

УДК 537.87:004.9

© Коллектив авторов

П.Н. Захаров, А.Ф. Королев, А.А. Потапов, А.В. Турчанинов

ПРИМЕНЕНИЕ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ ПРИ МОНИТОРИНГЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ РАДИОЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА ВНУТРИ ЗДАНИЙ И НА НЕПОСРЕДСТВЕННО ПРИЛЕГАЮЩИХ ТЕРРИТОРИЯХ

Мониторинг электромагнитных полей радиочастотного диапазона (ЭМП РЧ) в современных условиях является важным компонентом в оценке инфраструктурной развитости обитаемых территорий и их экологической безопасности: он должен проводиться при контроле соблюдения санитарно-гигиенических нормативов и при определении протяженности зон устойчивого функционирования систем беспроводной связи, передачи данных и эфирного вещания. Электромагнитная обстановка в условиях урбанизированных сред отличается высокой степенью пространственной неоднородности, связанной [1, 2]:

- с большим количеством источников радиосигнала с направленными и квазиизотропными передающими антеннами (вещательные центры, базовые станции сотовой связи, точки доступа беспроводных сетей и т.п.);
- со сложной трехмерной структурой среды (рельеф, многоэтажная застройка), приводящей к появлению многолучевого распространения радиоволн;
- с постоянным чередованием зон радиотени и участков с прямой видимостью излучающих антенн, существующим в условиях города.

Эти особенности предопределяют наличие существенных вариаций ЭМП РЧ амплитудой до 20...50 дБ и более на приращениях расстояний от десятков до нескольких сотен метров как в плане, так и по высоте. Поэтому простые метрики: расстояние по прямой до источника излучения, наличие/отсутствие прямой видимости, толщина внешних стен здания и т.п. с низкой достоверностью – обеспечивают априорную оценку электромагнитной безопасности территорий и помещений [3, 4].

В условиях помещений методы мониторинга ЭМП РЧ существенно усложняются следующими особенностями: невозможностью автоматизированной

пространственной привязки экспериментальных данных с помощью средств спутниковой навигации, высокой пространственной вариативностью ЭМП РЧ, наличием многочисленных внутренних источников радиосигнала. Это приводит к использованию на практике сильно упрощенных методик измерений, базирующихся на локализации максимума поля внутри помещения и дальнейшего мониторинга в этой точке (например, вблизи окна), или на проведении нескольких замеров в различных точках помещения с дальнейшим осреднением полученных данных [5, 6], при этом часто исследователи могут адаптировать методику эксперимента под конкретный тип передатчика [7].

В связи с распространением соответствующих технических средств мониторинг ЭМП РЧ часто может осуществляться с помощью индивидуальных носимых экспозиметров-самописцев, в том числе внутри строений. Этот подход позволяет исследователям достаточно быстро набирать значительные объемы статистики по уровням ЭМП РЧ, однако в большинстве случаев полученные результаты обобщенно описывают вариации электромагнитных полей в амплитудной области по наиболее используемым полосам частот (FM радиовещание, сотовая связь и др.) без геопространственной привязки данных [8].

При дальнейшей обработке эта информация чаще всего служит основой для выявления обобщенных закономерностей в уровнях поля по отдельным видам помещений (функциональное назначение, принадлежность к тому или иному населенному пункту и т.п.) без проведения анализа пространственной структуры электромагнитного поля, поиска путей проникновения ЭМП РЧ внутрь помещения и других видов углубленного изучения, для которых необходимо создание как моделей самих помещений, так и распределений уровней поля внутри них,

с последующим проблемно-ориентированным пространственным анализом [9].

Из этого следует, что применяемые на практике методы мониторинга ЭМП РЧ, особенно внутри зданий, чаще всего не имеют цели проанализировать пространственное распределение данного фактора окружающей среды, а также обеспечить возможность объединения разновременных и разнодиапазонных данных радиомониторинга в рамках единой геопропространственной платформы.

Высокая степень пространственной неоднородности ЭМП РЧ как в условиях открытых пространств, так и внутри помещений должна являться одним из ведущих факторов, учитываемых при создании адекватных методов радиомониторинга и обработки экспериментальных данных. Поэтому геоинформационные системы являются одними из самых эффективных и перспективных средств накопления, визуализации и обработки данных радиомониторинга [10].

Однако при решении задач экспериментального изучения и геопропространственного моделирования электромагнитной обстановки внутри зданий (и в непосредственной близости от них, в местах значительного затенения небосклона) фактор невозможности применения средств спутниковой навигации для точной геопропространственной привязки данных и отсутствие на сегодняшний день полностью отработанной технологии навигации внутри помещений на базе иных технических средств (инерциальные системы, навигация по точкам доступа Wi-Fi, вариациям геомагнитного поля и т.п.) [11] приводят к тому, что свою максимальную эффективность ГИС могут продемонстрировать только в результате проведения достаточно больших временных затрат и трудоемких процедур – создания детальных трехмерных моделей зданий, планирования и выноса в натуру с применением лазерных дальномеров и других инструментов квазирегулярных сетей измерений с метровым/субметровым расстоянием между точками и т.п. [10].

Это делает актуальным и необходимым разработку метода мониторинга ЭМП РЧ внутри и вблизи зданий, который обеспечивал бы адекватную фиксацию вариаций уровней радиосигнала в пространственной и амплитудной областях, легкую интеграцию полученных данных в системы геопропространственного моделирования, отличался достаточной оперативностью и простотой проведения как самих измерений, так и подготовительных мероприятий и мог использоваться в широком спектре прикладных задач.

Учитывая предшествующий опыт в области мониторинга электромагнитных полей радиочастотного диапазона в различных условиях [3, 9, 10, 12],

авторы разработали следующий метод оперативного мониторинга ЭМП РЧ внутри зданий и в непосредственной близости них. Метод базируется на следующих технологических приемах проведения экспериментальных работ:

1. Создается метрически корректная цифровая модель здания (целиком или некоторых его этажей), в котором проводятся измерения ЭМП РЧ. Цифровая модель здания, в свою очередь, привязана к модели прилегающей местности.
2. В рамках созданной модели здания намечается сеть прямолинейных маршрутов измерения ЭМП РЧ – по осевым линиям основных коридоров, на участках, непосредственно прилегающих к строению, и т.п., определяются их длины, направление, высотное расположение и другие характеристики.
3. В выбранный момент времени вдоль намеченных маршрутов проводятся измерения ЭМП РЧ посредством носимого средства объективного контроля, обеспечивающего запись измеряемых значений с заданной дискретностью и с последующей выдачей записанных результатов в текстовом виде.
4. Измерения вдоль маршрутов проводятся в движении (например, посредством равномерного непрерывного движения пешехода с измерителем), при этом старт записи показаний осуществляется при начале движения от первой точки маршрута и заканчивается (по команде пользователя) в момент достижения его конечной точки.
5. По завершении измерений пользователем фиксируется суммарное число замеров вдоль каждого маршрута и в среде системы геопропространственного моделирования на маршрутных линиях создается соответствующее число геопривязанных точек, в атрибуты которых заносятся результаты измерения и вспомогательная информация (время, частота и т.п.).

