

Читать
онлайн
Read
online

Никитина В.Н., Дубровская Е.Н., Калинина Н.И.

Гигиенические проблемы применения терагерцевых электромагнитных излучений (обзор литературы)

ФБУН «Северо-Западный научный центр гигиены и общественного здоровья» Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 191036, Санкт-Петербург, Россия

РЕЗЮМЕ

Цель работы — обзор и анализ отечественных и зарубежных научных работ, систематизация области применения электромагнитных излучений (ЭМИ) терагерцевого диапазона и определение гигиенических проблем в области профилактики риска для здоровья при разработке и использовании современных радиоэлектронных средств.

Поиск литературы проведён по базам данных eLIBRARY, Web of Science, PubMed. Было проанализировано более 50 научных работ, из которых отобраны 36 источников, соответствующих цели исследования. Актуальными задачами являются прогноз параметров сложной электромагнитной обстановки на открытых территориях и внутри зданий при использовании стандартов мобильной связи 4; 5 и 6G, научное обоснование гигиенических нормативов комбинированного воздействия электромагнитного фактора, разработка методических подходов к определению уровней ЭМИ, создание отечественных селективных приборов — измерителей ЭМИ широкого спектра частот (радиочастотного и терагерцевого диапазонов).

Ключевые слова: электромагнитные излучения; терагерцевый диапазон; обзор; 6G

Для цитирования: Никитина В.Н., Дубровская Е.Н., Калинина Н.И. Гигиенические проблемы применения терагерцевых электромагнитных излучений (обзор литературы). *Гигиена и санитария*. 2024; 103(8): 822–826. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2024-103-8-822-826> <https://elibrary.ru/pknrjf>

Для корреспонденции: Никитина Валентина Николаевна, доктор мед. наук, зав. отделения изучения электромагнитных излучений отд. физических факторов ФБУН «СЗНЦ гигиены и общественного здоровья», 191036, Санкт-Петербург. E-mail: v.nikitina@s-znc.ru

Участие авторов: Никитина В.Н. — концепция и дизайн исследования; анализ данных, написание текста; Дубровская Е.Н. — сбор данных литературы, сбор материала и обработка данных, редактирование; Калинина Н.И. — сбор данных литературы, сбор материала и обработка данных, редактирование. Все соавторы — утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Поступила: 03.05.2024 / Поступила после доработки: 06.06.2024 / Принята к печати: 19.06.2024 / Опубликовано: 10.09.2024

Valentina N. Nikitina, Ekaterina N. Dubrovskaya, Nina I. Kalinina

Hygienic problems of using terahertz electromagnetic radiation (literature review)

North-West Public Health Research Center, Saint Petersburg, 191036, Russian Federation

ABSTRACT

The purpose of the work is to review and analyze domestic and foreign scientific works, systematize the scope of application of terahertz electromagnetic radiation (EMR) to determine hygienic problems in the field of health risk prevention in the development and use of modern radioelectronic devices.

The literature search was conducted on the databases: eLibrary, Web of Science, and fifty. During the study of scientific literature, from over fifty works were analyzed, there 36 sources were selected 36 sources corresponded to the purpose of the study. Today, the urgent tasks are to predict the parameters of a complex electromagnetic environment in open areas and inside buildings using mobile communication standards 4, 5 and 6G, scientific justification of hygienic standards for the combined effects of the electromagnetic factor, methodological approaches to monitoring EMR levels, including the development of domestic selective EMR meters in a wide range of frequencies (radio frequency and terahertz ranges).

Keywords: electromagnetic radiation; terahertz range; overview; 6G

For citation: Nikitina V.N., Dubrovskaya E.N., Kalinina N.I. Trends of using terahertz electromagnetic radiation from a hygienic standpoint (literature review). *Gigiena i Sanitariya / Hygiene and Sanitation, Russian journal*. 2024; 103(8): 822–826. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2024-103-8-822-826> <https://elibrary.ru/pknrjf> (In Russ.)

For correspondence: Valentina N. Nikitina, MD, PhD, DSci., Head of the Department for the Study of Electromagnetic radiation of the Department of Physical Factors. North-West Public Health Research Center, 191036, St.-Petersburg, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-8314-2044> E-mail: v.nikitina@s-znc.ru

Contribution: Nikitina V.N. — the concept and design of the study; collection and processing of material; writing a text; Dubrovskaya E.N. — collection of literature data; collection and processing of material; editing; Kalinina N.I. — collection of literature data; collection and processing of material; editing. All authors are responsible for the integrity of all parts of the manuscript and approval of the manuscript final version

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgement. The study had no sponsorship.

