

---

## Гибридная модель распространения радиоволн в условиях сложных рельефов, лесистой местности и неравномерной застройки

*А.В. Тихомиров, Е.В. Омелянчук, А.Ю. Семенова, В.Ю. Михайлов*

*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*

**Аннотация:** Данная статья посвящена вопросам распространения радиоволн в условиях сложных трасс, сочетающих неравномерность рельефа с лесным массивом или городской застройкой. Общих моделей, позволяющих оценить влияние данных факторов на величину затухания радиосигнала на расстояния до единиц километров, не существует, однако с помощью аппроксимации экспериментальных данных о затухании возможно построение частных эмпирических моделей распространения. Авторами проведена серия экспериментов по измерению уровня электромагнитного излучения на заданном удалении от источника, и на основе полученных данных разработана гибридная модель распространения радиоволн на сложной приземной радиотрассе для систем наземной связи.

**Ключевые слова:** распространение радиоволн, УВЧ, экспериментальные исследования, среднeperесеченная местность, городские условия, лесные массивы, сложный рельеф, эмпирическая модель, затухание радиосигнала, наземная подвижная связь.

### Введение

Построение строгих математических моделей, описывающих характер распространения радиоволн в условиях среднeperесеченной местности и позволяющих оценить величину напряженности поля в различных точках неоднородной радиотрассы, практически невозможно. На практике широко используются различные приближенные математические модели, позволяющие определить область значений уровня сигнала в точке приема. Значительное количество работ, посвященных исследованиям распространения радиоволн в условиях среднeperесеченной местности, используют эмпирические математические модели, основанные на результатах проведенных экспериментов.

В рамках выполнения работы по разработке многофункционального комплекса наземной связи и радиолокации авторами было проведено исследование в области распространения радиоволн в различных средах и выполнена серия экспериментов по распространению радиоволн УКВ-

диапазона (435 МГц и 870 МГц) в условиях сложных рельефов, лесистой местности и неравномерной застройки. Результаты экспериментов выражены как потери при распространении радиосигнала в условиях среднeperесеченной местности для рассматриваемых типов трасс и используются для построения модели распространения радиоволн для сложных трасс. Авторами была разработана гибридная модель распространения, которая позволяет оценить уровень электромагнитного излучения на известном удалении от источника сигнала на сложной приземной радиотрассе и может быть использована для оценки параметров распространения радиосигнала в условиях сложных рельефов, лесистой местности и неравномерной застройки планировании систем наземной подвижной связи.

### **Особенности распространения радиоволн УВЧ диапазона**

Единой модели распространения радиоволн в условиях лесистой местности и неравномерной застройки не существует в связи с большим количеством факторов, влияющих на затухание сигнала, и их нестабильность во времени. Для случая наземной подвижной связи задача оценки параметров распространения радиосигнала связана с такими трудностями, как необходимость учета дифракционной составляющей сигнала, процента перекрытия препятствиями или земной поверхностью существенной области при распространении, быстрых и медленных замираний, возникающих вследствие изменения положения препятствий на трассе.

К факторам, влияющим на затухание радиосигнала при распространении в лесном массиве, можно отнести: рассеивание радиосигнала на стволах, ветвях и листьях, дифракцию на кромках элементов растительности и на вершинах лесного полога, отражение от лесной подстилки и границ разделов сред, а также изменение поляризации.

---

Существует ряд эмпирических моделей распространения радиоволн в растительности, таких как: модель COST-235, модель ITU-R и модель Вайсбергера [1-3]. Коэффициенты, используемые для расчетов по данным моделям, получаются на основе статистических данных, при этом для России таких экспериментов проводилось крайне мало, в связи с чем для средней полосы Российской Федерации необходим сбор статистики и оценка существующих моделей по степени соответствия результатам экспериментов.

При проектировании наземных систем подвижной радиосвязи для работы в городских условиях необходимо учитывать, что в зависимости от типа и плотности городской застройки сигнал может включать прямую, отраженную, дифрагированную и преломленную составляющие [4-6]. К распространенным моделям распространения радиоволн в городской среде можно отнести модель Hata, COST231-Hata и модель Stanford University Interim (SUI) была разработана для стандарта IEEE 802.16 (городские беспроводные вычислительные сети) [7-11]. Области применимости данных моделей ограничены не только по частотам до 1,5 ГГц или 2 ГГц, но и по протяженности трасс и высоты расположения передающей антенны. В частности, модели Hata и COST231-Hata соответствуют длинам трасс не менее 1 км и высоте передающей антенны не менее 10 м, что соответствует случаю сотовой связи. Ни одна из рассматриваемых моделей при этом не отвечает случаю низко расположенных антенн.

Оценка влияния сложных рельефов на степень затухания радиоволн представляет сложность с точки зрения определения преобладающего механизма распространения и оценки степени влияния подстилающей поверхности. Под обстановкой со сложными рельефами понимается анизотропная среда распространения радиоволн, характеризующаяся многолучевым распространением при многократных отражениях

радиосигналов при движении объектов или препятствий от искусственных сооружений и складок местности в условиях доплеровского изменения [5]. В качестве одного из подходов может использоваться оценка степени перекрытия первой зоны Френеля. В случае низко расположенных антенн земная поверхность экранирует значительную часть эллипсоида первой зоны Френеля, что приводит к дополнительным дифракционными потерям сигнала [12].