Представленная совокупность технологических приемов проведения измерений обеспечивает следующие преимущества разработанного метода оперативного мониторинга ЭМП РЧ внутри и вблизи зданий:

1. Обеспечивается возможность эффективного использования практически всех видов метрически корректных моделей зданий – от высокодетализированных (и достаточно трудоемких при создании, как в [9]) до самых простых и оперативно создаваемых – например отсканированного и привязанного к аэрокосмическому снимку или карте с общедоступного геопортала поэтажного плана/ов искомого строения.

2. За счет проведения измерений в движении обеспечивается высокая оперативность проведения измерений. Даже значительное по протяженности здание можно обследовать в течение нескольких дней или снизить трудозатраты при регулярном мониторинге электромагнитной обстановки и проводить его в наиболее приемлемые моменты времени – во время сеансов работы обследуемого оборудования, во время отсутствия мешающих измерениям явлений (например, при кратковременном ограничении доступа посторонних в зону эксперимента) и т.п.
3. Привязка модели здания и экспериментальных данных к стандартной системе координат (UTM, СК 95 и др.) обеспечивает возможность объединения и совместного анализа данных мониторинга ЭМП РЧ как от радиопередающих устройств внутри искомого строения, так и вне его, в том числе расположенных на значительной удаленности. Это позволяет проводить комплексный радиомониторинг распределения поля внутреннего радиопередающего устройства в прилегающих помещениях и на участках вблизи здания, а также контролировать распределение ЭМП РЧ от удаленных передатчиков (вещательные передатчики, сотовая связь) внутри и вблизи здания.
4. Предлагаемый метод не накладывает принципиальных ограничений на тип измерительного оборудования, в качестве которого могут выступать как частотно-селективные измерители (измерительные приемники, анализаторы спектра), так и частотно-неселективные приборы, применяемые при оценке электромагнитной безопасности с точки зрения санитарно-гигиенических нормативов.

Практическая апробация предлагаемого метода оперативного мониторинга электромагнитных полей радиочастотного диапазона внутри и вблизи зданий была осуществлена авторами в условиях помещений корпуса физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

В ходе экспериментальных работ в качестве основного прибора использовался измерительный приемник с функциями спектроанализатора EM100 производства компании Rohde&Schwarz и портативная широкополосная (25 МГц...3 ГГц) квазиизотропная антенна АШП-2. Для обеспечения измерений в движении измерительный приемник, приемная антенна и аккумуляторная батарея размещались в рюкзаке. Управление приемником EM100 осуществлялось с компактного нетбука по сетевому интерфейсу (Ethernet) посредством специально

созданной программы. Запись результатов измерений осуществлялась на жесткий диск нетбука в виде текстового файла формата .csv с временной дискретностью 0,25 с.

Для визуализации и геопространственной обработки экспериментальных данных использовалась геоинформационная система ArcGIS. В ней же ранее была создана трехмерная геоинформационная модель всего корпуса физического факультета в системе координат UTM, зона 37N. Опорная сеть маршрутов измерений была сформирована в виде линейных шейп-файлов, для которых в натуру были вынесены начальные и конечные точки, и с помощью функций ArcGIS рассчитаны их протяженность и высотное положение.

Привязка экспериментальных данных проводилась посредством создания точечного шейп-файла и формирования в нем с помощью функции Construct Points серии точек, равномерно расположенных вдоль линии заданного маршрута, число которых соответствовало количеству измерений, проведенных приемником при данном измерительном проходе. Затем в атрибутивную таблицу данного точечного слоя добавлялась таблица с результатами измерений; объединение таблиц осуществлялось по полю порядкового номера точки, отсчитываемого от начала маршрута. Данный метод обеспечил формирование набора геопривязанных слоев данных с результатами экспериментальных измерений внутри помещений, имеющих точную пространственную привязку к системе координат UTM.

В ходе практических изысканий посредством узкополосных измерений изучалось распределение вдоль выбранных маршрутов уровней радиосигналов на несущих частотах ряда вещательных FM радиостанций (полоса приема 120 кГц), а также от лабораторного генератора радиосигнала Rohde&Schwarz SMBV Vector Signal Generator, работавшего на частотах 150, 500 и 1500 МГц (полоса приема 10 кГц) в режиме генерации немодулированного гармонического сигнала с выходной мощностью +25 дБм (316 мВт); в качестве излучателя использовалась квазиизотропная антенна, аналогичная приемной.

Измерения FM радиосигналов проводились по маршруту длиной 183,3 м, располагавшемуся по центральной оси коридора, проходившего вдоль основной продольной секции здания. Данный маршрут был выбран, поскольку его длина позволила набрать достаточный объем данных для последующего анализа и вдоль его протяженности имелись как участки, расположенные вдоль окон во внешних стенах строения, так и изолированные ограждающими конструкциями от внешней среды участки. Соотношение выбранной скорости записи данных и скорости перемещения

приемника вдоль маршрута обеспечило пространственное разрешение (среднее расстояние между точками профиля) на уровне $0,4 \pm 0,03$ м.

В ходе работ были проведены измерения на 7 несущих частотах от 4 разных радиовещательных центров (от каждого центра было выбрано по 2 частоты, кроме одного, осуществлявшего вещание на единственной несущей), расположенных на расстояниях от 1,4 до 25 км от места проведения эксперимента. Помимо различий в дистанции до источника радиосигнала, направления прихода радиоволн (азимуты на передатчик) также варьировались в диапазоне от 346 до 110 градусов с шагом около 40 градусов (см. табл. 1).

