

УДК 614.875

## НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ПРИ ТЕСТОВОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ БАЗОВЫХ СТАНЦИЙ 5G В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ ДО 6 ГГц

Перов С.Ю., Белая О.В.

ФГБНУ «НИИ медицины труда имени академика Н.Ф. Измерова»,  
Москва, Россия

При развертывании и эксплуатации мобильных сетей поколения 5G, уделяется повышенное внимание задачам комплексной оценки условий электромагнитной экспозиции человека, в особенности, создаваемых антенными системами типа massive MIMO с реализацией технологий сканирования и формирования лучей к отдельным абонентам.

**Цель исследования** - сравнительная оценка уровней электромагнитных полей, создаваемых базовыми станциями пятого поколения стандарта 5G NR IMT-2020 в различных режимах тестовой эксплуатации.

**Материалы и методы.** При проведении натурных измерений смоделированы наилучшие условия передача данных, когда мобильные абоненты находятся вблизи базовой станции, а также условия передача данных, когда мобильные абоненты подключаются к сети на границе зон обслуживания базовой станции. Уровни ППЭ оценивались по результатам параллельных широкополосных и частотно-селективных измерений в режиме сканирования и формирования луча к абонентским терминалам при различных размещениях их относительно друг друга и базовой станции.

**Результаты.** В режиме активной передачи данных к абонентским терминалам максимальные уровни ППЭ превышали предельно допустимый уровень для населения ( $10 \text{ мкВт/см}^2$ ) только на площадке вблизи базовой станции (на расстояниях 20-40 м) как по данным широкополосных, так и частотно-селективных средств измерений. На площадке, соответствующей пересечению границ зон обслуживания различных базовых станций (на расстояниях более 150 м) несмотря на сохранение высокой скорости передачи данных, зарегистрированные максимальные уровни ППЭ не превышали  $2 \text{ мкВт/см}^2$ . Результаты оценки уровней ППЭ, полученные при «вынужденном» формировании луча в точку измерений, следует рассматривать как ориентировочные данные, характеризующие потенциальные максимальные уровни ППЭ при кратковременной экспозиции во время эксплуатации систем мобильной связи нового поколения. В дальнейшем представляется целесообразным разработать систему требований к усреднению

измеряемой ППЭ в пространстве и временной области для антенных систем нового типа динамической диаграммой направленности.

**Ключевые слова:** электромагнитное поле, базовая станции, пятое поколение сотовой связи, селективные измерения, формирование луча

**Для цитирования:** Перов С.Ю., Белая О.В. Натурные исследования электромагнитных полей при тестовой эксплуатации базовых станций 5g в диапазоне частот до 6 ГГц. Медицина труда и экология человека. 2024;2:6-19.

**Для корреспонденции:** Перов Сергей Юрьевич, д.б.н., ФГБНУ «Научно-исследовательский институт медицины труда имени академика Н.Ф. Измерова», заведующий лабораторией электромагнитных полей, e-mail: perov@irioh.ru

**Финансирование:** исследование не имело финансовой поддержки.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**DOI:** <http://dx.doi.org/10.24412/2411-3794-2024-10201>

## IN-SITU MEASUREMENT OF 5G BASE STATION ELECTROMAGNETIC FIELDS AT SUB-6 GHz FREQUENCIES

Perov S. Yu., Belaya O. V.

The Izmerov Research Institute of Occupational Health, Moscow, Russia

**Introduction.** When deploying and operating 5G mobile networks, increased attention is paid to the tasks of a comprehensive assessment of human electromagnetic exposure environment, particularly that created by massive MIMO antenna systems with the implementation of scanning and beamforming technologies to individual subscribers.

**The aim of the study** was a comparative assessment of electromagnetic field exposure from 5G NR IMT-2020 for various test operation modes.

**Materials and methods.** When carrying out in-situ measurements, the best transmission environment was simulated when mobile subscribers are in the vicinity of the base station, as well as data transmission environment when mobile subscribers connect to the network at the border of the base station service areas. Power density levels were assessed based on parallel broadband and frequency-selective measurements in scanning and beamforming modes to user terminals at different locations relative to each other and the base station.

**Results.** According to broadband and frequency-selective measuring instruments at active traffic transmission to user terminals the maximum power density levels exceeded the general public maximum permissible level ( $10 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ) only in the vicinity of the base station (at distances of 20-40 m). At the site of various base stations service

areas boundaries intersection (at distances of more than 150 m) the maximum power density levels did not exceed  $2 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  despite maintaining a high traffic speed. The results of power density assessment obtained during “forced” beamforming at the measurement point should be considered as indicative data of the possible maximum electromagnetic levels during short-term exposure from new generation mobile communication systems. In the future, it seems appropriate to develop a set of requirements for space and time domain averaging power density for new type antenna systems with a dynamic radiation pattern.

