

## **ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ РАСЧЕТА УСЛОВИЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН В ГОРОДСКОЙ И СЕЛЬСКОЙ МЕСТНОСТИ "СИГНАЛ-РП"**

*Турчанинов А.В., Королев А.Ф., Захаров П.Н.*  
Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова

*Потапов А.А.*  
Географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова

*Рассматриваются возможности и основные принципы работы созданного авторами программного обеспечения для расчета условий распространения радиоволн в городской и сельской местности "Сигнал-РП". Приводится описание используемых алгоритмов расчета, требований к цифровым пространственно-координированным данным о среде распространения радиоволн, пользовательского интерфейса и перспектив развития программного обеспечения.*

В условиях антропогенно-измененных территорий как в масштабах городского микрорайона, так и на больших территориях, особенно в староосвоенных районах, застройку нельзя считать статистически однородной, при этом протяженности радиотрасс часто сравнимы с расстояниями между препятствиями. В связи с этим, эмпирические и статистические методы расчета условий распространения радиоволн в этом случае практически не применимы [1-4].

Экспериментальные исследования свидетельствуют, что в условиях урбанизированных сред существует крайне высокая пространственная неоднородность распределения интенсивности радиосигнала во всех наиболее используемых диапазонах частот. В метровом диапазоне длин волн в условиях плотной городской застройки перепады напряженности электромагнитного поля могут составлять порядка 5...7 дБ на расстояниях 30...100 м, а в некоторых случаях (переход от освещенного участка к зоне радиотени) до 15...25 дБ и более. В масштабах микрорайона (на расстояниях 1...2 км) изменение уровня поля могут составлять 30...40 дБ. Помимо плоскостной, в городской среде очень четко выявляется и вертикальная изменчивость электромагнитной обстановки – на верхних этажах зданий интенсивность излучения может увеличиваться на 15...20 дБ [5, 6].

В диапазонах работы средств сотовой связи протяженность участков с колебаниями поля менее 5 дБ на открытой местности может составлять от 30...80 до 150...300 м в зависимости от условий местности и расстояний до излучающих антенн, уменьшаясь вблизи зданий до 20...50 м. Внутри помещений перепад интенсивности радиосигнала при его проникновении сквозь окна доходит до 15...30 дБ, при этом размер пространственных неоднородностей ЭМП с колебаниями поля менее 5 дБ составляет от нескольких сантиметров до 3...5 м [6-8]. Экранирующая способность ограждающих конструкций помещений может варьироваться в десятки раз, а внутри помещений могут отмечаться локальные (в пределах 1 м<sup>3</sup>) вариации поля амплитудой до двух порядков величины за счет комплекса интерференционно-дифракционных эффектов [8, 9].

В связи со столь высокой вариативностью условий радиоприема в условиях обитаемых территорий большой интерес представляет развитие методов прогнозирования условий распространения радиоволн, основанных на подходах геометрической оптики,

поскольку с одной стороны, по имеющимся данным [10] точность проведения расчетов с их помощью достаточно высока, а с другой вычислительная трудоемкость приемлема для решения задач расчета условий распространения радиоволн в микрорайоне. При этом требуемая детальность исходной информации может быть обеспечена специально подготовленными цифровыми проблемно-ориентированными моделями местности, созданными на основе современных цифровых топографических планов городской застройки, в том числе уточненных по оперативным материалам дистанционного зондирования Земли высокого и сверхвысокого разрешения [6, 11].

Методы геометрической оптики основываются на решении уравнений Максвелла в высокочастотном приближении. При этом предполагается, что энергия волны распространяется вдоль т.н. "лучевых трубок", а энергетический обмен между трубками отсутствует. Приближение справедливо для сред с незначительными относительными вариациями изменения электрофизических характеристик на расстояниях сравнимых с длиной волны. Из уравнений геометрической оптики следует принцип Ферма, в соответствии с которым оптическая длина пути вдоль луча минимальна.

