

## ВОЗМОЖНОСТИ СИСТЕМ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ЗАДАЧАХ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЭКОЛОГИИ

*А.П. Сухоруков, А.К. Бабушкин, Е.В. Михайлов, П.Н. Захаров, А.В. Козарь, А.Ф. Королев,  
Е.А. Пухов, А.В. Турчанинов  
Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова*

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

*Рассматриваются результаты исследований, полученные коллективом авторов в области исследования возможностей систем геопространственного моделирования в задачах прогнозирования распространения радиоволн. В работе представлен краткий анализ основных методов прогнозирования распространения радиоволн, сформулированы принципы геопространственного моделирования применительно к решению радиофизических задач и приведены примеры их практической реализации для методов прогнозирования, основанных на приближениях геометрической оптики и теории дифракции, а также методов численного решения уравнений Максвелла. Дана оценка экологической значимости электромагнитных полей радиочастотного диапазона в условиях антропогенно-измененных сред.*

При решении большинства прикладных задач в области связи, телекоммуникаций и электромагнитной экологии требуется корректное, геометрически точное и математически определенное моделирование реальной окружающей среды. При этом основным и практически единственным источником первичной информации о местности являются карты, точнее топографические карты территории разных масштабов, а также иные картографические продукты, полученные методами дистанционного зондирования – материалы аэрофотосъемок, космических съемок и т.д.

Наряду с корректной цифровой моделью среды, при практической реализации задачи прогнозирования распространения радиоволн, важную роль играют методы моделирования их распространения в окружающей среде. Эти методы подразделяются на эмпирические, статистические и детерминированные.

### **1. Классификация методов прогнозирования распространения радиоволн**

**Эмпирические** формулы, основанные на экспериментальных данных, являются наиболее общей статистикой и не учитывают особенностей местности. Они приблизительно прогнозируют потери при распространении волн в среде (такие как модель Окомуры для города) [1].

Более точные **статистические** модели имеют коэффициенты, учитывающие некоторую обобщенную статистику, зависящую от конкретной местности [1,2]. Например, при регулярной застройке параметрами могут быть характерная высота объектов и расстояние между ними. Такие модели также имеют зависимость потерь от расстояния как результат и не предсказывают импульсного отклика.

Если в качестве среды распространения сигнала рассматриваются здания, то ситуация многократно усложняется, передача как правило ведется на высоких скоростях и импульсный отклик среды приобретает существенное значение. Поэтому вышеуказанные методы практически неприменимы при расчете распространения радиоволн для высокоскоростных систем связи в зданиях.

**Детерминированные** модели используют точные знания о среде распространения (например, трехмерное распределение электрофизических характеристик среды – диэлектрической и магнитной проницаемости). Точные в том смысле, что радиотехническая модель устойчива к флуктуациям параметров модели (таким как неточность плана здания или городской среды, электромагнитных характеристик стен и др.). Как правило, приемлемой точностью прогнозирования в данном случае является точность не хуже 5 дБ (по уровню электромагнитного поля). Очевидно, чем детальнее модель, тем больше трудностей возникает при ее формировании, возрастает объем расчетов и др. Поэтому необходимо выбирать компромисс между требуемой точностью расчета, затрачиваемыми при этом ресурсами и устойчивостью модели. Ответ на этот вопрос могут дать экспериментальные исследования.

Среди наиболее известных детерминированных методов можно отметить следующие:

– приближения геометрической оптики;

- приближение Кирхгофа (метод интеграла Кирхгофа);
- геометрическая теория дифракции;
- метод параболического волнового уравнения;
- конечно-разностные методы во временной области;
- метод интегрального уравнения.

Обитаемые области подразделяются на слабонаселенные, пригородные и городские районы, расположенные на земной поверхности с различной степенью неоднородности (равнина, холмистая и горная местность) и интенсивностью растительного покрова, а также на области, расположенные внутри зданий. При выборе метода прогнозирования существенную роль играет соотношение длины волны, характерного размера объектов среды и пространственного масштаба рассматриваемой области, а также степень неоднородности (чаще всего, разрывной (кусочной) однородности) среды распространения. Не существует универсального метода прогнозирования распространения радиоволн, который позволил бы с приемлемой точностью решать все классы задач. Поэтому целесообразно комбинировать методы, выбирая оптимальные для каждого типа среды распространения.

В классической геометрической оптике волновой фронт рассматривается как набор лучевых трубок, причем обмена энергии между соседними лучевыми трубками не происходит, т.е. не учитываются эффекты дифракции. В связи с этим граница между тенью и освещенной областью проходит по лучу, касающемуся препятствия. Поле в области тени равно нулю. Данный подход оправдан, когда размеры препятствий намного превышают длину волны.

Метод физической (волновой) оптики основан на принципе Гюйгенса-Френеля, количественной формулировкой которого является интеграл Кирхгофа, поэтому его иногда называют приближением Кирхгофа. Данный метод позволяет приближенно вычислить поле как в освещенной области, так и в области тени.