Received: May 3, 2024 / Revised: June 6, 2024 / Accepted: June 19, 2024 / Published: September 10, 2024

Современный этап развития научно-технического прогресса в области электромагнитных излучений (ЭМИ) имеет несколько отличительных особенностей. Во-первых, интенсивно используются в новых технологиях диапазоны частот, не имевшие ранее широкого применения. Примером могут служить миллиметровые волны (ММВ), которые с 90-х годов прошлого столетия широко применяются в медицинской практике [1, 2]. Обширной областью использования ММВ становится мобильная связь [3, 4]. Во-вторых, внедрение новых технологий идёт без должной фактической проверки их безопасности для здоровья населения. Изложенное выше в полной мере относится к электромагнитным излучениям терагерцевого диапазона (ТГц). Освоение терагерцевого диапазона частот – одна из тенденций развития современной радиоэлектроники. Граница терагерцевого диапазона в спектре электромагнитных излучений в настоящее время точно не определена. В широкой интерпретации терагерцевый диапазон занимает область частот от 100 ГГц до 10 ТГц (длина волн от 3 мм до 30 мкм). Диапазон 0,1–0,3 ТГц часто называют субтерагерцевым, диапазон 0,3–1 ТГц – более низкими ТГц, а диапазон 1–10 ТГц либо более высокими, либо истинными ТГц. Терагерцевый диапазон ЭМИ лежит между областью миллиметровых и инфракрасных длин волн. В соответствии с рекомендациями Международного союза электросвязи терагерцевый диапазон определяется как диапазон частот от 300 ГГц до 3 ТГц (длина волн от 1 до 0,1 мм) [5, 6]. При решении задач практического использования данного участка спектра учитываются свойства ТГц и характер взаимодействия с различными видами материалов. ТГц-излучение относится к неионизирующим электромагнитным излучениям. Это определяется малой энергией фотона (0,04–0,004 eV). ТГц хорошо проникают сквозь многие диэлектрические материалы, такие как дерево, бумага, ткань, пластмасса, керамика, и с различной интенсивностью поглощаются разными биологическими тканями. Электромагнитные излучения такого типа значительно поглощаются парами воды [7].

Цель работы – систематизировать области применения ЭМИ терагерцевого диапазона для определения гигиенических проблем и профилактики риска для здоровья при разработке и использовании современных радиоэлектронных средств (РЭС).

Были проанализированы статьи, опубликованные в отечественных и иностранных журналах за период с 2013 по 2023 г., использованы библиографические базы данных eLIBRARY, Web of Science, PubMed, монографии и электронные ресурсы. Перечень журналов включает такие издания, как «Оптика и спектроскопия», «Информационные технологии и телекоммуникации», «Системы управления, связи и безопасности», иностранные журналы International Journal of Environmental Research and Public Health, Non-Conventional Communications and Networks. Было проанализировано более 50 работ, из которых отобраны 36 источников, соответствующих цели исследования.

Результаты исследования свидетельствуют о том, что электромагнитные излучения терагерцевого диапазона уже используются в некоторых областях науки и техники, а в перспективе найдут широкое применение в телекоммуникации, радиолокации, фармацевтике, медицине и других областях. В рассматриваемый период опубликовано значительное число отечественных и зарубежных обзорных работ, позволяющих обобщить и систематизировать основные современные тенденции применения терагерцевых электромагнитных излучений. Поскольку энергия терагерцевого фотона меньше энергии рентгеновского излучения, а изображение в терагерцевых лучах для биосред является более контрастным по сравнению с инфракрасными и оптическими волнами, ТГц могут использоваться вместо рентгеновского излучения при диагностике болезней. Так, в области медицины рассматривается применение ТГц в диагностике злокачественных новообразований. Авторы отмечают, что терагерцевая технология является эффективным методом визуализации

опухолей и, по мнению клиницистов, в будущем получит широкое применение в практике. Новые методы терагерцевой диагностики могут заменить существующий метод биопсии: они позволяют не только обнаруживать, но и следить за развитием и распространением раковых клеток. Методы ТГц-диагностики уменьшат число ненужных хирургических биопсий и ускорят постановку диагноза до нескольких минут. Рассматриваются и другие варианты применения ТГц в медицине: контроль ожоговых раневых поверхностей без снятия бинтов, исследование влагосодержания в биологических тканях, выявление зубного кариеса. Основными диагностическими приборами являются ТГц-томографы различного применения и ТГц-микроскопы. В экспериментальных исследованиях на животных показано, что предварительное в течение 5; 15 и 30 мин терагерцевое облучение на частотах молекулярного спектра излучения и поглощения атмосферного кислорода $129 \pm 0,75$ ГГц способно оказывать антистрессорный эффект. Это делает возможным использование данного вида излучения для профилактики гемодинамических нарушений. Клиническими исследованиями показано, что применение терагерцевой терапии (диапазон частот ЭМИ 150–176, 664 ГГц) у пациентов с ишемической болезнью сердца и артериальной гипертензией обеспечивает значимые гипотензивный, антиангинальный и гипокоагуляционный эффекты. Это позволяет рекомендовать указанную выше схему электроволнового воздействия как перспективный способ лечения при нестабильной стенокардии и гипертонической болезни. ТГц-диапазон частот найдёт широкое применение и в других медицинских технологиях [8–17].