На местности, практически всегда присутствует значительное количество природных и антропогенных неоднородностей, размер которых составляет порядка  $5\lambda \dots 100\lambda$ , (длина волны для наиболее распространенных систем передачи данных и радиосвязи варьируется в пределах 0,05...3 м). Указанное соотношение между размерами препятствий и длиной волны, во-первых, определяет их доминирующий вклад в распространение радиоволн по сравнению с неоднородностями меньших размеров, а во-вторых, позволяет моделировать распространение радиосигнала с использованием геометрооптического приближения. Широко распространенная концепция многолучевого распространения радиоволн в городе также дает основание предположить адекватность применения геометрооптического приближения в указанном диапазоне длин волн.

Методы расчета, в основе которых лежит геометрооптическое приближение, базируются на поиске путей формирования лучей-радиотрасс, обеспечивающих перенос энергии от передатчика к приемнику. Локальность траекторий распространения позволяет синтезировать общий метод расчета на основе отдельных механизмов распространения. Основные механизмы, влияющие на формирование радиотрасс и ослабление энергии волны при этом следующие:

- распространение прямым лучом в зоне прямой видимости;
- отражение лучей от стен зданий, других препятствий и поверхности земли;
- дифракция на крышах и углах зданий;
- рассеяние;
- прохождение сквозь строения и другие препятствия;
- ослабление в сплошной растительности;
- влияние атмосферных осадков.

Ослабление волны при прохождении сквозь препятствия в виде зданий застройки, весьма значительно по сравнению с ослаблением вследствие других механизмов распространения, поэтому при расчетах вкладом от прошедшей сквозь препятствие волны на практике можно пренебрегать.

Полная трехмерная трассировка лучей, учитывающая совокупность всевозможных

препятствий, встречающихся в городском микрорайоне, требует значительных вычислительных ресурсов. Для преодоления указанной трудности вводятся упрощения, состоящие в учете только лучей дающих основной вклад при формировании структуры электромагнитного поля, а также рассматриваются только основные геометрические и физические характеристики препятствий и поверхности земли. В зависимости от условий размещения антенн передатчика и приемника могут вводиться и другие упрощающие предположения. Так, например, при размещении приемника и передатчика ниже уровня крыш застройки, может рассматриваться двумерная задача.

Математическое моделирование [12] показывает в заданном диапазоне длин волн и в условиях города практическую идентичность результатов полученных методом прямого решения уравнений Максвелла и путем применения метода основанного на геометрооптическом приближении.

За последние годы методы расчета характеристик распространения радиоволн получили значительное развитие, правда, в основном, в работах зарубежных исследовательских коллективов. Развитие методов расчета было обусловлено в первую очередь потребностями бурно развивающихся сетей мобильной связи и передачи данных и сопутствующих технологий, базирующихся на этой основе.

Первые методы расчета условий распространения радиоволн основывались на простых физических моделях гладкой плоской или сферической поверхности, а также дифракции на объектах простой формы [8]. В то же время в руках исследователей отсутствовали достаточно мощные вычислительные средства и инструменты детального моделирования среды распространения радиоволн. Такая ситуация привела к широкому использованию усредненных параметрических зависимостей затухания сигнала от расстояния, специфицированных для различных обобщенных сред распространения радиоволн – город, сельская местность, горная местность и т.д. Среди статистических прогнозов наиболее известен прогноз Окамура-Хата, созданный по результатам обработки большого объема экспериментальных измерений, полученных в условиях равнинных городов с относительно однородной застройкой [1]. Прогнозы данного типа обеспечивали потребности систем радио и телевидения, а также систем ведомственной подвижной радиосвязи, обслуживавшихся одним или несколькими стационарными радиопередатчиками, в зоне площадью несколько сотен квадратных километров. Следующий шаг, сделанный в начале 90-х годов двадцатого столетия [2, 3], был связан с использованием в качестве основы для прогнозирования усредненных статистических характеристик отдельных кварталов городской застройки, таких как средняя высота зданий, периметр, ширина улицы и т.д. Также учитывалась форма поверхности земли, что позволило распространить расчетные методики на города с ярко выраженным рельефом местности.