Приближение метода физической оптики основано на том, что функции  $\psi$  и  $\frac{\partial \psi}{\partial n}$  ( $\psi$  — любая из проекций какой-либо компоненты электромагнитного поля,  $n$  — какая либо координата) на освещенной части поверхности выбираются равными соответствующим значениям падающей волны, на теневой — равными нулю [3]. Метод физической оптики дает уточненное решение задачи по сравнению с методом геометрической оптики, поскольку поле в области тени не равно нулю, т.к. учитываются волновые свойства поля. Недостаток метода Кирхгофа заключается в том, что поле в области тени никак не зависит от характеристик неосвещенной части поверхности, поскольку токи на теневой части поверхности принимаются равными нулю.

Геометрическая теория дифракции основывается на приближении геометрической оптики, но позволяет более точно рассчитывать значение поля в области тени. Обычно используется один из двух способов уточнения методов геометрической и физической оптики. Первый основан на уточнении и дополнении этих методов. Второй путь заключается в приближенном решении уравнения Гельмгольца в зонах тени и полутени.

Метод, уточняющий геометрическую оптику, базируется на обобщенном принципе Ферма о возможности распространения электромагнитного поля не только вдоль обычных лучей, но и вдоль дифракционных лучей. Под последними понимаются лучи, проведенные по кратчайшему пути от источника в точку наблюдения и имеющие при этом общий отрезок гладкой кривой с отражающей поверхностью или общую точку с отражающим ребром.

В случае тел сложной формы трудно получить эталонное решение с использованием описанного метода. Метод параболического уравнения, развитый В.А. Фоком и М.А. Леонтовичем, при определенных условиях является упрощенным уравнением Гельмгольца и позволяет найти главный, превосходящий по величине остальные, член решения. Если, согласно обобщенному принципу Ферма, в пространстве определены направления как лучей обычных, так и дифракционных, то следующим шагом является предположение о характере энергетического обмена между лучевыми трубками [3]. Гипотеза о независимости распространения поля внутри лучевых трубок заменяется следующими гипотезами: а) сохраняется понятие луча, энергия не накапливается в какой-либо точке лучевой трубки и не колеблется внутри нее; б) обмен энергией между разными лучевыми трубками — поперечная диффузия амплитуды — происходит в соответствии с принципом локальности, т.е. только между соседними лучевыми трубками. Из требований метода геометрической оптики сохраняется требование медленности изменения амплитуды напряженности поля вдоль луча.

Был разработан численный алгоритм для метода параболического волнового уравнения [4]. Как показало исследование разработанного алгоритма, метод параболического волнового уравнения подходит для моделирования распространения радиоволн над нерегулярным рельефом. Он

позволяет с хорошей точностью учитывать влияние зданий и растительного покрова на распространение радиоволн над поверхностью Земли.

Для решения комплексных задач распространения радиоволн в обитаемых средах целесообразно использовать метод трассировки лучей, являющийся комбинацией методов геометрической оптики с методами дифракции Кирхгофа или геометрической теории дифракции. Геометрическая теория дифракции используется в случае, когда размеры препятствия намного больше длины волны. В случаях, когда размеры препятствий сопоставимы с длиной волны, целесообразно применение теории дифракции Кирхгофа. Основной областью применения метода трассировки лучей является расчет в протяженных областях пространства без учета электромагнитных неоднородностей с размерами порядка длины волны. В тех областях, где влияние достаточно малых объектов не может быть учтено с помощью приближенных методов дифракции, используются комбинация метода трассировки с более точными методами, например, FDTD [5] или FEM. Разработанная авторами реализация метода трассировки лучей была с успехом использована для моделирования распространения радиоволн в городе и внутри зданий.

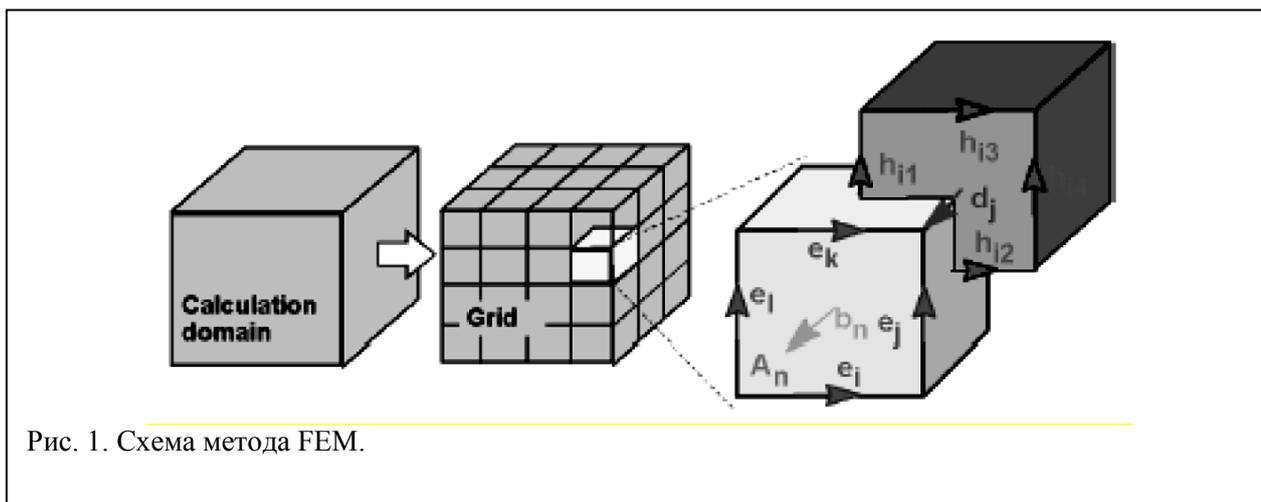


Рис. 1. Схема метода FEM.