**Keywords:** electromagnetic field, mobile base station, 5G telecommunications, selective measurement, beamforming

**Citation:** Perov S. Yu., Belaya O. V. In-situ measurement of 5G base station electromagnetic fields at sub-6 GHz frequencies. *Occupational Health and Human Ecology*. 2024;2:6-19.

**Correspondence:** Sergey Yu. Perov, Doctor of Biology, FSBSI “The Izmerov Research Institute of Occupational Health”, Head of Electromagnetic field laboratory, e-mail: perov@irioh.ru.

**Financing:** the study had no financial support.

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

**DOI:** <http://dx.doi.org/10.24412/2411-3794-2024-10201>

Развертывание сетей мобильной связи перспективных поколений и появление в окружающей среде новых техногенных источников электромагнитных полей радиочастотного диапазона (ЭМП РЧ) неизбежно преобразует электромагнитную обстановку на селитебных территориях, что в свою очередь требует комплексной оценки степени и качества этих изменений. Ключевой особенностью эксплуатации мобильных сетей пятого поколения является широкое использование в радиоэлектронном оборудовании базовых станций (БС) антенных систем нового типа – многоэлементных антенн massive MIMO с реализацией технологий сканирования и формирования лучей к отдельным абонентам. С применением подобных технологий достигается высокая спектральная эффективность, пропускная способность и надежность передачи данных в системах нового поколения [1], что в свою очередь отражается в усложнении электромагнитной обстановки, в т.ч. в повышении неравномерности распределения электромагнитной энергии во времени и пространстве из-за стохастического характера сигнала БС к мобильным пользователям [2]. Таким образом, с внедрением систем мобильной связи поколения 5G особую актуальность

представляют задачи совершенствования методологии инструментального контроля ЭМП РЧ, в частности оценки максимальных уровней в зоне обслуживания БС с динамической диаграммой направленности антенны [3]. Одним из приемов, используемых в международной практике при оценке и инструментальном контроле ЭМП РЧ, создаваемых БС поколения 5G, является применение абонентского терминала для формирования направленного луча в точку измерений [4, 5].

При исследовании изменений электромагнитной обстановки отдельную задачу составляет выделение из общего электромагнитного фона новых источников, оценка их вклада, а также учет спектральных характеристик ЭМП РЧ, модулированных по стандартам поколения 5G, что требует применения не только широкополосных, но и частотно-селективных средств измерения ЭМП. Спецификацией стандарта 5G NR IMT-2020 определены два диапазона рабочих частот: диапазон FR1 от 410 до 7125 МГц с максимальной шириной радиоканала 100 МГц и диапазон FR2 от 24,25 до 71,0 ГГц с максимальной шириной радиоканала 400/2000 МГц [6]. Диапазон FR1 не только охватывает полосы частот, предназначенные для работы сетей мобильной связи действующих стандартов GSM, UMTS и LTE, но и включает новые для сотовой связи частоты выше 3 ГГц, которые активно используются для тестовых и коммерческих запусков сетей поколения 5G во всем мире. Например, в Российской Федерации определена полоса частот от 4400 до 5000 МГц (n79), в странах Европы – от 3300 до 4200 МГц (n77).

Эксплуатация базовых станций 5G в диапазоне FR1 представляет также особый интерес и для рассмотрения различных подходов к инструментальному контролю ЭМП РЧ, особенно в зонах тестовых испытаний, где возможно моделировать и контролировать различные режимы работы БС в условиях ограниченного количества активных абонентов. В настоящее время задачам контроля условий электромагнитной экспозиции человека, создаваемых при развертывании и эксплуатации мобильных сетей поколения 5G, уделяется повышенное внимание в зарубежных исследованиях, которые проводятся не только для анализа изменений уровней ЭМП РЧ в окружающей среде [1,7,8,9,10], но и с целью разработки методологии инструментального контроля ЭМП РЧ, создаваемых антенными системами типа massive MIMO [4,11,12,13,14]. Обозначенные вопросы совершенствования гигиенической оценки условий электромагнитной экспозиции с учетом этапов развития и внедрения систем нового поколения сотовой связи

представляются крайне актуальными для экспериментального изучения в нашей стране.