Дальнейшее развитие средств массовой радиосвязи характеризовалось повышением рабочего частотного диапазона (GSM 900/1800), а также уменьшением размеров зоны, обслуживаемой одной базовой станцией сети, до нескольких километров или даже нескольких сотен метров в условиях плотной неоднородной городской застройки (микросот и пикосот). В условиях микро и пикосот методы расчета характеристик распространения радиоволн, обеспечивающие приемлемую точность прогнозирования,

должны учитывать конкретную городскую застройку и ее свойства. Практической реализации подобных расчетных методик способствовало развитие геоинформационных систем (ГИС), позволяющих осуществлять ввод, хранение и управление пространственно привязанными данными, а также современных систем дистанционного зондирования Земли, позволяющих в приемлемые сроки и за приемлемые финансовые ресурсы создавать трехмерные модели местности, в том числе, городской застройки.

Указанные выше современные представления о преобладающих механизмах распространения радиоволн реализованы в программном обеспечении (ПО) «Сигнал-РП» [13, 6]. ПО «Сигнал-РП» предназначено для расчета уровня электромагнитного поля с использованием геоинформационных моделей местности.

ПО «Сигнал-РП» реализует следующие методы расчетов:

- расчет уровня электромагнитного поля, при распространении земных радиоволн на радиотрассах протяженностью от 1 до 20 км в диапазоне частот 100 МГц – 5 ГГц (расчет в "дальней зоне");
- расчет уровня электромагнитного поля при распространении радиоволн в условиях городской застройки на расстояниях от 30 м до 1 км в диапазоне частот 100 МГц – 5 ГГц (расчет в "ближней зоне").

Расчет в "дальней зоне" осуществляется с использованием геоинформационных моделей среды распространения радиоволн, подготовленных средствами геоинформационной системы (ГИС). Расчет в "ближней зоне" дополнительно требует использования радиотехнических моделей, создаваемых (конвертируемых) средствами ПО «Сигнал-РП» на основе геоинформационных моделей.

ПО «Сигнал-РП» предназначено для эксплуатации на ЭВМ, работающих под управлением операционной системы MS Windows XP, на которых установлена ГИС ArcGIS Desktop версии не ниже 9.1, совместно с модулями Spatial Analyst и 3D Analyst. В состав программного обеспечения «Сигнал-РП» входят:

- программный модуль, реализующий методы расчета уровня электромагнитного поля;
- программный модуль построения радиотехнических моделей городской среды распространения радиоволн.

ПО «Сигнал-РП» интегрировано в ГИС и представляет собой динамически подключаемую библиотеку. Интеграция ПО «Сигнал-РП» с ГИС позволяет использовать для подготовки исходных данных, а также для отображения и анализа результатов вычислений мощный инструментарий геоинформационной системы.

ПО «Сигнал-РП» обеспечивает:

- ввод исходных данных, необходимых для проведения расчетов (координаты и условия размещения приемной антенны и радиопередатчиков, а также их параметры);
- запуск, реализацию и контроль вычислительного процесса;
- нанесение результатов вычислений на геоинформационную модель местности;
- конвертацию геоинформационной модели ближней зоны в текстовый файл, служащий основой для создания радиотехнических моделей.

Собственно ГИС обеспечивает:

- подготовку исходной геоинформационной модели среды распространения радиоволн (цифровой проблемно-ориентированной модели местности);
- автоматическую загрузку геоинформационной модели среды распространения радиоволн, необходимой для проведения расчетов;
- отображение на геоинформационной модели местности результатов расчетов;
- анализ и преобразование результатов расчетов в форму удобную для восприятия оператором или необходимую для подготовки отчетности (построение легенды в соответствии с сутью решаемой задачи, интерполяция результатов в регулярную растровую матрицу удобную для визуального анализа, в том числе за счет применения интуитивно понятных цветовых шкал);
- нанесение на геоинформационную модель местности дополнительной информации, в соответствии с сутью решаемой задачи.