Отмечена перспективность использования многочастотного терагерцевого квантово-каскадного лазера для решения задач атмосферного зондирования и дистанционного определения содержания в атмосфере различных газов или аэрозолей, в первую очередь малых примесей и загрязнений [18]. Терагерцевое излучение применяется для исследования и восстановления предметов искусства. Авторы указывают, что данный метод *позволяет «увидеть» перекрывающиеся друг друга слои и выявить скрытые надписи, авторскую поверхность под позднейшими реставрационными записями, загрязнениями, наслоениями различного характера. Всё это важно в реставрации и исследовании живописи, памятников декоративно-прикладного искусства.* Разработаны методики применения терагерцевого излучения в данной области [19, 20]. Рассматривается использование сверхширокополосных радаров малой дальности диапазонов между 116 и 260 ГГц и потенциально до 1 ТГц. Существует возможность применения в автомобильных радарах, размещаемых как внутри, так и снаружи транспортных средств, а также в системах безопасности (квантово-каскадные лазеры) [21]. Информация о характеристиках терагерцевого спектра электромагнитных излучений и потенциальном их использовании представлена в работах многих авторов [22–24].

Терагерцевый диапазон частот электромагнитных излучений найдёт применение при построении высокоскоростных беспроводных сетей мобильной связи 6G, распространение которой ожидается в 2030-х годах [25–28]. ЭМИ терагерцевого диапазона активно поглощаются водой и водяными парами в воздухе. В связи с этим при распространении в окружающей среде терагерцевые сигналы с увеличением расстояния быстро затухают и имеют малый радиус покрытия. Из-за этого чаще всего терагерцевые системы связи рассматриваются в качестве систем ближней и средней дальности (до 5 км). Существует ряд «окон» в частотной области с наименьшим затуханием терагерцевого излучения, расположенных на частотах 300; 350; 410; 670 и 850 ГГц. С учётом роста затухания сигнала с увеличением частоты часть терагерцевого диапазона частот до 350 ГГц используют для систем связи на средних расстояниях (от 100 м до 1 км), а «окна» в диапазоне от 350 до 500 ГГц – для систем беспроводной связи малой дальности (от 10 до 100 м) [29].

В связи с указанным ограничением рассматриваются варианты размещения терагерцевых точек доступа в местах с

наиболее интенсивным потоком пользователей абонентских устройств (входные двери в торговый комплекс, вход и выход с эскалатора метрополитена, узкий коридор с высокой проходимостью). Антенны с высокой направленностью в комбинации с высокой ёмкостью терагерцевых сетей связи позволяют использовать данные системы для организации высокозащищённых соединений. Предполагается построение антенн с узким лучом диаграммы направленности между банкоматом и мобильным телефоном, находящимися на расстоянии прямой видимости друг от друга. Дальнейшее увеличение плотности малых сот и точек доступа ведёт к необходимости уделять существенное внимание каналу связи между точкой доступа и сетью Интернет. Предлагается построение сети связи с использованием большого числа малых сот, работающих на частотах в несколько десятков ГГц. Подобные точки доступа могут быть размещены в коридорах и помещениях, снаружи на углах зданий, фонарных столбах и других объектах. При этом канал связи между малой сотой и ядром сети будет организован с помощью системы связи в терагерцевом диапазоне частот. Для этого предлагается использование антенных массивов, формирующих диаграмму с высокой направленностью электромагнитного излучения на обоих концах соединения [30, 31]. Авторы отмечают, что технологии 6G отличаются от предыдущего поколения сетей мобильной связи. Концепции их развития включают использование оптической беспроводной связи, беспроводной передачи энергии, терагерцевую связь, искусственный интеллект. Терагерцевая частота в полосе пропускания от 0,1 до 10 ТГц обеспечивает связь на коротких расстояниях между двумя объектами. Сети мобильной связи 6G будут обеспечивать большую пропускную способность, сверхвысокие скорости и безопасность передачи данных, станут первым поколением с использованием искусственного интеллекта в технологии беспроводной связи. Внедрение искусственного интеллекта в коммуникацию 6G улучшит и упростит передачу данных в режиме реального времени [32]. Физические основы технологии 6G, перспективные планы исследований, направления развития и применение новых антенн, формы сигналов и схем модуляции рассматриваются во многих работах [33–38].