Метод FDTD — конечно-разностный метод решения уравнений Максвелла во временной области. В своей классической постановке метод FDTD основан на дискретизации уравнений Максвелла, записанных в дифференциальной пространственно-временной формулировке. Узлы сеток электрического и магнитного полей смещены по отношению друг к другу на половину шага дискретизации по каждой из переменных во времени и пространстве. Конечно-разностные уравнения позволяют определять значения электрического и магнитного полей в данный момент времени на основании известных значений в предыдущий момент времени, при заданных начальных условиях. Распределения векторов напряженности электрического и магнитного полей по поверхности препятствия на каждом временном шаге представлены в полностью разрешаемом виде, поэтому нет необходимости в решении системы линейных непрерывных уравнений. Метод FDTD и его программная реализация в сочетании с достижениями ЭВМ, обладая высокой точностью и быстродействием, делают этот способ предпочтительным для решения задач рассеяния волн на электрически больших трехмерных структурах. Основным препятствием на пути применения метода FDTD являются его высокие требования к вычислительным ресурсам, поскольку для каждой элементарной ячейки необходим расчет 6 компонент электромагнитного поля, а максимальный размер ячейки, необходимый для стабильного решения составляет не более  $1/3\lambda$ .

В отличие метода FDTD, метод конечного интегрирования или метод конечных элементов FEM рассматривает уравнения Максвелла не в дифференциальной, а в интегральной форме. Для численного решения этих уравнений определяется область расчета, которая разбивается на ячейки. Пространственная дискретизация уравнений Максвелла производится на двух ортогональных сетках, на которых также вводится новая степень свободы в виде значения интеграла. Напряженность электрического поля  $e$  и магнитные потоки  $b$  размещаются на первичной сетке, а поляризация  $d$  и магнитное поле  $h$  размещены на вторичной сетке, рис. 1.

Было проведено исследование применимости метода конечных интегралов для моделирования распространения радиоволн в зданиях на примере программного продукта CST Microwave Studio. Пример сопоставления результатов расчета с помощью Microwave Studio и результатов экспериментальных измерений приводится далее. Как показали исследования, при использовании

современных персональных ЭВМ Microwave Studio подходит для моделирования распространения радиоволн при линейных размерах рассматриваемой области порядка нескольких десятков длин волн, что при частотах порядка 1 ГГц позволяет прогнозировать распределение электромагнитного поля в помещениях общей площадью порядка нескольких сотен м<sup>2</sup>.

## **2. Основные принципы геопространственного моделирования применительно к задачам распространения радиоволн**

В настоящее время наиболее разработанным инструментом геопространственного моделирования являются геоинформационные системы (ГИС), использующиеся для создания и работы с моделями окружающей среды. ГИС являются объектно-ориентированными базами данных, в которых информация о любом пространственном объекте состоит из двух взаимосвязанных составляющих: позиционных данных или метрики объекта и непозиционных данных или семантики (атрибутов) объекта. Исходной информацией для создания ГИС моделей местности служат цифровые топографические карты и планы, а при моделировании зданий/сооружений инженерно-строительная документация.

Все многообразие объектов физической реальности в ГИС разделяется на два класса – непрерывные и дискретные объекты. Моделирование непрерывных объектов (поверхности рельефа, физических полей) осуществляется с помощью геопривязанных растровых и/или триангуляционных поверхностей. Дискретные объекты (здания и их элементы, водоемы, растительность и т.п.) описываются с помощью векторной модели данных, т.е. наборов координат, определяющих их форму и местоположение и существующих в форме простых геометрических примитивов – точки, линии и полигона. Создание трехмерных моделей среды осуществляется за счет преобразования двухмерных примитивов в трехмерные (плоскости, объемные элементы) на основе данных об их высотах, вводимых в атрибутивное и/или метрическое описание.

Достоверность геоинформационных моделей определяется величинами ошибок в координатах/высотах объектов, ее пространственным разрешением и полнотой данных о местности. Но использование даже достоверных геоинформационных моделей в задачах моделирования физических процессов невозможно без специальной адаптации и перехода от картографических моделей к цифровым проблемно-ориентированным моделям местности.

Процедуры адаптации включают в себя проблемно-ориентированное структурирование массива данных, топологическую верификацию, комплексирование метрики и семантики объектов, создание сопряженных объектов, разработку единой системы атрибутивного описания и идентификации элементов модели. Таким образом создается объектно-ориентированная, цельная и топологически-определенная структура в массивах пространственно-координированных данных. Также необходимым элементом подготовки модели к использованию является визуальная адаптивность модели, достигающаяся за счет добавления слоев данных, формирующих визуальный каркас модели, и настройки цветовых и светотеневых параметров отображения.

