

EDN: <https://elibrary.ru/crhgmk>DOI: <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2022-62-6-388-396>

УДК 614.875

© Коллектив авторов, 2022

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

ФГБНУ «Научно-исследовательский институт медицины труда имени академика Н.Ф. Измерова», пр-т Будённого, 31, Москва, 105275

Внедрение сетей сотовой связи пятого поколения влечёт за собой увеличение разнообразия сценариев использования электромагнитной энергии в различных отраслях экономики и изменение условий воздействия электромагнитных полей радиочастотного диапазона на человека, в том числе расширение контингента лиц, подвергающихся производственному и внепроизводственному воздействию. Отличительной особенностью ЭМП, создаваемых базовыми станциями, является их сложная частотно-временная и пространственная динамика при наличии постоянных управляющих сигналов, что должно учитываться в современных методах контроля ЭМП.

Применительно к уровням ЭМП, создаваемыми базовыми станциями сотовой связи, в международной практике рассматриваются подходы к оценке максимальных уровней воздействия: теоретических и фактических. Теоретические максимальные уровни ЭМП характеризуют режим эксплуатации базовой станции при наибольшей загрузке сети, наибольшего трафика передачи данных и полного использования частотно-временного ресурса радиоканала при максимальной разрешённой мощности передачи. Определение фактических максимальных уровней ЭМП является альтернативным принципом оценки базовых станций и основано на определении практически достижимых максимальных условий экспозиции с учётом стохастического характера сигнала базовой станции.

С развитием адаптивных антенных технологий в сетях сотовой связи поколения 5G в международной практике гигиенической оценки и контроля ЭМП, создаваемых базовыми станциями, приоритетными становятся подходы статистической оценки фактических максимальных уровней воздействия, принципы которых заложены в международных документах. Для отечественной практики такой подход, направленный на оценку реальных условий экспозиции, является принципиально новым и для реализации потребует не только методологического обновления регуляторной базы, но и проведения комплексных исследований совместно с операторами сетей сотовой связи, в том числе по апробации подходов к экстраполяции результатов селективных измерений.

**Этика.** Данное исследование не требовало заключения этического комитета.

**Ключевые слова:** электромагнитное поле; базовая станция; стандарт 5G/IMT-2020; селективные измерения; гигиеническая оценка

**Для цитирования:** 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. *Мед. труда и пром. экол.* 2022; 62(6): 388–396. <https://elibrary.ru/crhgmk> <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2022-62-6-388-396>

**Для корреспонденции:** Перов Сергей Юрьевич, зав. лабораторией электромагнитных полей, ФГБНУ «Научно-исследовательский институт медицины труда имени академика Н.Ф. Измерова», д-р биол. наук. E-mail: [perov@iriioh.ru](mailto:perov@iriioh.ru)

### Участие авторов:

Перов С.Ю. — концепция и дизайн исследования, редактирование;

Белая О.В. — концепция и дизайн исследования, сбор и обработка данных, написание текста;

Рубцова Н.Б. — концепция и дизайн исследования, редактирование.

**Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Дата поступления: 25.04.2022 / Дата принятия к печати: 21.06.2022 / Дата публикации: 15.07.2022

**Введение.** Разработка и внедрение систем беспроводной связи пятого поколения характеризуют международные тенденции интенсивного развития отрасли телекоммуникаций, достижения которой оказывают все большее влияние на преобразование различных социально-экономических сфер современного общества. Беспроводные сети нового поколения, предоставляющие инновационные услуги радиосвязи, рассматриваются как технологическая база для стратегического развития промышленности, здравоохранения, сельского хозяйства, строительства, транспортной и энергетической инфраструктуры, а также других приоритетных отраслей в рамках реализации национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации». Согласно прогнозу распределения количества абонентов сетей стандарта 5G/IMT-2020 по отраслям экономики РФ в 2026 г., наиболее востребованными сферами будут промышленность, жилищно-коммунальное хозяйство и медицина, в каждой из которых ожидается более 2,1 млн пользователей [1]. С возрастанием