### **Проведение экспериментов**

Эксперименты проводились в г. Зеленограде в соответствии с методикой, учитывающей требования [4] и (ГОСТ Р 51320 – 99 Совместимость технических средств электромагнитная РАДИОПОМЕХИ ИНДУСТРИАЛЬНЫЕ Методы испытаний технических средств - источников промышленных радиопомех; Методика частотного планирования радиоэлектронных средств цифрового телевизионного вещания стандарта DVB-H; МУК 4.3.1167-02 Определение плотности потока энергии электромагнитного поля в местах размещения радиосредств, работающих в диапазоне частот 300 МГц-300 ГГц: Методические указания; МУК 4.3.1677-03. Определение уровней электромагнитного поля, создаваемого излучающими техническими средствами телевидения, ЧМ радиовещания и базовых станций сухопутной подвижной радиосвязи: Методические указания; Рекомендация МСЭ-R BS.1195-1. Характеристики передающих антенн в диапазонах СВЧ и УВЧ; Рекомендация МСЭ-R BS.1698. Оценка полей от наземных радиовещательных передающих систем, работающих в любых полосах частот, для определения воздействия неионизирующего излучения; Рекомендация МСЭ-R SM.1708 Измерения напряженности поля вдоль маршрута с регистрацией географических координат); результаты экспериментов в нелицензируемых диапазонах частот 435 МГц и 870 МГц

---

частично представлены в работах [13-15] отдельно для распространения радиоволн в лесном массиве и для распространения радиоволн в условиях неравномерной городской застройки.

Для каждого из экспериментов использовалась карта, на которой помимо координат точек были обозначены значения высот над уровнем моря, что позволило построить профиль высот и оценить соотношение между величиной перепада высот и высотой подвеса антенны. На основании этих данных были сделаны выводы о соответствии рассмотренной трассы распространения радиосигнала критерию обстановки со сложными рельефами.

Всего были выбраны две трассы распространения в лесном массиве с дальностью до 250 м и 800 м и две трассы распространения в неравномерной городской застройке с дальностью до 1800 м. Высота подвеса передающей антенны изменялась от 2,5 до 8 м, высота подвеса приемной антенны составляла 1,5 м. Для калибровки измерительной аппаратуры проводился дополнительный эксперимент на открытом пространстве, после чего результаты измерений нормировались по уровню сигнала на расстоянии 50 м от передатчика при распространении в открытом пространстве. Отдельно проводился эксперимент, в ходе которого измерялся уровень радиосигнала на склонах оврага. Результаты проведенных экспериментов для обеих частот, нормированные расстоянию от передатчика до границы раздела сред и по величине затухания в свободном пространстве, представлены на рис.1 и 2. Для уменьшения среднеквадратического отклонения (СКО) определения затухания на трассе распространения аппроксимация результатов экспериментов проводилась отдельно для каждого из рассматриваемых случаев. В таблицах 1 и 2 представлены результаты аппроксимации экспериментальных данных для условий лесистой местности и неравномерной застройки соответственно.

Аппроксимация производилась полиномиальной функцией в логарифмическом масштабе, что соответствует степенной функции в абсолютных единицах, при этом в большинстве случаев использование линейной функции представляется удовлетворительным. Физическая интерпретация линейной аппроксимации представляется несложной: при перекрытии средой, такой как лесной массив или городская застройка, значительной части первой зоны Френеля, радиосигнал претерпевает значительное ослабление вследствие ряда факторов, таких как отражение от поверхности препятствия, рассеяние на элементах составного препятствия, затенение и др., что отображено в постоянной составляющей (коэффициент  $p_1$ , дБ), в дальнейшем при прохождении через среду радиосигнал затухает с постоянной скоростью, т.е. коэффициент  $p_0$  является погонным затуханием, дБ/м. Такая интерпретация в целом соответствует подходам к составлению моделей распространения радиоволн, предлагаемым Международным союзом электросвязи (МСЭ).

