

## **Сравнение результатов экспериментального исследования распространения радиоволн в лесу с численным моделированием.**

Е.С. Малевич, М.С. Михайлов, А.А. Волкова

Национальный исследовательский университет «МЭИ», 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная 17 E-mail [malevichmpei@gmail.com](mailto:malevichmpei@gmail.com)

*Представлены результаты экспериментального исследования затухания сигнала в X-диапазоне частот при прохождении через лесную среду. Описаны условия расположения развернутой радиолинии, проходящей через лесной массив. Для сравнения было проведено моделирование лесной среды плоскостной моделью, на основе которого можно говорить о хорошем качественном согласии результатов. Предложенная методика позволяет провести предварительную оценку при проектировании антенных систем разного назначения.*

*The results of an experimental study of the attenuation of a signal in the X-frequency range when passing through a forest environment are presented. The conditions of the location of the deployed radio link passing through the forest are described. For comparison, a simulation of the forest environment was carried out using a flat-layered model, on the basis of which one can speak of a good qualitative agreement of the results. The proposed technique allows for a preliminary assessment in the design of antenna systems for different purposes.*

### **Введение**

Всё более широкое распространение получают исследования распространения радиоволн в условиях реальной окружающей среды. Лесная среда является одним из самых распространенных факторов, затрудняющих прохождение электромагнитных волн практически во всех диапазонах частот. В теоретических и экспериментальных исследованиях по изучению распространения радиоволн в лесных покровах большое внимание уделяется зависимости характера затухания радиосигнала от частоты и поляризации электромагнитной волны, от типа леса, плотности распределения деревьев, их высоты, диаметра стволов, а также от сезона года, географических факторов и рельефа окружающей среды.

При проектировании различных систем радиосвязи необходимо учитывать факторы окружающей среды, в том числе прохождение сигнала через лесную растительность. Целью работы стала оценка влияния особенностей ландшафта местности на затухание сигнала для последующей выработки рекомендаций по выбору местоположения антенн и необходимости вырубки близлежащих лесных массивов, чтобы увеличить эффективность антенной системы в целом.

При развертывании линии связи с использованием остронаправленных антенн, расположенных внутри лесных массивов, необходимо учитывать протяженность трасс распространения с учетом границ дальней зоны и френелевской.

Для верификации результатов производилось сравнение численного моделирования с использованием метода параболического уравнения и экспериментального исследования затухания радиоволн в лесу. В настоящее время реализовано огромное количество математических моделей представления лесного массива и отдельных деревьев. В основном выделяют три группы моделей: электродинамические [1, 2, 3], статистические [4, 5] и эмпирические [6]. Электродинамические модели чаще всего представляют в виде многослойной структуры в вертикальном сечении, когда лес состоит из слоев лесной подстилки, стволов, подлеска и полога. Можно отдельно учесть форму кромки лесного полога,

исходя из визуальных соображений о геометрии полога в зависимости от типа лесного массива: лиственный – синусоидальная, хвойный – пилообразная [7].

Статистические модели учитывают рассеяние от одиночных рассеивателей-деревьев, особое внимание уделяется эффектам, возникающим при отражении от отдельных структурных элементов дерева [5]. Преимущество подобных моделей в том, что можно как воссоздать расположение деревьев на реальной местности, так и путем расчета ансамбля множества реализаций учесть статистические особенности распространения радиоволн через лесные среды [8].

Эмпирические модели основываются на результатах экспериментальных исследований потерь при распространении электромагнитных волн через лесную растительность. Преимуществом подобных моделей является то, что для расчетов величины ослабления применяются простые аналитические выражения, которые можно найти, например, в Рекомендациях Международного союза электросвязи ITU-R [9].

В предлагаемой методике численного моделирования будут использоваться многослойная модель, где лес представлен гетерогенной структурой с потерями, и модель конструктора леса, где лес набирается отдельными деревьями, представленными в виде цилиндров и эллипсоидов. Обе модели рассчитываются методом параболического уравнения с пошаговым преобразованием Фурье, который дает неплохое сочетание точности и эффективности во многих электродинамических задачах [10].

## **2. Методика проведения экспериментального исследования.**

Эксперимент по исследованию затухания радиосигнала внутри лесной среды проводился на полигоне ОКБ «МЭИ» в Калязине. Была исследована территория полигона в Калязине, проведены предварительные измерения характеристик близлежащих лесных массивов и отдельных деревьев. В данной местности преобладает смешанный тип леса, состоящий преимущественно из елей, сосен, берез и осин. Средняя высота деревьев составляет 16 метров.