функционального разнообразия возможностей и услуг беспроводной связи внедрение сетей пятого поколения влечёт за собой расширение спектра сценариев использования электромагнитной энергии в различных отраслях экономики и изменение условий воздействия электромагнитных полей радиочастотного диапазона (ЭМП) на человека. Вследствие этого можно ожидать как ещё большее расширение контингента лиц, подвергающихся воздействию ЭМП, так и стирание границ между условиями производственных и внепроизводственных воздействий фактора. Все это определяет актуальность проблемы обеспечения электромагнитной безопасности человека и необходимость совершенствования методов гигиенической оценки и контроля фактора.

Вопросы влияния на здоровье человека ЭМП при эксплуатации сетей беспроводной связи пятого поколения являются предметом обсуждения и исследования специалистов различного профиля во всем мире, в том числе и в РФ. Однако, несмотря на имеющиеся публикации о

необходимости совершенствования действующих нормативно-методических документов [2–6], вопросы применения соответствующих принципов, критериев и методов оценки экспозиции ЭМП, отвечающим специфичным условиям эксплуатации систем сотовой связи различных стандартов, в отечественной научной литературе освещены фрагментарно и недостаточно. В развитии ранее изложенных идей [7] представляет интерес рассмотрение мирового опыта в области контроля ЭМП систем сотовой связи действующих и перспективных стандартов с целью выявления мировых тенденций в этой области и разработки рекомендаций по методическому совершенствованию системы гигиенической оценки фактора на национальном уровне в РФ.

**Особенности эксплуатации базовых станций сотовой связи.** Уровни ЭМП в среде обитания человека, которые создаются при работе базовых станций сетей мобильной связи различных стандартов связи, характеризуются сложным спектральным составом, стохастической временной динамикой и пространственной неоднородностью распределения электромагнитной энергии [8]. Спектральные характеристики сигнала базовой станции определены рабочим диапазоном частот базовой станции, шириной полосы радиоканала и частотно-временной структурой в соответствии со стандартом *GSM*, *UMTS*, *LTE* или *5G/IMT-2020*. Временная динамика уровней ЭМП обусловлена используемым режимом дуплекса с частотным или временным разделением (*FDD* или *TDD*), предусмотренного стандартом связи и конфигурацией базовой станции, а также уровнем трафика передачи данных в сети и количеством подключённых абонентских терминалов в зоне обслуживания базовой станции. Пространственное распределение ЭМП характеризуется диаграммой направленности антенн базовой станции, в т. ч. использованием технологий сканирования и формирования луча в системах *MIMO* и *mMIMO*, которые обеспечивают динамическое фокусирование электромагнитной энергии в заданных направлениях в рамках зоны обслуживания. Наряду с рассмотренными переменными составляющими в сигнале базовой станции присутствуют и постоянные компоненты (опорные сигналы), уровень которых не зависит от фактической загрузки сети и которые выполняют функции синхронизации/контроля в соответствии со стандартом связи. Таким образом, характерной особенностью уровней ЭМП, создаваемых базовыми станциями, в отличие от других передающих радиотехнических объектов является их сложная частотно-временная и пространственная динамика при наличии постоянных управляющих сигналов, что должно учитываться в современных методах контроля условий воздействия фактора на человека.

Принципы и критерии гигиенической оценки уровней ЭМП базовых станций. При гигиенической оценке уровней воздействия ЭМП на человека основным является принцип определения наихудших условий экспозиции — максимальных уровней ЭМП. Применительно к уровням ЭМП, создаваемыми базовыми станциями сотовой связи, в международной практике рассматриваются теоретические максимальные и фактические максимальные уровни воздействия [9, 10].

