

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.6.8>

УДК: 53.043

ВЛИЯНИЕ ЛЕСНЫХ МАССИВОВ НА ПРИЗЕМНОЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОЛН НИЗКОЧАСТОТНОЙ ЧАСТИ УЛЬТРАКОРОТКОВОЛНОВОГО ДИАПАЗОНА

А.Ю. Ветлужский

**Институт физического материаловедения СО РАН,
670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, д. 6**

Статья поступила в редакцию 15 мая 2026 г.

Аннотация. Статья посвящена экспериментальному исследованию влияния лесных массивов на распространение электромагнитных волн низкочастотной части ультракоротковолнового диапазона. Показано, что существующие эмпирические модели ослабления сигнала обладают ограниченной применимостью в указанном диапазоне, поскольку не разделяют вклад лесной растительности и подстилающей поверхности, а также не всегда учитывают эффект боковых волн, распространяющихся над верхней кромкой леса. В работе представлены результаты натурных измерений, проведённых в сосновом лесу и на открытой местности с идентичными почвенными условиями. На основе сравнения дистанционных зависимостей уровня поля выявлено, что на низких частотах диапазона дополнительное ослабление, вносимое лесной растительностью, перестаёт нарастать с расстоянием после некоторой дистанции и остаётся практически постоянным относительно уровня поля над открытой местностью. Данный эффект объясняется переходом к механизму распространения боковой волны вдоль верхней кромки леса. Показано, что на более высоких частотах характер распространения меняется: ослабление сигнала в лесу возрастает пропорционально пройденному расстоянию, а формирование боковых волн

не происходит. Установлено также, что элементы лесной растительности, выступая в роли рассеивателей, одновременно минимизируют влияние земной поверхности на распространение волн. Полученные результаты позволяют уточнить существующие модели распространения радиоволн в лесных массивах и могут быть использованы при проектировании систем связи в условиях пересечённой и покрытой лесом местности.

Ключевые слова: лесная среда, распространение волн, ослабление, боковая волна.

Автор для переписки: Ветлужский Александр Юрьевич, vay@ipms.bscnet.ru

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания ИФМ СО РАН № FWSF-2024-0008

Введение

Проблема распространения электромагнитных волн в лесных массивах является классической задачей радиофизики, находящейся на стыке теории дифракции, статистической радиофизики и физики случайно-неоднородных сред. Интерес к ней обусловлен широким спектром приложений: от организации тактической связи и радиолокационного обнаружения объектов, скрытых растительностью [1], до задач дистанционного зондирования Земли и проектирования беспроводных сетей связи [2,3]. Физическая сложность проблемы заключается в стохастичности лесной среды как канала распространения. Лес представляет собой совокупность дискретных рассеивателей (стволы, ветви, листва), распределенных на фоне протяженной границы раздела сред «воздух-земля». При этом, во многом определяя параметры электромагнитных излучений вблизи земли, лесная среда по-разному проявляет свое влияние на различных частотах. Незначительно изменяя структуру и амплитудные характеристики поля, если длина волны существенно превосходит высоту древостоя, лес оказывает значительно больший вклад в результат взаимодействия радиоизлучения с окружающей средой на частотах ультракоротковолнового (УКВ) диапазона. При этом ключевым вопросом, который так или иначе рассматривается

практически во всех работах, связанных с этой проблематикой, является оценка ослабления электромагнитного поля, привносимого элементами лесной растительности [4]. Данная оценка необходима как для прогнозирования затухания радиосигналов в наземных радиоканалах, так и для разработки эффективных алгоритмов интерпретации данных дистанционного зондирования.

Методологически все существующие исследования, посвященные влиянию леса на распространение электромагнитных волн, можно разделить на два класса. Первый – строгие аналитические и численные подходы, основанные на решении уравнений Максвелла. К ним относятся метод интегральных уравнений, метод параболического уравнения, а также теория многократного рассеяния [5]. Второй класс – эмпирические и полуэмпирические модели, которые строятся на основе регрессионного анализа натурных измерений.