Алгоритмы преобразования и адаптации исходных цифровых данных о местности для проведения радиофизического моделирования зависят от используемых моделей распространения радиоволн. Однако, вне зависимости от алгоритма корректное моделирование невозможно без наличия: цифровой модели рельефа, данных о плановых очертаниях, высотах и материале постройки зданий/сооружений, характере подстилающей поверхности, расположении и высотах лесных массивов, координат передающих и приемных устройств и их характеристик [4]. В ряде случаев из исходной цифровой информации необходимо извлечение цифровых описаний наиболее важных для распространения радиоволн элементов (отражающих поверхностей, ребер дифракции, полупрозрачных поглощающих объемов) и их конвертация в формат, удобный для проведения расчетов. Использование в ГИС моделях метрических систем координат, совместимых с системами спутниковой навигации, существенно ускоряет сбор и обработку фактических материалов о районе исследования и экспериментальных данных, упрощает внедрение результатов моделирования в процесс решения практических задач.

## **3. Примеры практической реализации использования систем геопространственного моделирования в задачах прогнозирования распространения радиоволн и экологической безопасности**

Одним из главных условий применимости и эффективности методов и алгоритмов расчета пространственного распределения электромагнитного поля радиочастотного диапазона является возможность проведения детальной пространственной декомпозиции их результатов, в том числе для

определения границ зон устойчивой связи и экологического влияния конкретных потенциально опасных объектов в зависимости от их расположения и технических характеристик.

Примером реализации подобного подхода к изучению электромагнитной обстановки и проведению физико-экологического мониторинга в условиях городского микрорайона является работа, выполненная авторами на физическом факультете МГУ им. М.В. Ломоносова [6]. Первым шагом стало создание трехмерной проблемно-ориентированной модели микрорайона площадью 1 км<sup>2</sup> на базе фрагмента стандартного цифрового топографического плана масштаба 1:2 000 в среде геоинформационной системы (ГИС) ArcView производства компании ESRI, США, рис. 2.



Рис. 2. Трехмерная модель городского микрорайона, построенная в среде ГИС ArcView, на базе экспериментально уточненных данных о высотах объектов местности.

Проведение ряда процедур по уточнению (особенно в части фактических высот элементов застройки и растительности) и адаптации созданной пространственной модели позволило сформировать на ее основе специализированную радиотехническую модель местности, включающую цифровые описания таких элементов среды как поверхность рельефа, боковые поверхности зданий и сооружений, кромки их ребер и объемы зеленых насаждений, что обеспечило ее сопряжение с разработанным оригинальным программным обеспечением, проводящим расчеты с применением соответствующих математических алгоритмов.

В качестве физической модели распространения радиоволн в условиях плотной городской застройки было выбрано геометрикооптическое приближение, учитывающее такие базовые процессы распространения радиоволн как: отражение от земли и стен зданий, дифракция на ребрах зданий и сооружений и затухание при прохождении сквозь зеленые насаждения. При этом учитывались следующие особенности излучателя: мощность, частота и высота подвеса антенны. Помимо собственно расчетов уровня поля, разработанное программное обеспечение, обеспечило проведение и оценку среднеквадратической точности прогноза уровня поля, путем сравнения расчетных и полученных экспериментально данных.

Совместимость выбранной геоинформационной системы со стандартными средами разработки программ и с интерфейсами программирования, позволила обеспечить не только экспорт исходных пространственных данных в формат, приемлемый для проведения радиофизических расчетов, но и импорт их результатов обратно в ГИС, в том числе непосредственно в трехмерную модель местности. При этом функции экспорта/импорта пространственных данных были реализованы в виде набора модулей расширения ГИС ArcView, а собственно радиофизические расчеты проводились отдельной программой, работающей во взаимодействии с геоинформационной системой, что позволяет проводить расчеты на базе данных о конкретной местности с меняющимися привходящими условиями (расположение, мощность, частота передатчика и т.д.).

Результаты радиофизических расчетов импортировались в ГИС ArcView в форме цифрового описания вычисленных траекторий распространения радиоволн, в виде трехмерных линий, в атрибутивных таблицах которых содержатся все количественные результаты расчета (величина электромагнитного поля в точке приема в дБмкВ/м, задержка радиосигнала). Средствами ГИС возможна визуализация рассчитанных траекторий распространения радиоволн как в рамках двухмерной, так и трехмерной модели местности, что обеспечивает проведение детальной пространственной декомпозиции результатов расчета, в том числе с использованием средств пространственного анализа и оптимизации визуализации используемой геоинформационной системы.

Сравнение экспериментальных данных о распределении ЭМП 100 МГц и соответствующих расчетов позволило произвести оценку среднеквадратической точности прогноза величины электромагнитного поля 100 МГц. Оценка показала, что среднеквадратическая ошибка прогноза не превышает 8,5 дБ при обработке всей совокупности экспериментальных данных (450 точек измерений равномерно распределенных по всей площади пространственной модели на расстоянии 50 – 950 м от передатчика), что хорошо согласуется с литературными данными [7]. При этом в формировании уровня электромагнитного поля в подавляющем большинстве точек измерения вносило 2 или более лучей, см. рис. 3.