Теоретические максимальные уровни ЭМП характеризуют режим эксплуатации базовой станции при наибольшей загрузке сети, наибольшего трафика передачи данных и полного использования частотно-временного ресурса радиоканала при максимальной разрешённой мощности

передачи. Подобный режим эксплуатации базовой станции является критическим и маловероятным случаем на практике, поэтому ориентирован на проведение общепринятой типовой оценки уровней ЭМП. Определение теоретических максимальных уровней ЭМП может проводиться в обычном режиме эксплуатации базовой станции на основе селективных измерений постоянной компоненты сигнала от базовой станции к абоненту, которые передаются с фиксированным уровнем мощности [8]. В качестве критерия гигиенической оценки используется максимальный уровень экспозиции  $ППЭ_{max}^{BC}$ , определяемый на основе экстраполяции результатов селективных измерений, которая в общем виде описывается формулой:

$$ППЭ_{max}^{BC} = ППЭ_{ОПОР}^{BC} \cdot K_{ЭКСТ}^{BC} \quad (1)$$

где:

$ППЭ_{ОПОР}^{BC}$  — уровень плотности потока энергии (ППЭ) для опорного сигнала базовой станции,

$ППЭ_{max}^{BC}$  — теоретический максимальный уровень ППЭ базовой станции,

$K_{ЭКСТ}^{BC}$  — коэффициент экстраполяции для конфигурации базовой станции.

В соответствии со стандартом Международной электротехнической комиссии *IEC 62232-2017* [9] при оценке ЭМП базовых станций в зависимости от стандарта сотовой связи 2–4G для измерения постоянных компонент применяют:

- частотно-селективные измерения канала передачи системной информации *BCCH* в сетях *GSM* (2G),
- кодо-селективные измерения первичного общего пилотного канала *P-CPICH* в сетях *UMTS* (3G), опорного сигнала *RS* в сетях *LTE* (4G) [8, 11].

В сигналах базовых станций сетей стандарта *5G/IMT-2020* постоянная составляющая определяется блоком сигнала синхронизации *SSB*, отдельные сигналы в котором выделяются с помощью также кодо-селективных измерений [12].

Коэффициент экстраполяции  $K_{ЭКСТ}^{BC}$ , используемый для оценки теоретических максимальных уровней ЭМП, определяется параметрами конфигурации конкретной базовой станции и включает в общем случае набор коэффициентов, учитывающих отношение максимальной мощности передачи к мощности передачи опорного сигнала стандарта сотовой связи, применение режима дуплекса *TDD*, различия диаграмм направленности опорных сигналов и сигналов трафика в адаптивных антеннах.

Определение фактических максимальных уровней ЭМП является альтернативным принципом оценки базовых станций, который основан на определении практически достижимых максимальных условий экспозиции с учётом стохастического характера сигнала базовой станции. Подобный принцип особенно важен при гигиенической оценке пространственно-неоднородных ЭМП, создаваемых адаптивными антенными системами с динамической диаграммой направленности, которые получили широкое распространение при внедрении сетей сотовой связи стандарта *5G/IMT-2020* [8]. В качестве критерия гигиенической оценки используется фактический максимальный уровень экспозиции  $ППЭ_{max, ф}^{BC}$ , который определяется на основе поправочного коэффициента и в общем виде описывается формулой:

$$\text{ППЭ}_{\text{max}_\phi}^{\text{BC}} = \text{ППЭ}_{\text{max}}^{\text{BC}} \cdot K_{\text{СТАТ}}^{\text{BC}} \quad (2)$$

где:

$\text{ППЭ}_{\text{max}_\phi}^{\text{BC}}$  — фактический максимальный уровень ППЭ базовой станции;

$\text{ППЭ}_{\text{max}}^{\text{BC}}$  — теоретический максимальный уровень ППЭ базовой станции;

$K_{\text{СТАТ}}^{\text{BC}}$  — поправочный коэффициент, учитывающий снижение фактической максимальной мощности при эксплуатации БС на основе статистики её распределения.

