

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ (ПО ВИДАМ ИЗМЕРЕНИЙ)/THE DEVICES AND METHODS OF MEASUREMENT (BY TYPES OF MEASUREMENTS)

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160.10>

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ВБЛИЗИ БАЗОВЫХ СТАНЦИЙ МОБИЛЬНЫХ ОПЕРАТОРОВ

Научная статья

Казенас В.Е.^{1,*}, Чарыков В.И.², Копытин И.И.³

¹ ORCID : 0009-0008-5387-1236;

² ORCID : 0000-0002-6434-3825;

³ ORCID : 0000-0002-1295-1896;

¹ Уральский государственный университет путей сообщения, Курган, Российская Федерация

^{1,3} Курганский государственный университет, Курган, Российская Федерация

² Курганский институт железнодорожного транспорта, филиал Уральского государственного университета путей сообщения, Курган, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (kzenas64[at]mail.ru)

Аннотация

С развитием технологий связи вопросы, связанные с воздействием электромагнитного излучения, становятся все более актуальными. В работе предложен, на основании функциональной схемы, программно-аппаратный комплекс для мониторинга электромагнитной экологии и электромагнитной безопасности радиоэлектронной обстановки окружающей среды вблизи базовых станций мобильных операторов. Получены результаты замеров плотности потока энергии вблизи базовой станции в полосе частот 824-960 МГц и 1710-2170 МГц. Сформирована пространственная картина опасности электромагнитных излучений. Разработана оригинальная антенна измерителя, которая имеет три дипольно-детекторные микросборки, образующие взаимно-ортогональную структуру. Поставлена задача разработки и внедрения более детализированных регламентов, учитывающих особенности функционирования систем укладки мобильной связи и другие нововведения в области технологий связи. Исследование направлено на комплексный анализ проблемы электромагнитной безопасности на урбанизированных территориях, что позволит выработать обоснованные рекомендации для повышения уровня безопасности и защиты здоровья граждан.

Ключевые слова: электромагнитное излучение, мониторинг, измерительный комплекс, окружающая среда, здоровье, базовая станция, мобильный оператор.

DEVELOPMENT OF A SOFTWARE AND HARDWARE SYSTEM FOR ECOLOGICAL MONITORING OF THE ENVIRONMENT NEAR MOBILE OPERATORS' BASE STATIONS

Research article

Kazenas V.E.^{1,*}, Charikov V.I.², Kopitin I.I.³

¹ ORCID : 0009-0008-5387-1236;

² ORCID : 0000-0002-6434-3825;

³ ORCID : 0000-0002-1295-1896;

¹ Ural State University of Railway Transport, Kurgan, Russian Federation

^{1,3} Kurgan State University, Kurgan, Russian Federation

² Kurgan Institute of Railway Transport, branch of the Ural State University of Railway Transport, Kurgan, Russian Federation

* Corresponding author (kzenas64[at]mail.ru)

Abstract

With the development of communication technologies, issues related to the impact of electromagnetic radiation are becoming increasingly relevant. Based on a functional scheme, the paper proposes a software and hardware system for monitoring the electromagnetic environment and electromagnetic safety of the radio-electronic environment near mobile operators' base stations. The results of measurements of energy flux density near the base station in the 824-960 MHz and 1710-2170 MHz frequency bands have been obtained. A spatial picture of the danger of electromagnetic radiation has been formed. An original measuring antenna has been developed, which has three dipole-detector microassemblies forming a mutually orthogonal structure. The task has been set to develop and implement more detailed regulations that take into account the specifics of the functioning of mobile communication systems and other innovations in the field of communication technologies. The research is aimed at a complex analysis of the problem of electromagnetic safety in urban areas, which will allow the development of sound recommendations for improving the level of safety and health protection of citizens.

Keywords: electromagnetic radiation, monitoring, measuring complex, environment, health, base station, mobile operator.

Введение

В современных урбанизированных территориях наблюдается стремительный рост числа базовых станций мобильной связи, что, в свою очередь, вызывает необходимость обеспечения электромагнитной безопасности. С увеличением плотности населения и развитием технологий связи, вопросы, связанные с воздействием электромагнитного излучения, становятся все более актуальными. Несмотря на то, что многочисленные исследования не подтверждают прямую связь между воздействием электромагнитного излучения от мобильных телефонов и

развитием раковых заболеваний, общественные дискуссии о возможных долгосрочных последствиях продолжаются. Это подчеркивает важность разработки и внедрения мер, направленных на защиту здоровья граждан.

Из этого следует, что актуальность данной работы заключается в необходимости создания безопасной городской среды, где жители могут чувствовать себя защищенными от потенциальных рисков, связанных с электромагнитным излучением. В условиях постоянного роста числа базовых станций, важно не только установить их на безопасных расстояниях от жилых зон, но и разработать строгие стандарты для электромагнитного излучения, а также проводить регулярный мониторинг его воздействия на здоровье населения [1].

Целью выполненных научных исследований явилось разработка программно-аппаратного комплекса по контролю электромагнитной обстановки окружающей среды вблизи базовых станций мобильных операторов.

Научная новизна — методика компьютерного моделирования электромагнитного поля вблизи базовых станций мобильных операторов для формирования пространственной картины опасности электромагнитных излучений.

Методы и принципы исследования

Проблема регулирования электромагнитного излучения (ЭМИ) требует глубокого анализа на фоне глобального роста технологических решений в сфере связи. В рамках этого процесса различные страны разрабатывают меры по ограничению ЭМИ, обеспечивая защиту здоровья граждан. Одним из ключевых элементов, используемых для оценки уровня безопасности, являются предельно допустимые уровни (ПДУ) ЭМИ.