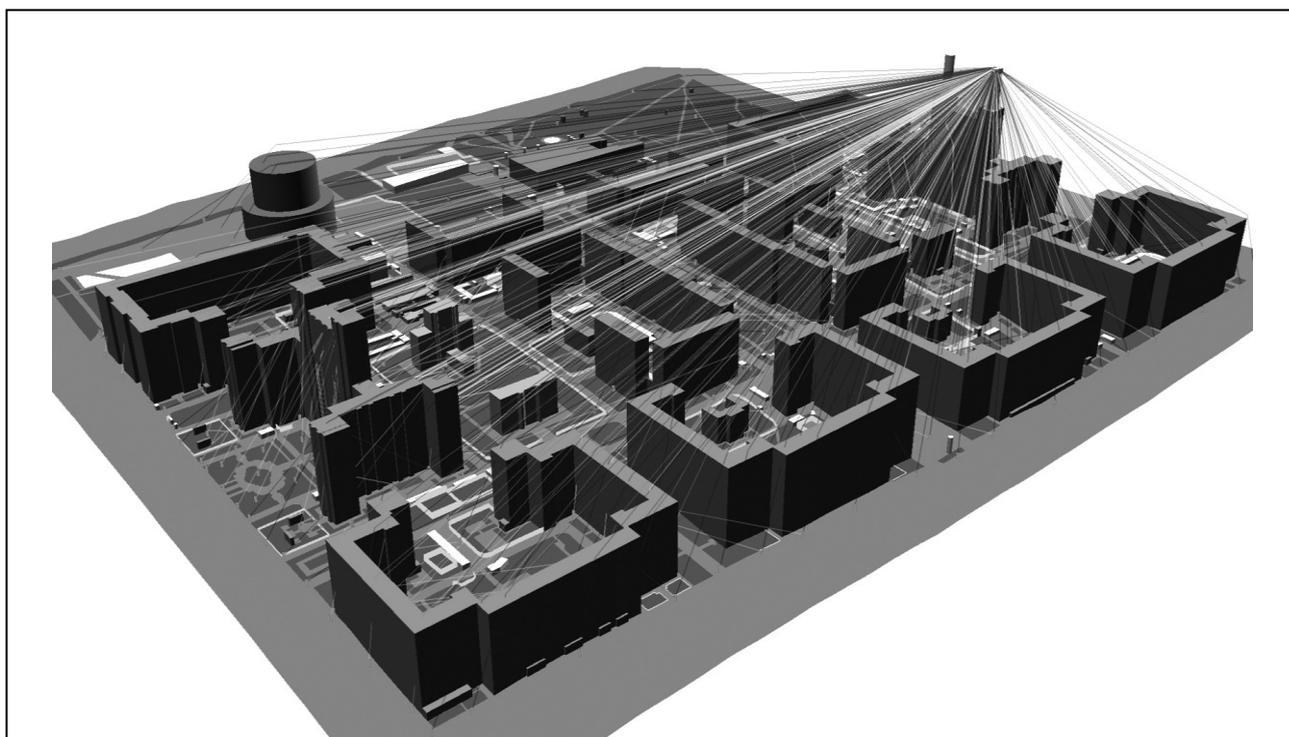


Рис. 3. Трехмерное отображение траекторий распространения ЭМП 100 МГц в пределах городского микрорайона; среднеквадратическая точность прогноза по всей совокупности пространственных данных (450 точек измерения) составила 8,5 дБ.

В пределах рассматриваемой территории имелись участки существенно отличающиеся по условиям распространения радиоволн, в том числе зоны прямой оптической видимости антенн, зоны глубокой радиотени и участки с частичной видимостью антенн. В связи с этим, была проанализирована точность прогноза уровня ЭМП 100 МГц в различных условиях.

В условиях радиотени, при преобладании дифракционных процессов точность прогноза составила (3 – 4) дБ, в зонах полной/частичной оптической видимости излучающих антенн – (5 – 7) дБ, а в зоне преобладания процессов отражения электромагнитных волн она увеличивалась до 7 – 9 дБ. Снижение точности прогноза при преобладании процессов отражения связано в первую очередь с недостатком данных о характеристиках и неучетом мелких деталей отражающих поверхностей, т.к. в распоряжении исследователей имелись только плановые очертания зданий.

Таким образом, сравнение теоретических и экспериментальных результатов позволяет утверждать, что методы геометрической оптики могут применяться не только для анализа электромагнитной обстановки конкретных микрорайонов и/или конкретных радиотехнических объектов, но и могут быть в перспективе эффективно использованы для создания карт потенциально-

опасных зон в городе, учитывающих влияние как крупных теле- и радиочастотных, так и радиопередатчиков средней и малой мощности (подстанций сотовой связи и передачи данных), т.е. создавать экологические проблемно-ориентированные модели местности не только муниципального, но городского/регионального уровня, в том числе и в таких регионах со сложной инфраструктурой радиовещания и связи.