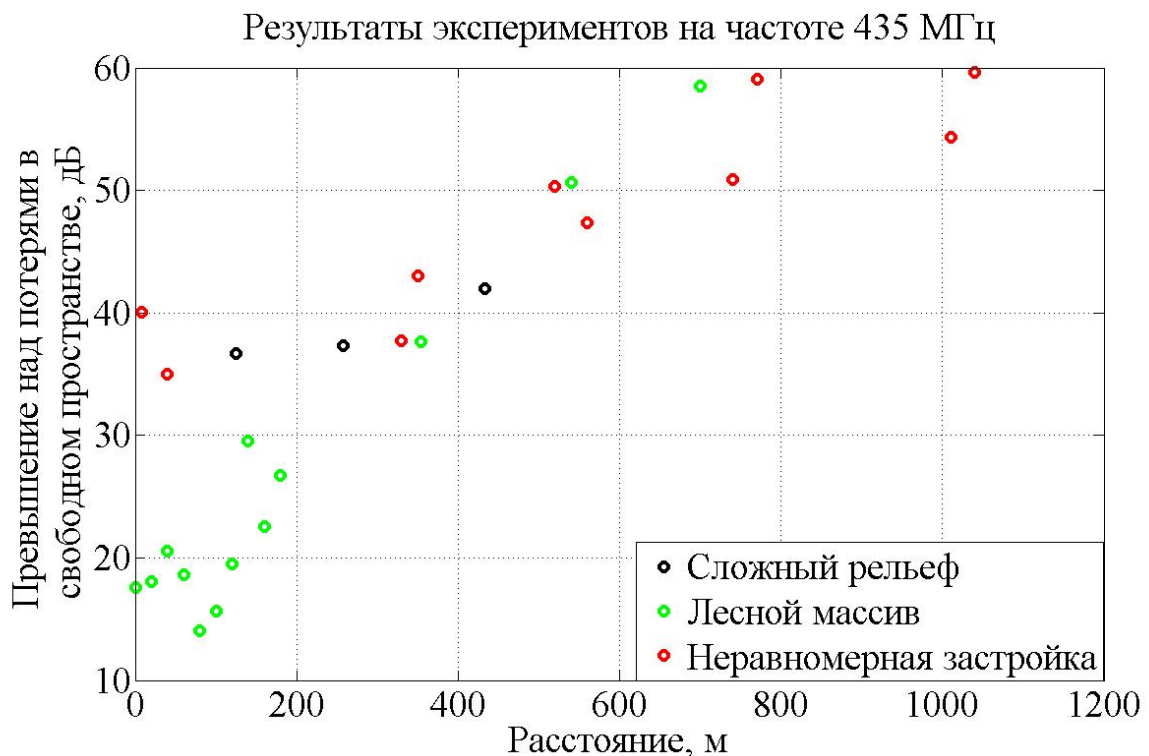


Рис. 1. – Результаты экспериментов по распространению радиоволн на частоте 435 МГц в различных условиях, нормированные по расстоянию

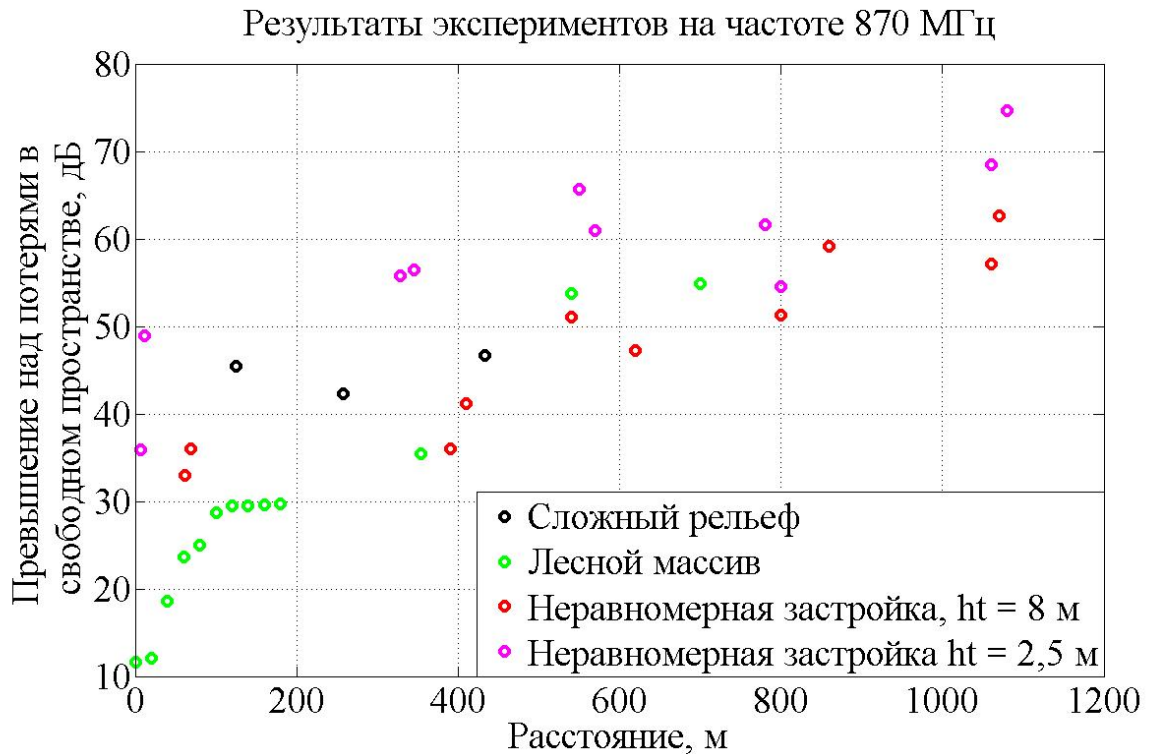


Рис. 2. – Результаты экспериментов по распространению радиоволн на частоте 870 МГц в различных условиях, нормированные по расстоянию

Таблица № 1

Результаты аппроксимации экспериментальных данных по распространению радиоволн в условиях лесистой местности