Таким образом, поправочный коэффициент  $K_{\text{СТАТ}}^{\text{BC}}$  применяется к теоретическому максимальному уровню ЭМП, который рассматривается в качестве базового уровня, и основан на статистическом исследовании распределения передаваемой мощности при эксплуатации базовой станции в реальных условиях [13, 14].

**Тенденции развития подходов к гигиенической оценке ЭМП систем стандарта 5G/IMT-2020.** Технологические различия сетей стандарта 5G/IMT-2020, развёртывание которых происходит при одновременной эксплуатации сетей действующих поколений сотовой связи 2–4G, обуславливает необходимость совершенствования методологических подходов к гигиенической оценке ЭМП, создаваемых новыми источниками. В частности, для учёта сложной электромагнитной обстановки, создаваемых адаптивными антеннами с технологиями формирования и сканирования луча, приоритетными становятся принципы статистической оценки фактических максимальных уровней воздействия, заложенные в международных документах МЭК [9, 10].

Непосредственно для инструментальной оценки ЭМП, создаваемых базовыми станциями стандарта 5G/IMT-2020, в 2020–2021 гг. регламентированы методики на национальном уровне в Швейцарии [12], Китае [15] и Малайзии [16], которые, в свою очередь, демонстрируют два различных подхода к определению теоретических максимальных уровней воздействия. Тогда как методики в Швейцарии [12] и Малайзии [16] основаны на экстраполяции результатов кодо-селективных измерений вторичного сигнала синхронизации SSS блока синхронизации SSB, методика Китая [15] основана на результатах частотно-селективных измерений сигнала передачи трафика от базовой станции к абонентскому терминалу. Оба типа методик моделируют максимальный наихудший с гигиенических позиций режим эксплуатации базовой станции, однако этот подход может приводить к недооценке (переоценке) фактических условий экспозиции ЭМП и рассматривается зарубежными специалистами как устаревший, в особенности применительно к антенным системам типа *mMIMO* [17–19]. Выходная мощность подобных антенн распределяется между многими элементами антенной решётки, которые используются для формирования множества лучей синхронизации и передачи трафика в различных направлениях, поэтому на практике предположение о концентрации всей мощности излучения антенной решётки в одном луче представляется нереалистичным [20, 23]. Решение этой проблемы является предметом статистических исследований по определению поправочных коэффициентов, отражающих изменчивость диаграммы направленности антенны во времени и пространстве, технологию формирования луча, реальные сценарии эксплуатации базовых станций различных стандар-

тов сотовой связи и соответствующие им условия экспозиции ЭМП [8, 10].

Методы статистической оценки воздействия ЭМП, создаваемых базовыми станциями в реальных сценариях эксплуатации с учётом переменного количества подключаемых абонентов, их распределения в пространстве, моментов и продолжительности подключения и т.п., отражают подход учёта фактических максимальных условий экспозиции и включают как теоретические [19–22], так и инструментальные [17, 23–25] исследования, в результате которых определяются реалистичные пороги максимальных мощностей излучения источников в зависимости от условий их эксплуатации.

Например, в работе [19] предложена статистическая модель для реалистичной консервативной оценки воздействия ЭМП от антенн базовых станций типа *mMIMO*, которая показала, что с учётом возможных сценариев даже при высокой степени загрузки сети фактический максимальный уровень ЭМП по критерию 95-го перцентиля составлял 7–22% от теоретического максимального уровня. Результаты трёхмерного моделирования пространственного канала передачи с учётом реалистичных конфигураций трафика и распределения абонентов в секторе показали, что 95-й и 99-й перцентили кумулятивной функций распределения фактической мощности передачи базовой станции типа *mMIMO* составляли 22–26% и 27–32% от теоретического максимума, соответственно [22].