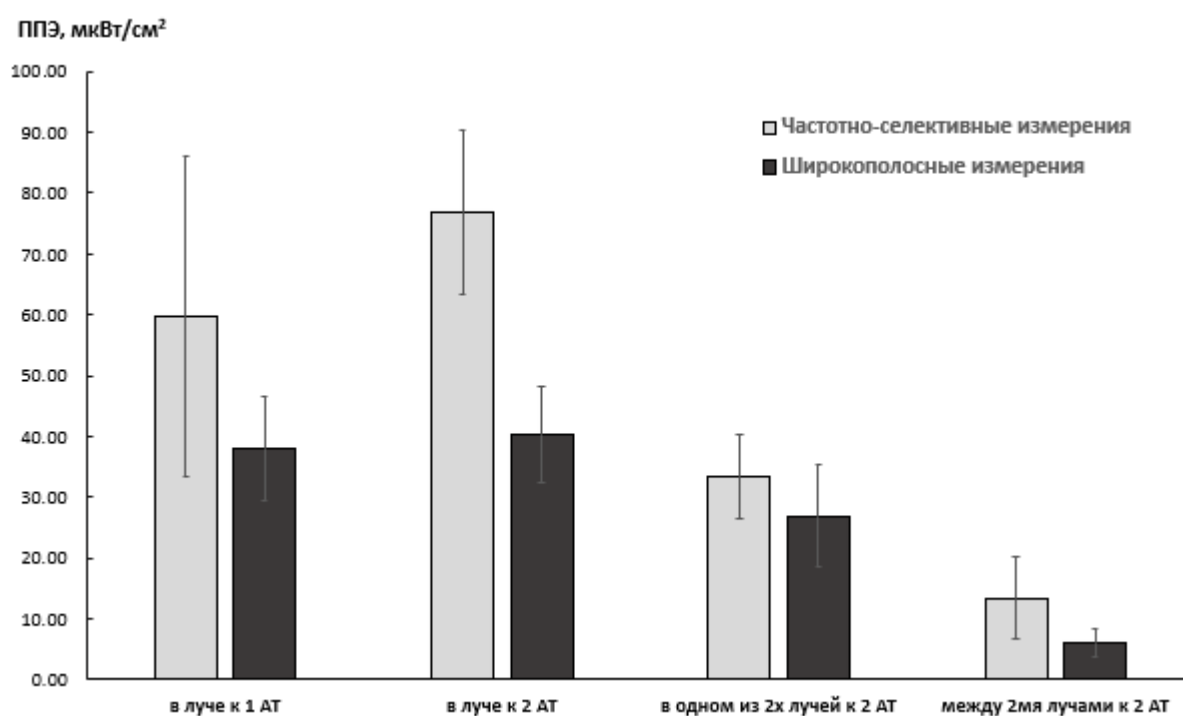
Цель исследования: сравнительная оценка уровней электромагнитных полей, создаваемых базовыми станциями пятого поколения стандарта 5G NR IMT-2020 в различных режимах тестовой эксплуатации, с применением широкополосных и селективных средств измерений.

**Материалы и методы.** Натурные исследования проводились на территории пилотной зоны тестирования сети мобильной связи поколения 5G, включающей 3 различные БС, оснащенные антенными системами massive MIMO с технологией формирования луча. Все БС работали в одном радиоканале шириной 100 МГц в полосе n79 стандарта 5G NR/IMT-2020 [6]. Электромагнитная обстановка на территории пилотной зоны создавалась также коммерческими сетями сотовой связи стандартов GSM, UMTS и LTE различных диапазонов частот.

Для проведения натурных измерений были выбраны 2 площадки на различном удалении от базовых станций таким образом, чтобы смоделировать крайние из возможных ситуаций при эксплуатации БС перспективного поколения: наилучшие условия передача данных, когда мобильные абоненты находятся вблизи БС, и наихудшие (нестабильные) условия передача данных, когда мобильные абоненты подключаются к сети на границе зон обслуживания БС. На каждой площадке, на высоте 1,5 м от уровня земли проводились параллельные широкополосные и частотно-селективные измерения ППЭ в течение 10 с в различных режимах работы БС: сканирования (фоновые уровни) и формирования луча к абонентским терминалам (АТ). Для обеспечения устойчивой нисходящей линии связи от БС на каждом АТ синхронно запускалось специализированное программное обеспечение контроля трафика. Активные АТ находились в прямой видимости БС стандарта 5G NR/IMT-2020 на расстоянии не менее 1 м от точки измерений. В каждой точке измерений рассматривались возможные условия электромагнитной экспозиции при различной конфигурации АТ относительно друг друга и БС. В точке №1 проводилась оценка ППЭ в луче передачи данных к одному и двум АТ, расположенным вблизи. Также рассматривалась ситуация двух активных АТ, удаленных друг от друга на одинаковое расстояние от БС, при этом оценивались уровни ЭМП РЧ, как в каждом из формируемых лучей, так и между ними. В точке №2, ввиду нестабильности подключения АТ на границе зон обслуживания БС, оценка ППЭ проводилась на пересечении двух лучей, формируемых от различных БС к отдельным активным АТ, а также в режиме обслуживания только одного активного абонента.