Частота, МГц	Дальность	Выражение	Коэффициенты	СКО
435	до 200 м	$L = p_0 d + p_1$	$p_0 = 0,05$ $p_1 = 15,83$	3,99
435	до 700 м	$L = p_0 d + p_1$	$p_0 = 0,06$ $p_1 = 14,73$	3,53
870	до 150 м	$L = p_0 d + p_1$	$p_0 = 0,11$ $p_1 = 13,90$	3,09



870	до 700 м	$L = p_0 d + p_1$	$p_0 = 0,06$ $p_1 = 18,16$	4,37
-----	----------	-------------------	-------------------------------	------

Таблица № 2

Результаты аппроксимации экспериментальных данных по распространению радиоволн в условиях неравномерной застройки

Частота, МГц	Высота подвеса передающей антенны	Выражение	Коэффициенты	СКО
435	8 м	$L = p_0 d^3 + p_1 d^2 + p_2 d + p_3$	$p_0 = -4,39 \cdot 10^{-8}$ $p_1 = 6,48 \cdot 10^{-5}$ $p_2 = 0$ $p_3 = 36,44$	1,55
435	8 м	$L = p_0 d + p_1$	$p_0 = 0,022$ $p_1 = 36,07$	2,54
870	8 м	$L = p_0 d + p_1$	$p_0 = 0,027$ $p_1 = 31,44$	2,65
870	2,5 м	$L = p_0 d + p_1$	$p_0 = 0,024$ $p_1 = 45,10$	5,11

### Гибридная модель распространения радиоволн

Для построения гибридной модели распространения радиоволн предлагается использовать кусочно-полиномиальную модель потерь из  $N$  сегментов, каждый из которых соответствует одному из типов сред распространения радиоволн. Порядок расположения сегментов является произвольным, количество точек изломов (разрывов функции) определяется количеством переходов из одной среды в другую.

Для учета влияния сложного рельефа на затухание сигнала предлагается введение дополнительного коэффициента. При этом имеющийся на трассах распространения овраг можно разбить на три области: склон, дно и подъем.



Гибридная модель распространения радиоволн в условиях сложных рельефов, лесистой местности и неравномерной застройки тогда будет иметь следующий вид:

$$L_{\text{общ}} = \sum_{i=1}^N (L_{\text{св}}(d) + L_{\text{дон}}(d-d_{i-1})), \quad (1)$$

где  $L_{\text{общ}}$  – общие потери на распространение в условиях сложных рельефов, лесистой местности и неравномерной застройки,  $N$  – количество сегментов, на которые разбивается трасса распространения в зависимости от типа сегмента (лесной массив, городская застройка, сложный рельеф в соответствии с разделением, представленным ранее),  $d$  – текущее расстояние от передающей антенны,  $d_{i-1}$  – расстояние от передающей антенны до начала текущего сегмента,  $L_{\text{св}}$  – потери на распространение в свободном пространстве,  $L_{\text{дон}}$  – дополнительные потери на распространение внутри сегмента, определяющиеся как сумма потерь в среде (лесной массив, городская застройка)  $L_{\text{среды}}$  и потерь за счет неровностей рельефа  $L_{\text{рельефа}}$ :

$$L_{\text{дон}} = L_{\text{среды}} + L_{\text{рельефа}}, \quad (2)$$

$$L_{\text{среды}} = K_{\text{среды}} + \gamma_{\text{среды}} \cdot (d-d_{\text{нач}}), \quad (3)$$

$$L_{\text{рельефа}} = \gamma_{\text{рельефа}} \cdot (d-d_{\text{нач}}), \quad (4)$$

где  $d_{\text{нач}}$  – расстояние от передающей антенны до начала сегмента, соответствующего началу рассматриваемого фактора на трассе распространения,  $\gamma_{\text{среды}}$ ,  $\gamma_{\text{рельефа}}$  – погонное затухание для рассматриваемого фактора,  $K_{\text{среды}}$  – коэффициент ослабления на границе среды.

Расстояния в рассматриваемой модели определяются в соответствии с трассой распространения. Частотно-зависимые коэффициенты определены эмпирическим путем для частот 435 МГц и 870 МГц и представлены в таблицах 1 и 2. Влияние рельефа должно учитываться только при наличии

---

достаточно крутого склона на трассе распространения, перекрывающего первую зону Френеля. Во всех прочих случаях следует принять  $L_{\text{рельефа}} = 0$ .

Можно обозначить границы применимости предложенной модели следующим образом:

- дальность до 700 м в лесном массиве,
- дальность до 1000 м в условиях городской застройки,
- высоты подъема передающей антенны от 2 до 8 м,
- высота подъема приемной антенны не менее 1,5 м.

### Проверка гибридной модели

Для проверки разработанной модели был проведен дополнительный эксперимент по распространению радиоволн на сложной трассе на частотах 435 МГц и 870 МГц. Эксперимент проводился в сентябре при наличии листвы в соответствии с картой-схемой, показанной на рис. 3, и включающей следующие участки:

- 1) свободное пространство (0 – 275 м),
- 2) лесной массив (275 – 330 м),
- 3) лесной массив со склоном (330 – 410 м),
- 4) поверхность пруда (410 – 550 м),
- 5) подъем с растительностью (505 – 665 м),
- 6) свободное пространство (665 – 740 м),
- 7) городская застройка (740 – 775 м).