Исследование [17] стохастической природы технологий формирования луча при работе антенных систем *mMIMO* проводилось на основе натурных измерений ЭМП в лабораторных условиях, в частности, оценивались пространственные изменения ЭМП вокруг лабораторного стенда антенны *mMIMO* при различных скоростях передачи данных и конфигурациях профилей лучей в зависимости от количества и расположения абонентов.

В исследовании [23] для реалистичной оценки условий воздействия ЭМП был проведён мониторинг уровней мощности излучения базовых станций типа *mMIMO* в коммерческих сетях поколения 5G (Австралия). В течение 24 ч отслеживалось динамическое распределение мощности передачи базовых станций для каждого луча, формируемого при обслуживании подключённых пользователей. Сбор данных осуществлялся с помощью системы сетевого управления на основе сетевых счётчиков и событий об операциях базовой станции. Результаты исследований показали, что величина фактической максимальной мощности излучения базовой станции по критерию 95-го перцентиля оказалась ниже теоретической максимальной на 8,8 дБ. По данным исследования [24] уровни фактической мощности излучения базовых станций в сетях сотовой связи поколения 4G (Италии) составляли 20–23% от максимальной. Результаты аналогичных исследований мониторинга сетей поколения 3G (Швеция) показали, что уровни фактической мощности излучения базовых станций по критериям средних, медианных значений и 90-го перцентиля составили 23%, 17% и 35%, соответственно, от максимальной мощности [25]. При этом отмечена сильная корреляция между результатами сетевых измерений мощности базовых станций и натурных селективных измерений уровня ЭМП со средней величиной относительной ошибки 2,7% [25].

Рассмотренные методы определения фактических максимальных уровней ЭМП применительно к гигиенической оценке базовых станций сотовой связи активно разраба-

тываются за рубежом и представляются перспективными в качестве типового подхода в новой редакции международного стандарта МЭК 62232 [23]. Однако, уже в настоящее время результаты статистических исследований используются в нормативной документации на национальном уровне в Швейцарии, где при оценке соблюдения гигиенических регламентов ЭМП базовых станций введены поправочные коэффициенты для учёта особенностей эксплуатации адаптивных передающих антенн с переменной диаграммой направленности. Поправочные коэффициенты, применяемые к максимальной мощности передачи антенны и разработанные на основе результатов научных статистических исследований, лежат в диапазоне от 0,1 до 1,0 и регламентированы в зависимости от размеров антенных решёток (количества подмассивов — антенных блоков). Например, для антенных решёток с количеством подмассивов 64 и более определен поправочный коэффициент, который допускает наибольшее увеличение мощности передачи — до 10 раз относительно наихудших условий экспозиции. Применение поправочных коэффициентов подразумевает возможность кратковременного повышения максимальной мощности передачи адаптивных антенн в реальных условиях эксплуатации до фиксированного уровня, что в свою очередь должно быть обеспечено со стороны оператора базовой станции путём оснащения антенн автоматическим ограничением мощности — программным приложением, которое непрерывно отслеживает общую мощность передачи антенны в секторе [26].

**Заключение.** С развитием адаптивных антенных технологий в сетях сотовой связи поколения 5G в международной практике гигиенической оценки и контроля ЭМП, создаваемых базовыми станциями, можно отметить активное

изучение и внедрение концепции определения фактических максимальных уровней экспозиции, причём с использованием как расчётных, так и инструментальных методов. Для отечественной практики такой подход, направленный на оценку реалистичных условий экспозиции, является принципиально новым, реализация которого потребует не только методологического обновления нормативно-методической базы, но и проведения комплексных исследований совместно с операторами сетей сотовой связи, в том числе по апробации подходов экстраполяции результатов селективных методов измерений. Соответственно, для методического совершенствования системы гигиенической оценки ЭМП, создаваемых базовыми станциями сотовой связи в РФ, представляется необходимым:

- внедрение селективных методов оценки ЭМП от базовых станций действующих и перспективных поколений;
- внедрение подхода экстраполяции результатов селективных измерений для оценки теоретического максимального уровня экспозиции ЭМП;
- разработка методов мониторинга фактической мощности излучения базовой станции с помощью контролеров сети, систем поддержки эксплуатации сети и т. п.;
- разработка подхода определения фактических максимальных уровней экспозиции на основе статистических исследований распределения передаваемой мощности при эксплуатации базовых станций в реальных условиях;
- разработка регулирующих документов по обеспечению взаимодействия органов санитарно-эпидемиологической службы и владельцев/операторов базовых станций в рамках контроля ЭМП.