При прогнозировании распространения радиоволн в условиях помещений системы геопространственного моделирования обеспечивают возможность создания метрически корректных и высоко детализированных моделей зданий, которые могут быть успешно использованы при проведении прогнозирования численными методами.

К наиболее точным детерминированным методам прогнозирования распространения радиоволн относятся методы численного решения уравнений Максвелла, имеющие наиболее высокую вычислительную трудоемкость. Для реализации данного метода авторами была адаптирована программная среда CST Microwave Studio, предназначенная для электромагнитных расчетов радиотехнических устройств с помощью метода конечных интегралов (FIT). На рис. 4 представлена одна из пространственных областей в здании, в которой производилось моделирование, а также экспериментальные измерения с целью оценки точности прогнозирования. На рис. 5 (а) представлены результаты расчета напряженности электрического поля с помощью CST Microwave Studio при несущей частоте 270 МГц, усредненные с пространственным окном размера длины волны, на рис. 5 (б) – результаты экспериментальных измерений напряженности поля. Из рисунка видно качественное совпадение картины распределения поля. Количественно среднеквадратическое отклонение прогноза от результатов измерений составило около 3 дБ на 95 % площади.

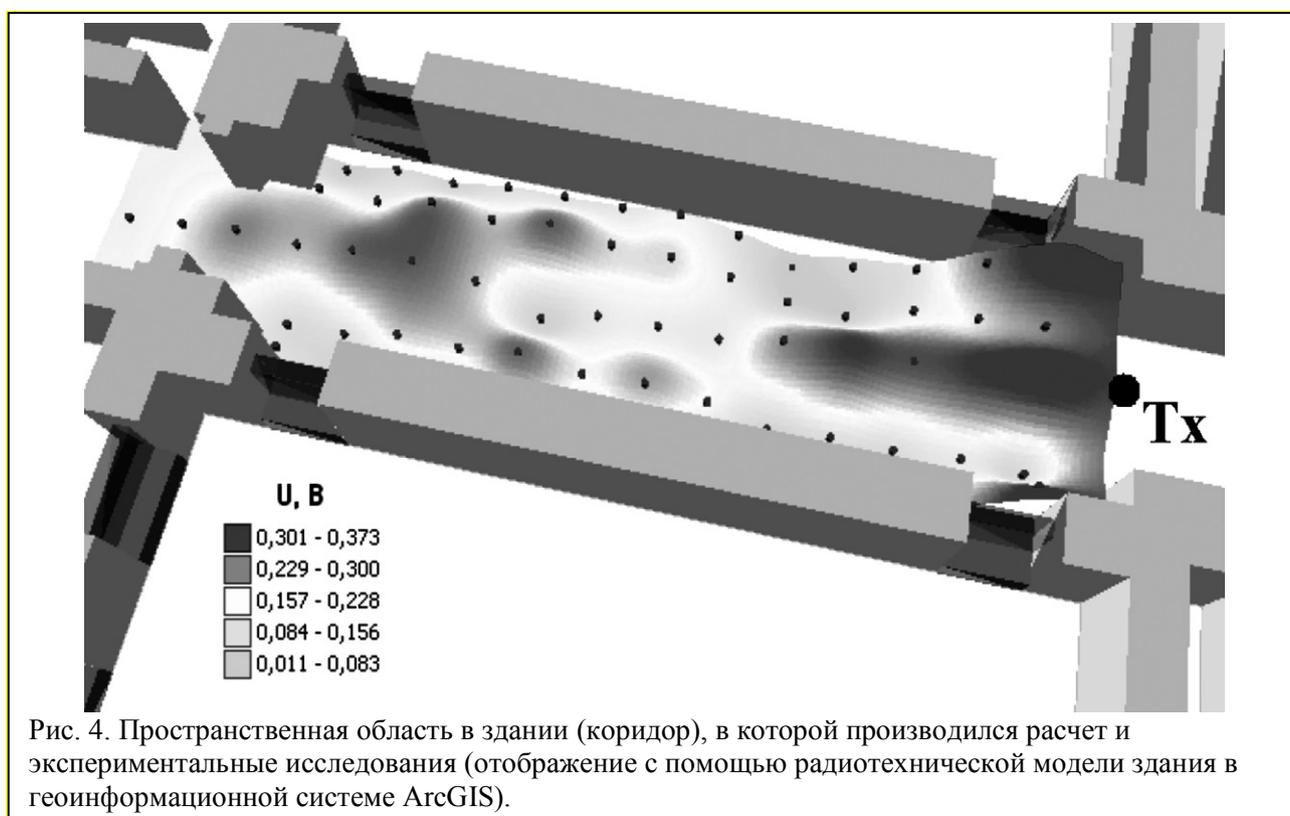


Рис. 4. Пространственная область в здании (коридор), в которой производился расчет и экспериментальные исследования (отображение с помощью радиотехнической модели здания в геоинформационной системе ArcGIS).