Для проведения первого эксперимента передающая антенна, представляющая собой параболическое зеркало диаметром 1 м, была размещена на поворотной платформе антенны ТНА-1500 на высоте примерно 22 метров над землей.



**Рис.1. Передающая зеркальная антенна на поворотной платформе ТНА-1500.**

Для исследования затухания выбрана частота из X-диапазона частот 10 ГГц (3 см). Для обеспечения приемлемой дальности связи диаметр передающей зеркальной антенны (рис. 1) был выбран  $\sim 1$  м, при этом ширина главного лепестка передающей антенны равна  $1.53^\circ$ , рассчитана по формуле (1):

$$\theta_{эл} = \frac{51 \cdot \lambda}{D} = \frac{51 \cdot 0.03}{1} = 1.53^\circ. \quad (1)$$

Чтобы оценить влияние лесной растительности, измерялось затухание сигнала на радиотрассе без препятствий (72 м) и с препятствием в виде небольшого отрезка леса длиной 100 м (172 м).

Исходя из предварительных оценок дальняя зона в таком случае оказывается на расстояниях:

$$R \geq \frac{2 \cdot D^2}{\lambda} = 66.7 \text{ м} \quad (2)$$

В качестве приемной антенны был выбран рупор размером 13,5×9 см (рис. 2), возбуждаемый отрезком прямоугольного волновода 23×10 мм. Приемная антенна была закреплена на 12-метровой мачте с возможностью изменения высоты ее подъема над земной поверхностью. Кабелем с потерями 1 дБ/м приемная антенна соединялась с анализатором спектра, по которому определялось затухание сигнала.



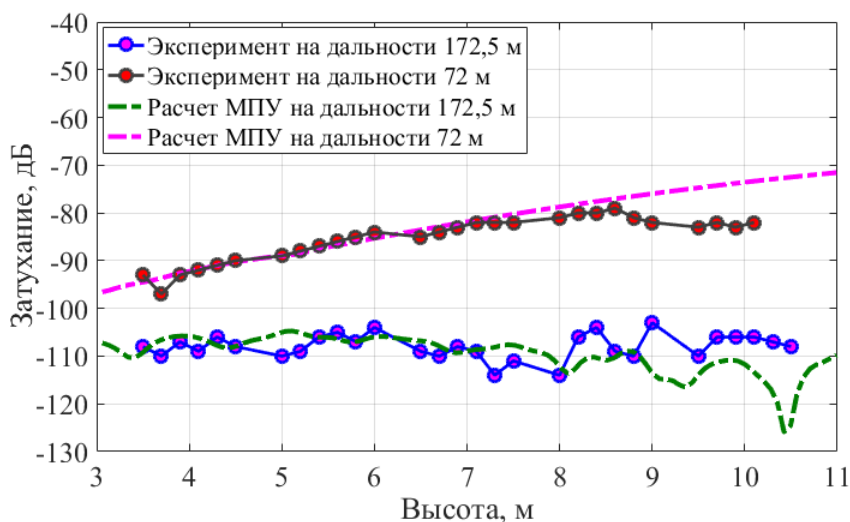
**Рис.2. Приемная рупорная антенна с согласованием.**

Для оценки влияния лесной растительности на затухание сигнала, измерения проводились в двух точках перед лесом и за лесом. На дальностях 72 и 172 м соответственно на рисунке 3 эти места отмечены крестом.



**Рис.3. Схема расположения приемной антенны.**

Во время первого эксперимента была получена зависимость затухания сигнала от высоты подъема приемной антенны над землей в двух случаях: перед лесом и за лесом. Из графика на рисунке 4 видно, что 100 метров леса ослабили в среднем сигнал примерно 20 дБ, но этот параметр варьируется. На этом же графике представлена зависимость затухания сигнала от высоты, полученная с помощью численного моделирования методом параболического уравнения [10]. Для численного расчета была выбрана плоскостойкая модель леса с плоской формой полога и эффективной диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon = 1.02 - j0.008$ .