### Список литературы

1. Приказ Минкомсвязи России от 27.12.2019 № 923 «Об утверждении Концепции создания и развития сетей 5G/IMT-2020 в Российской Федерации». Available at: <https://legalacts.ru/doc/prikaz-mincomsvjazi-rossii-ot-27122019-n-923-ob-utverzhenii/>
2. Зайцева Н.В., Уланова Т.С., Пономарев А.А., Молок О.А., Одегов А.А. Оценка и обоснование необходимости пересмотра методических документов по измерению электромагнитного излучения от базовых станций сотовой связи. *Здоровье населения и среда обитания*. 2020; 5(326): 29–35. <https://doi.org/10.35627/2219-5238/2020-326-5-29-35>
3. Егорова А.М., Луценко Л.А., Сухова А.В., Колюка В.В., Турдыев Р.В. Гигиеническая оценка влияния сетей сотовой связи 5G/IMT-2020 на здоровье населения (обзор литературы). *Гигиена и санитария*. 2021; 100(9): 929–32. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-9-929-932>
4. 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>
5. Сизов Д.В., Панкратов Д.Ю. Оценка влияния электромагнитных полей сетей 5G на человека. *Телекоммуникации и информационные технологии*. 2021; 8(1): 13–20.
6. Маслов М.Ю., Сподобаев Ю.М. Конвергенция в нормировании и контроле электромагнитных полей современных беспроводных технологий. *Медицина труда и промышленная экология*. 2020; 60(9): 610–3. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2020-60-9-610-613>
7. Перов С.Ю., Белая О.В., Балзано К., Рубцова Н.Б. Проблемы оценки электромагнитных полей от систем мобильной связи сегодня и завтра. *Медицина труда и промышленная экология*. 2020; 60(9): 597–99. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2020-60-9-597-599>
8. Adda S., Aureli T., D'elia S., Franci D., Grillo E., Migliore M.D. et al. A Theoretical and Experimental Investigation on the Measurement of the Electromagnetic Field Level Radiated by 5G Base Stations. *IEEE Access*. 2020; 8: 101448–63. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998448>
9. IEC 62232-2017. 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; 2017.
10. TR 62669-2019. Case studies supporting IEC 62232—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; 2019.
11. Салахов А.З. Оценка воздействия средств мобильной связи пятого поколения 5G на человека путем экспериментального измерения и экстраполяции максимальной мощности электромагнитного поля. *Вестник Российского нового университета. Серия сложные системы: модели, анализ и управление*. 2020; 5: 29–39. <https://doi.org/10.25586/RNU.V9I87.20.05.P029>
12. METAS-report 154.1-2020-5218-1016. Technical Report: Measurement Method for 5G NR Base Stations up to 6 GHz. - Federal Institute of Metrology METAS. Bern-Wabern. 2020:25. Available at: <https://www.metas.ch/metas/en/home/dok/publikationen/meldungen/2020-02-18.html>