Для обнаружения и выделения сигнала БС стандарта 5G NR/IMT-2020 в электромагнитном фоне окружающей среды и для проведения частотно-селективных измерений использовался селективный измеритель ЭМП SRM-3006 (Narda Safety Test Solutions, Германия). Широкополосные измерения проводились с помощью измерителя Narda NBM-550 (Narda AG, Германия). Обработка результатов измерений проводилась с использованием специализированного программного обеспечения SRM-3006\_TS (Narda Safety Test Solutions, Германия).

**Результаты.** На первой площадке измерения проводились в точке №1, которая располагалась напротив БС в ее основной диаграмме направленности, на расстоянии около 40 м от нее. В режиме сканирования БС без подключения активных АТ фоновые уровни ППЭ составили 0,3 и 1,7 мкВт/см<sup>2</sup> по данным частотно-селективных и широкополосных измерений соответственно. Как представлено на рисунке, в режиме передачи данных от БС к активным АТ уровни ППЭ были значительно выше фоновых.



**Рис.** Результаты натурных измерений ППЭ в точке №1 при одном и двух активных абонентах.

**Figure.** Results of in-situ measurements of PES at point No. 1 with one and two active subscribers

При подключении одного АТ к мобильной сети поколения 5G уровни ППЭ в точке №1, находящейся в сформированном луче между БС и АТ, составили  $59,75 \pm 26,45$

мкВт/см<sup>2</sup> по результатам селективных измерений в радиоканале шириной 100 МГц, тогда как по данным широкополосных измерений при этом же режиме работы БС уровни ЭМП РЧ были ниже –  $38,01 \pm 8,51$  мкВт/см<sup>2</sup>. Условия электромагнитной экспозиции на границе луча к одному АТ, которые оценивались при приближении точки измерений к БС, на расстоянии 20 м, составили  $8,32 \pm 2,53$  мкВт/см<sup>2</sup> и  $11,10 \pm 2,77$  мкВт/см<sup>2</sup> по данным частотно-селективных и широкополосных измерений соответственно. Во время проведения натуральных измерений на первой площадке при подключении одному АТ максимальная скорость трафика изменялась в диапазоне от 920 до 1430 Мбит/с.

Как представлено на рисунке, при одновременном подключении двух активных АТ, находящихся рядом, наблюдалось повышение уровней электромагнитной экспозиции и уровни ППЭ в точке №1, находящейся в луче, сформированном от БС к двум активным АТ, составили  $76,87 \pm 13,54$  мкВт/см<sup>2</sup> и  $40,21 \pm 7,90$  мкВт/см<sup>2</sup> по результатам частотно-селективных и широкополосных измерений соответственно. В этих условиях максимальная скорость суммарного трафика изменялась в диапазоне от 1218 до 1435 Мбит/с.

На первой площадке также проводилась оценка уровней ППЭ при формировании двух различных лучей к двум АТ, равноудаленных от точки №1 на 10 м и 40 м от БС. По результатам натуральных измерений уровни электромагнитной экспозиции, создаваемые одним из активных лучей, были ниже по сравнению с рассмотренными ранее режимами эксплуатации БС и составили  $33,36 \pm 6,99$  мкВт/см<sup>2</sup> и  $26,97 \pm 8,30$  мкВт/см<sup>2</sup> по результатам частотно-селективных и широкополосных измерений соответственно. При этом, как отражено на рисунке, соответствующие уровни ЭМП РЧ между лучами снижались до  $13,39 \pm 6,76$  мкВт/см<sup>2</sup> и  $6,18 \pm 2,34$  мкВт/см<sup>2</sup>. В условиях формирования двух различных лучей к активным АТ максимальная скорость суммарного трафика изменялась в диапазоне от 1099 до 1652 Мбит/с.

На второй площадке натурные измерения проводились в точке №2, которая располагалась на пересечении границ зон обслуживания двух других БС поколения 5G и удаленная от них на расстояния 160 и 150 м соответственно.

При отсутствии активных абонентов в режиме сканирования БС фоновые уровни ППЭ в точке №2 составили 0,2 и 1,1 мкВт/см<sup>2</sup> по данным частотно-селективных и широкополосных измерений соответственно. При подключении одного и двух АТ и формирования лучей к ним в точке измерений наблюдалось повышение уровней, как приведено в таблице.

**Таблица** .Результаты натурных измерений ППЭ в точке №2

**Table.** Results of in-situ measurements of PES at point No. 2

Условия подключения АТ к БС	Трафик, Мб/с	Результаты измерения ППЭ, мкВт/см <sup>2</sup>	
		частотно-селективные	широкополосные
АТ1 к БС1	707 ± 60	0,48 ± 0,49	1,52 ± 0,20
АТ2 к БС2	814 ± 202	0,92 ± 0,61	1,48 ± 0,11
Одновременно АТ1 к БС1 и АТ2 к БС2	1068 ± 125	0,67 ± 0,68	1,38 ± 0,11

При поочередном подключении АТ к соответствующим БС точка №2 находилась в одном из формируемых лучей, при этом, как представлено в таблице, наибольшие уровни ППЭ ( $0,92 \pm 0,61$  мкВт/см<sup>2</sup> по результатам частотно-селективных измерений) наблюдались при подключении абонента к базовой станции БС2, находящейся ближе к точке измерений, чем базовая станция БС1. По данным широкополосных измерений уровни ППЭ были незначительно выше при подключении АТ1 к БС1 и составили  $1,52 \pm 0,20$  мкВт/см<sup>2</sup>.