На международном уровне существуют рекомендации, касающиеся безопасности ЭМИ. Например, многие страны ориентируются на уровень в 1000 мкВт/кв. см, что было обосновано исследованиями Всемирной организации здравоохранения. Это, однако, вызывает вопросы о достаточности таких мер, учитывая разнообразие существующих технологий и их воздействия на человека [2]. В частности, в результате недавних исследований в России, проводившихся в 2020–2021 годах, высказывались идеи о возможности повышения предельно допустимых уровней для магнитных полей, но данная инициатива получила противоречивую реакцию и критику со стороны экспертов [3].

Для электромагнитных волн радиодиапазона, распространяющихся в городских условиях, характерны отражение (многократные в том числе), дифракция, интермодуляция, рассеяние, поглощение. Такие особенности распространения формируют сложную многолучевую, интерференционную картину распределения амплитуды напряженности электромагнитного поля (ЭМП), плотности потока электромагнитного излучения (ППЭИ). В зависимости от изменения окружающей обстановки (строительство, снос объектов, появление металлоконструкционных изделий), природных факторов (осадки, солнечная активность), могут наблюдаться заметные флуктуации названных параметров. Особое внимание заслуживает передающая аппаратура радиотелекоммуникационных средств диапазонов от 300 МГц до 5 ГГц, в частности сетей сотовой связи.

Направленные антенны базовой станции являются наиболее широко используемыми полностью закрытыми антеннами, которые делятся на множество типов, включая: антенны с вертикальной поляризацией, с вертикальной и горизонтальной поляризацией, антенны с двойной поляризацией $\pm 45^\circ$, многодиапазонные антенны и т. д. В соответствии с различными режимами модуляции угла наклона, их можно разделить на антенны с фиксированным углом наклона, а также трехсекторные кластерные антенны.

В практике измерений в области распространения радиоволн обычно используются усредненные характеристики городской застройки. Городская застройка в нашем случае — многоэтажная административная, жилая застройка, промышленные районы. Случайный характер городской застройки, сложный характер распространения радиоволн являются причиной случайных значений измерения напряженности поля, плотности потока энергии в данной локации. В этих условиях оценку влияния городской застройки на распространение радиоволн строят на основе медианного (усредненного) значения напряженности поля в точке замера ППЭИ.

Несмотря на большое число моделей, построенных по результатам экспериментальных исследований по распространению радиоволн в городских условиях, не существует единой модели, позволяющей с высокой степенью достоверности определить значение напряженности и, соответственно, ППЭИ в заданной точке радиомониторинга.

Семейство измерительного оборудования для радиомониторинга электромагнитного излучения (ЭИ), как правило (зависит от производителя), имеет или узкие частотные диапазоны или один протяженный диапазон, не имеет возможности одновременного избирательного мониторинга выделенных частотных областей; отсутствует специализированное программное обеспечение к оборудованию для обработки и анализа результатов радиомониторинга.

В соответствии с задачами исследования была предпринята попытка создания измерительной станции радиомониторинга для обеспечения приема ЭИ в заданных интервалах частот, анализа и определения параметров излучения, их регистрацию и документирование в файлах.

Моделирование электромагнитного поля сотовых станций — это сложная задача, которая требует учета множества факторов, включая многолучевое распространение радиоволн и влияние конструкции зданий. Как основная рабочая математическая модель распространения радиоволн в системах сотовой и мобильной связи использовалась модель Walfisch-Ikegami $LOS/NLOS+SD/EMW_i$ с удовлетворяющими для нашего случая ограничениями: диапазон рабочих частот 800 – 2000 МГц; высота подъема антенны базовой станции 4 – 50 м; высота антенны мобильного оператора (приемная антенна-датчик) 1 – 3 м; расстояние между базовой станцией и мобильным оператором 0,02 – 5 км. Алгоритм расчетов с использованием этой модели подробно описан в статье «Математические модели и алгоритмы распространения радиоволн в сотовых сетях мобильной связи» [11].

Кроме того, был использован метод лучевого трассирования (Ray Tracing): этот алгоритм моделирует распространение радиоволн как совокупность лучей, что позволяет ускорить расчеты и учитывать многолучевое распространение.

Для моделирования распространения радиоволн в городской среде использовалось программное обеспечение Wireless InSite, FEKO, CST Microwave Studio.

Модель геометрии зданий и улиц в исследуемой локальной зоне была построена с помощью данных LiDAR (Light Detection and Ranging) и топографии с использованием программного обеспечения RadioPlanner 3.0, которое предназначено для частотно-территориального планирования в частности мобильных сетей 5G (NR), LTE, UMTS, GSM, GSM-R, WCDMA и расчета уровня принимаемой мощности, зоны максимального уровня мощности на приеме и напряженности поля в точке приема.

Использовались следующие методы определения зон с высоким уровнем сигнала:

1. Анализ диаграммы распределения плотности потока энергии радиоволн позволил определить зоны с высоким уровнем сигнала.

2. Измерения сигнала в различных точках сети позволяет определить зоны с высоким уровнем сигнала.

Результаты моделирования сравнивались с измерениями плотности потока энергии электромагнитного излучения в реальных условиях, что способствовало обеспечению точности и достоверности результатов исследования.