Как отмечалось выше, расчет характеристик электромагнитного поля в чрезвычайно неоднородных средах распространения радиоволн, таких как местность различной степени урбанизации или плотная городская застройка, представляет собой сложную физическую задачу. Как правило, для ее решения с использованием достаточно широко доступных вычислительных средств, применяются физически обоснованные приближенные модели распространения радиоволн кардинально сокращающие объемы требуемых вычислений.

Методы расчета, реализованные в ПО «Сигнал-РП» для "дальней зоны", основываются на предположении о преимущественном распространении радиоволн вдоль рельефа местности и над городской застройкой (для расстояний свыше 1 км).

Для "ближней зоны" используется модель геометрической оптики, предполагающая, что основная энергия радиоволны распространяется по локализованным в пространстве траекториям распространения, образованным механизмами отражения и дифракции радиоволн. Таким образом, для "ближней зоны" оказывается возможным кроме уровня электромагнитного поля, оценить направления прихода основной энергии радиоволны, а также задержки распространения вдоль указанных направлений.

Помимо физических характеристик электромагнитного поля ПО «Сигнал-РП» позволяет оценить такие радиотехнические характеристики, как уровень сигнала на входе приемного устройства (при условии согласования с приемной антенно-фидерной системой и с параметрами передатчика), а также отношение сигнал/шум.

Для проведения расчетов в "дальней зоне" ПО «Сигнал-РП» использует непосредственно геоинформационную модель среды распространения радиоволн, создаваемую в прямоугольных метрических координатах и удовлетворяющую специальным требованиям. В "дальней зоне" расчет осуществляется как по базовому алгоритму, так и по ускоренному алгоритму. Ускоренный алгоритм расчета позволяет быстро проводить оценочные расчеты с использованием минимума исходной геопространственной информации на относительно больших площадях возможного размещения передающих устройств. Различия между алгоритмами заключаются в скорости проведения вычислений, составе исходной геопространственной информации, а

также в дискретности расчета. При использовании базового алгоритма точки размещения передатчика отстоят друг от друга на 25 м, а при использовании ускоренного алгоритма на 50 м. Все файлы, описывающие слои геоинформационной модели ГИС должны быть сведены в отдельный специальный каталог, содержащий и файл проекта.

Минимальная геоинформационная модель среды распространения радиоволн, необходимая для обеспечения работы ускоренного алгоритма расчета должна содержать следующую информацию:

- слой высот рельефа местности (цифровую модель рельефа в растровом формате ESRI GRID) – наименование relief;
- слой покрытия поверхности земли, содержащий информацию о поверхности и расположенных на ней объектах с использованием заданной пользователем классификации поверхностей (так же в формате ESRI GRID) – наименование cover;
- слой высот объектов, расположенных на поверхности земли (формат ESRI GRID) – наименование height.
- все слои данных должны находится в прямоугольной (метрической) системе координат в качестве которых могут выступать как местные/региональные, так и общемировые геодезические координатные системы (СК-42, СК-95, UTM и др.)

Цифровая проблемно-ориентированная модель местности, имеющая вышеописанную структуру данных о территории, может быть подготовлена с помощью функций преобразования (конвертации, объединения, оверлейных операций и т.п.) цифровых пространственно-координированных данных о местности геоинформационной системы ArcGIS, при этом в качестве основы могут быть успешно использованы цифровые топографические карты масштабов 1:200 000, 1:50 000 и 1:25 000.