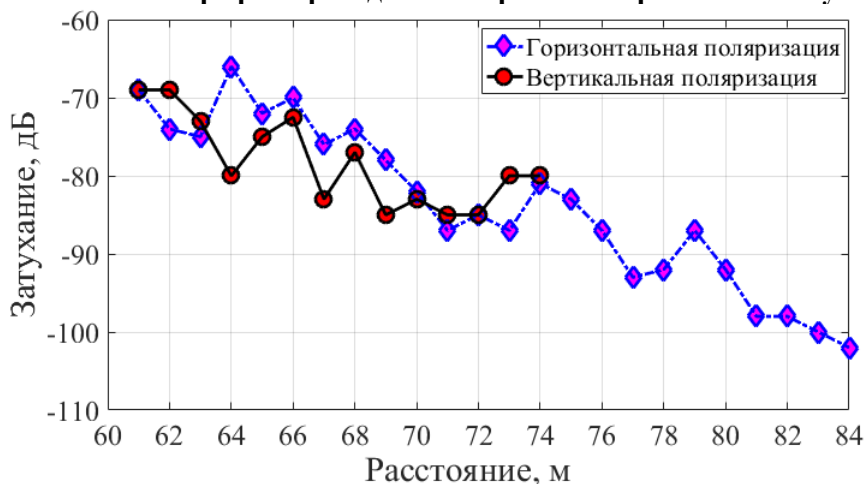
**Рис.4. Зависимость затухания сигнала от высота приемной антенны для первого эксперимента.**

Сравнение графиков на рисунке 4 показывает хорошее качественное совпадение кривых. На результаты экспериментальных данных существенное влияние оказывают окружающие факторы, такие как ветер, например, который может существенно уменьшать амплитуду сигнала (порядка 15 дБ). Поэтому амплитуду сигнала в каждой точке вычисляли путем усреднения результата.

Второй эксперимент заключался в измерении зависимости затухания сигнала от расстояния в небольшой лесопосадке, состоящей из сосен на территории полигона (рис. 5). Расстояние от передающей антенны до лесопосадки составляло 60 метров. Высота сосен в среднем составляла 10 метров, а расстояние между деревьями 3 метра. Измерения проводились на фиксированной высоте подъема над землей 1.8 метра.



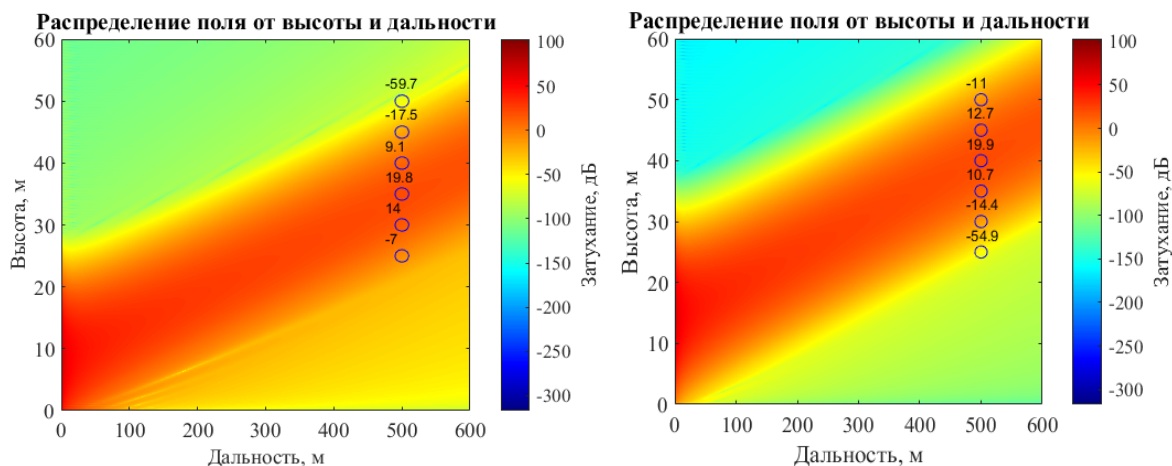
**Рис.5. Фотография проведения второго эксперимента в лесу.**