На каждой несущей частоте было проведено по два измерения вдоль выбранного маршрута, при этом в ходе первого прохода движение осуществлялось вдоль одного направления, а в ходе второго – в обратном. Это было сделано для того, чтобы оценить степень вариативности получаемых результатов, поскольку при расположении измерительного оборудования в рюкзаке затруднительно обеспечить полностью изотропные измерения уровней радиосигнала; при обработке данных все измерительные ряды приводились к единому направлению движения вдоль соответствующего маршрута. Результаты проведенных измерений FM радиосигналов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты измерений FM радиосигналов в условиях здания

Характеристика	Радиоцентр № 1 (расстояние 9,4 км; азимут 346°)		Радиоцентр № 2 (расстояние 14,3 км; азимут 22°)	
	Частота 101,7 МГц	Частота 104,7 МГц	Частота 103,7 МГц	Частота 106,2 МГц
Среднее значение уровня радиосигнала, дБмкВ	23,5 ± 1,9	27,8 ± 0,1	21,4 ± 0,2	18,1 ± 0,3
Среднеквадратическое отклонение среднего, дБ	6,8 ± 0,3	4,7 ± 0,02	5,0 ± 0,1	5,3 ± 0,2
Минимальное зафиксированное значение, дБмкВ	6,8 ± 2,8	20,7 ± 0,4	10,3 ± 0,5	8,8 ± 0,6
Максимальное зафиксированное значение, дБмкВ	38,4 ± 3,6	40,4 ± 0,6	34,6 ± 0,3	40,4 ± 0,6
Максимальный перепад уровня радиосигнала, дБ	31,6 ± 0,8	19,7 ± 0,3	24,3 ± 0,3	24,5 ± 2,3
K	0,71	0,75	0,53	0,65
K_5	0,89	0,93	0,82	0,88
Характеристика	Радиоцентр № 3 (расстояние 24,9 км; азимут 67°)		Радиоцентр № 4 (расстояние 1,4 км; азимут 110°)	
	Частота 104,2 МГц	Частота 107,8 МГц	Частота 79,92 МГц	
Среднее значение уровня радиосигнала, дБмкВ	22,0 ± 0,4	16,3 ± 0,2	42,1 ± 0,7	
Среднеквадратическое отклонение среднего, дБ	4,0 ± 0,02	4,8 ± 0,2	6,9 ± 0,1	
Минимальное зафиксированное значение, дБмкВ	16,3 ± 1,0	8,2 ± 0,1	23,3 ± 0,5	
Максимальное зафиксированное значение, дБмкВ	34,2 ± 0,6	29,5 ± 1,4	58,8 ± 1,7	
Максимальный перепад уровня радиосигнала, дБ	17,9 ± 0,4	21,4 ± 1,5	35,6 ± 2,2	
K	0,61	0,74	0,64	
K_5	0,83	0,91	0,80	

В табл. 1 для измерений на каждой несущей частоте приведены средние значения полученных статистических характеристик по двум проходам по маршруту одновременно с диапазоном вариаций соответствующих величин между проходами. Также между полученными двумя рядами измерений на каждой частоте вдоль маршрута был рассчитан коэффициент корреляции по неосредненным данным (K) и при сглаживании полученных пространственных вариаций радиосигнала с помощью скользящего среднего с размером окна 5 м (K_5).

Как следует из представленных в табл. 1 данных, несмотря на неидеальные условия проведения измерений с точки зрения обеспечения изотропности приема радиосигнала (неизбежность частичного экранирования приемной антенны телом исследователя и элементами оборудования), тем не менее обеспечивается хорошая повторяемость результатов независимо от направления прохода по маршруту – основные статистические параметры варьируются в пределах 3 дБ. Также помимо стабильности обобщенных характеристик рядов измерений (среднее арифметическое, среднеквадратические отклонение и др.) наблюдается хорошая повторяемость результатов и в пространственной области, что подтверждается как соответствием вариаций радиосигнала вдоль линии профиля (рис. 1), так и высокими значениями коэффициентов корреляции между рядами измерений, полученных при разных проходах.

Среднее значение коэффициента корреляции по необработанным данным, пространственное разрешение которых было $\approx 0,4$ м на всех частотах,

составило 0,66. Само по себе это достаточно высокая величина, т.к. в условиях помещений для пространственной структуры электромагнитного поля характерно наличие значительных случайных вариаций – т.н. быстрых замираний радиосигнала вследствие интерференционных эффектов. Поэтому было дополнительно проведено осреднение полученных рядов данных с помощью скользящего окна длиной 5 м, что позволило снизить влияние случайных вариаций на амплитуду радиосигнала. Применение осреднения существенно увеличило коэффициенты корреляции по всем наборам данных и в среднем по всем частотам составило 0,85, что позволяет говорить о высокой степени достоверности выявляемых предлагаемым методом пространственных вариаций радиосигнала и устойчивости экспериментальной локализации максимумов/минимумов поля внутри зданий не хуже 1...3 м независимо от направления движения измерителя.

Визуализация данных мониторинга ЭМП РЧ внутри здания в рамках геоинформационной модели возможна как в двухмерном, так и в трехмерном представлении. В двухмерном случае наличие всех результатов измерений в атрибутивной таблице слоя позволяет отображать результаты как с помощью цветowych шкал и цифровых подписей, так и размеров условных знаков (рис. 2). Это делает возможным оперативно подготавливать графическую оставляющую отчетов по результатам измерений с локализацией зон высоких/низких уровней ЭМП РЧ, мест возможного проникновения радиосигнала в помещение (оконные проемы) и т.п.