При одновременном подключении двух АТ к соответствующим БС, когда точка №2 находилась на пересечении двух сформированных лучей, уровни ППЭ составили  $0,67 \pm 0,68$  мкВт/см<sup>2</sup> и  $1,38 \pm 0,11$  мкВт/см<sup>2</sup> по результатам частотно-селективных и широкополосных измерений соответственно. В условиях формирования двух различных лучей к активным АТ на границах зон обслуживания БС максимальная скорость суммарного трафика изменялась в диапазоне от 879 до 1237 Мбит/с.

**Обсуждение.** Представленные результаты оценки наибольших уровней ЭМП РЧ, характеризующие возможные условия экспозиции человека на различных расстояниях от БС сети мобильной связи поколения 5G, были получены с использованием искусственного приема – моделирования нисходящей линии связи от БС к АТ, что обеспечивало «вынужденное» формирование луча в точках измерений. По литературным данным подобный прием получил широкое распространение на практике для экспериментальной оценки максимальных уровней ЭМП РЧ в диапазоне FR1, причем в ряде исследований были реализованы сходные с рассмотренными выше условия эксплуатации БС стандарта 5G NR/IMT-2020.



Результаты широкополосных измерений фоновых уровней ЭМП РЧ, характеризующих режим эксплуатации БС поколения 5G в отсутствие передачи трафика к абонентам, однако, учитывающих также сигналы от других радиотехнических систем, не превышали  $1,7 \text{ мкВт/см}^2$  на всех исследуемых площадках.

В режиме формирования луча к активному АТ наблюдалось повышение уровней ЭМП РЧ, которое наиболее выражено было в точка №1, на расстоянии 40 м от БС – до  $59,75 \text{ мкВт/см}^2$  в радиоканале сигнала стандарта 5G. По данным зарубежных исследований при высокой скорости трафика уровень ППЭ от БС поколения 5G в диапазоне FR1 может достигать около  $230 \text{ мкВт/см}^2$  на расстоянии 30 м [15],  $39,8\text{-}77,9 \text{ мкВт/см}^2$  на расстоянии 40 м [7], около  $21,5 \text{ мкВт/см}^2$  на расстоянии 50 м [16].

При формировании луча от БС к АТ уровни ППЭ в точке №2, удаленной на расстояние 150-160 м, были сопоставимы с фоновыми уровнями и не превышали  $1,6 \text{ мкВт/см}^2$ . В зарубежных натурных исследованиях на аналогичном удалении от БС в режиме передачи максимальные уровни ППЭ составляли от 1,6 до  $2,4 \text{ мкВт/см}^2$  на расстояниях 175-200 м [17] и 3,4 до  $5,2 \text{ мкВт/см}^2$  на расстояниях 80-95 м [10].

Анализ уровней ППЭ в формируемом луче от БС при различном положении двух активных АТ показал, что в случае одновременной работы двух АТ, находящихся рядом (в одном луче), наблюдалось повышение ППЭ в точке №1 на 29% по результатам частотно-селективных измерений и на 6% – широкополосных измерений, что согласуется с литературными данными [18], где отмечается незначительное увеличение (на 8%) уровня электромагнитной экспозиции в луче БС поколения 5G при одновременном подключении двух, трех или четырех АТ в одной точке.

При пространственном разнесении активных АТ в секторе обслуживания одной БС наблюдалась иная закономерность: при удалении двух АТ от точки измерений, что способствовало формированию двух различно-ориентированных лучей от БС, наблюдалось снижение ППЭ в одном из лучей на 44% по результатам частотно-селективных измерений и на 29% – широкополосных измерений. По оценкам зарубежных исследователей снижение уровней электромагнитной экспозиции БС стандарта 5G при одновременном подключении двух различных АТ может достигать 34%, а при четырех АТ – 73% [18].

Проведенные натурные исследования с использованием двух активных АТ позволили также оценить пространственную неоднородность электромагнитного фона, обусловленную реализацией технологией формирования нескольких лучей.

Так, при пространственном разнесении активных АТ уровень ППЭ в точке между лучами к ним снизился по сравнению с уровнем в одном из лучей: в 2,5 раза по результатам селективных измерений и в 4,4 раза – по результатам широкополосных измерений. Рассмотренные данные моделируют условия электромагнитной экспозиции человека, который не является активным пользователем мобильной связи в данный момент времени, но может находиться поблизости, например, на расстоянии порядка 20 м от АТ, подключенного к сети.