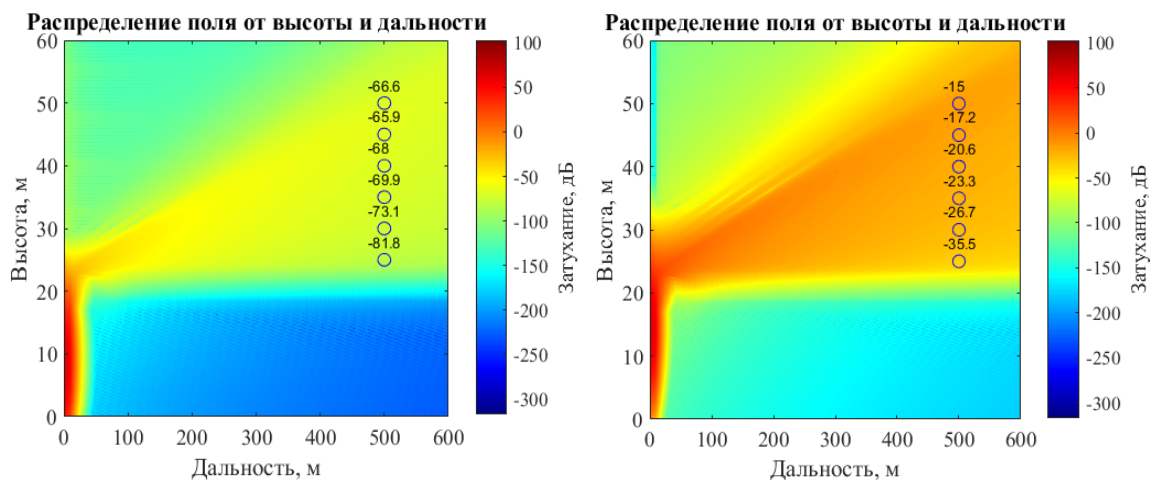
**Рис.6. Зависимость затухания сигнала от расстояния для второго эксперимента.**

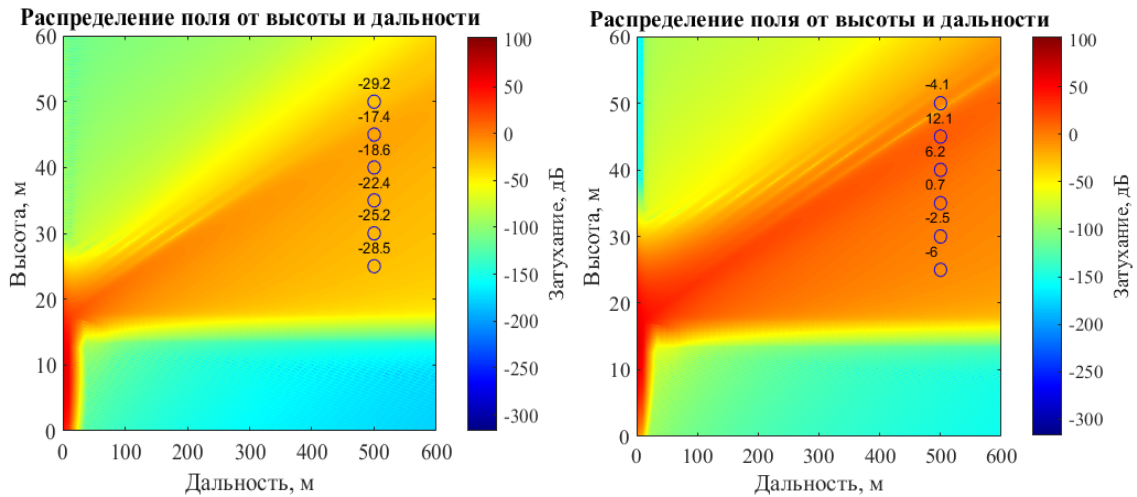
В процессе выполнения измерений изменили поляризацию приемной антенны. На результирующих графиках интересно наблюдать эффект деполяризации излучения антенны (рис. 6), который можно объяснить тем, что работа радиолинии происходит не в главном луче передающей антенны, а в боковых лепестках, поэтому возможно отражение исходного сигнала от металлической плоскости в месте установки передающей антенны.

Для исследования влияния леса на прием сигнала в рамках радиолинии Земля-космос были выполнены теоретические расчеты на основе эмпирически полученных данных о диэлектрической проницаемости лесной среды. Частота сигнала выбрана 7.2 ГГц, излучающие антенны ТНА-12М, с диаметром зеркала 12 метров, высота подъема пилон над земной поверхностью 2 или 8 метров. Оценивали распределение поля в рамках прожекторного пучка, в случаях, когда антенны располагаются вблизи леса и чуть по отдалении. Величину затухания фиксировали в нескольких точках на одинаковой дальности и высоте и сравнивали между собой несколько случаев.