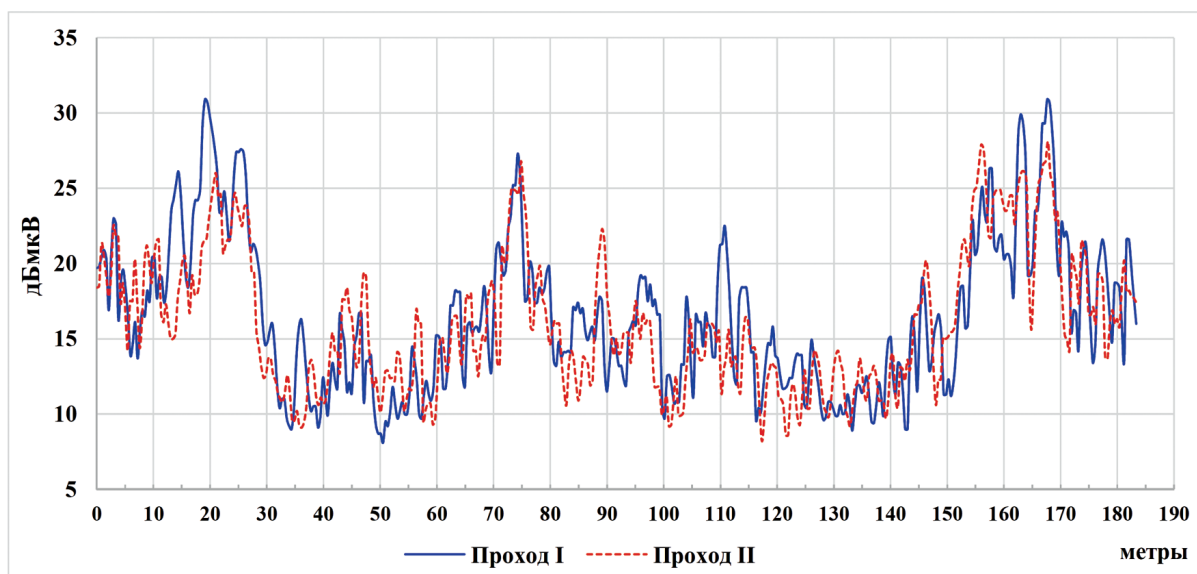


Рис. 1. Вариации уровней FM радиосигнала на частоте 107,8 МГц (без осреднения) по результатам двух независимых проходов ($K = 0,74$; $K_5 = 0,91$)

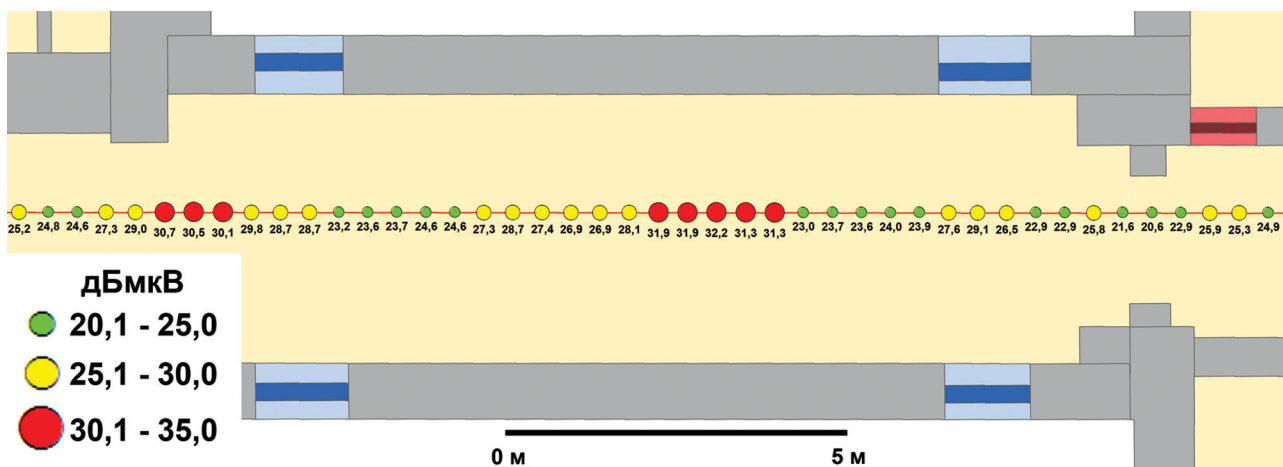


Рис. 2. Пример двумерного отображения результатов измерения уровня радиосигнала на частоте 104,2 МГц вдоль фрагмента маршрута (для каждой точки измерения показан уровень радиосигнала в дБмВ; шаг градаций размера и цвета символа 5 дБ)

Трехмерное представление экспериментальных данных позволяет формировать обзорное отображение больших массивов измерений по всему зданию, рис. 3. Благодаря наличию сопряженной трехмерной модели строения и прилегающей местности, возможен анализ распределения уровней ЭМП РЧ по интересующим исследователя участкам маршрута, а также оценка их расположения относительно соседних зданий и направлений прихода электромагнитных волн.

В качестве средства увеличения визуальной адаптивности данных радиомониторинга при трехмерном представлении, наряду с использованием цветовых шкал, изменением прозрачности и других доступных пользователю инструментов, необходимо отметить возможность присвоения точкам измерений условных высот ($h_{\text{усл}}$), пропорциональных уровню радиосигнала или иному интересующему исследователя параметру. Корректное решение этой задачи (особенно при визуализации большого



Рис. 3. Пример трехмерного отображения вариаций уровня радиосигнала (частота 104,7 МГц) внутри здания (пунктирными линиями показаны уровни, соответствующие значениям 20, 30 и 40 дБмВ; шаг цветовых градаций результатов измерений – 5 дБ)

количества данных) возможно только при выработке единого подхода к заданию условных высот наборов данных. Учитывая свойства 2,5-мерной среды приложения ArcScene ГИС ArcGIS, формализованно такой подход можно сформулировать как:

$$h_{\text{усл}} = h_{\text{баз}} + k \cdot P, \quad (1)$$

где $h_{\text{усл}}$ – условная высота элемента геоинформационной модели, содержащего в атрибутах результат/ты измерений; $h_{\text{баз}}$ – базовый высотный уровень элемента геоинформационной модели (высота его основания в системе высот модели местности), P – значение невысотного параметра (атрибута) элемента геоинформационной модели, подлежащего визуализации; k – согласующий коэффициент, обеспечивающий адекватность визуального отображения элемента геоинформационной модели.

В соотношении (1) в качестве величины $h_{\text{баз}}$ можно использовать истинные значения высот расположения экспериментальных точек (линий, полигонов) в рамках используемой модели местности, это, в частности, позволит обеспечить согласованное по высоте представление данных, полученных на разных этажах многоэтажного здания. Параметр k соотношения (1) также выполняет очень важную роль. Отображение высотных составляющих координатного описания элементов трехмерной модели местности обычно ведется в той или иной геодезической системе высот, имеющей единицей измерения метр, с характерными колебаниями ее значений порядка десятков метров (до первых сотен метров в случае наличия высотных зданий), при этом колебания искомого невысотного параметра (уровня радиосигнала и т.п.) могут быть представлены числами практически любой размерности с относительными колебаниями от десятых долей до многих порядков величины.