13. Adda S., Aureli T., Coltellacci S., D'elia S., Franci D., Grillo E. et al. A Methodology to Characterize Power Control Systems for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields Generated by Massive MIMO Antennas. *IEEE Access*. 2020; 8: 171956–171967. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3024764>
14. Franci D., Coltellacci S., Grillo E., Pavoncello S., Aureli T., Cintoli R. et al. Experimental Procedure for Fifth Generation (5G) Electromagnetic Field (EMF) Measurement and Maximum Power Extrapolation for Human Exposure Assessment. *Environments*. 2020; 7(3): 22. <https://doi.org/10.3390/environments7030022>
15. HJ 1151-2020. Monitoring method for electromagnetic radiation environment of 5G mobile communication base station (on trail). 2020: 16. Available at: <http://www.guoyang.gov.cn/zwgk/zdlyxxgkx/sthj/hyfsaqjg/202103/P020210303363740255142.pdf>
16. MCMC MTSFB TC G032:2021 Technical code. Prediction and measurement of RF RMF exposure from base station. 2021: 78. Available at: [https://www.mcmc.gov.my/skmmgovmy/media/General/registers/MCMC-MTSFB-TC-G032\\_2021-Prediction-and-Measurement-of-RF-EMF-Exposure-from-Base-Station.pdf](https://www.mcmc.gov.my/skmmgovmy/media/General/registers/MCMC-MTSFB-TC-G032_2021-Prediction-and-Measurement-of-RF-EMF-Exposure-from-Base-Station.pdf)
17. Loh T.H., Cheadle D., Heliot F., Sunday A., Dieudonne M.A. Study of Experiment-based Radio Frequency Electromagnetic Field Exposure Evidence on Stochastic Nature of A Massive MIMO System. 2021 *15<sup>th</sup> European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. 2021: 1–5. <https://doi.org/10.23919/EuCAP51087.2021.9411325>
18. Степанец И., Фокин Г. Особенности реализации Massive MIMO в сетях 5G. Первая миля. 2018; 1: 44–50. <https://doi.org/10.22184/2070-8963.2018.70.1.46.52>
19. Thors B., Furuskär A., Colombi D., Törnevik C. Time-averaged realistic maximum power levels for the assessment of radio frequency exposure for 5G radio base stations using massive MIMO. *IEEE Access*. 2017; 5: 19711–9. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2753459>
20. Chiaraviglio L., Lodovisi C., Franci D., Grillo E., Pavoncello S., Aureli T. et al. What is the Impact of 5G Towers on the Exposure over Children, Teenagers and Sensitive Buildings? *arXiv preprint*. 2022: arXiv:2201.06944. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2201.06944>
21. Xu B., Anguiano Sanjurjo D., Colombi D., Törnevik C. A Monte Carlo Analysis of Actual Maximum Exposure From a 5G Millimeter-Wave Base Station Antenna for EMF Compliance Assessments. *Frontiers in Public Health*. 2022; 9: 777759. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2021.777759>
22. Baracca P., Weber A., Wild T., Grangeat C. A Statistical Approach for RF Exposure Compliance Boundary Assessment in Massive MIMO Systems. In: WSA 2018; 22<sup>nd</sup> *International ITG Workshop on Smart Antennas*. 2018: 1–6.
23. Colombi D., Joshi P., Xu B., Ghasemifard F., Narasaraju V., Törnevik C. Analysis of the Actual Power and EMF Exposure from Base Stations in a Commercial 5G Network. *Applied Sciences*. 2020; 10(15): 5280. <https://doi.org/10.3390/app10155280>
24. Persia S., Carciofi C., D'Elia S., Suman R. EMF evaluations for future networks based on Massive MIMO. In: 2018 *IEEE 29<sup>th</sup> Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*. 2018: 1197–202. <https://doi.org/10.1109/PIMRC.2018.8580893>
25. Colombi D., Thors B., Persson T., Wirén N., Larsson L.E., Jonsson M. et al. Downlink power distributions for 2G and 3G mobile communication networks. *Radiat Prot Dosimetry*. 2013; 157(4): 477–87. <https://doi.org/10.1093/rpd/nct169>
26. Erläuterungen zur Änderung der Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV) 17. Dezember 2021: 10. Available at: <https://www.news.admin.ch/news/message/attachments/69619.pdf>