Измерения плотности потока энергии ЭМП в полосе частот 824-960, МГц и 1710-2170, МГц проводились широкополосным измерителем ППЭ и направленными узкополосными антеннами, так как точка замеров находилась в ближней зоне измерений. Для этих целей использовался прибор ПЗЗ-ЗМ. Данный измеритель предназначен для измерения ППЭ в режиме непрерывной генерации в диапазоне частот от 0,3 до 4/18 ГГц при проведении контроля уровней электромагнитного поля на соответствие требованиям норм по электромагнитной безопасности в соответствии с СанПиН 1.2.3685-21, СанПиН 2.2.2/2.4.1383-03, МУК 4.3.1167-02, МУК 4.3.1677-03 и др. В состав измерительного комплекса входят: антенна-преобразователь АП-2; измерительно-индикаторный блок; кабель для связи с ПК, оснащенных интерфейсом RS-232; адаптер USB A-COM, логопериодические антенны, антенны волновой канал и микропроцессорный блок программного управления режимами измерений.

Измеритель ПЗЗ-ЗМ обеспечивает измерения средних значений напряженности и плотности потока энергии в СВЧ диапазоне электромагнитных излучений:

- от 0,3 до 18,0 ГГц;

- ППЭ от 1 мкВт/см² до 105 мкВт/см².

Пределы допускаемой относительной погрешности измерения ППЭ, дБ:

- на уровнях от 1,0 до 5,0 мкВт/см² $\pm 3,0$;

- на уровнях свыше 5,0 мкВт/см² $\pm 2,0$.

Измеритель состоит из антенны-преобразователя напряженности переменного электрического поля в постоянное напряжение и измерительного блока, осуществляющего аналого-цифровое преобразование, цифровую обработку сигнала и вывод результатов измерения на экран жидкокристаллического индикатора, а также (при необходимости) — на персональную ЭВМ. Антенна измерителя имеет три дипольно-детекторные микросборки, которые образуют взаимно-ортогональную структуру. Антенна вносится в измеряемое поле электромагнитной волны с вектором распространения k . Положение прибора и ручки антенны параллельно вектору магнитного поля H соответствует минимальной (основной) погрешности измерения. Минимизировать погрешность измерения можно также задавая частоту (если она известна) падающей волны. Это позволяет уточнить коэффициент преобразования антенны, который меняется в зависимости от частоты волны, что и приводит к основной погрешности измерения. В среднем, по диапазону частот измерения уменьшения погрешности достигает 0,5 – 1 дБ.

Антенна состоит из трех датчиков электрического поля дипольного типа. Оси чувствительности датчиков направлены в трех взаимно-ортогональных направлениях. Принятые каждой дипольной антенной сигналы детектируются диодами Шоттки с квадратичной вольтамперной характеристикой, так что результат пропорционален потоку энергии электромагнитной волны с соответствующей направлению антенны компонентой электрического поля. Продетектированные сигналы с отдельных дипольных антенн суммируются и усиливаются встроенным в антенну усилителем.

Регистрирующий блок состоит из аналогово-цифрового преобразователя, центрального процессора, кнопочного блока управления процессором и жидкокристаллическим алфавитно-цифровым дисплеем матричного типа. В качестве аналогово-цифрового преобразователя используется 8-ми входной мультиплексированный АЦП микроконтроллера семейства MCS-51 фирмы INTEL. Он включает в себя 256-элементную последовательно-параллельную резистивную матрицу, компаратор, конденсатор выборки и хранения, регистр последовательного приближения, триггер управления, регистр результатов сравнения и 8 регистров результатов аналогово-цифрового преобразования.

В качестве центрального процессора измерителя используется высокоинтегрированный 8-битовый микроконтроллер ADuC831, основанный на архитектуре MCS-51. В измерителе этот процессор используется для установления режима измерений поля, а также для математической обработки входных сигналов. Пользовательский интерфейс обеспечивается в режиме «Меню» кнопочным блоком управления микроконтроллером и программным управлением изменения настроек режимов измерения. Как предложения выбора режимов работы прибора, так и результаты измерения плотности потока электромагнитной энергии отображаются на жидкокристаллическом индикаторе прибора.

В процессорном блоке производится следующая обработка результатов измерений:

- усреднение результатов измерения текущих значений ППЭ и напряженности электрического (магнитного) поля за выбранное пользователем время усреднения;

- выбор максимальных значений результатов измерения текущих значений ППЭ и напряженности электрического (магнитного) поля за выбранные пользователем интервалы времени;

- хранение в памяти процессора средних и максимальных значений ППЭ и экспозиции облучения суммарным объемом до 1000 результатов замеров, вычисление экспозиции облучения.

Функциональная блок-схема программно-аппаратного комплекса (ПАК) представлена на рисунке 1.



Рисунок 1 - Функциональная блок-схема ПАК
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160.10.1>

Так как зона обслуживания таких станций разбита на несколько секторов (обычно не менее трёх), поэтому измерения проводились в направлениях максимального излучения каждого из них.

Измерения проводились в точках видимости фермы с антеннами, находящейся в городской черте с плотной застройкой на расстоянии 100 м и 200 м. Мониторинг осуществлялся в 5 разных точках от антенны. Измерения проводились утром, днём и вечером на частотах 824-960, МГц и 1710-2170, МГц (табл. 1–3, рис. 2–5).

Расстояния, азимуты точек измерения, полученные показатели нанесены на карту. Информация об антеннах на ферме, частотах, на которых они могут работать, и их операторах была получена в соответствующих организациях.

Таким образом, данное исследование направлено на комплексный анализ проблемы электромагнитной безопасности в урбанизированных территориях, что позволит выработать обоснованные рекомендации для повышения уровня безопасности и защиты здоровья граждан.