На рис.4 и 6 представлена трасса распространения и первая зона Френеля для частот 435 МГц и 870 МГц соответственно. На рис.5 и 7 показан процент перекрытия препятствиями на трассе распространения первой зоны Френеля для высоты подъема передающей антенны 8 м, а также результаты лабораторных исследований распространения радиоволн в условиях сложных рельефов, лесистой местности и неравномерной застройки на частотах

---

435 МГц и 870 МГц соответственно в сравнении с результатами моделирования разработанной гибридной модели распространения радиоволн с соответствующими коэффициентами для данной трассы.

Рис.4-7 показывают, что результаты расчетов по представленной гибридной модели в значительной мере совпадают с нормированными значениями ослабления радиоволн в точках трассы, полученными из экспериментальных данных. Отклонение значений величины затухания, полученных в результате моделирования в точках 4 и 6, от значений, полученных в ходе эксперимента, можно объяснить изменением просвета первой зоны Френеля (в точке 4) и усилением за препятствием (в точке 6).

Стоит отметить, что для частоты 435 МГц было выбрано значение погонного ослабления в растительности равное 0,06 дБ/м и 0,04 дБ/м для сегментов трассы 2 и 5, в обоих случаях использовалось постоянное ослабление на границах сегментов. Для частоты 870 МГц использовались значения коэффициентов, соответствующие малым длинам трасс в растительности, то есть постоянное ослабление на границах сегментов 13,9 дБ и погонное ослабление 0,11 дБ/м. По значениям коэффициентов погонного ослабления для сегментов трассы 2 и 5 можно сделать вывод о том, что радиосигнал на частоте 870 МГц в большей степени подвержен влиянию растительности.