Наиболее известными эмпирическими моделями являются модель Вайсбергера, модель ITU-R, а также европейская модель COST235 [6,7]. Эти модели построены на аппроксимации обширных экспериментальных данных и либо представляют ослабление излучения при распространении в лесном массиве как степенную функцию частоты и глубины леса, либо описывают его в экспоненциальной форме. Ключевым параметром в последнем случае выступает коэффициент погонного ослабления, существенно варьирующийся в зависимости от типа лесной растительности, плотности древостоя, сезонности и т. д. Общим для этих моделей является то, что они описывают общие потери на трассе, включающие как рассеяние и поглощение в растительности, так и влияние подстилающей поверхности. Более того, для низкочастотной части УКВ диапазона эти модели дают завышенные значения ослабления, поскольку не учитывают эффект боковой волны, формирующейся за счет явления полного внутреннего отражения и распространяющейся над верхней кромкой лесной среды, что было отмечено, в частности, в [8]. Именно боковые волны в указанных диапазонах определяют параметры излучения, взаимодействующего с лесной растительностью, и распространяющегося

на относительно большие расстояния [9]. В настоящее время существуют экспериментальные оценки частот и минимальных дистанций между корреспондирующими антеннами, погруженными в лесную среду, на которых формирование и проявление боковых волн становится возможным в разных типах растительности [10].

Важно подчеркнуть, что практически все разработанные ныне модели ослабления волн в лесной среде рассматривают систему «лес-земля» как единое целое. Интерференционная картина поля, описываемая формулой Введенского для двухлучевой модели, оказывается фактически «встроенной» в эмпирические коэффициенты. Например, в работе [7] при построении полуэмпирической модели явно используется плоско-земной множитель ослабления, который затем умножается на дополнительный фактор, учитывающий растительность. Такие подходы, будучи практически оправданными, не дают представления о влиянии собственно лесной растительности на ослабление электромагнитных волн.

Таким образом, анализ литературы показывает, что, несмотря на значительный объем накопленных данных, существующие модели, как правило, не решают задачу разделения вклада лесной растительности и подстилающей поверхности в результирующее ослабление радиоволн. Целью настоящей работы является анализ результатов экспериментальных исследований, позволяющий оценить вклад именно леса в ослабление излучений низкочастотной части УКВ диапазона и сопоставить его с результатами измерений ослабления волн при распространении на открытых трассах.

1. Постановка и методика проведения экспериментов

Постановка экспериментов, проведенных в рамках указанных исследований, заключалась в следующем.

Измерения проводились в сосновом лесу и на ровной открытой местности с одинаковой сухой песчаной почвой, поэтому в обоих случаях на трассах измерений отсутствовали мелкие кустарники и высокая трава. Лес характеризовался плотностью древостоя $0.14-0.16 \text{ м}^{-2}$, средним диаметром

стволов 22 см, средней высотой деревьев 15 м и высоко (3.5-4.5 м) расположенными над землей кронами деревьев. В качестве приемной и передающей антенн использовались полуволновые симметричные вибраторы, которые размещались на высоте 2.5 м над земной поверхностью. Функцию приемного устройства выполнял анализатор спектра Protek 3201N, сопряженный с компьютером. Измерения проводились на различных частотах УКВ диапазона при вертикальной поляризации излучения.

Целью экспериментов являлось определение дистанционной зависимости поля в лесу при небольшом (до 200 м) пространственном разnose антенн. Для достижения достаточной статистической обеспеченности результатов методика измерений строилась следующим образом. Каждый из экспериментов проводился на трех трассах в пределах одного типа леса. На каждой дистанционной отметке уровень сигнала фиксировался в семи точках, располагавшихся поперек основной трассы распространения излучения на участке, близком к длине волны. Таким образом, снижалось влияние на получаемые результаты местоположения приемной антенны относительно ближайших деревьев. Кроме того, в каждой из указанных точек данные записывались трехкратно в течение минуты, что позволяло уменьшить погрешность, связанную с ветровыми колебаниями элементов растительности. В итоге полученные значения уровня поля усреднялись.

2. Обсуждение результатов

Полученные в лесу результаты приведены на рис. 1 в сравнении с дистанционными зависимостями, измеренными на открытой местности. При этом вне зависимости от абсолютного уровня поля, определенного в ходе экспериментов, данные по открытой местности и по лесу для наглядности сведены воедино в начальных точках, соответствующих пятиметровому разносу антенн. Сплошная кривая на представленных рисунках является графическим отображением функции ослабления поля вблизи гладкой земной поверхности

(функция Зоммерфельда), убывающей обратно пропорционально квадрату расстояния между источником излучения и точкой наблюдения.