Основные результаты

В России система стандартов электромагнитной безопасности включает в себя несколько ключевых регламентов, которые соответствуют требованиям, выдвигаемым как национальными, так и международными нормами. Основной стандарт — ГОСТ Р МЭК 61000-6-7-2019, устанавливающий требования к помехоустойчивости на уровне функциональной безопасности для оборудования, используемого в промышленных системах. Этот стандарт находит применение в случае отсутствия более специализированных стандартов, которые могли бы охватывать конкретные области применения [4].

К важным документам также относятся стандарты серии ИЕС, такие как ИЕС 61508, который касается функциональной безопасности, и ИЕС 61000-1-2, определяющий электромагнитную совместимость и помехи. Эти стандарты позволяют учитывать не только общие, но и специфические требования безопасности, что особенно важно для сложных систем и оборудования, требующих повышенной надежности в условиях электромагнитных воздействий.

Дополнительные нормативные акты, такие как ГОСТ Р 51317.4.6—2000, а также ГОСТ ИЕС/ТС 61000-1-2-2015, направлены на определение методик испытаний и оценку устойчивости к электромагнитным помехам. Эти документы обеспечивают единый подход к тестированию и обеспечению электромагнитной совместимости для различных типов оборудования и систем. Регламентация требует, чтобы применяемые меры безопасности учитывали специфику и предназначение электрических устройств, в том числе в контексте их интеграции в более крупные комплексы и системы.

Стоит отметить, что ГОСТ 12.1.006—84 и ряд других документов акцентируют внимание на защите от электромагнитных полей на рабочих местах. Этот аспект становится все более актуальным в условиях роста плотности размещения базовых станций мобильной связи и других источников электромагнитного излучения в урбанизированных территориях.

Тем не менее существующие стандарты и рекомендации могут иметь несколько недостатков. К ним относится неопределенность в применении датчиков и технологий для непрерывного мониторинга электромагнитных полей, что затрудняет полное соблюдение требований безопасности. При этом международные образцы стирают грань между общими и специфическими нормами, что может привести к недочетам в практике их реализации.

Таким образом, актуальным является необходимость разработки и внедрения более детализированных регламентов, учитывающих особенности функционирования систем укладки мобильной связи и другие нововведения в области технологий связи. Это позволит существенно повысить уровень электромагнитной безопасности и лучше защищать жителей городских территорий от потенциального воздействия электромагнитного излучения.

Результаты мониторинга представлены в таблицах 1-5, рис. 2-5.

Таблица 1 - Измеряемая полоса 1710-2170, МГц

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160.10.2>

позиция на карте	плотность потока, мкВт/см ²	кол-во видимых излучателей, антенн
дата измерений 18.12.24 / время измерений 14:00-15:00		
позиция 1	0,1	1
позиция 2	0,6	2

позиция на карте	плотность потока, мкВт/см ²	кол-во видимых излучателей, антенн
позиция 3	0,5	1
позиция 4	0,5	2
позиция 5	1,3	1
Дата измерений 21.12.24 / Время измерений 11:00-12:00		
позиция 1	0,1	1
позиция 2	0,3	2
позиция 3	0,7	1
позиция 4	0,6	2
позиция 5	0,9	1
Дата измерений 23.12.24 / Время измерений 19:30-20:30		
позиция 1	0,1	1
позиция 2	0,3	2
позиция 3	0,6	1
позиция 4	0,3	2
позиция 5	1,7	1

Примечание: расстояние 200 м от фермы с антеннами

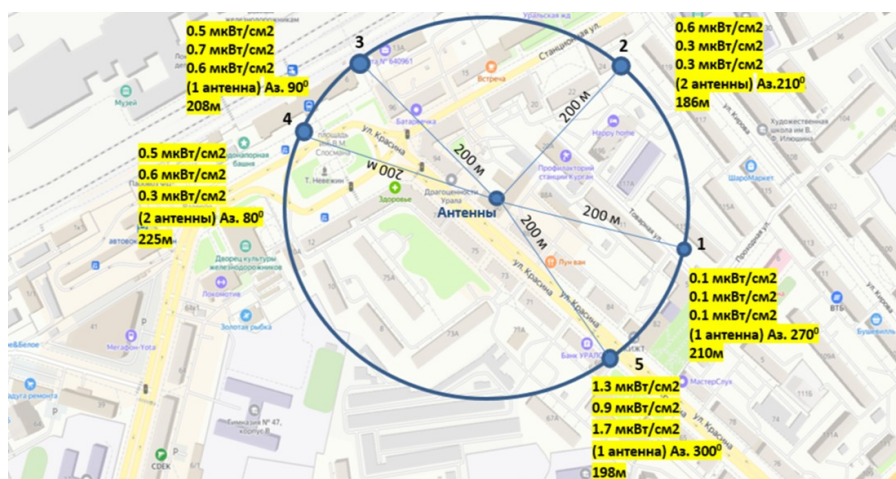


Рисунок 2 - Графическая экспозиция измерений
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160.10.3>