Для обеспечения работы базового алгоритма геоинформационная модель дополнительно к указанным слоям должна содержать модель застройки искомой территории в формате векторного полигонального слоя (формат ESRI shape – .shp) с наименованием Houses, в семантическом описании которого в соответствии с принятой системой кодирования должна быть представлена информация о высотах и материале постройке зданий. Такой shape-файл может быть подготовлен с помощью функций преобразования пространственно-координированных данных ГИС на базе цифровых топографических планов масштабов 1:10 000, 1:2 000 и крупнее.

Помимо указанных обязательных слоев геоинформационная модель может содержать любые слои произвольного состава, отражающие суть решаемой задачи пользователя.

Для проведения расчетов в "ближней зоне", помимо указанных выше слоев, в каталог геоинформационной модели также должны быть включены два файла радиотехнической модели среды распространения радиоволн mirrors.mdl и corners.mdl. Файлы содержат детальное описание отражающих поверхностей и углов, на которых происходит дифракция радиоволн.

Расчеты в "ближней зоне" базируются на модели застройки, в которой элементы зданий представлены полигонами - блоками, имеющими обязательные атрибуты:

- минимальная высота над поверхностью (рельефом);

- максимальная высота над поверхностью (рельефом);
- вид материала из которого создан блок.

Для автоматической подготовки файлов радиотехнической модели, состоящей из файлов `mirrors.mdl` и `corners.mdl`, в составе геоинформационной модели необходимо иметь хотя бы один полигональный `shape`-файл, реализующий модель застройки в виде блоков-полигонов. Пример внешнего вида трехмерной цифровой проблемно-ориентированной модели местности, обеспечивающей проведение расчетов как в "дальней", так и "ближней" зоне приведен на рис. 1.

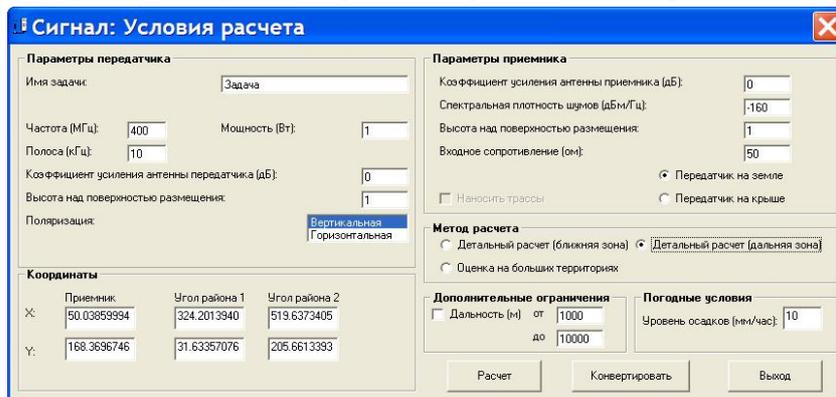


*Рис. 1. Внешний вид трехмерной цифровой проблемно-ориентированной модели территории в среде ГИС ArcGIS, служащей основой для создания радиотехнической модели местности и отображения результатов вычислений.*

Дискретность размещения передатчика при расчете в "ближней зоне" составляет 5 м. После завершения расчета в проект ГИС добавляются слои, содержащие результаты расчета:

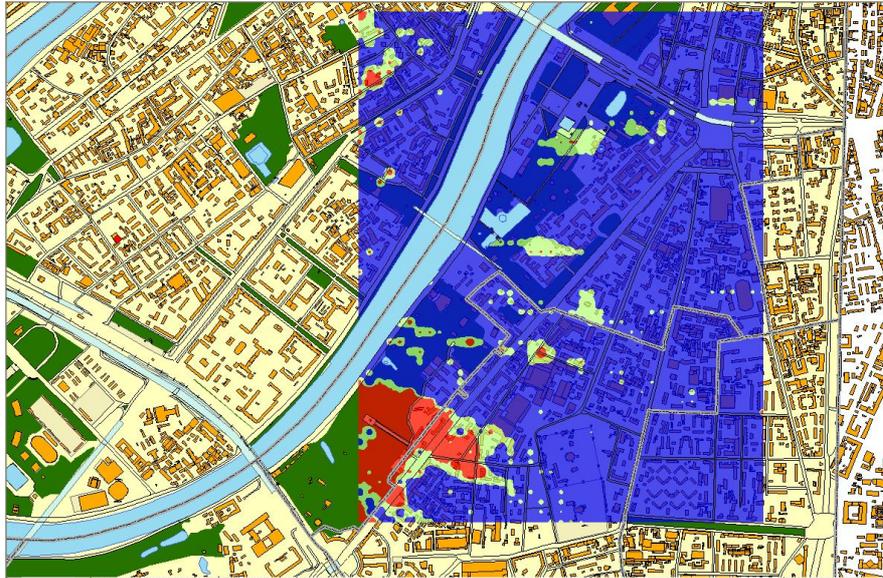
- слой содержащий координаты передатчиков и результаты расчета уровня электромагнитного поля (дБ/мкВ/м), уровня сигнала (дБм) и отношения сигнал/шум (дБ) на входе;
- слой содержащий данные об основных траекториях распространения радиоволн при расчете в ближней зоне.

Интерфейс определения условий расчета представлен на рис. 2.



*Рис. 2. Интерфейс определения условий расчета.*

Средства ГИС позволяют интерполировать результаты расчета в точках размещения передатчиков и представить их в виде поля значений (рис. 3), либо нанести их на трехмерную модель, рис.4.

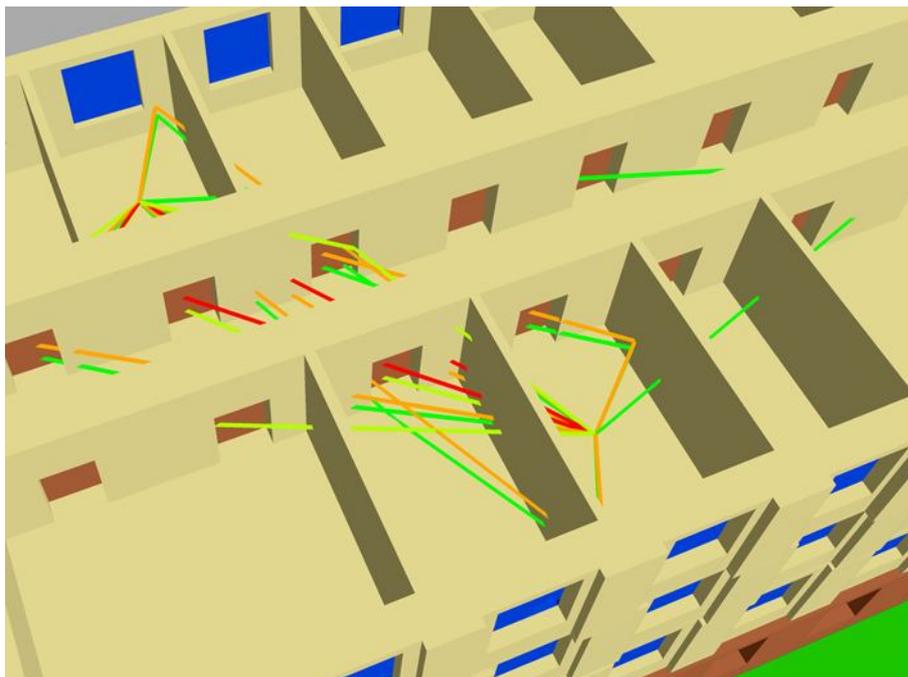


*Рис. 3. Пример расчета уровня электромагнитного поля в "дальней зоне".*



*Рис. 4. Пример расчета основных траекторий распространения радиоволн в "ближней зоне".*

В перспективе развитие методов и алгоритмов, используемых в ПО "Сигнал-РП" позволит осуществлять прогнозирование условий распространения радиоволн внутри зданий за счет учета их внутренней структуры при расчетах (рис. 5). Проведенные к настоящему времени (в тестовом режиме) сравнения экспериментальных измерений в дециметровом диапазоне длин волн внутри помещений с расчетными значениями, полученными методами геометрической оптики показали, что точность прогноза средних уровней радиосигнала в радиусе 2 м от точки приема составляет 0,8...4,6 дБ, а при радиусе осреднения 4 м от точки приема точность увеличивается вплоть до 2 дБ [14].