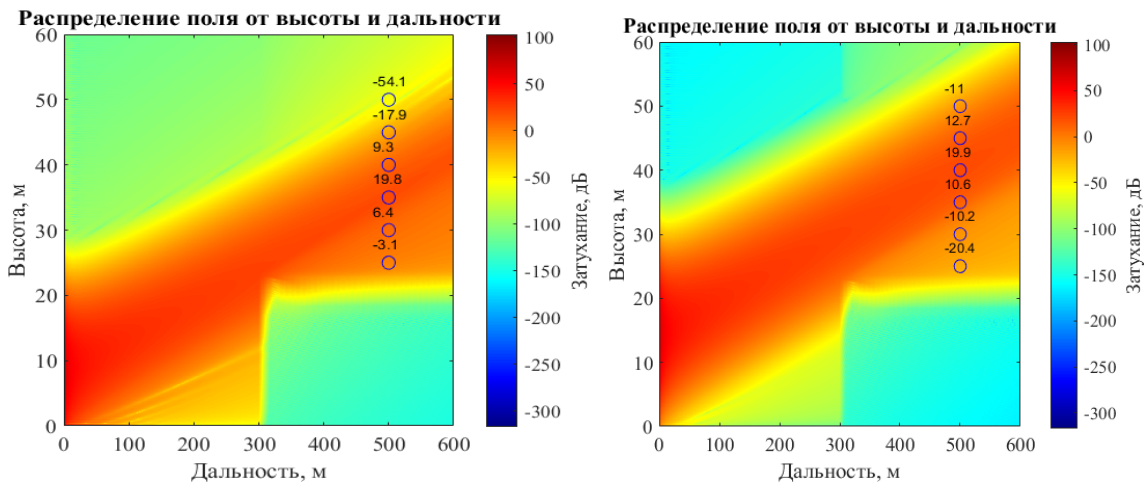


На графиках рисунков 7–11 представлены картины распределения поля по высоте и дальности для разной высоты пилонов, на которых будут установлены антенны ТНА-12М. Чем больше высота пилон, тем меньше влияние лесной растительности, но существеннее стоимость подобной конструкции. На рисунке 7 график показывается распределение поля при отсутствии лесной среды на пути распространения радиоволн. На графиках отмечены 5 характерных точек со значением затухания поля на дальности 500 м и высотах 25, 30, 35, 40 и 50 м над землей.

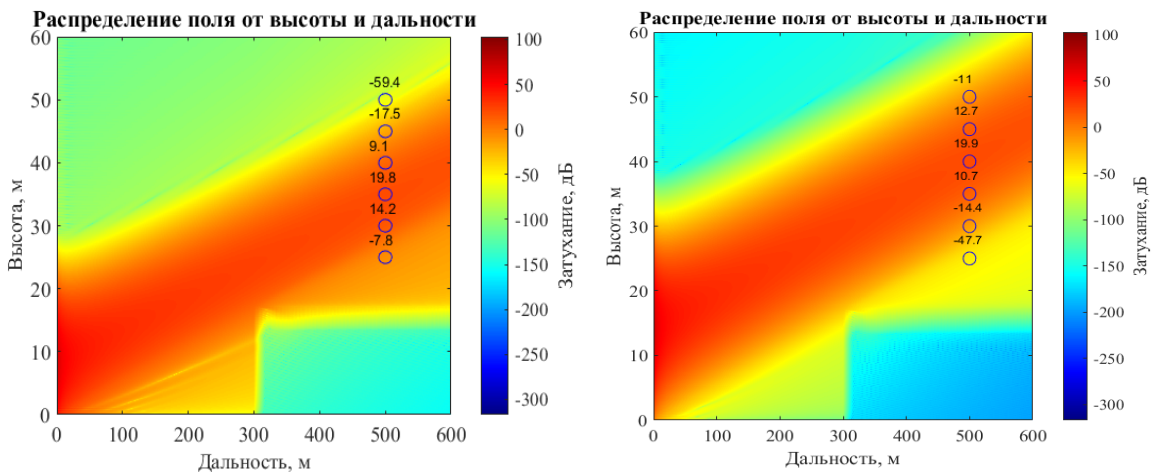




**Рис.9.** Распределение поля по высоте и дальности для подъема пилона антенны на 2 м (слева) и 8 м (справа). Лес начинается на 10 м от антенны, средняя высота леса 15 м.