#### 4. Электромагнитные поля радиочастотного диапазона как важный экологический фактор антропогенно-изменных сред

Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона (ЭМП РЧ) являются экологическим фактором, степень воздействия которого на население быстро возрастает в связи с постоянным увеличением количества объектов радиотехнической инфраструктуры обитаемых территорий и радиоэлектронных устройств в пользовании у населения.

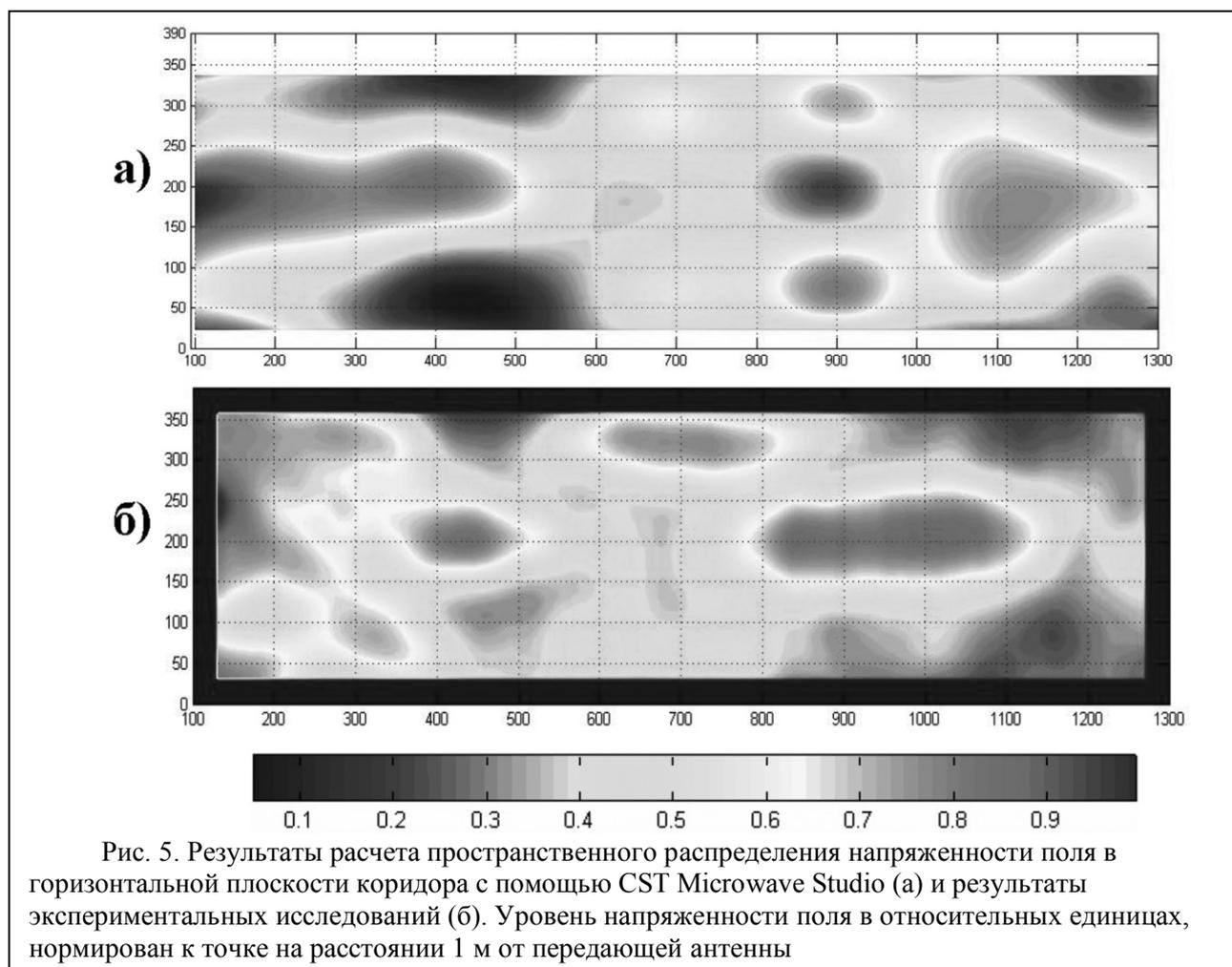


Рис. 5. Результаты расчета пространственного распределения напряженности поля в горизонтальной плоскости коридора с помощью CST Microwave Studio (а) и результаты экспериментальных исследований (б). Уровень напряженности поля в относительных единицах, нормирован к точке на расстоянии 1 м от передающей антенны

Важной особенностью ЭМП РЧ является их высокая пространственная неоднородность в условиях селитебных территорий и помещений. Экспериментальные исследования показывают, что в условиях плотной городской застройки перепад напряженности электромагнитного поля составляет 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, рис. 6 [6, 8].

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. Внутри помещений при проникновении электромагнитного излучения сквозь оконные проемы перепады интенсивности радиосигнала в пределах помещения доходит до 15-20 дБ, при этом размер пространственных неоднородностей ЭМП с колебаниями поля менее 5 дБ составляет от 0,8 – 1,5 м до 3 – 5 м [6, 8].