Необходимо отметить, что уровни ЭМП РЧ, полученные с помощью широкополосных средств измерения, как правило, превышают результаты частотно-селективных измерений [2], однако, согласно полученным данным эта закономерность не прослеживается для результатов оценки максимальных уровней ППЭ в точке №1 при различных режимах эксплуатации БС, что можно объяснить плотной городской застройкой на площадке измерений и возможными эффектами переотражения, а также различием частотных характеристик измерительных антенн в различных методах измерения.

Результаты проведенных исследований в тестовой зоне 5G показали, что в режиме активной передачи трафика к абонентским терминалам максимальные уровни ЭМП РЧ, создаваемые БС поколения 5G превышали предельно допустимый уровень для населения ( $10 \text{ мкВт/см}^2$ ) только на площадке вблизи БС (на расстояниях порядка 20-40 м), причем как по данным широкополосных, так и частотно-селективных средств измерения. На второй площадке, соответствующей пересечению границ зон обслуживания различных БС (на расстояниях более 150 м) несмотря на сохранение высокой скорости трафика, зарегистрированные максимальные уровни ППЭ не превышали  $2 \text{ мкВт/см}^2$ . По результатам предыдущих натурных исследований [19], проведенных на территории аналогичной тестовой зоны поколения 5G, характерные максимальные уровни ППЭ по результатам частотно-селективных измерений были значительно меньше значений, полученных в настоящей работе, как для режима сканирования ( $0,11 \text{ мкВт/см}^2$ ), так и в луче передачи трафика от БС к одному АТ ( $5,67 \pm 1,13 \text{ мкВт/см}^2$ ). Полученные в ходе натурных измерений оценки уровней ППЭ, создаваемых БС сотовой связи поколения 5G в луче к одному абоненту, характеризуют теоретические максимально возможные уровни электромагнитной экспозиции человека в точке исследования, однако можно полагать, что в реальных условиях эксплуатации коммерческих сетей фактические уровни ЭМП будут значительно ниже рассмотренных. Снижение уровней ППЭ в месте нахождения активного абонента будет обусловлено распределением электромагнитной энергии между

множеством лучей к другим абонентам, которые могут находиться на значительном расстоянии друг от друга, вариацией ширины луча, создаваемого БС, а также использованием динамического управления мощностью БС [15].

Представленные результаты оценки уровней ППЭ, создаваемые БС сети стандарта 5G NR/IMT-2020 при «вынужденном» формировании луча в точку измерений, следует рассматривать как ориентировочные данные, характеризующие возможные максимальные (пиковые) уровни ЭМП РЧ при кратковременной экспозиции во время эксплуатации систем мобильной связи нового поколения. В дальнейшем для проведения натуральных исследований по контролю и гигиенической оценке условий электромагнитной экспозиции, формируемых антенными системами нового типа (massive MIMO) с динамической диаграммой направленности, представляется необходимым разработка требований к усреднению ППЭ в пространстве и временной области, а также применение кодо-селективных измерений ППЭ от систем поколения 5G и разработки подходов экстраполяции их результатов для определения фактических максимальных уровней [4,11,12,14,15,20].

**Заключение.** На современном этапе развития и внедрения сетей мобильной связи нового поколения проблема гигиенической оценки электромагнитной экспозиции человека, создаваемой антенными системами БС с динамической диаграммой направленности, требует комплексного решения и проработки прежнего всего методического аспекта инструментального контроля ЭМП РЧ. В рамках натуральных исследований в тестовой зоне 5G проведен анализ максимальных возможных уровней ППЭ при различных конфигурациях АТ относительно БС сети, показано как увеличение, так и снижение уровней ЭМП РЧ при увеличении количества активных абонентов в сети. Применение активных АТ для формирования направленного луча в точку измерения является одним из популярных подходов при инструментальной оценке систем нового типа, но требует дополнения частотно - и кодо-селективными методами в рамках дальнейшего совершенствования гигиенической оценки ЭМП РЧ.

### Список литературы:

1. Huang W.W., HuY.N., Zhu J.J., Cen Z.N., Bao J.L. The Measurement and Evaluation of the Electromagnetic Environment from 5G Base Station. Detection. 2022; 9: 1-11.
2. Козел В.М., Ковалев К.А., Жолудь А.В. Результаты экспериментального исследования распределения плотности потока энергии, создаваемых антенной системой massive MIMO для технологии New Radio (5G). URL: <https://libeldoc.bsuir.by/handle/123456789/48229> (дата обращения 06.06.2024).