*Рис. 5. Учет внутренней структуры здания при прогнозировании условий распространения радиоволн и отображении результатов радиотехнических расчетов (перспектива развития).*

Учет внутренней структуры здания при моделировании распространения радиоволн осуществляется за счет использования алгоритмом расчета соответствующей необходимой информации из метрического и семантического описания специализированной цифровой высокодетализированной модели здания и прилегающей местности, создающейся в среде ГИС ArcGIS, в которую также могут быть интегрированы и результаты радиотехнических расчетов, рис. 5.

Конец статьи.

## Литература

1. Okamura Y. et al. Field strength and its variability in VHF and UHF land mobile radio service (Tokyo) //Rev. Elec. Comm. Lab. –1968. – № 6. – P.825–873.
2. Пономарев Г.А., Куликов А.Н. Распространение УКВ в городе. Томск: 1991.
3. Bertoni H.L. et al. "UHF propagation prediction for wireless personal communications" //Proc. IEEE. 1994. – Vol. 82. – № 9. – P. 1333–1359.
4. Варакин Л.Е. Статистическая модель многолучевого распространения УКВ в городе//Радиотехника. – 1989. – № 4. – С. 33.
5. 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.
6. Потапов А.А., Турчанинов А.В., Королев А.Ф. Методы радиофизического моделирования с использованием геоинформационных систем в обеспечении электромагнитной безопасности урбанизированных территорий //Экология урбанизированных территорий. – 2007. – № 1. – С. 57 – 62.

7. Bornkessel C. et al. Determination of the general public exposure around GSM and UMTS base stations //Radiation Protection Dosimetry. – 2007.– № 1. – P. 40 – 47.
8. Bertoni H.L. Radio Propagation for Modern Wireless Systems. New Jersey: Prentice hall, 2001. – 340 p.
9. Viel J.-F. et al. Residential exposure to radiofrequency fields from mobile phone base stations, and broadcast transmitters: a population-based survey with personal meter //Occupational and Environmental Medicine. – 2009. – № 66. – P. 550-556.
10. Zhengqing Yun, Zhijun Zhang, Magdy F. Iskander. A ray-tracing method based on the triangular grid approach and application to propagation prediction in urban environments //IEEE Trans. Antennas Propag. – 2002. – Vol. 50. – P. 750-758.
11. Сухоруков А.П., Дудов Р.А., Королев А.Ф., Потапов А.А., Турчанинов А.В. Квазиоптические методы в задачах моделирования распространения радиоволн вдоль поверхности Земли //Нелинейный мир. – 2005. – № 1-2. – Т. 3. – С. 107 – 115.
12. J.W. Schuster, R.J. Luebbers. FDTD techniques for evaluating the accuracy of ray-tracing propagation models for microcells.
13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010616591. "Сигнал-РП" /Авторы: Турчанинов А.В., Королев А.Ф., Захаров П.Н., Потапов А.А. – Заявка № 2010615772 от 21.09.2010; зарегистрирована в Реестре программ для ЭВМ 04.10.2010. М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. – 2010.
14. P.N. Zakharov, E.V. Mikhailov, A.A. Potapov, A.F. Korolev, A.P. Sukhorukov. Comparative Analysis of Ray tracing, Finite Integration Technique and Empirical Models Using Ultra-Detailed Indoor Environment Model and Measurements //Proceedings 2009 3rd IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications. – Beijing: IEEE Press, 2009. –Vol. 1. – P. 176 – 183.