Примечание: полоса 1710-2170 МГц

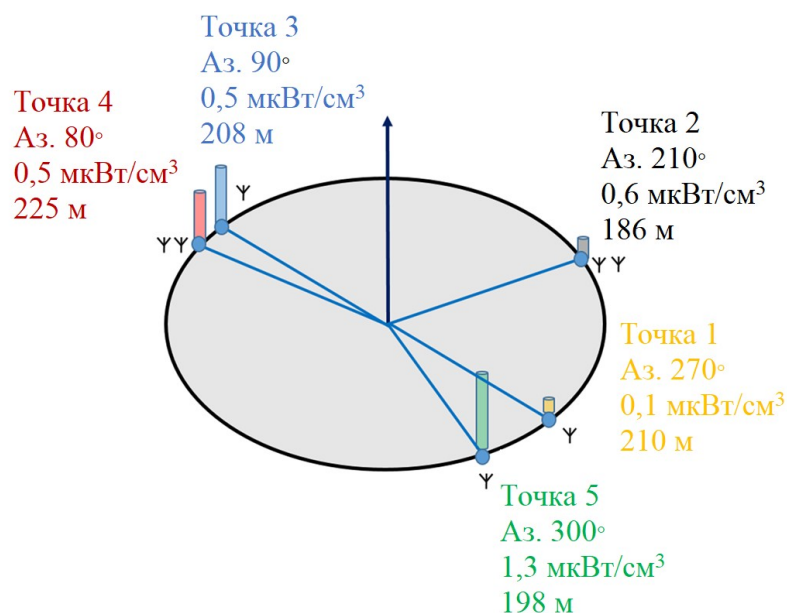


Рисунок 3 - Графическая экспозиция результатов измерений от 18.12.2024
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160.10.4>

Примечание: столбцами схематично показана величина ППЭ

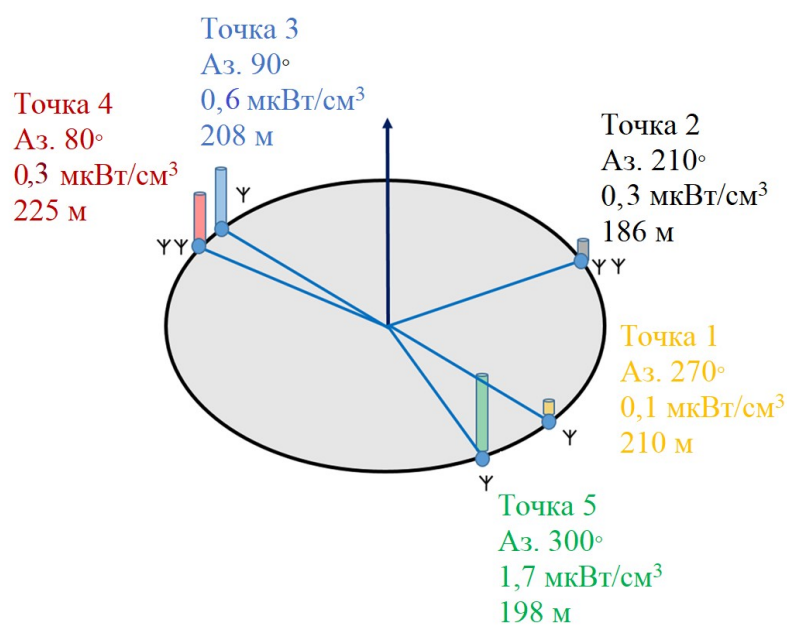


Рисунок 4 - Графическая экспозиция результатов измерений от 23.12.2024
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160.10.5>

Примечание: столбцами схематично показана величина ППЭ

Таблица 2 - Измеряемая полоса 824-960, МГц

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160.10.6>

позиция на карте	плотность потока, мкВт/см ²	кол-во видимых излучателей, антенн
дата измерений 25.02.25 / время измерений 14:00-15:00		
позиция 1	0,2	1
позиция 2	0,5	2
позиция 3	1,2	1
позиция 4	1,7	2
позиция 5	1,3	1

Примечание: расстояние 200 м от фермы с антеннами

Таблица 3 - Измеряемая полоса 824-960, МГц

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160.10.7>

позиция на карте	плотность потока, мкВт/см ²	кол-во видимых излучателей, антенн
дата измерений 21.02.25 / время измерений 14:00-15:00		
позиция 1	1,8	1
позиция 2	0,6	1
позиция 3	0,3	2
позиция 4	0,7	2
позиция 5	2,2	2

Примечание: расстояние 100 м от фермы с антеннами

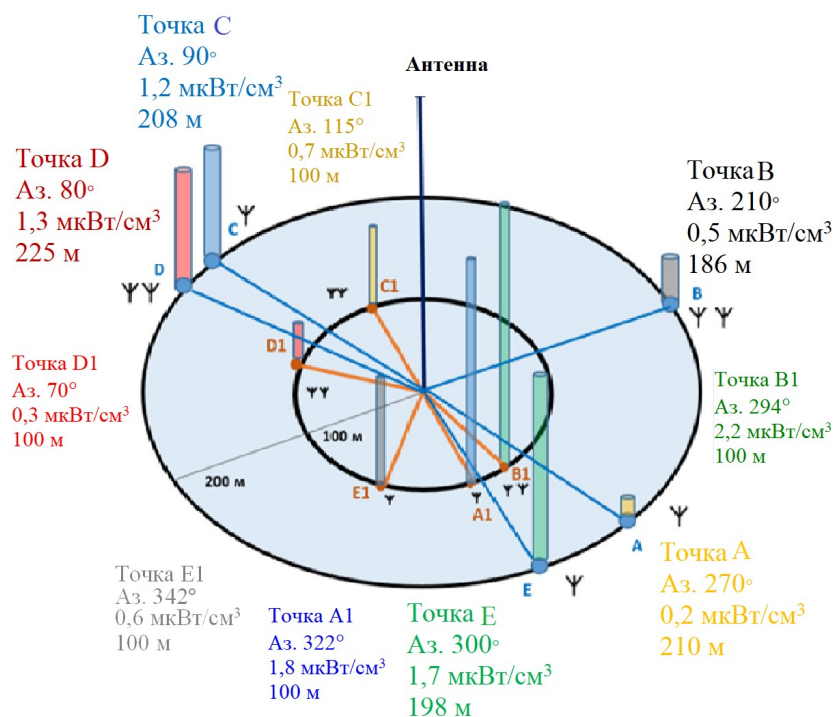


Рисунок 5 - Графическая экспозиция результатов измерений от 21.02.2025, расстояние 100 м и на расстоянии 200 м от 25.02.2025

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160.10.8>

Примечание: столбцами схематично показана величина ППЭ

Обсуждение

Результаты измерений показали, что уровень плотности потока энергии в указанных диапазонах не превышает нормы, однако незначительные изменения показателей указывают на некоторое изменение мощности в течение выбранных временных промежутков.

