp.2008.01.011
40. Vornoli A., Falcioni L., Mandrioli D., Bua L., Belpoggi F. The contribution of in vivo mammalian studies to the knowledge of adverse effects of radiofrequency radiation on human health. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2019, vol. 16, no. 18, pp. 3379. DOI: 10.3390/ijerph16183379
41. Smith-Roe S.L., Wyde M.E., Stout M.D., Winters J.W., Hobbs C.A., Shepard K.G., Green A.S., Kissling G.E. [et al.]. Evaluation of the genotoxicity of cell phone radiofrequency radiation in male and female rats and mice following subchronic exposure. *Environ. Mol. Mutagen.*, 2020, vol. 61, no. 2, pp. 276–290. DOI: 10.1002/em.22343
42. Larjavaara S., Schuz J., Swerdlow A., Feychting M., Johansen C., Lagorio S., Tynes T., Klaeboe L. [et al.]. Location of gliomas in relation to mobile telephone use: a case-case and casespecular analysis. *Am. J. Epidemiol.*, 2011, vol. 174, no. 1, pp. 2–11. DOI: 10.1093/aje/kwr071
43. ICNIRP Note on Recent Animal Carcinogenesis Studies. *ICNIRP*, 2018. Available at: <https://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPnote2018.pdf> (April 09, 2024).
44. Joseph W., Frei P., Roosli M., Thuróczy G., Gajsek P., Trcek T., Bolte J., Vermeeren G. [et al.]. Comparison of personal radio frequency electromagnetic field exposure in different urban areas across Europe. *Environ. Res.*, 2010, vol. 110, no. 7, pp. 658–663. DOI: 10.1016/j.envres.2010.06.009
45. Durrenberger G., Frohlich J., Roosli M., Mattsson M.-O. EMF monitoring—concepts, activities, gaps and options. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2014, vol. 11, no. 9, pp. 9460–9479. DOI: 10.3390/ijerph110909460
46. Chiaraviglio L., Galan-Jimenez J., Fiore M., Blefari-Melazzi N. Not in my neighborhood: A user equipment perspective of cellular planning under restrictive EMF limits. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 6161–6185. DOI: 10.1109/access.2018.2888916
47. Chiaraviglio L., Di Paolo C., Bianchi G., Blefari-Melazzi N. Is it safe living in the vicinity of cellular towers? Analysis of long-term human EMF exposure at population scale. *2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring)*, Antwerp, Belgium, May, 2020. DOI: 10.1109/vtc2020-spring48590.2020.9129577
48. Chiamello E., Bonato M., Fiocchi S., Tognola G., Parazzini M., Ravazzani P., Wiart J. Radio frequency electromagnetic fields exposure assessment in indoor environments: A review. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2019, vol. 16, no. 6, pp. 955. DOI: 10.3390/ijerph16060955
49. Cell phone towers. *American Cancer Society*, 2020. Available at: <https://www.cancer.org/cancer/cancer-causes/radiation-exposure/cellular-phone-towers.html> (March 16, 2024).
50. Elliott P., Toledano M.B., Bennett J., Beale L., de Hoogh K., Best N., Briggs D.J. Mobile phone base stations and early childhood cancers: case-control study. *BMJ*, 2010, vol. 340, pp. c3077. DOI: 10.1136/bmj.c3077
51. Jazyah Y.H. Thermal and Nonthermal Effects of 5 G Radio-Waves on Human's Tissue. *Scientific World Journal*, 2024, vol. 2024, pp. 3801604. DOI: 10.1155/2024/3801604
52. Nikitina V.N., Kalinina N.I., Lyashko G.G., Dubrovskaya E.N., Plekhanov V.P. Special features of the architecture of 5G networks. Probabilistic forecasting of the impact of electromagnetic fields of radio frequencies on the population (literature review). *Gigiena i sanitariya*, 2021, vol. 100, no. 8, pp. 792–796. DOI: 10.47470/0016-9900-2021-100-8-792-796 (in Russian).
53. INTERPHONE Study Group. Brain tumour risk in relation to mobile telephone use: results of the INTERPHONE international case-control study. *Int. J. Epidemiol.*, 2010, vol. 39, no. 3, pp. 675–694. DOI: 10.1093/ije/dyq079
54. INTERPHONE Study Group. Acoustic neuroma risk in relation to mobile telephone use: results of the interphone international case-control study. *Cancer Epidemiol.*, 2011, vol. 35, no. 5, pp. 453–464. DOI: 10.1016/j.canep.2011.05.012
55. Frei P., Poulsen A.H., Johansen C., Olsen J.H., Steding-Jessen M., Schuz J. Use of mobile phones and risk of brain tumours: update of Danish cohort study. *BMJ*, 2011, vol. 343, pp. d6387. DOI: 10.1136/bmj.d6387
56. Benson V.S., Pirie K., Schuz J., Reeves G.K., Beral V., Green J., Million Women Study Collaborators. Mobile phone use and risk of brain neoplasms and other cancers: prospective study. *Int. J. Epidemiol.*, 2013, vol. 42, no. 3, pp. 792–802. DOI: 10.1093/ije/dyt072
57. Koh T.H., Choi J.W., Seo M., Choi H.-D., Kim K. Factors affecting risk perception of electromagnetic waves from 5G network base stations risk. *Bioelectromagnetics*, 2020, vol. 41, no. 7, pp. 491–499. DOI: 10.1002/bem.22290
58. Freudenstein F., Wiedemann P.M., Brown T.W.C. Exposure perception as a key indicator of risk perception and acceptance of sources of radio frequency electromagnetic fields. *J. Env. Publ. Health*, 2015, pp. 198272. DOI: 10.1155/2015/198272
59. Kim K., Kim H.-J., Song D.J., Cho Y.M., Choi J.W. Risk perception and public concerns of electromagnetic waves from cellular phones in Korea. *Bioelectromagnetics*, 2014, vol. 35, no. 4, pp. 235–244. DOI: 10.1002/bem.21836