Исследователи изучают биологическое действие ЭМИ ТГц, в том числе влияние ТГц на различные клетки (крови, кожи, нервные, стволовые), рассматривают модели взаимодействия с тканями (исследования *in vitro*). Авторы отмечают разнообразное влияние ТГц на клетки, которое проявляется в нарушении свойств мембран клеток, изменении их жизнеспособности и пролиферации. Исследования на уровне всего организма животных проводились преимущественно для изучения возможности использования ЭМИ ТГц для

лечебно-диагностических целей. В работах рассматриваются вопросы теплового и нетеплового механизма действия терагерцевых волн. Авторы считают, что тепловое воздействие ТГц-излучения связано с нагревом облучаемых объектов вследствие сильного поглощения ЭМИ водой, что в основном наблюдается при использовании непрерывных источников излучения. При нетепловом механизме возможно резонансное, линейное или нелинейное взаимодействие ТГц-излучения с ДНК биологических систем. В определённых условиях это существенно меняет динамику молекулы, может привести к образованию локальных разрывов водородных связей в цепях ДНК и к изменению экспрессии генов. Такой эффект особенно вероятен при использовании мощного импульсного ТГц-излучения [8, 39, 40]. Данные о биологическом действии ЭМИ ТГц-диапазона на уровне целостного организма в условиях систематического воздействия электромагнитных излучений в доступной литературе отсутствуют.

Заключение

Представленный нами обзор охватывает отдельные используемые и прогнозируемые технологии в области терагерцевых излучений, однако даёт представление об уникальных свойствах ТГц, перспективах применения терагерцевых волн в радиоэлектронной технике. Очевидно, что в процессе разработки, обслуживания и эксплуатации устройств многие люди будут подвергаться воздействию электромагнитных излучений. Возможно облучение персонала непрерывными, модулированными и импульсными ЭМИ. Внедрение технологии 6G повлечёт за собой воздействие ТГц-волн на население. Одновременно будут воздействовать ЭМИ, создаваемые антеннами базовых станций и абонентскими устройствами перспективных стандартов мобильной связи 4; 5 и 6G. В настоящее время практически отсутствуют экспериментальные данные и выводы об эффектах длительного систематического воздействия ТГц-волн нетепловой интенсивности на организм. Опыт применения ТГц в медицинской практике подтверждает высокую чувствительность организма к терагерцевым электромагнитным излучениям. Актуальными задачами являются прогноз параметров сложной электромагнитной обстановки на открытых территориях и внутри зданий при использовании стандартов мобильной связи 4; 5 и 6G, научное обоснование гигиенических нормативов комбинированного воздействия электромагнитного фактора и подходов к измерению уровней ЭМИ. В практической области необходима разработка отечественных селективных приборов – измерителей ЭМИ широкого спектра частот (радиочастотного и терагерцевого диапазонов).

Литература

(п.п. 4, 5, 9, 16, 17, 22, 23, 25–28, 30, 34, 35, 38, 39 см. References)