3. Rybakowski M., Bechta K., Grangeat C., Kabacik P. Impact of Beamforming Algorithms on the Actual RF EMF Exposure From Massive MIMO Base Stations. *IEEE Access*. 2023; 11: 141956-141964.
4. Exposito I., Hakizimali C., Garcia Sanchez M., Cuinas I., Verhaevert J. Human exposure to EMF from 5G base stations: analysis, evaluation and comparison of different assessment methods. *Measurement*. 2024; 229: 114434.
5. IEC 62232-2022. Determination of RF field strength, power density and SAR in the vicinity of radiocommunication base stations for the purpose of evaluating human exposure. Geneva: IEC; 2022.
6. ETSI TS 138 104 V17.7.0 (2022-10) 5G; NR; Base Station (BS) radio transmission and reception (3GPP TS 38.104 version 17.7.0 Release 17). URL :[https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/138100\\_138199/138104/17.07.00\\_60/ts\\_138104v170700p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138100_138199/138104/17.07.00_60/ts_138104v170700p.pdf) (дата обращения 26.04.2024).
7. Wei Q., Ge X., Liu J., Li H. A study on the ambient electromagnetic radiation level of 5G base stations in typical scenarios. *Radiat Detect Technol Methods*. 2024. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s41605-024-00452-1#citeas> (дата обращения 06.06.2024).
8. Henderson S., Bhatt C., Loughran S. A survey of the radiofrequency electromagnetic energy environment in Melbourne, Australia, *Radiat Prot Dosimetr* 2023 Apr 19;199(6):519-526.
9. Gong Y., Guo X., Qiuxin Liu Q., Long Y., Li Y. Monitoring and Analysis of the Current Environmental Situation of Electromagnetic Radiation from 5G Application Base Stations. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2022; 2242, 012026:1-8.
10. Ursachianu M. V., Lazarescu C., Bejenaru O. Salceanu A. Human exposure in a 5G cellular base station environment in residential districts of Iasi city. *IMEKO TC-4 2022, Brescia, Italy*. 2022; Sept: 204-209.
11. Aerts S., Verloock L., Van Den Bossche M., Colombi D., Martens L., Tornevik C. et al. In-Situ Measurement Methodology for the Assessment of 5G NR Massive MIMO Base Station Exposure at Sub-6 GHz Frequencies. *IEEE Access*. 2019; 7: 184658–184667.
12. Bienkowski P., Zubrzak B., Sobkiewicz P., Bechta K., Rybakowski M. Simplified Methodology of Electromagnetic Field Measurements in the Vicinity of 5G Massive MIMO Base Station for Environmental Exposure Assessment. *IEEE Access*. 2024; 12: 8071-8080.
13. Fellan A., Schotten H.D. Overview of the Evaluation Methods for the Maximum EMF Exposure in 5G Networks. *IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN)*. 2022: 53-57.
14. Lebl A., Budimir D. Maximum electric field estimation in the vicinity of 5G base stations before their start-up. *Vojnotehnički glasnik*. 2023; 71(2): 345-361.
15. Aerts S., Deprez K., Verloock L., Olsen R.G., Martens L., Tran P. et al. RF-EMF Exposure near 5G NR Small Cells. *Sensors (Basel)*. 2023; Mar 15; 23(6): 3145.
16. Sali A., Wali S. Q., Osman A. F. Evaluation of RF-EMF Exposure for sub-6GHz 5G NR Massive MIMO Base Station. *2022 IEEE 6th International Symposium on Telecommunication Technologies (ISTT), Johor Bahru, Malaysia*. 2022: 16-21.
17. Ursachianu M. V., Lazarescu C., Bejenaru O. Salceanu A. Assessment of human exposure to EMF generated by 5G mobile phone base stations. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2022;1254 (1): 012026.

18. Deprez K., Verloock L., Colussi L., Aerts S., Van den Bossche M., Kamer J. et al. In-situ 5G NR base station exposure of the general public: comparison of assessment methods. *Radiat. Prot. Dosim.* 2022; 198(6): 358–369.
19. Перов С.Ю., Белая О.В. Электромагнитная обстановка, создаваемая базовыми станциями сотовой связи в пилотной зоне 5G. *Гигиена и санитария.* 2023; 102(6): 538-543.
20. Migliore M. D., Franci D., Pavoncello S., Grillo E., Aureli T., Adda S. et al. A New Paradigm in 5G Maximum Power Extrapolation for Human Exposure Assessment: Forcing gNB Traffic Toward the Measurement Equipment. *IEEE Access.* 2021; 9: 101946-101958.