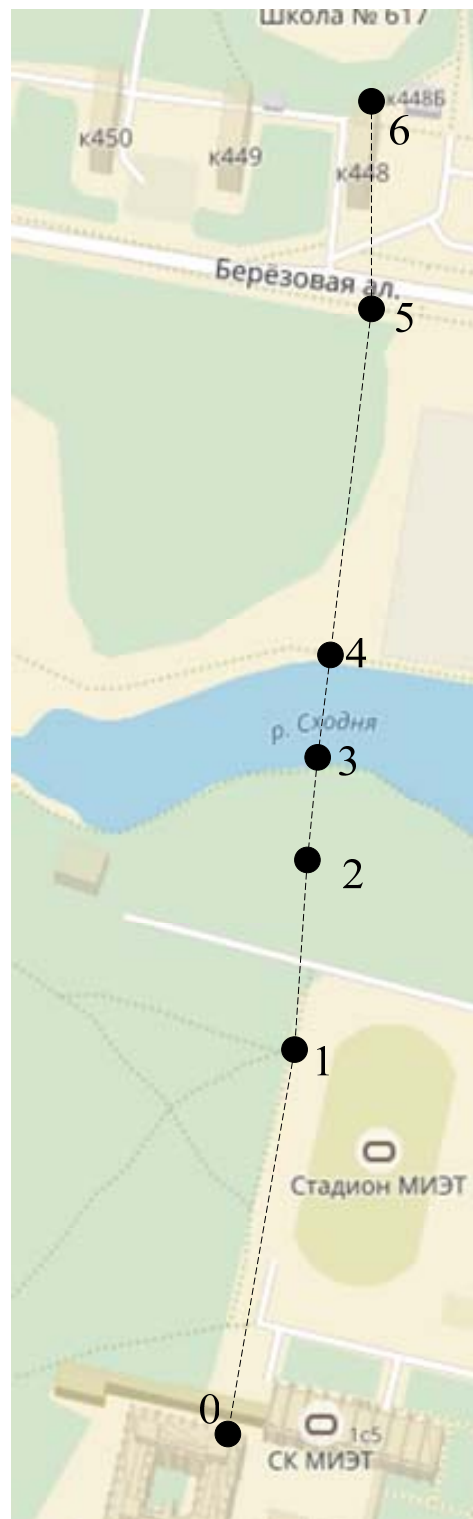


Рис. 3. – Карта-схема проведения эксперимента для проверки гибридной модели

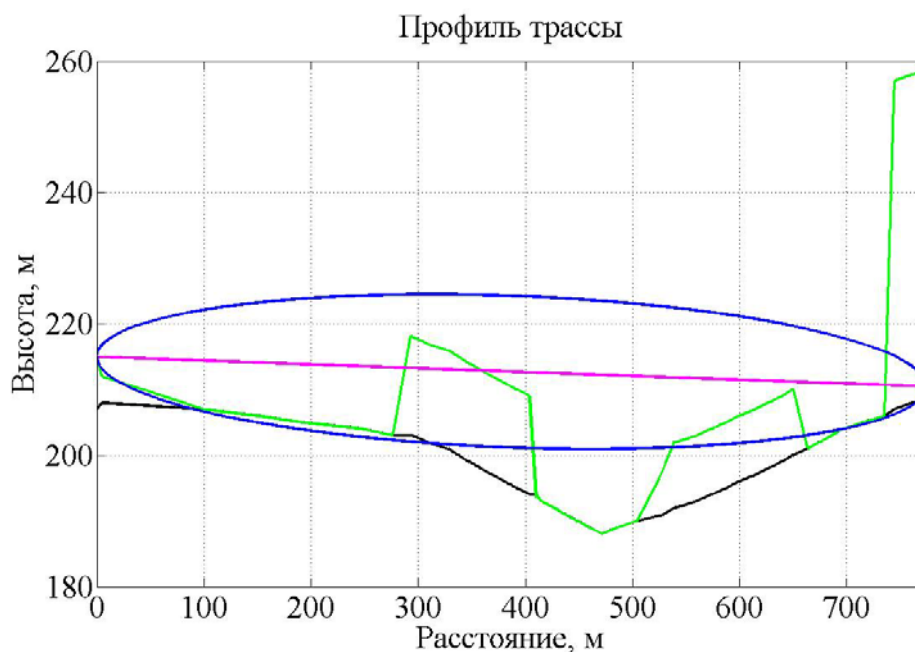


Рис. 4 – Высотный профиль трассы при высоте подъема передающей антенны 8 м и первая зона Френеля для частоты 435 МГц

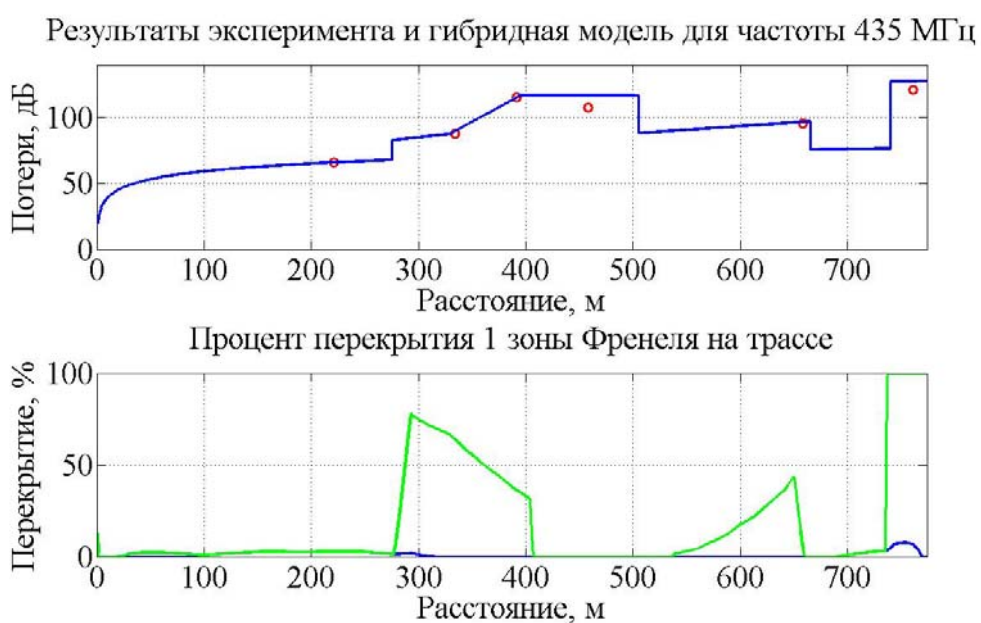


Рис. 5. – Результаты эксперимента на частоте 435 МГц в сравнении с гибридной моделью и процент перекрытия препятствиями на трассе распространения первой зоны Френеля

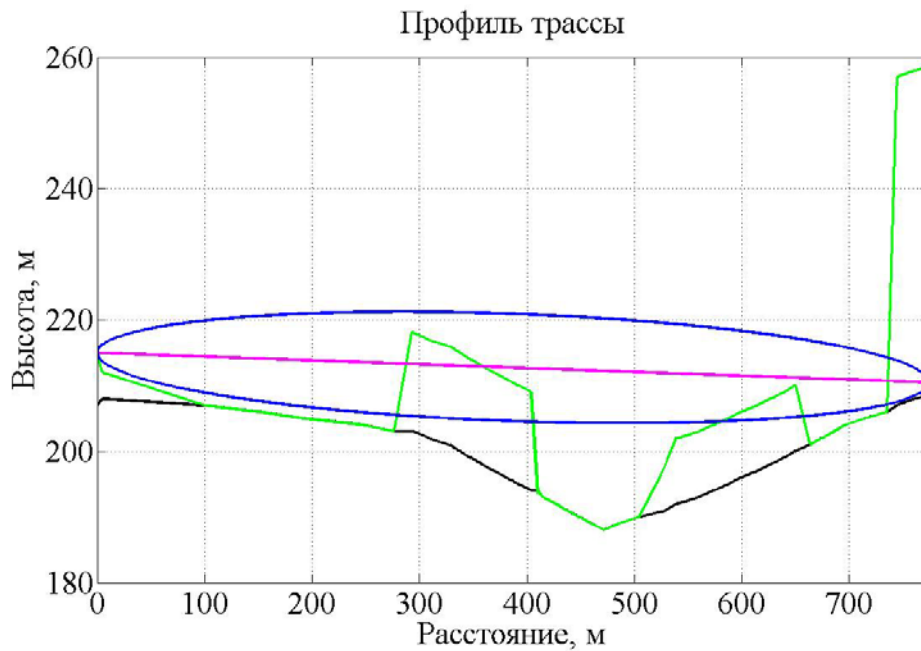


Рис. 6. – Высотный профиль трассы при высоте подъема передающей антенны 8 м и первая зона Френеля для частоты 870 МГц