**Рис. 10.** Распределение поля по высоте и дальности для подъема пилона антенны на 2 м (слева) и 8 м (справа). Лес начинается на 300 м от антенны, средняя высота леса 20 м.



**Рис. 11.** Распределение поля по высоте и дальности для подъема пилона антенны на 2 м (слева) и 8 м (справа). Лес начинается на 300 м от антенны, средняя высота леса 15 м.

Расчеты показали, что т.к. дальняя зона антенны ТНА-12М будет располагаться от 6.8 км и дальше, в промежуточной зоне лес оказывает существенное влияние на

затухание сигнала. Чтобы почти полностью исключить потери из-за прохождения через лесную среду, необходимо вырубить лес на расстоянии больше 300 м от антенны.

### **Заключение**

В докладе представлены результаты сравнения численного моделирования распространения радиоволн с учетом леса на основе метода параболического уравнения с экспериментальными данными по измерению затухания в лесу. Для моделирования леса использовалась электродинамическая плоскостойкая модель, диэлектрическая проницаемость которой была найдена эмпирическим путем. Первый эксперимент дал хорошее согласование с численным результатом, а второй показал эффект деполяризации из-за работы излучающей антенны не в главном лепестке диаграммы направленности.

Построенные в результате численного моделирования графики позволяют оценить распределение поля на радиолинии Земля-космос при работе наземной антенны под малыми углами места.

Из-за сложности при прогнозировании интерференционной картины поля с учетом лесной среды целесообразно собирать статистические данные на основе множественных расчетов при различных реализациях лесного массива. Для выявления закономерностей в дальнейших исследованиях необходимо будет учитывать зависимость влияния леса на формирование поля от множества факторов, таких как, тип леса, его густота, сезон года, влажность и др.

*Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект №17-19-01616).*

### **Литература**

1. T. Tamir. On radio-wave propagation in forest environments // IEEE Trans. Antennas and Propagation, vol. AP-15, no. 6, pp. 806–817, 1967.
2. P. Holm, G. Eriksson, P. Krans, B. Lundborg, E. Lafsved, U. Sterner, A. Waern. Wave propagation over a forest edge-parabolic equation modelling vs measurements // IEEE Symp. PIMRC. Lisboa Portugal, vol. 1, pp. 140-145, September 2002.
3. L-W. Li, J-H. Koh, T-S. Yeo, M-S. Leong, P-S. Kooi. Analysis of radiowave propagation in a four-layered anisotropic forest environment // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 37, no. 4, pp. 1967-1979, July 1999.
4. Y. Ziade, Huy Nguyen, H. Roussel and W. Tabbara. Medeling of propagation of electromagnetic waves in forest media Application to detection and localization of targets // 2006 2nd International Conference on Information & Communication Technologies, Damascus, 2006, pp. 2140-2145.
5. Магазинникова А.Л. Статистические методы расчета УКВ поля в лесных районах. / Дисс. на соискание ученой степени к.ф.м.н., Томск, 1998.
6. Ulaby F.T., Sarabandi K., McDohald K., et al. Michigan microwave canopy scattering model. /Int. J. Remote Sensing, 1990, v.11, No 7, pp. 1223-1253.
7. Малевич Е.С., Михайлов М.С., Пермяков В.А. Моделирование распространения радиоволн над нерегулярной земной поверхностью с лесными массивами с использованием метода параболического уравнения // В сборнике: Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн материалы II Всероссийской научной конференции по проблемам радиофизики и дистанционного зондирования сред, проводимой в рамках VIII Всероссийских Армандовских чтений. Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВО "Владимирский государственный университет имени им. А.Г. и Н.Г. Столетовых". 2018. С. 187-192.



8. Волкова А.А. Распространение радиоволн в лесном массиве, смоделированном с помощью конструктора отдельных деревьев // Тезисы докладов – МЭИ, Москва: 25-ая Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». – 2019. – Т. 1. – С.67.
9. Рекомендация МСЭ-R P.833-9 (09/2016). Ослабление сигналов растительностью. с. 1 – 27.
10. Malevich E. S., Mikhailov M. S. and Permyakov V. A. Method of the Parabolic Equation and its Application in Educational and Engineering Practice // 2018 IV International Conference on Information Technologies in Engineering Education (Inforino), Moscow, 2018, pp. 1-5.