- Ильина С.А. *Сборник докладов Международного симпозиума «Миллиметровые волны нетепловой интенсивности в медицине»*. М.; 1991. <https://elibrary.ru/xljvnm>
- Чуян Е.Н., Трибрат Н.С., Раваева М.Ю., Ананченко М.Н. *Тканевая микрогемодинамика: влияние низкоинтенсивного электромагнитного излучения миллиметрового диапазона*. Симферополь: АРИАЛ; 2017. <https://elibrary.ru/ysfrpu>
- Никитина В.Н., Калинина Н.И., Ляшко Г.Г., Дубровская Е.Н., Плеханов В.П. Особенности архитектуры сетей 5G. Вероятностное прогнозирование воздействия электромагнитных полей радиочастот на население (обзор литературы). *Гигиена и санитария*. 2021; 100(8): 792–6. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-8-792-796> <https://elibrary.ru/vjzwr>
- Минин И.В., Минин О.В. Проблемы метрологии терагерцевого излучения в медицине. *Вестник СГУиТ*. 2021; 26(3): 162–80. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2021-26-3-162-180> <https://elibrary.ru/plllzv>
- Черкасова О.П., Сердюков Д.С., Ратушняк А.С., Немова Е.Ф., Козлов Е.Н., Шидловский Ю.В., Зайцев К.И., Тучин В.В. Механизмы влияния терагерцевого излучения на клетки (обзор). *Оптика и спектроскопия*. 2020; 128(6): 852–64. <https://doi.org/10.21883/OS.2020.06.49420.51-20> <https://elibrary.ru/neruuk>
- Бондарев А. Терагерцевое излучение. Обзор современных технологий; 2023. Доступно: https://habr.com/ru/companies/etmc_exponent/articles/713944
- Зайцев К.И., Долганова И.Н., Черномырдин Н.В., Командин Г.А., Лаврухин Д.В., Решетов И.В. и др. Применение терагерцевых технологий в биофотонике. Часть 1: методы терагерцевой спектроскопии и визуализации тканей. *Фотоника*. 2019; 13(7): 680–7. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2019.13.7.680.687> <https://elibrary.ru/kahdtu>
- Исаев В.М., Кабанов И.Н., Комаров В.В., Мещанов В.П. Современные радиоэлектронные системы терагерцевого диапазона. *Доклады ТУСУРа*. 2014; (4): 5–21. <https://elibrary.ru/rohjxx>
- Гареев Г., Лучинин В. Применение терагерцевого излучения в биологии и медицине. *Наноиндустрия*. 2014; (6): 34–44. <https://elibrary.ru/sqcebx>
- Чекрыгин В.Э. Терагерцевой диапазон на страже здоровья. *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2009; (7): 102–7. <https://elibrary.ru/kvbcpf>
- Киричук В.Ф., Антипова О.Н., Великанов В.В., Великанова Т.С. Антистрессорный эффект волн терагерцевого диапазона на частотах атмосферного кислорода на измененные показатели линейной скорости кровотока в эксперименте. *Фундаментальные исследования*. 2013; (5–1): 82–7. <https://elibrary.ru/pzbqod>

Review article

15. Свистунов А.А., Цымбал А.А., Литвицкий П.Ф., Будник И.А. Экспериментальное и клиническое обоснование применения электромагнитных волн терагерцового диапазона на частотах излучения и поглощения оксида азота и кислорода при различных формах патологии. *Вестник Российской академии медицинских наук*. 2017; 72(5): 365–74. <https://doi.org/10.15690/vramn817> <https://elibrary.ru/zriwt4>
18. Аксенов В.Н., Ангелуц А.А., Балакин А.В., Иванов С.В., Ожерев И.А., Солянкин П.М. и др. Многочастотный терагерцовый квантово-каскадный лазер для решения задач атмосферного зондирования и обнаружения малых примесей. *Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия*. 2019; (6): 58–64. <https://elibrary.ru/hkxclv>
19. Терагерцы для живописи: как исследования ученых из России и Франции помогают восстанавливать предметы искусства; 2019. Доступно: <https://news.itmo.ru/ru/science/photronics/news/8653/>
20. Скрыль А.С., Царев М.В. Применение терагерцового излучения для исследования предметов искусства. Электронное методическое пособие; 2011. Доступно: <https://laser.unn.ru/sites/default/files/terahertz-for-art.pdf>
21. Волков В.Г. Квантово-каскадные лазеры и их применение в системах обеспечения безопасности и связи. *Системы управления, связи и безопасности*. 2016; (1): 10–41. <https://elibrary.ru/votnah>
24. Гайдученко И.А., Гольцман Г.Н., Ожегов Р.В., Шураков А.С. *Терагерцовая фотоника. Коллективная монография*. М.; 2023. <https://elibrary.ru/djcszpj>
29. Кучерявый Е.А., Молчанов Д.А., Петров В.И. Открытые исследовательские задачи и возможные приложения для сетей связи терагерцового диапазона частот. *Информационные технологии и телекоммуникации*. 2017; 5(1): 54–67. <https://elibrary.ru/ypqdkv>
31. Хофизов С.А., Долбич Ю.М. Оценка коммуникаций будущего: от 5G до 6G. *Экономика и качество систем связи*. 2022; (2): 24–31. <https://elibrary.ru/bdgtzv>
32. Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б. Проблема повышения спектральной эффективности и емкости в перспективных системах связи 6G. *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт*. 2020; 14(2): 25–31. <https://doi.org/10.36724/2072-8735-2020-14-2-25-31> <https://elibrary.ru/hhvlbc>
33. Бондарев А. На каких физических основах будет строиться технология 6G? Что известно на сегодняшний день; 2023. Доступно: https://habr.com/ru/companies/etmc_exponenta/articles/722308/
36. Тихвинский В., Девяткин Е., Смирнов Ю., Иванкович М., Веерпалу В. Беспроводная связь. Перспективы использования терагерцового диапазона в сетях 6G. Часть 2. *Первая миля*. 2022; (8): 10–6. <https://doi.org/10.22184/2070-8963.2022.108.8.10.16> <https://elibrary.ru/sxessa>
37. Тихвинский В.О., Терентьев С.В., Коваль В.А., Девяткин Е.Е. *Развитие сетей мобильной связи от 5G Advanced к 6G: проекты, технологии, архитектура*. М.: Техносфера; 2023.
40. Иванов А.Н. Регуляторные эффекты волн терагерцового диапазона. *Бюллетень медицинских интернет-конференций*. 2012; 2(6): 392–9. <https://elibrary.ru/oyzphj>