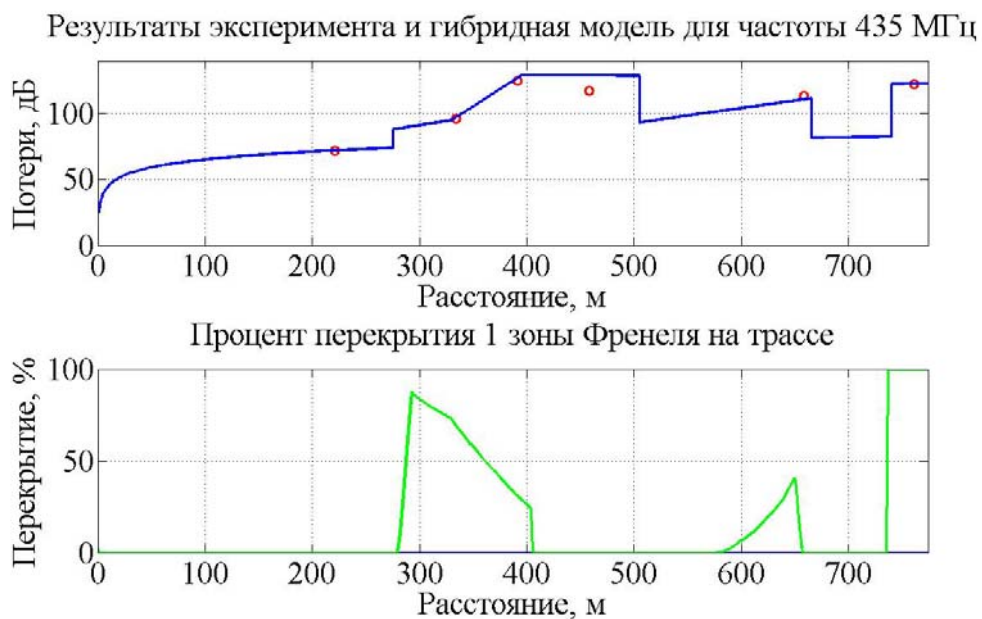


Рис. 7. – Результаты эксперимента на частоте 870 МГц в сравнении с гибридной моделью и процент перекрытия препятствиями на трассе распространения первой зоны Френеля

## Выводы

Разработанная гибридная модель распространения радиоволн в условиях сложных рельефов, лесистой местности и неравномерной застройки была проверена на практике и продемонстрировала соответствие эмпирическим данным. Не давая однозначного прогноза величины ослабления в каждой точке трассы распространения, она однако позволяет оценить сверху значения потерь в радиоканале. Для расширения границ применимости данной модели требуется проведение дополнительных исследований, которые также могут позволить уточнить коэффициенты погонного ослабления в рассматриваемых средах в зависимости от различных параметров, оказывающих влияние на распространение радиоволн, таких как плотность и высота застройки, наличие растительности, ее высота и тип, а также тип поверхности.

Показано, что модель демонстрирует величину среднеквадратичных отклонений от эмпирических данных до 5,1 дБ для случая низко расположенных антенн передатчика и приемника. Проведенный дополнительный эксперимент демонстрирует незначительные расхождения с разработанной гибридной моделью, не превышающие данные отклонения.

Таким образом, разработанная гибридная модель распространения радиоволн в условиях сложных рельефов, лесистой местности и неравномерной застройки может применяться для оценки уровня электромагнитного излучения на известном удалении от источника сигнала при планировании систем наземной подвижной связи.