60. Morgan J., Reidy J., Probst T. Age group differences in household accident risk perceptions and intentions to reduce hazards. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2019, vol. 16, no. 12, pp. 2237. DOI: 10.3390/ijerph16122237
61. Ho M.-C., Shaw D., Lin S., Chiu Y.-C. How do disaster characteristics influence risk perception? *Risk Anal.*, 2008, vol. 28, no. 3, pp. 635–643. DOI: 10.1111/j.1539-6924.2008.01040.x
62. Cousin M.-E., Siegrist M. Cell phones and health concerns: Impact of knowledge and voluntary precautionary recommendations. *Risk Anal.*, 2011, vol. 31, no. 2, pp. 301–311. DOI: 10.1111/j.1539-6924.2010.01498.x
63. Claassen L., van Dongen D., Timmermans D.R.M. Improving lay understanding of exposure to electromagnetic fields; the effect of information on perception of and responses to risk. *J. Risk Res.*, 2017, vol. 20, no. 9, pp. 1115–1131. DOI: 10.1080/13669877.2015.1031268
64. Perov S.Yu., Belaya O.V., Rubtsova N.B. The prospects for radiofrequency electromagnetic fields control approaches improvement under 5G wireless communication technologies introduction. *Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya*, 2022, vol. 62, no. 6, pp. 388–396. DOI: 10.31089/1026-9428-2022-62-5-388-396 (in Russian).
65. Pawlak R., Krawiec P., Żurek J. On measuring electromagnetic fields in 5G technology. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 29826–29835. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2902481
66. Kharchenko S., Zhizhin N. Fifth Generation of Wireless Networks (5G): Problems and Risks. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*, 2020, vol. 24, no. 12, pp. 58–65. DOI: 10.18412/1816-0395-2020-12-58-65 (in Russian).
67. Pantelić S., Vulević B., Milić S. Fuzzy Decision Algorithm for Health Impact Assessment in a 5G Environment. *Appl. Sci.*, 2023, vol. 13, no. 11, pp. 6439. DOI: 10.3390/app13116439
68. Markovic V. 5G EMF Exposure: Overview of Recent Research and Safety Standard Updates. *2021 15th International Conference on Advanced Technologies, Systems and Services in Telecommunications (TELSIKS)*, 2021, pp. 359–365.
69. Egorova A.M., Lutsenko L.A., Sukhova A.V., Kolyuka V.V., Turdyev R.V. Hygienic assessment of the impact of 5G/IMT-2020 communication networks on public health (literature review). *Gigiena i sanitariya*, 2021, vol. 100, no. 9, pp. 929–932. DOI: 10.47470/0016-9900-2021-100-9-929-932 (in Russian).
70. Sofri T., Rahim A., Abdulmalek H., Rani M., Omar K.A., Yasin M.H., Jusoh M., Soh P.J. Health Effects of 5G Base Station Exposure: A Systematic Review. *IEEE Access*, 2022, vol. 10, pp. 41639–41656.
71. Frank J.W. Electromagnetic fields, 5G and health: what about the precautionary principle? *J. Epidemiol. Community Health*, 2021, vol. 75, no. 6, pp. 562–566.
72. Kantsurov A. GKRCh-2020: 5G, sputnikovyi internet IoT [GKRCh-2020: 5G, satellite Internet IoT]. *Elektrosvyaz'*, 2020, no. 12, pp. 4–8 (in Russian).
73. Karipidis K., Mate R., Urban D., Tinker R., Wood A. 5G mobile networks and health – a state-of-the-science review of the research into low-level RF fields above 6 GHz. *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.*, 2021, vol. 31, no. 4, pp. 585–605. DOI: 10.1038/s41370-021-00297-6

Goshin M.E., Garin E.V. On assessing health risks related to implementation of 5G networks. *Health Risk Analysis*, 2025, no. 1, pp. 144–158. DOI: 10.21668/health.risk/2025.1.14.eng

Получена: 05.11.2024

Одобрена: 17.02.2025

Принята к публикации: 17.03.2025