В связи с этим присвоение условных высот искомому элементу геоинформационной модели без поправочного коэффициента, скорее всего, приведет к невозможности адекватного одновременного отображения результатов измерений и модели здания/местности. Введение соответствующего коэффициента может «сжать» или «растянуть» по вертикали изображение экспериментальных данных, чтобы обеспечить оптимальное отображение их самих и важных в данном случае элементов модели, т.е., иными словами, провести проблемно-ориентированное согласование используемой в модели местности геодезической системы высот и результатов измерений в атрибутах слоя, образующих свою параметрическую систему высот. Корректный и единообразный выбор значений k особенно важен при отображении нескольких наборов сопоставимых (по типу приемника, антенны и т.п.) экспериментальных данных

в задачах совместного анализа и подготовки отчетной документации.

В качестве дополнительных компонентов трехмерного отображения экспериментальных данных в состав объемной сцены могут быть внедрены дополнительные элементы (линейные, полигональные), для которых $h_{\text{усл}} = \text{const}$ (рис. 3). Визуальное акцентирование таких элементов модели позволяет оперативно выделять зоны с превышением нормативных или заданных пользователем уровней ЭМП РЧ (обычно кратных десяткам, сотням и т.д.), зоны устойчивого/неустойчивого приема и т.п., в том числе при использовании различных настроек прозрачности одновременно для нескольких слоев данных.

Применимость предлагаемого метода оперативного мониторинга ЭМП РЧ внутри и вблизи зданий была также апробирована и для внутренних источников радиосигнала. Для этого были проведены измерения по маршруту длиной 64,5 м, проходившему по оси одного из боковых коридоров 2-го этажа корпуса физического факультета. Источником радиосигнала являлся векторный генератор Rohde&Schwarz SMBV, расположенный в одной из комнат, выходящих в указанный коридор (измерения проводились при закрытых дверях и окнах соответствующего помещения). Измерения были проведены на трех частотах – 150, 500 и 1500 МГц в полосе 10 кГц; для каждой частоты было проведено по два прохода вдоль линии профиля во взаимно противоположных направлениях.

Кроме того, для частоты 500 МГц при том же расположении генератора были проведены дополнительные измерения по маршруту длиной 57,7 м, проходившему во внутреннем дворе здания, на расстоянии около 13,5 м от внешней стены; расположение данного маршрута было параллельно маршруту измерений внутри здания со сдвигом около 23 м в плане и 8,5 м по высоте. Обследованный участок внутреннего двора отличался высокой степенью закрытости небосклона, что не позволяло применять для пространственной привязки данных средства спутниковой навигации. Результаты проведенных измерений радиосигналов от генератора приведены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, как и в случае FM вещания, результаты измерений радиосигналов от локального внутреннего (по отношению к зданию) источника излучения также характеризуются хорошей стабильностью и повторяемостью как в амплитудной, так и в пространственных областях. Вариации статистических показателей рядов данных для одной частоты не превышают 1...2 дБ, а во многих случаях они менее 1 дБ.

Таблица 2

Результаты измерений радиосигналов от лабораторного генератора, расположенного внутри здания

Характеристика	Частота работы генератора			
	150 МГц	500 МГц	1500 МГц	500 МГц (во внутреннем дворе здания)
Среднее значение уровня радиосигнала, дБмкВ	48,0 ± 0,01	62,1 ± 0,3	37,2 ± 0,5	55,8 ± 0,1
Среднеквадратическое отклонение среднего, дБ	11,3 ± 0,7	9,3 ± 0,1	11,8 ± 0,3	5,7 ± 0,1
Минимальное зафиксированное значение, дБмкВ	22,9 ± 1,0	44,4 ± 0,6	17,9 ± 0,1	39,5 ± 0,3
Максимальное зафиксированное значение, дБмкВ	72,2 ± 0,6	85,0 ± 0,05	70,6 ± 1,7	66,4 ± 0,3
Максимальный перепад уровня радиосигнала, дБ	49,3 ± 0,4	40,6 ± 0,7	52,7 ± 1,6	26,9 ± 0,6
<i>K</i>	0,89	0,83	0,91	0,72
<i>K</i> ₅	0,96	0,94	0,96	0,90

Моделирование геообъектов и геопроцессов

Хорошая повторяемость результатов измерений в пространственной области хорошо заметна как на графиках, построенных по результатам измерений (рис. 4), так и по высоким значениям коэффициентов корреляции между полученными рядами данных, в том числе при измерениях во внутреннем дворе здания. Среднее значение коэффициента корреляции по неосредненным данным составило 0,84, а при наличии осреднения – 0,94.

Как видно из рис. 4, при измерениях на всех частотах вдоль маршрута, проходившего в непосредственной близости от передатчика, был зафиксирован четко выраженный максимум поля, расположенный практически точно на ближайшем к передатчику участке маршрута, с вариативностью местоположения как между частотами, так и между независимыми проходами на одной частоте не более 1...3 м.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют, что предлагаемый метод измерений обеспечивает не только текущий экологически ориентированный мониторинг распределения ЭМП РЧ в искомой части здания или вблизи него, но и может быть эффективно использован для детальной пространственной декомпозиции зон электромагнитного воздействия базовых станций сотовой связи и локальных беспроводных сетей (маршрутизаторы и точки доступа Wi-Fi) как по фиксируемой амплитуде

радиосигнала, так и по степени электромагнитного загрязнения и экологической комфортности прилегающих помещений, в том числе в рамках трехмерной модели здания, рис. 5.

Наличие трехмерной модели здания, сопряженной с моделью прилегающей местности, обеспечивает возможность совместного анализа как экспериментальных данных, полученных с помощью рассмотренного метода маршрутных измерений, так и результатов радиомониторинга, полученных с применением традиционной GPS/ГЛОНАСС пространственной привязки данных.

Практическая апробация возможностей ГИС ArcGIS в задачах совместной обработки данных маршрутного и автомобильного радиомониторинга (на базе ранее описанного измерительного комплекса с добавлением GPS-приемника) была проведена посредством измерений радиосигнала на частоте 500 МГц вдоль транспортной сети вблизи здания физического факультета (местоположение и мощность излучения лабораторного генератора оставались теми же, что и в ранее описанных экспериментах). В результате практических изысканий был сформирован точечный шейп-файл, содержащий в атрибутивной таблице результаты измерения уровня радиосигнала с зафиксированными значениями более 20 дБмкВ (меньшие значения были отброшены).