## Литература

1. ICT COST Action 235. Radiowave propagation effects on next-generation fixed-services terrestrial telecommunication systems. Chair: M.P.M. Hall, UK URL: [cost.eu/COST\\_Actions/ict/235](http://cost.eu/COST_Actions/ict/235)
  2. Recommendation ITU-R P.833 Attenuation in vegetation. URL: [itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.833-9-201609-I!!PDF-E.pdf](http://itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.833-9-201609-I!!PDF-E.pdf)
  3. Weissberger, M.A., «An Initial Critical Summary of Models for Predicting the Attenuation of Radio Waves by Trees», ESD-TR-81-101, Electromagnet Compat. Analysis Center, Annapolis, MD, July 1982
  4. Рекомендация МСЭ-R P.1406 Эффекты распространения радиоволн, касающиеся наземных сухопутной подвижной и радиовещательной служб в диапазонах ОБЧ и УВЧ. URL: [itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1406-2-201507-I!!PDF-R.pdf](http://itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1406-2-201507-I!!PDF-R.pdf)
  5. Галкин В.А. Цифровая мобильная радиосвязь. Учебное пособие для вузов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 432 с.
  6. Маковеева М. М. и Шинаков Ю. С.. Системы связи с подвижными объектами: Учебное пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 2002, 440с.: ил.
  7. Hata M. Empirical formula for propagation loss in land mobile services//IEEE Trans. Vehicular Technology. 1980. V. 29, № 3. pp. 317–326
  8. Cost Final Report URL: [lx.it.pt/cost231/](http://lx.it.pt/cost231/)
  9. V. Erceg, L. J. Greenstein, S. Y. Tjandra, S. R. Parkoff, A. Gupta, B. Kulic, A. A. Julius, and R. Bianchi, «An empirically based path loss model for wireless channels in suburban environments» IEEE J. Select. Areas Commun., vol. 17, July 1999. pp. 1205–1211
  10. Муравьев И.В., Перцев Л.В., Исаенков Н.С. Обзор методов адаптивного использования спектра // Инженерный вестник Дона. 2011. №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2011/468](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2011/468)
-



11. Баринов В.В., Смирнов А.В., Мигалин Д.С. Модифицированный протокол канального уровня для высокоомобильной эпизодической сети с направленными антеннами // Инженерный вестник Дона. 2011. №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2011/466](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2011/466)
12. Долуханов М.П. Распространение радиоволн. Учебник для вузов. М., «Связь», 1972, 336 с.
13. Тихомиров А. В., Омелянчук Е. В., Семенова А. Ю., Михайлов В. Ю. Прогнозирование параметров распространения радиоволн в условиях городской застройки при использовании низко расположенных антенн // Труды МАИ. 2017. № 97. URL: [trudymai.ru/published.php?ID=87308](http://trudymai.ru/published.php?ID=87308)
14. Tikhomirov A., Omelyanchuk E., Semenova A., Mikhailov V. Experimental Study of UHF Radio Wave Propagation in Rough Terrain. // Proceedings of the 2017 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, 2017 ElConRusNW, Moscow, 2017, pp. 307 – 311.
15. Tikhomirov A., Omelyanchuk E., Semenova A. Radio Wave Propagation Impact on Signal Parameters of Local Positioning Systems // 2016 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, Saint Petersburg, 2016, pp. 490 – 494.

### References

1. ICT COST Action 235. Radiowave propagation effects on next-generation fixed-services terrestrial telecommunication systems. Chair: M.P.M. Hall, UK. URL: [cost.eu/COST\\_Actions/ict/235](http://cost.eu/COST_Actions/ict/235)
  2. Recommendation ITU-R P.833 Attenuation in vegetation. URL: [itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.833-9-201609-1!!PDF-E.pdf](http://itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.833-9-201609-1!!PDF-E.pdf)
-

3. Weissberger, M.A., «An Initial Critical Summary of Models for Predicting the Attenuation of Radio Waves by Trees», ESD-TR-81-101, Electromagnet Compat. Analysis Center, Annapolis, MD, July 1982
4. Recommendation ITU-R P.1406: Propagation effects relating to terrestrial land mobile and broadcasting services in the VHF and UHF bands: [int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1406-2-201507-I!!PDF-R.pdf](http://int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1406-2-201507-I!!PDF-R.pdf)
5. Galkin V.A. Cifrovaja mobil'naja radiosvjaz' [Digital Mobile Communications] M.: Gorjachaja linija. Telekom, 2007. 432 p.
6. Makoveeva M. M. i Shinakov Ju. S.. Sistemy svjazi s podvizhnymi ob'ektami [Mobile communication systems]. M.: Radio i svjaz', 2002, 440 p.: il.
7. Hata M. IEEE Trans. Vehicular Technology. 1980. V. 29, № 3. pp. 317–326
8. Cost Final Report. URL: [lx.it.pt/cost231](http://lx.it.pt/cost231)
9. V. Erceg, L. J. Greenstein, S. Y. Tjandra, S. R. Parkoff, A. Gupta, B. Kulic, A. A. Julius, and R. Bianchi. IEEE J. Select. Areas Commun., vol. 17, July 1999. pp. 1205–1211
10. Murav'ev I.V., Percev L.V., Isaenkov N.S. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2011. №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2011/468](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2011/468)
11. Barinov V.V., Smirnov A.V., Migalin D.S. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2011. №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2011/466](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2011/466)
12. Doluhanov M.P. Rasprostranenie radiovoln [Radiowave propagation]. M., «Svjaz'», 1972, 336 p.
13. Tihomirov A. V., Omelyanchuk E. V., Semenova A. Ju., Mikhailov V. Ju. Trudy MAI. 2017. № 97. URL: [trudymai.ru/published.php?ID=87308](http://trudymai.ru/published.php?ID=87308)
14. Tikhomirov A., Omelyanchuk E., Semenova A., Mikhailov V. Proceedings of the 2017 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, 2017 ElConRusNW, Moscow, 2017, pp. 307 – 311.



15. Tikhomirov A., Omelyanchuk E., Semenova A. IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, Saint Petersburg, 2016, pp. 490 – 494.