В процессе анализа столь неоднородной в пространственном отношении экологической обстановки важную роль играют геоинформационные системы. В частности, после сбора и интеграции в среду ГИС результатов измерений, часто появляется необходимость перехода от дискретных значений искомого параметра к непрерывному его распределению. Эта проблема достаточно легко решается благодаря функциям математической интерполяции/экстраполяции данных из отдельных точек в непрерывные растровые поверхности и создания поля изолиний (рис.

б), реализованным в геоинформационных системах. Безусловным преимуществом ГИС при решении этой задачи является то, что при задании параметров интерполяции пользователь указывает размер ячейки, шаг дискретизации расчетов и границы области расчета непосредственно в единицах измерения и координатах местности, тем самым получая в результате строго пространственно-привязанную растровую матрицу, что обычно трудно реализуемо при работе со стандартными программами математического анализа [9].

Это обеспечивает переход к высоко детализированному детерминированному описанию экологических условий окружающей среды для объективной оценки экспозиций (доз) воздействия

ЭМП РЧ в зависимости от места жительства, специфики работы, образа жизни и других факторов. Повышается надежность выявления экопатогенных зон, причин их появления и обеспечивается разработка мотивированных решений, направленных на оптимизацию экологической обстановки как по электромагнитной безопасности, так и по другим факторам окружающей среды.

К методологическим проблемам объективной оценки электромагнитной безопасности следует отнести то, что на практике, процедура экологического мониторинга ЭМП РЧ в большинстве случаев не учитывает указанных особенностей электромагнитного загрязнения: используемая измерительная аппаратура имеет очень высокий нижний порог измерений (0,6–1,0 В/м и выше), который не позволяет получить непрерывное в пространственном отношении описание пространственной структуры загрязнения. По этой же причине невозможна корректная оценка реальной интенсивности излучения, воздействующего на человека излучения – составляет она 0,5 или 0,05 В/м.

Очень широкая полоса пропускания измерительных антенн приборов экологического контроля ЭМП РЧ (от 4 ГГц и более для частот выше 0,3 ГГц) не позволяет производить идентификацию типа источника электромагнитного загрязнения (телевещание, сотовая связь, Wi-Fi), а также выявлять индивидуальный вклад каждого источника ЭМП РЧ при их компактном расположении. Это существенно затрудняет как выработку решений по защите от электромагнитного излучения (экранировка, снижение мощности), так и шагов по правовой оценке факта нарушения санитарных норм. В связи с этим актуальным является внедрение в практику экологического контроля ЭМП РЧ радиотехнического измерительного оборудования (**анализаторов спектра с измерительными антеннами**), позволяющего проводить частотную декомпозицию структуры электромагнитного загрязнения.



Рис. 6. Типичный пример пространственного распределения ЭМП 100 МГц в условиях плотной застройки; изолинии проведены через 5 дБ; стрелкой показано направление распространения радиосигнала.

Совместное использование высокоточных радиофизических методов прогнозирования электромагнитной обстановки с системами геопро пространственного моделирования (в первую очередь специализированных ГИС) позволяет выйти на принципиально новый уровень проведения объективной оценки экологической обстановки урбанизированных территорий со сложной трехмерной пространственной структурой, включающей большое количество потенциальных источников опасности, который обеспечит не только возможность прогноза электромагнитной обстановки в широком диапазоне частот, но и выявления конкретных причин возникновения экопатогенных зон, что позволит принимать мотивированные решения, направленные на оптимизацию экологической обстановки.

Также необходимо отметить, что при решении подобного рода задач, в полной мере раскрывается потенциал геоинформационных систем как очень эффективного средства обработки больших слабоструктурированных массивов экологически значимой информации. В связи с этим, развитие данного подхода может стать одним из существенных шагов на пути становления современной системы управления объектами инфраструктуры территории, требующими экологического надзора, а также систем технического учета и информационных систем управления и поддержки принятия решений в области радиосвязи и смежных областях.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Феер К.: Беспроводная цифровая связь. – М.: Радио и связь, 2000.
2. Пономарев Л.И., Манкевич Т.Л. Моделирование мобильных систем связи //Успехи современной радиоэлектроники, – 1999. – № 8. – С. 45-58.
3. Петров Б.М. Электродинамика и распространение радиоволн.—М.: Горячая Линия-Телеком, 2004.
4. 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.
5. Ying Wang, Safieddin Safavi-Naeini, Chaudhuri S.K. A hybrid technique based on combining ray tracing and FDTD methods for site-specific modeling of indoor radio wave propagation.— IEEE Transactions on antennas and propagation, vol.48, №5, 2000.
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. Bertoni H.L. Radio Propagation for Modern Wireless Systems. New Jersey: Prentice hall, 2001. – 340 p.
8. Королев А.Ф., Краснушкин А.В., Потапов А.А., Турчанинов А.В. Возможности геоинформационных технологий в анализе больших объемов слабоструктурированной физико-экологической информации //Научно-технические технологии. – 2005. – № 1. – Т. 6. – С. 42 – 47.
9. Потапов А.А. Пространственная неоднородность физического загрязнения как экологически значимый фактор. Препринт. М.: Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, 2006. – 54 с.