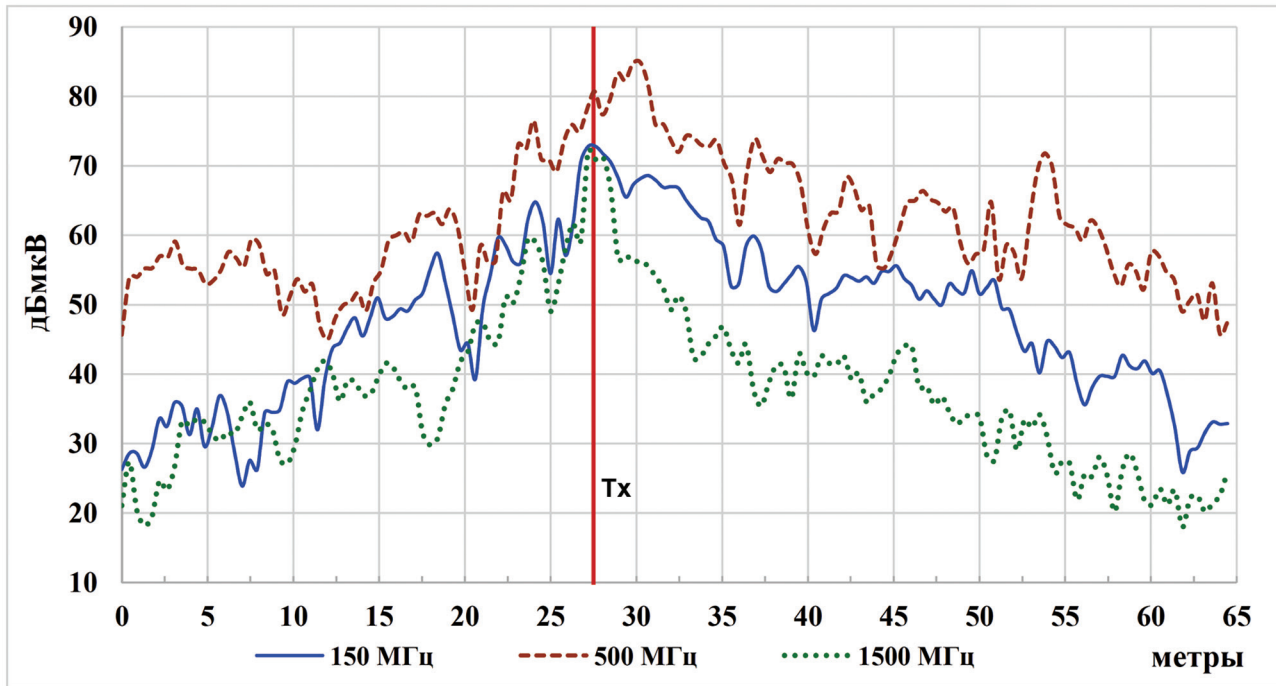


Рис. 4. Вариации уровней радиосигналов (без осреднения) от лабораторного генератора вдоль маршрута внутри здания на трех частотах (показан один проход для каждой частоты); вертикальной линией с обозначением «Tx» показана проекция центра дверного проема помещения, в котором расположена излучающая антенна на линию маршрута

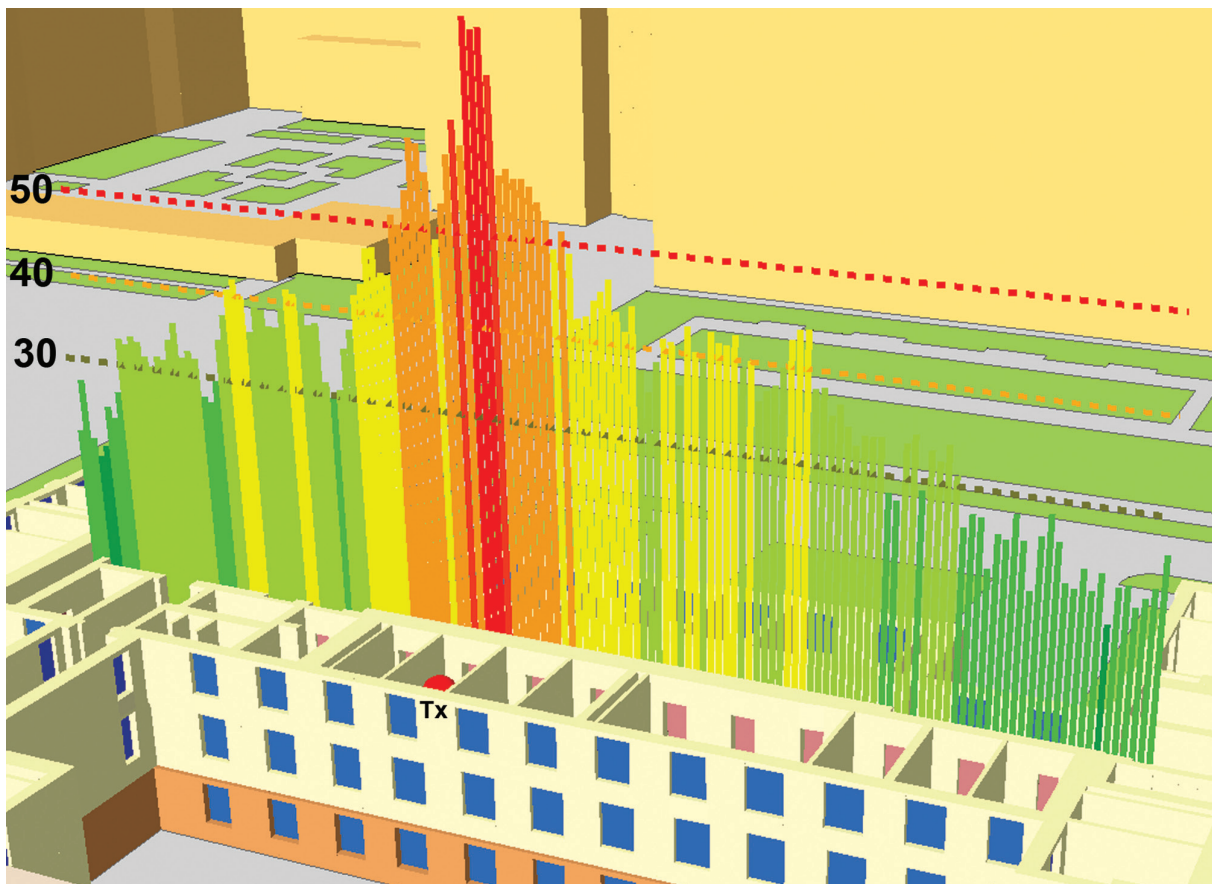


Рис. 5. Трехмерное отображение результатов измерений уровней радиосигнала от локального передатчика (лабораторного генератора); пунктирными линиями показаны уровни, соответствующие значениям 30, 40 и 50 дБмкВ; шаг цветовых градаций результатов измерений – 10 дБ; красной сферой и индексом «Tx» показано местоположение источника ЭМП РЧ в здании

Совместная визуализация полученных данных приведена на рис. 6.