Первое, что следует из анализа представленных данных – это хорошая аппроксимация поведения поля на открытой местности степенной функцией, свидетельствующая о корректной постановке экспериментов.

На рис. 1а) изображена зависимость поля в лесу на частоте 150 МГц. Видно, что на начальном участке ослабление поля по сравнению с его поведением на открытой местности нарастает, а затем, начиная с удаления от передающей антенны на расстояние 80-90 м, стабилизируется и далее остается практически неизменным относительно уровня поля в отсутствие леса.

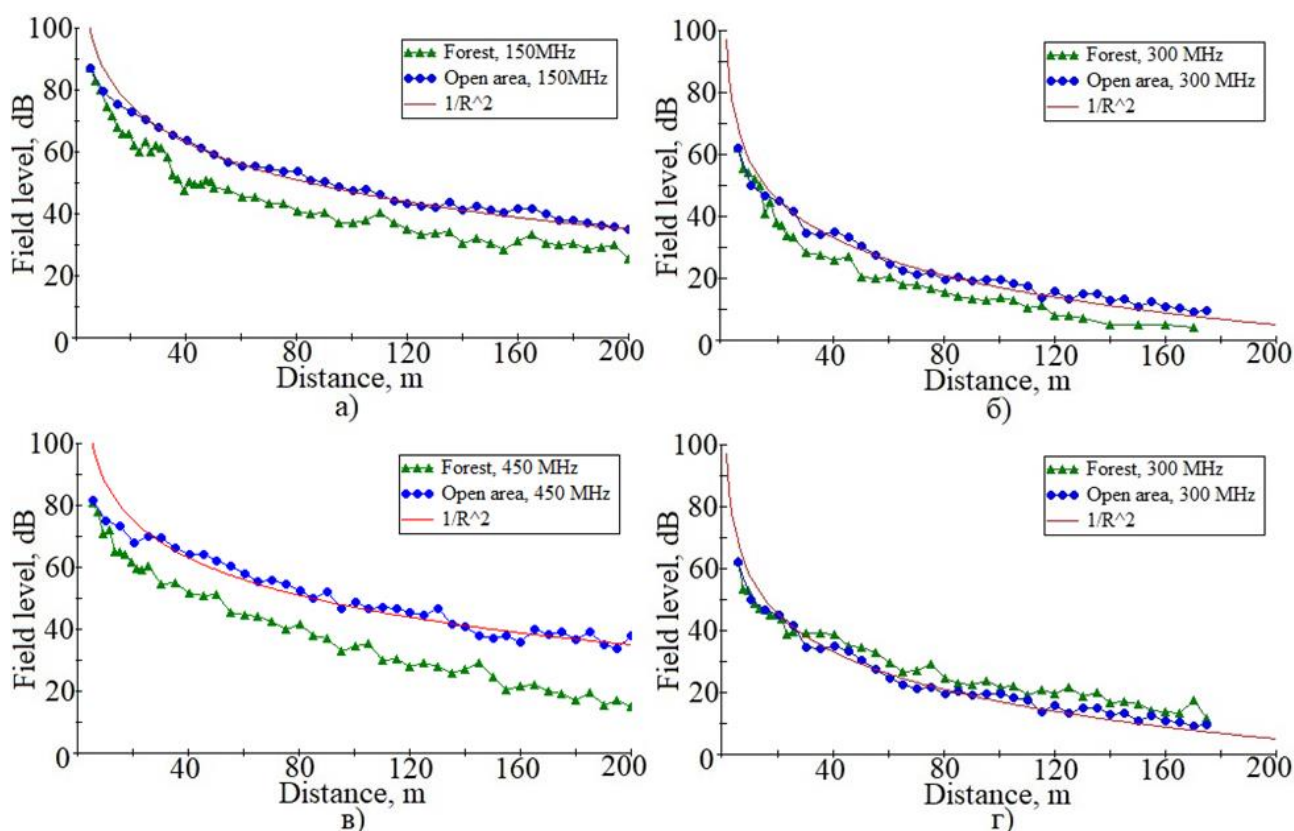


Рис. 1. Сопоставление дистанционного поведения поля в лесной среде и вблизи ровной земной поверхности. а) 150 МГц, б) 300 МГц, в) 450 МГц, г) дистанционное поведение поля в лесу на одной из трех рассматривавшихся трасс распространения на частоте 300 МГц. Данные по лесу представляют собой результат усреднения массива из 21 результата на каждой дистанционной отметке.