References

1. Iliina S.A. *Collection of reports of the International Symposium «Millimeter Waves of Non-Thermal Intensity in Medicine» [Sbornik dokladov Mezhdunarodnogo simpoziuma «Millimetrovye volny neteplovoi intensivnosti v meditsine»]*. Moscow; 1991. <https://elibrary.ru/xljvnn> (in Russian)
2. Chuyan E.N., Tribat N.S., Ravaeva M.Yu., Ananchenko M.N. *Tissue Microhemodynamics: the Effect of Low-Intensity Electromagnetic Radiation in the Millimeter Range [Tkanevaya mikrogemodinamika: vliyaniye nizkointensivnogo elektromagnitnogo izlucheniya millimetrovogo diapazona]*. Simferopol: ARIAL; 2017. <https://elibrary.ru/ysfpuy> (in Russian)
3. 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 (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2021; 100(8): 792–6. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-8-792-796> <https://elibrary.ru/vjzwwr> (in Russian)
4. Redmayne M., Maisch D.R. ICNIRP Guidelines' exposure assessment method for 5G millimeter wave radiation may trigger adverse effects. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2023; 20(7): 5267. <https://doi.org/10.3390/ijerph20075267>
5. Petrov V., Bodet D., Singh A. Mobile near-field terahertz communications for 6G and 7G networks: Research challenges. *Front. Comms. Net*. 2023; 4. <https://doi.org/10.3389/frcmn.2023.1151324>
6. Minin I.V., Minin O.V. Problems of terahertz radiation metrology in medicine. *Vestnik SGU/Gi.T*. 2021; 26(3): 162–80. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2021-26-3-162-180> <https://elibrary.ru/pillzv> (in Russian)
7. Cherkasova O.P., Serdyukov D.S., Ratushnyak A.S., Nemova E.F., Kozlov E.N., Shidlovskii Yu.V., Zaitsev K.I., Tuchin V.V. Effects of terahertz radiation on living cells: a review. *Optika i spektroskopiya*. 2020; 128(6): 852–64. <https://doi.org/10.1134/S0030400X20060041> <https://elibrary.ru/oeqprf> (in Russian)
8. Bondarev A. Terahertz radiation. Review of modern technologies; 2023. Available at: https://habr.com/ru/companies/etmc_exponenta/articles/713944 (in Russian)
9. Cong M., Li W., Liu Y., Bi J., Wang X., Yang X., et al. Biomedical application of terahertz imaging technology: a narrative review. *Quant. Imaging. Med. Surg.* 2023; 13(12): 8768–86. <https://doi.org/10.21037/qims-23-526>
10. Zaitsev K.I., Dolganov I.N., Chernomyrdin N.V., Komandin G.A., Lavrukhin D.V., Reshetov I.V., et al. Application of terahertz technologies in biophotonics. Part 1: methods of terahertz spectroscopy and imaging of tissues. *Fotonika*. 2019; 13(7): 680–7. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FR0s.2019.13.7.680.687> <https://elibrary.ru/kahdttu> (in Russian)
11. Isaev V.M., Kabanov I.N., Komarov V.V., Meshchanov V.P. Modern radio-electronic systems of terahertz frequency range. *Doklady TUSURa*. 2014; (4): 5–21. <https://elibrary.ru/rohjxx> (in Russian)
12. Gareev G., Luchinin V. Applications of terahertz radiation in biology and medicine. *Nanoindustriya*. 2014; (6): 34–44. <https://elibrary.ru/sqcebx> (in Russian)
13. Chekrygin V.E. Terahertz a range on the guard of health. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki*. 2009; (7): 102–7. <https://elibrary.ru/kvbcpf> (in Russian)
14. Kirichuk V.F., Antipova O.N., Velikanov V.V., Velikanova T.S. Anti-stress effect terahertz waves at a frequency of atmospheric oxygen on the change of parameters of linear flow velocity in the experiment. *Fundamentalnye issledovaniya*. 2013; (5–1): 82–7. <https://elibrary.ru/pzbqod> (in Russian)
15. Svistunov A.A., Tsymbal A.A., Litvitskii P.F., Budnik I.A. Experimental and clinical rational for terahertz therapy at the frequency of molecular oxygen and nitrogen oxide absorption and emission in different pathologies. *Vestnik Rossiiskii akademii meditsinskikh nauk*. 2017; 72(5): 365–74. <https://doi.org/10.15690/vramn817> <https://elibrary.ru/zriwt4> (in Russian)
16. Smolyanskaya O.A., Chernomyrdin N.V., Konovko A.A., Zaitsev K.I., Ozheredov I.A., Cherkasova O.P., et al. Terahertz biophotonics as a tool for studies of dielectric and spectral properties of biological tissues and liquids. *Prog. Quantum Electron.* 2018; 62: 1–77. <https://doi.org/10.1016/j.pquantelec.2018.10.001>