## References:

1. Huang W.W., HuY.N., Zhu J.J., Cen Z.N., Bao J.L. The Measurement and Evaluation of the Electromagnetic Environment from 5G Base Station. *Detection.* 2022; 9: 1-11.
2. Kozel V.M., Kovalev K.A., Zhopov A.V. Results of an experimental study of the energy flow density distribution created by the massive MIMO antenna system for new radio technology (5G). URL: <https://libeldoc.bsuir.by/handle/123456789/48229> (access date 06.06.2024).
3. Rybakowski M., Bechta K., Grangeat C., Kabacik P. Impact of Beamforming Algorithms on the Actual RF EMF Exposure from Massive MIMO Base Stations. *IEEE Access.* 2023; 11: 141956-141964.
4. Exposito I., Hakizimali C., Garcia Sanchez M., Cuinas I., Verhaevert J. Human exposure to EMF from 5G base stations: analysis, evaluation and comparison of different assessment methods. *Measurement.* 2024; 229: 114434.
5. IEC 62232-2022. Determination of RF field strength, power density and SAR in the vicinity of radiocommunication base stations for the purpose of evaluating human exposure. Geneva: IEC; 2022.
6. ETSI TS 138 104 V17.7.0 (2022-10) 5G; NR; Base Station (BS) radio transmission and reception (3GPP TS 38.104 version 17.7.0 Release 17). URL: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/138100\\_138199/138104/17.07.00\\_60/ts\\_138104v170700p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138100_138199/138104/17.07.00_60/ts_138104v170700p.pdf) (дата обращения 26.04.2024).
7. Wei Q., Ge X., Liu J., Li H. A study on the ambient electromagnetic radiation level of 5G base stations in typical scenarios. *Radiat Detect Technol Methods.* 2024. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s41605-024-00452-1#citeas> (access date 06.06.2024).
8. Henderson S., Bhatt C., Loughran S. A survey of the radiofrequency electromagnetic energy environment in Melbourne, Australia, *Radiat Prot Dosimetr* 2023 Apr 19;199(6):519-526.
9. Gong Y., Guo X., Qiuxin Liu Q., Long Y., Li Y. Monitoring and Analysis of the Current Environmental Situation of Electromagnetic Radiation from 5G Application Base Stations. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2022; 2242, 012026:1-8.
10. Ursachianu M. V., Lazarescu C., Bejenaru O. Salceanu A. Human exposure in a 5G cellular base station environment in residential districts of Iasi city. *IMEKO TC-4 2022, Brescia, Italy.* 2022; Sept: 204-209.
11. Aerts S., VerloockL., Van Den Bossche M., Colombi D., Martens L., Tornevik C. et al. In-Situ Measurement Methodology for the Assessment of 5G NR Massive MIMO Base Station Exposure at Sub-6 GHz Frequencies. *IEEE Access.* 2019; 7: 184658–184667.

12. Bienkowski P., Zubrzak B., Sobkiewicz P., Bechta K., Rybakowski M. Simplified Methodology of Electromagnetic Field Measurements in the Vicinity of 5G Massive MIMO Base Station for Environmental Exposure Assessment. *IEEE Access*. 2024; 12: 8071-8080.
13. Fellan A., Schotten H.D. Overview of the Evaluation Methods for the Maximum EMF Exposure in 5G Networks. *IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN)*. 2022: 53-57.
14. Lebl A., Budimir D. Maximum electric field estimation in the vicinity of 5G base stations before their start-up. *Vojnotehnički glasnik*. 2023; 71(2): 345-361.
15. Aerts S., Deprez K., Verloock L., Olsen R.G., Martens L., Tran P. et al. RF-EMF Exposure near 5G NR Small Cells. *Sensors (Basel)*. 2023; Mar 15; 23(6): 3145.
16. Sali A., Wali S. Q., Osman A. F. Evaluation of RF-EMF Exposure for sub-6GHz 5G NR Massive MIMO Base Station. *2022 IEEE 6th International Symposium on Telecommunication Technologies (ISTT), Johor Bahru, Malaysia*. 2022: 16-21.
17. Ursachianu M. V., Lazarescu C., Bejenaru O. Salceanu A. Assessment of human exposure to EMF generated by 5G mobile phone base stations. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2022;1254 (1): 012026.
18. Deprez K., Verloock L., Colussi L., Aerts S., Van den Bossche M., Kamer J. et al. In-situ 5G NR base station exposure of the general public: comparison of assessment methods. *Radiat. Prot. Dosim.* 2022; 198(6): 358–369.
19. Perov S.Yu., Belaya O.V. Electromagnetic environment created by mobile communication base stations in the 5G pilot area. *Gigiena i sanitariya*. 2023; 102(6): 538-543. (In Russ).
20. Migliore M. D., Franci D., Pavoncello S., Grillo E., Aureli T., Adda S. et al. A New Paradigm in 5G Maximum Power Extrapolation for Human Exposure Assessment: Forcing gNB Traffic Toward the Measurement Equipment. *IEEE Access*. 2021; 9: 101946-101958.

Поступила/Received: 19.06.2024  
Принята в печать/Accepted: 21.06.2024