Не стоит игнорировать и тот факт, что электромагнитные волны затухают при распространении в пространстве: чем дальше от источника сигнала, тем слабее становится сигнал. На практике это означает, что на расстоянии в несколько сотен метров от базовой станции плотность потока энергии становится очень низкой.

Сигнал от базовой станции может ослабляться при прохождении через различные препятствия, такие как стены зданий, деревья и другие объекты, быть подвержен интерференции. Это также способствует уменьшению плотности потока энергии в местах, где находятся люди.

Мониторинг уровней электромагнитного излучения (ЭМИ) в населенных районах является критически важной практикой для оценки воздействия на здоровье человека и обеспечение безопасности окружающей среды. Установление системы регулярного контроля за ЭМИ позволяет своевременно выявлять потенциальные проблемы и принимать меры для их устранения. Эффективный мониторинг охватывает такие параметры, как напряженность электрического и магнитного полей, а также плотность потока энергии, что дает полное представление о состоянии электромагнитного фона в urban территории [5].

Современные технологии мониторинга ЭМИ позволяют собирать и анализировать данные с помощью автоматизированных систем, что значительно повышает точность и оперативность оценок. Использование мобильных приложений и сенсоров для мониторинга ЭМИ становится все более распространенным. Эти решения позволяют не только получать данные об уровне воздействия, но и осуществлять их визуализацию, делая информацию более доступной для заинтересованных сторон, включая местные органы власти и общественность [6].

Долгосрочные исследования воздействия ЭМИ на здоровье требуют дополнительного внимания и постоянного мониторинга. Исследования показывают, что при регулярном повышении уровней ЭМИ могут возникнуть негативные эффекты для здоровья населения, включая бессонницу, головные боли и даже более серьезные заболевания в дальнейшем. Поэтому важно, чтобы данные, полученные в результате мониторинга, использовались для анализа трендов и формирования рекомендаций по снижению риска.

Условия, в которых осуществляется мониторинг ЭМИ, также играют значительную роль. Параметры, учитывающие особенности размещения базовых станций мобильной связи и других источников излучения, должны быть тщательно исследованы. Это необходимо для прогнозирования воздействия ЭМИ на ближайшие жилые и общественные территории, а также для формирования политики по снижению доли излучения в тех местах, где это особенно важно для здоровья [7].

Разработка современного законодательства и рекомендаций по электромагнитной безопасности, основанных на достоверных данных, сделает процесс мониторинга более четким и эффективным. Объединение усилий научного сообщества, бизнеса и государственного сектора позволит создать единый подход к решению вопросов, связанных с электромагнитной безопасностью. Популяризация таких инициатив будет способствовать повышению осведомленности общества о возможных рисках и улучшению качества жизни в урбанизированных территориях [8].

Мониторинг ЭМИ не только защищает здоровье населения, но и способствует ответственному использованию технологий. Важно помнить, что повышение уровня осведомленности о воздействии ЭМИ на здоровье и создание условий для постоянного контроля могут привести к более безопасным и сбалансированным жизненным условиям для всех горожан.

Заключение

В заключении следует подчеркнуть, что проблема электромагнитной безопасности в урбанизированных территориях, особенно вблизи базовых станций мобильных операторов, становится все более актуальной в условиях стремительного роста технологий связи и увеличения плотности застройки. С каждым годом количество базовых станций возрастает, что, в свою очередь, приводит к увеличению уровня электромагнитного излучения в городских условиях. Несмотря на то, что существующие исследования не подтверждают прямую связь между воздействием электромагнитного излучения от мобильных телефонов и развитием раковых заболеваний, общественное беспокойство по этому поводу продолжает расти. Это подчеркивает необходимость разработки и внедрения эффективных мер по повышению электромагнитной безопасности.

Основные результаты исследования заключаются в разработке:

1) программно-аппаратного мультимастотного комплекса мониторинга ППЭ излучения антенн аппаратуры стационарной мобильной связи в условиях урбанизированных территорий;

2) проведении круглосуточных измерений как на отдельных частотах, так и одновременно на разных частотах.

В результате исследования были выявлены флуктуации ППЭ излучения в зависимости от времени суток, что свидетельствует об изменении излучаемой мощности стационарных базовых станций мобильной связи и электромагнитной обстановки в целом; построена пространственная картина распределения ППЭ с учетом городской застройки и особенностей распространения сигнала. Данные моделирования сопоставлены с результатами реальных измерений, что подтвердило их достоверность.