17. Zaitsev K.I., Chernomyrdin N.V., Kudrin K.G., Reshetov I.V., Yurchenko S.O. Terahertz spectroscopy of pigmentary skin nevi *in vivo*. *Opt. Spectrosc.* 2015; 119(3): 404–10. <https://doi.org/10.1134/S0030400X1509026X>
18. Akseonov V.N., Angeluts A.A., Balakin A.V., Ivanov S.V., Ozheredov I.A., Solyankin P.M., et al. A multi-frequency terahertz quantum-cascade laser for atmospheric probing and detection of small impurities. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 3. Fizika. Astronomiya*. 2019; (6): 58–64. <https://doi.org/10.3103/S002713491906002X> <https://elibrary.ru/rbyedx> (in Russian)
19. Terahertz for painting: how research by scientists from Russia and France helps to restore art objects; 2019. Available at: <https://news.itmo.ru/ru/science/photronics/news/8653/> (in Russian)
20. Skryl' A.S., Tsarev M.V. The use of terahertz radiation for the study of art objects. Electronic methodological guide; 2011. Available at: <http://laser.unn.ru/sites/default/files/terahertz-for-art.pdf> (in Russian)
21. Volkov V.G. Quantum cascade lasers and their application in safety and communication systems. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti*. 2016; (1): 10–41. <https://elibrary.ru/votnah> (in Russian)
22. Unlocking the potential of Terahertz radio spectrum. The role of spectrum management; 2021. Available at: https://www.ofcom.gov.uk/_data/assets/pdf_file/0032/228929/terahertz-spectrum-paper.pdf
23. Imran M.A., Abbasi Q.H. Exploiting Rarely Capitalised Spectrum Future Technologies using THz and beyond THz bands; 2020. Available at: <https://pixl8-cloud-techuk.s3.eu-west-2.amazonaws.com>
24. Gaiduchenko I.A., Gol'tsman G.N., Ozhergov R.V., Shurakov A.S. *Terahertz Photonics. Collective Monograph [Terahertzovaya fotonika. Kollektivnaya monografiya]*. Moscow; 2023. <https://elibrary.ru/djcszpj> (in Russian)
25. Farhad A., Pyun J.Y. Terahertz Meets AI: The State of the Art. *Sensors (Basel)*. 2023; 23(11): 5034. <https://doi.org/10.3390/s23115034>
26. Sardeddeen H., Alouini M.S., Al-Naffouri T.Y. Terahertz-Band Ultra-Massive Spatial Modulation MIMO. *IEEE J. Sel. Areas Commun.* 2019; 37: 2040–52. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2019.2929455>
27. Saad W., Bennis M., Chen M. A vision of 6G wireless systems: Applications, trends, technologies, and open research problems. *IEEE New.* 2019; 34: 134–42. <https://doi.org/10.1109/MNET.001.1900287>
28. Alraih S., Shayaeh I., Behjati M., Nordin R., Abdullah N.F., Abu-Samah A., et al. Revolution or evolution? Technical requirements and considerations towards 6G mobile communications. *Sensors (Basel)*. 2022; 22(3): 762. <https://doi.org/10.3390/s22030762>
29. Kucheryavii E.A., Molchanov D.A., Petrov V.I. Open research problems and possible applications for terahertz band wireless network. *Informatsionnye tekhnologii i telekommunikatsii*. 2017; 5(1): 54–67. <https://elibrary.ru/ypqdkv> (in Russian)
30. Akyildiz I.F., Jornet J.M. Realizing ultra-massive MIMO communication in the (0.06–10) terahertz band. *Nano Communication Networks*. 2016; 8: 46–54. <https://doi.org/10.1016/j.nancom.2016.02.001>
31. Khofizov S.A., Dolbich Yu.M. Evaluation of future communications: from 5G to 6G. *Ekonomika i kachestvo sistem svyazi*. 2022; (2): 24–31. <https://elibrary.ru/bdgtzv> (in Russian)
32. Bakulin M.G., Kreindel V.B. The problem of spectral efficiency and capacity increase in perspective 6g communication systems. *T-Comm: Telekommunikatsii i transport*. 2020; 14(2): 25–31. <https://doi.org/10.36724/2072-8735-2020-14-2-25-31> <https://elibrary.ru/hhvlbc> (in Russian)
33. Bondarev A. What physical foundations will the 6G technology be based on? What is known today; 2023. Available at: https://habr.com/ru/companies/etmc_exponenta/articles/722308/ (in Russian)
34. Bariah L., Mohjazi L., Muhaidat S., Sofotasios P.C., Kurt G.K., Yanikomeroğlu H., et al. A prospective look: key enabling technologies, applications and open