Как видно из рис. 6, объединение в рамках одной объемной модели пространства данных измерений как внутри, так и вне здания, а также использование единой цветовой шкалы и шкалы условных высот для отображения уровня радиосигнала, позволяет в высшей степени наглядно представить распределение поля вокруг излучающего устройства.

Одной из актуальных задач при обработке данных измерений ЭМП РЧ, стоящих перед практикующим исследователем, является выделение зоны с уровнем радиосигнала выше/ниже определенного уровня (санитарных норм, нормативов по уровням электромагнитных помех и т.п.) по результатам нерегулярных в пространственной области измерений. Последнее может быть связано с отсутствием развитой дорожной сети вокруг искомого здания, наличием ограждений, зеленых насаждений и другими причинами.

Помочь в решении этой проблемы может использование функции Minimum Bounding Geometry приложения ArcGIS, которая обеспечивает построение полигонального объекта, охватывающего точки измерения с уровнем радиосигнала более/менее

порогового значения. С учетом того факта, что распределение величины радиосигнала вокруг передатчика может быть очень неравномерным и ассиметричным (из-за расположения и ориентации оконных проемов и формы самого строения), при применении данной функции опциями построения охватывающего полигона могут являться выпуклая оболочка (convex hull) и окружность (circle).

Опция «выпуклая оболочка» обеспечивает создание многоугольника, периметр которого представлен прямолинейными отрезками, соединяющими внешние точки группы точечных объектов с заданным уровнем радиосигнала. Опция «окружность» обеспечивает построение окружности минимального радиуса, охватывающей группу точек с искомым уровнем ЭМП РЧ. На рис. 6 приведено отображение охватывающих полигонов типа convex hull (IV) и circle (V), построенных по точкам измерений с уровнем радиосигнала более 30 дБмкВ, полученных в ходе измерений на частоте 500 МГц на базе автомобиля.

Как видно из рис. 6, применение опции convex hull обеспечивает наиболее строгое отображение искомой зоны вокруг радиопередатчика, базирующейся

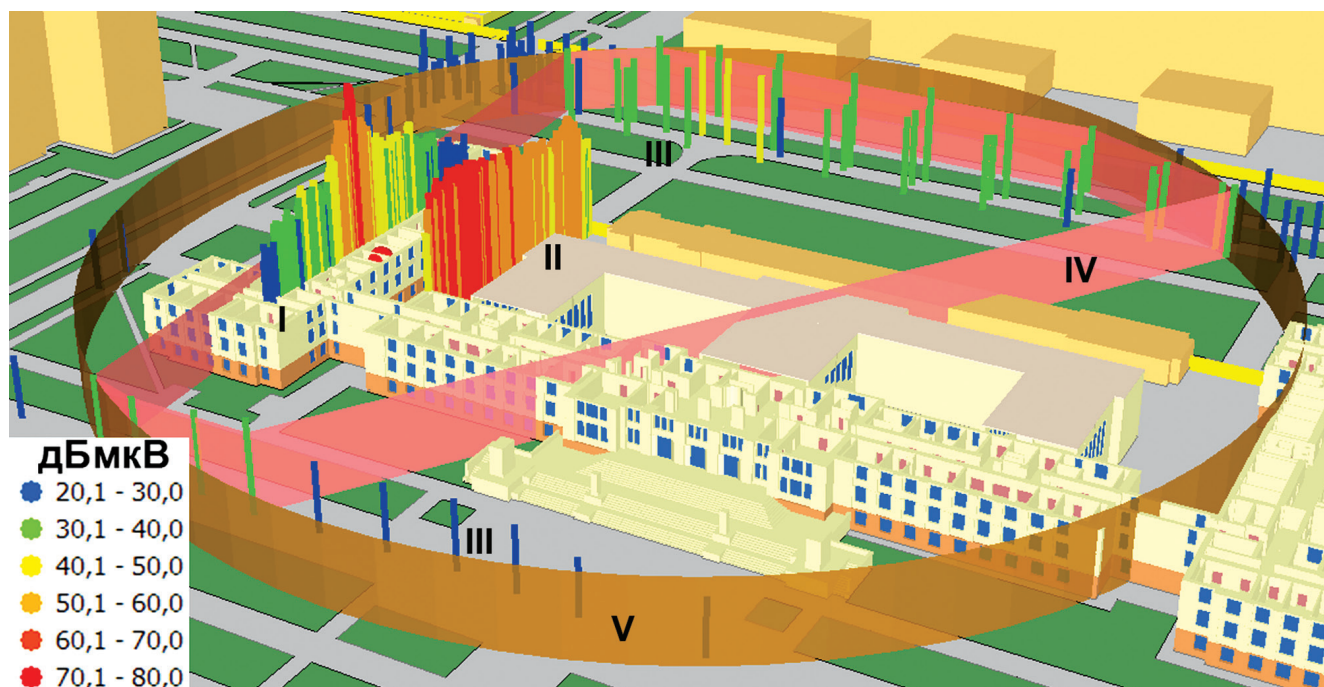


Рис. 6. Комплексное трехмерное отображение результатов радиомониторинга на частоте 500 МГц внутри здания (I), в его внутреннем дворе (II) и на прилегающей территории (III); для отображения всех данных использована единая цветовая шкала (шаг цветовых градаций 10 дБ); для точек на прилегающей территории с уровнями радиосигнала > 30 дБмкВ показаны границы охватывающих полигонов типа convex hull (IV) и circle (V)

исключительно на проведенных измерениях. Опция circle обеспечивает выделение более широкого пространства за счет симметричности используемого геометрического примитива. Очевидно, что в общем случае в условиях априорной неопределенности свойств излучателя (расположение, диаграмма направленности, мощность) инструмент Minimum Bounding Geometry должен использоваться с осторожностью, преимущественно для эффективной визуализации уже накопленной базы данных измерений, иллюстрации предварительных выводов и планирования расположения дополнительных пунктов измерений на необследованных участках.