Научная новизна исследования заключается в:

1) разработке оригинальной методики мониторинга ППЭ поля вблизи базовых станций мобильных операторов с использованием программно-аппаратного комплекса, включающего антенную систему с высокой чувствительностью и избирательностью; приёмник-анализатор и блок измерений, способный круглосуточно регистрировать и обрабатывать данные в реальном времени; микропроцессорный блок управления, обеспечивающий усреднение, выбор максимальных значений и хранение до 1000 результатов измерений;

2) разработке методики моделирования электромагнитных полей, основанной на комбинации моделей Walfisch-Ikegami и лучевого трассирования (Ray Tracing), что обеспечило учёт многолучевого распространения радиоволн и влияния городской застройки.

Оригинальность исследования состоит в интеграции методов моделирования и реальных измерений. Сочетание теоретического моделирования (с использованием ПО Wireless InSite, FEKO, CST Microwave Studio) и практических замеров с помощью созданного программно-аппаратного комплекса и с учетом случайных факторов городской застройки позволило добиться высокой точности и достоверности результатов.

Текущие стандарты безопасности в России требуют пересмотра и обновления, чтобы соответствовать современным требованиям и международным нормам. Важно, чтобы эти стандарты были основаны на научных данных и учитывали все аспекты воздействия электромагнитного излучения на здоровье человека.

Практическая значимость заключается в возможности проведения детализированного мониторинга электромагнитной обстановки и формирования пространственных карт опасности. В связи с этим предлагается выявлять зоны опасности и ужесточать регламенты по размещению базовых станций в таких зонах, учитывая особенности городской застройки; обеспечить регулярный мониторинг ППЭ, особенно в жилых зонах, а также рассмотреть переход на микросотовую связь для снижения уровня излучения. Разработанный комплекс и полученные данные могут быть использованы для формирования новых стандартов безопасности и защиты здоровья населения. Эти меры помогут создать более безопасную городскую среду и снизить уровень беспокойства граждан [9].

Мониторинг воздействия электромагнитного излучения является важным аспектом, который требует внимания. Регулярные замеры и анализ данных позволят выявить потенциальные риски и своевременно реагировать на изменения в уровне излучения. Перспективным направлением дальнейших исследований является изучение кумулятивного эффекта многочисленных источников излучения в условиях плотной городской застройки, а также разработка прогностических моделей на основе полученных данных. Это также поможет в формировании общественного мнения и повышении осведомленности граждан о вопросах электромагнитной безопасности [10], [12].

Перспективы дальнейших исследований в этой области обширны. Необходимо продолжать изучение влияния электромагнитного излучения на здоровье человека, а также разрабатывать новые технологии и методы, которые позволят минимизировать его воздействие.

Важно также учитывать мнения и опасения граждан, чтобы выработать четкие рекомендации и стратегии по повышению электромагнитной безопасности [14]. Полученные результаты не только расширяют научные представления об электромагнитной безопасности, но и имеют практическую ценность для разработки нормативных документов и улучшения качества жизни в урбанизированных территориях.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Фазылзянов Р.Р., Научно-производственное объединение
«Государственный институт прикладной оптики», Казань
Российская Федерация
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160.10.9>

Review

Fazilzyanov R.R., Scientific and Production Association
«State Institute of Applied Optics», Kazan Russian Federation
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160.10.9>