Это можно трактовать как результат проявления боковых волн.

Известно [11], что боковая волна, распространяющаяся вблизи границы раздела сред с разными показателями преломления, имеет характер дистанционного поведения аналогичный поведению поля над гладкой однородной земной поверхностью, а именно, ее амплитуда убывает обратно пропорционально квадрату расстояния, пройденного волной вдоль границы. Расхождение результатов, полученных в лесу и на открытой местности, на начальном участке анализируемой зависимости объясняется экспоненциальным затуханием поля в растительности на начальных и конечных участках траектории распространения волн в лесной среде, определяемых механизмом боковой волны [12].

На частоте 300 МГц (рис. 1б) изменения уровня поля при погружении в лесную среду также могут интерпретироваться подобным образом, с той разницей, что относительная величина ослабления по сравнению с полем на открытой местности оказывается несколько меньше. Это может быть связано с тем, что при использовавшейся вертикальной поляризации излучения и преимущественно вертикальной ориентации стволов деревьев процессы поглощения и рассеяния волн в лесу происходят наиболее интенсивно в низкочастотной части рассматривавшегося диапазона. Кроме того, в ходе проведения измерений выявилась возможность аномального прохождения излучения через лес, наблюдавшаяся на одной из выбранных трасс распространения (рис. 1г) и оказавшая влияние на результаты на рис. 1б. В этом случае ослабление поля в лесу было меньше, чем на открытой местности, что, по-видимому, объясняется конструктивным характером интерференционных эффектов при малом пространственном разноразмерности антенн. Ранее на такую возможность указывалось в [13]. Однако в целом можно утверждать, что и на данной частоте, начиная с некоторых дистанций (90-100 м), ослабление поля в лесу остается постоянным по сравнению с полем над земной поверхностью.

Иная картина наблюдается при дальнейшем увеличении частоты (рис. 1в). На 450 МГц дистанционные зависимости поля в лесу и на открытой местности

имеют расходящийся характер. Это, наряду с линейным поведением первой из них, представленной в полулогарифмическом масштабе, говорит об отсутствии в этом случае локализации излучения в форме боковой волны и прямом прохождении излучения через растительность, сопровождающуюся затуханием из-за процессов рассеяния и поглощения.

Резюмируя сказанное, можно отметить, что представленные результаты указывают на то, что анализ распространения волн рассматриваемого в работе диапазона через лесную среду, связанного с формированием боковых волн, не имеет смысла вести в терминах погонного ослабления излучения или путем установления связи между ослаблением поля и глубиной погружения излучения в лесную среду. Для корректного описания ослабляющего действия лесной растительности на дистанциях свыше ста метров достаточно ввести определяемую теоретически или экспериментально аддитивную компоненту в функциональную зависимость поля над гладкой земной поверхностью.

Более того, вопреки распространенному мнению, лес любой структуры и любого видового состава в указанном диапазоне частот не вызывает существенного дополнительного ослабления волн по сравнению с распространением на открытой местности. Причиной данного эффекта является разрушение однолучевого характера электромагнитной волны, отраженной от земли, которая является основным фактором ослабления излучения вблизи гладкой земной поверхности, из-за наличия большого числа рассеивающих элементов, в роли которых выступают стволы и ветви деревьев. Таким образом, являясь, с одной стороны, причиной ослабления поля, с другой – элементы растительности минимизируют влияние земной поверхности на распространения волн. На больших же дистанциях поведение поля в лесу и вблизи земли совпадает из-за одинаковых функциональных зависимостей от расстояния: в лесу – из-за дифракционного характера боковой волны, на открытой местности – из-за противофазности волны, отраженной от земли, по отношению к волнам, непосредственно распространяющимся между антеннами.