В заключение представляется необходимым отметить, что представленные в данной работе результаты хорошо иллюстрируют широкие возможности геоинформационных систем по высоко адаптивной визуализации данных радиомониторинга посредством применения различных цветовых/тоновых градаций, присвоения условных высот точкам измерений и настройки степени прозрачности разных слоев данных, что очень важно для подготовки качественной документации по результатам экспериментальных работ. ГИС также являются эффективным инструментом проблемно-ориентированного пространственного анализа больших массивов радиотехнических измерений, обеспечивающим принятие мотивированных решений по планированию и оптимизации дальнейших мониторинговых мероприятий и мер по улучшению электромагнитной обстановки.

Основные выводы

1. Разработан метод оперативного мониторинга ЭМП РЧ внутри и вблизи зданий с применением систем геопро пространственного моделирования, основанный на проведении измерений в движении по сети прямолинейных геопривязанных маршрутов.
2. Метод обеспечивает проведение измерений в условиях невозможности применения средств спутниковой навигации, эффективное использование практически всех видов метрически корректных моделей зданий (от простейших до высокодетализированных), высокую скорость работы и возможность совместного анализа распределения ЭМП РЧ как от внутренних по отношению к зданию, так и от внешних и удаленных источников радиосигнала в рамках единой пространственной модели.
3. Практическая апробация метода на примере мониторинга на 7 несущих частотах FM радиосигналов от четырех удаленных радиовещательных центров показала хорошую

устойчивость и повторяемость получаемых результатов как в амплитудной, так и в пространственной областях: устойчиво выявляются вариации радиосигналов вдоль маршрута измерения с разбросом не более 1...3 м, изменения обобщенных статистических характеристик рядов измерений для заданной частоты не превышают 3 дБ, а величины коэффициентов корреляции составили в среднем 0,66 и 0,85 соответственно для неосредненных и осредненных данных независимых разнонаправленных измерительных проходов.

4. Практическая апробация метода на примере мониторинга радиосигналов в пределах здания от внутреннего источника (лабораторного генератора) на частотах 150, 500 и 1500 МГц также показала его высокую результативность: хорошую устойчивость и повторяемость результатов с вариациями статистических показателей рядов данных для заданной частоты не более 1...2 дБ, а во многих случаях менее 1 дБ. Выявлена высокая устойчивость рядов измерений в пространственном отношении – среднее значение коэффициента корреляции по неосредненным данным составило 0,84, а при наличии осреднения – 0,94; разброс в определении местоположения максимума радиосигнала составлял не более 1...3 м на всех частотах.
5. Подробно рассмотрены способы практического применения геоинформационной системы ArcGIS для двух- и трехмерной визуализации данных радиомониторинга, включающей использование специальных цветовых градаций условных знаков и присвоение условных высот точкам измерений, пропорциональных уровню радиосигнала. Рассмотрены возможности ГИС в задачах оценки расположения границ зоны с заданными параметрами сигнала вокруг радиопередатчика по материалам натурных неравномерно распределенных по местности радиотехнических измерений с применением разных геометрических подходов.
6. Полученные результаты свидетельствуют о возможности совместного применения геоинформационных систем и разработанного метода мониторинга ЭМП РЧ внутри и вблизи зданий для решения широкого спектра актуальных задач: проведения оценки экологической безопасности зданий и помещений по электромагнитному фактору и пространственной декомпозиции зон электромагнитного воздействия повсеместно распространенных типов излучателей (Wi-Fi точки доступа и т.п.).

Ключевые слова: электромагнитные поля радиочастотного диапазона (ЭМП РЧ), геоинформационные системы, пространственная неоднородность, радиомониторинг.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bertoni H.L. Radio Propagation for Modern Wireless Systems. – New Jersey : Prentice hall, 2001. – 340 p.
2. Saunders S.R., Aragon-Zavala A. Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems. – 2nd. ed. – Chichester : John Wiley & Sons, Ltd, 2007. – 545 p.
3. Воробьева Т.А., Краснушкин А.В., Потапов А.А. Изучение и картографирование физического загрязнения городской среды // Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 2005. – № 4. – С. 35-39.
4. Bornkessel C., Schubert M., Wuschek M., Schmidt P. Determination of the general public exposure around GSM and UMTS base stations // Radiation Protection Dosimetry. – 2007. – № 1. – P. 40-47.
5. Seyfi L. Measurement of electromagnetic radiation with respect to the hours and days of a week at 100 kHz – 3 GHz frequency band in a turkish dwelling // Measurement. – 2013. – № 46. – P. 3002-3009.
6. Beekhuizen J., Vermeulen R., Eijdsden M., Strien R., Vьrgi A., Loomans E., Guxens M., Kromhout H., Huss A. Modelling indoor electromagnetic fields (EMF) from mobile phone base stations for epidemiological studies // Environment International. – 2014. – № 67. – P. 22-26.
7. Baltrenas P., Buckus R. Measurements and analysis of the electromagnetic fields of mobile communication antennas // Measurement. – 2013. – № 46. – P. 3942-3949.
8. Mann S. Assessing personal exposures to environmental radio frequency electromagnetic fields // Comptes Rendus Physique. – 2010. – № 9-10. – P. 541-555.
9. Потапов А.А. Геоинформационные системы в экологическом мониторинге электромагнитных полей радиочастотного диапазона // Геоинформатика. – 2011 – № 1. – С. 17-25.
10. Потапов А.А. Физико-технические принципы построения комплексов радиомониторинга : в 2 т. Том II : Создание радиотехнических моделей среды и исследование ее радиофизических характеристик с применением методов и технологий геопространственного моделирования : монография / под ред. проф. Н.Н. Сысоева. – М. : МАКС Пресс, 2012. – 352 с.
11. Yu K., Oppermann I., Dutkiewicz E., Sharp I., Retscher G. Indoor navigation and tracking // Physical Communication. – 2014. – № 13. – P. 1-3.
12. Сухоруков А.П., Бабушкин А.К., Дудов Р.А., Захаров П.Н., Козарь А.В., Королев А.Ф., Потапов А.А., Пухов Е.А., Турчанинов А.В. Распространение радиоволн в обитаемых средах: физические, информационные и экологические аспекты // Радиотехника. – 2009. – № 5. – С. 40-49.