Список литературы / References

1. Григорьев Ю.Г. Сотовая связь и здоровье: электромагнитная обстановка, радиобиологические и гигиенические проблемы, прогноз опасности / Ю.Г. Григорьев, О.А. Григорьев. — Москва: Экономика, 2016. — 574 с.
2. Нормирование электромагнитных излучений. — 2015. — URL: https://nngrachev.dajstudio.ru/uch_kurs/sredstva/templ_1/templ_1_5.htm (дата обращения: 05.02.25)
3. Внедрение 5G продолжается // dzen.ru. — 2025. — URL: https://dzen.ru/a/zg1_3y2zrlz6dkej. (дата обращения: 27.05.25)
4. Электромагнитная совместимость. — Введ. 2019-09-24. — Москва: Росстандарт, 2019. — 28 с.
5. Мониторинг электромагнитной обстановки – основа высокого... — 2025. — URL: <https://www.ql-journal.ru/ru/node/605> (дата обращения: 01.07.25)
6. Емельянов В.А. Мониторинг электромагнитного излучения / В.А. Емельянов, А.В. Арсеньев // Сервис в России и за рубежом. — 2007. — № 5.
7. Пат. 27817601 Российская Федерация, МПК RU2781760C1. Способ мониторинга внешней электромагнитной обстановки / Подгорный А.С.; заявитель и патентообладатель Подгорный А.С. — № 2022105389; заявл. 2022-02-25; опубл. 2025-07-30, — 15 с.
8. Измерение уровня ЭМИ - ГК «Лаборатория». — 2024. — URL: <https://gklab.ru/uslugi/fizicheskie-factory/izmerenie-urovnya-emi/> (дата обращения: 01.07.25)
9. Шилов В.В. Проблема электромагнитной безопасности в современных условиях научно-технического прогресса / В.В. Шилов, Т.В. Каляда, Н.М. Фролова // Медицина труда и промышленная экология. — 2013. — № 12.
10. Графкина М.В. Риск-анализ электромагнитной безопасности урбанизированных территорий / М.В. Графкина, Е.Ю. Свиридова // Экология урбанизированных территорий. — 2019. — № 2.
11. Попов В.И. Математические модели и алгоритмы распространения радиоволн в сотовых сетях мобильной связи / В.И. Попов, В.А. Скуднов, А.С. Васильев // Евразийский Союз Ученых. — Рига: Рижский технический университет, 2016.
12. Потапов А.А. Электромагнитная безопасность электроэнергетической инфраструктуры урбанизированных территорий / А.А. Потапов, А.В. Турчанинов, А.Ф. Королев // Экология урбанизированных территорий. — Махачкала: Камертон, 2007. — Вып. 2.
13. Чарыков В.И. Влияние электромагнитного излучения базовых станций сотовой связи на здоровье человека / В.И. Чарыков, В.Е. Казенас // Сборник трудов Всероссийской научно-практ. конф. с междунац. участием «Возможности развития инженерно-технического образования в контексте реализации Транспортной стратегии Российской Федерации». — Курган: КИЖТ УрГУПС, 2025.
14. Гибадуллин Р.Ф. Анализ параметров промышленных сетей с применением нейросетевой обработки / Р.Ф. Гибадуллин, Д.В. Лекомцев, М.Ю. Перухин // Искусственный интеллект и принятие решений. — 2020. — № 1.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Grigor'ev Yu.G. Sotovaya svyaz' i zdorov'e: e'lektromagnitnaya obstanovka, radiobiologicheskie i gigienicheskie problemy', prognoz opasnosti [Mobile communications and health: electromagnetic environment, radiobiological and hygienic issues, risk assessment] / Yu.G. Grigor'ev, O.A. Grigor'ev. — Moscow: E'konomika, 2016. — 574 p. [in Russian]
2. Normirovanie elektromagnitnikh izluchenii [Regulation of electromagnetic radiation]. — 2015. — URL: https://nngrachev.dajstudio.ru/uch_kurs/sredstva/templ_1/templ_1_5.htm (accessed: 05.02.25) [in Russian]
3. Vnedrenie 5G prodolzhaetsya [The introduction of 5G continues] // dzen.ru. — 2025. — URL: https://dzen.ru/a/zg1_3y2zrlz6dkej. (accessed: 27.05.25) [in Russian]
4. E'lektromagnitnaya sovmestimost' [Electromagnetic compatibility]. — Introduced 2019-09-24. — Moscow: Rosstandart, 2019. — 28 P. [in Russian]
5. Monitoring elektromagnitnoi obstanovki – osnova visokogo... [Monitoring the electromagnetic environment – the higher basis]. — 2025. — URL: <https://www.ql-journal.ru/ru/node/605> (accessed: 01.07.25) [in Russian]
6. Yemelyanov V.A. Monitoring elektromagnitnogo izlucheniya [Monitoring of electromagnetic radiation] / V.A. Yemelyanov, A.V. Arsenev // Servis v Rossii i za rubezhom [Service in Russia and abroad]. — 2007. — № 5. [in Russian]
7. Pat. 27817601 Russian Federation, IPC RU2781760C1. Sposob monitoringa vneshnei elektromagnitnoi obstanovki [Method for monitoring the external electromagnetic environment] / Podgornii A.S.; the applicant and the patentee Podgorniy A.S. — № 2022105389; appl. 2022-02-25; publ. 2025-07-30, — 15 p. [in Russian]
8. Izmerenie urovnya EMI - GK "Laboratoriya" [EMF level measurement — GC "Laboratory"]. — 2024. — URL: <https://gklab.ru/uslugi/fizicheskie-factory/izmerenie-urovnya-emi/> (accessed: 01.07.25) [in Russian]
9. Shilov V.V. Problema elektromagnitnoi bezopasnosti v sovremennikh usloviyakh nauchno-tekhnicheskogo progressa [The problem of electromagnetic safety in the modern conditions of scientific and technological progress] / V.V. Shilov, T.V.

Kalyada, N.M. Frolova // *Meditsina truda i promishlennaya ekologiya* [Occupational medicine and industrial ecology]. — 2013. — № 12. [in Russian]

10. Grafkina M.V. Risk-analiz elektromagnitnoi bezopasnosti urbanizirovannikh territorii [Risk analysis of electromagnetic safety in urbanised areas] / M.V. Grafkina, Ye.Yu. Sviridova // *Ekologiya urbanizirovannikh territorii* [Ecology of urbanised areas]. — 2019. — № 2. [in Russian]

11. Popov V.I. Matematicheskie modeli i algoritmi rasprostraneniya radiovoln v sotovikh setyakh mobilnoi svyazi [Mathematical models and algorithms for radio wave propagation in cellular mobile communication networks] / V.I. Popov, V.A. Skudnov, A.S. Vasilev // *Eurasian Union of Scientists*. — Riga: Riga Technical University, 2016. [in Russian]

12. Potapov A.A. Elektromagnitnaya bezopasnost elektroenergeticheskoi infrastrukturi urbanizirovannikh territorii [Electromagnetic safety of the electrical power infrastructure in urbanised areas] / A.A. Potapov, A.V. Turchaninov, A.F. Korolev // *Ecology of urbanised areas*; — Makhachkala: Kamerton, 2007. — Iss. 2. [in Russian]

13. Charikov V.I. Vliyanie elektromagnitnogo izlucheniya bazovikh stantsii sotovoi svyazi na zdorove cheloveka [The impact of electromagnetic radiation from mobile phone base stations on human health] / V.I. Charikov, V.E. Kazenas // *Collection of papers from the All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation "Opportunities for the development of engineering and technical education in the context of implementing the Transport Strategy of the Russian Federation"*. — Kurgan: KIZhT UrGUPS, 2025. [in Russian]

14. Gibadullin R.F. Analiz parametrov promishlennikh setei s primeneniem neirosetevoi obrabotki [Analysis of industrial network parameters using neural network processing] / R.F. Gibadullin, D.V. Lekomtsev, M.Yu. Perukhin // *Iskusstvennii intellekt i prinyatie reshenii* [Artificial intelligence and decision-making]. — 2020. — № 1. [in Russian]