Заключение

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что в низкочастотной части УКВ диапазона лесная растительность не вызывает монотонно нарастающего с расстоянием дополнительного ослабления сигнала. Выявлен эффект стабилизации разности уровней поля в лесу и над открытой местностью, обусловленный переходом к механизму распространения боковой волны вдоль верхней кромки лесной растительности. Показано, что на более высоких частотах характер распространения меняется, и ослабление сигнала в лесу возрастает пропорционально пройденному расстоянию. Полученные результаты позволяют уточнить существующие модели распространения радиоволн в лесных массивах и могут быть использованы при проектировании систем связи в условиях пересеченной и покрытой лесом местности.

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания ИФМ СО РАН № FWSF-2024-0008

Литература

1. Sullivan A. Modeling targets in a forest at VHF and UHF frequencies // Proceedings of SPIE. – 2002. – Vol. 4744. – P. 19–29. [https://doi.org/ 10.1117/12.488290](https://doi.org/10.1117/12.488290)
2. Yuewei M., Wenbin L., Dongtao H., Yuan H., Qingsong L., Xiaopeng B., Daochun X. Wireless Wave Attenuation in Forests: An Overview of Models // Forests. – 2024. – Vol. 15. – No. 9. – P. 1587. <https://doi.org/10.3390/f15091587>
3. Olasupo T.O., Otero C.E. Empirical Path Loss Models for Wireless Sensor Network Deployment in Suburban and Rural Environments // IEEE Sensors Journal. – 2022. – Vol. 22. – No. 12. – P. 12182–12192. <https://doi.org/10.1109/TAP.2016.2583507>
4. Tang X., Liu P., Lin P., Jiang Y., Lin Y.-H. An empirical model for predicting wave attenuation inside vegetation domain // Ocean Engineering. – 2022. – Vol. 257. – No. 3. – P. 111636. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111636>

5. Mikhailov M.S., Malevich¹ E.S., Permyakov V.A. Modeling of Radio-wave Propagation in Forest by the Method of Parabolic Equation // International Journal of Engineering & Technology. – 2018. – Vol. 7. – P. 111-113. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i2.23.11895>
6. Azevedo J.A.R., Santos F.E.S. An Empirical Propagation Model for Forest Environments at Tree Trunk Level // IEEE Trans. Antennas and Propagation. – 2011. – Vol. 59. – No. 6. – P. 2357-2367. <https://doi.org/10.1109/TAP.2011.2143664>
7. Hejselbæk J., Nielsen J.O., Fan W., Pedersen G.F. Empirical Study of Near Ground Propagation in Forest Terrain for Internet-of-Things Type Device-to-Device Communication // IEEE Access. – 2018. – Vol. 6. – P. 54052 – 54063. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2871368>
8. Meng Y.S., Lee Y.H., Ng B.C. Empirical near ground path loss modeling in a forest at VHF and UHF bands // IEEE Trans. Antennas and Propagation. – 2009. – Vol. 57, No. 5. – P. 1461-1468. <https://doi.org/10.1109/TAP.2009.2016703>
9. Tamir T. On radiowave propagation in forest environments // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1967. – Vol. 15. – No. 6. – P. 806-817. <https://doi.org/10.1109/TAP.1967.1139054>
10. Ветлужский А.Ю., Калашников В.П. Экспериментальное изучение условий формирования боковых волн в лесных покровах // ЖТФ. – 2013. – Т. 83. – № 4. – С. 99-104. <https://doi.org/10.1134/S1063784213040269>
11. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. – М.: Изд-во АН СССР, 1957. – 502 с.
12. Ветлужский А.Ю. Локализация электромагнитных волн в регулярных и случайных дискретных средах. – М.: Техносфера, 2025. – 283 с.
13. Атутов Е.Б., Дагуров П.Н., Ломухин Ю.Л. Ослабляющие свойства лесного покрова / Труды III Всероссийской конференции «Радиолокация и радиосвязь». – Москва, 2009. – С. 536–540.

Для цитирования:

Ветлужский А.Ю. Влияние лесных массивов на приземное распространение волн низкочастотной части ультракоротковолнового диапазона. // Журнал радиоэлектроники. – 2026. – №. 6. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.6.8>