- research topics in 6G networks. *IEEE Access*. 2020; 8(29): 174792–820. Available at: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tuni-202112219441>
35. Letaief K.B., Chen W., Shi Y., Zhang J., Zhang Y.J.A. The roadmap to 6G: AI empowered wireless networks. *IEEE Comm. Mag.* 2019; 57(8): 84–90. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2019.1900271>
36. Tikhvinskii V., Devyatkin E., Smirnov Yu., Ivankovich M., Veerpalu V. Prospects for the use of terahertz frequency band in 6G networks, part 2. *Pervaya milya*. 2022; (8): 10–6. <https://doi.org/10.22184/2070-8963.2022.108.8.10.16> <https://elibrary.ru/cxexcca> (in Russian)
37. Tikhvinskii V.O., Terent'ev S.V., Koval' V.A., Devyatkin E.E. *Development of Mobile Communication Networks from 5G Advanced to 6G: Projects, Technologies, Architecture [Razvitiye setei mobil'noi svyazi ot 5G Advanced k 6G: proekty, tekhnologii, arkhitektura]*. Moscow: Tekhnosfera; 2023. (in Russian)
38. Wilmink G.J., Grundt J.E. Invited review article: current state of research on biological effects of terahertz radiation. *J. Infrared Millim. Terahertz Waves*. 2011; 32(10): 1074–122. <https://doi.org/10.1007/s10762-011-9794-5>
39. Alexandrov L.B., Rasmussen K.O., Bishop A.R., Alexandrov B.S. Evaluating the role of coherent delocalized phonon-like modes in DNA cyclization. *Sci. Rep.* 2017; 7(1): 9731. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-09537-y>
40. Ivanov A.N. Regulatory effects of wave terahertz frequencies. *Byulleten' meditsinskikh internet-konferentsii*. 2012; 2(6): 392–9. <https://elibrary.ru/oyzphj> (in Russian)

Сведения об авторах

Никитина Валентина Николаевна, доктор мед. наук, зав. отделением изучения электромагнитных излучений отд. физических факторов, ФБУН «СЗНЦ гигиены и общественного здоровья», 191036, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: v.nikitina@s-znc.ru

Дубровская Екатерина Николаевна, науч. сотр. отделения изучения электромагнитных излучений отд. физических факторов, ФБУН «СЗНЦ гигиены и общественного здоровья», 191036, Санкт-Петербург, Россия.

Калинина Нина Ивановна, канд. мед. наук, ст. науч. сотр. отделения изучения электромагнитных излучений отд. физических факторов, ФБУН «СЗНЦ гигиены и общественного здоровья», 191036, Санкт-Петербург, Россия.

Information about the authors

Valentina N. Nikitina, MD, PhD, DSci., Head of the Department for the Study of Electromagnetic radiation of the Department of Physical Factors, North-West Public Health Research Center, 191036, St.-Petersburg, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-8314-2044> E-mail: v.nikitina@s-znc.ru

Ekaterina N. Dubrovskaya, researcher at the Department of Electromagnetic Radiation Research of the Department of Physical Factors, North-West Public Health Research Center, St.-Petersburg, 191036, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-4235-378X>

Nina I. Kalinina, MD, PhD, senior researcher at the Department of Electromagnetic Radiation Research of the Department of Physical Factors, North-West Public Health Research Center, St.-Petersburg, 191036, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-9475-0176>