

# Оценка использования рекомендаций ITU на лесных территориях при распространении сигнала GSM

С. Бурков, Д. Вегера, В. Власов, Г. Жиба

**Аннотация**—Создание современной инфраструктуры передачи голоса на сложных по рельефу загородных трассах, отдаленных и труднодоступных населённых пунктов, является одной из важнейших проблем. Затухание сигнала за счет лесных массивов является важным фактором при проектировании новых базовых станций. Это связано с существенным влиянием лесной растительности на параметры электромагнитных излучений практически любых диапазонов.

Для определения влияния леса на прохождение сигнала существует множество методик. Каждая имеет свои достоинства и недостатки, которые способствуют определению затухания сигнала в условиях леса. Высокой репутацией пользуются и применяются во всем мире рекомендации разработанные Международным союзом электросвязи. Поэтому на примере уже существующих объектах связи рассматриваются методики расчета затухания и дальности распространения радиосигнала для технологии GSM с учетом лесных массивов, сравниваются с фактическими показателями и оценивается актуальность использования выбранных рекомендаций. Дается краткое описание методики проведения экспериментов и используемых методов. Представлены результаты моделирования затухания и дальности распространения радиосигнала в зависимости от типа леса. Предложенные методы, модели и технические решения позволяют учесть распространение радиоволн еще на этапе проектирования радиосистем и устройств связи для практической реализации современной инфраструктуры передачи голоса и данных на сложных по рельефу загородных трассах, отдаленных и труднодоступных населённых пунктов. Для решения поставленных задач используются методы математического моделирования, вычислительной математики, системного анализа, методы программирования и натурного экспериментального исследования.

**Ключевые слова**—GSM, метод параболического уравнения, формула Введенского, распространение радиоволн, ITU-R, ITU-R MA, LITU-R.

Статья получена 30.03.2022.

Сергей Михайлович Бурков, доктор технических наук, Кафедра Вычислительной техники, Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск, Россия (e-mail: burkovsm@khhb.ru)

Денис Владимирович Вегера, Кафедра Вычислительной техники, Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск, Россия (e-mail: vege79@mail.ru).

Владимир Николаевич Власов, Кафедра Вычислительной техники, Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск, Россия (e-mail: rz0cq@mail.ru).

Григорий Вячеславович Жиба, ФГУП ГРЦ в ДВФО, г. Хабаровск, Россия (e-mail: grisha2160@mail.ru).

## I. ВВЕДЕНИЕ

Для правильной оценки зоны покрытия при строительстве новых базовых станций необходимо учитывать ослабление сигнала за счет лесных массивов. Лес является существенным фактором, влияющим на качество обслуживания абонентов и радиус покрытия. К сожалению, не существует идеального решения, способного определить затухание сигнала в любых условиях. Поэтому на сегодняшний день появилось большое количество методов прогнозирования распространения сигнала для различных условий. Базовая основа, помогающая определить характеристики растительности и прогнозированию распространения сигнала с помощью моделей затухания сигнала содержится в рекомендации P.833-8, разработанной Международным союзом электросвязи (International Telecommunication Union-ITU).

В данной статье проводится комплекс теоретических и практических расчетов распространения сигнала в условиях леса для стандарта GSM в диапазоне 900 и 1800 МГц на сложной по рельефу загородной трассе в Хабаровском крае. На построенных объектах связи рассматриваются методики расчета затухания и дальности распространения сигнала, изучается влияние типа леса, а также оцениваются результаты, полученные с помощью моделей по рекомендации ITU. На основе полученных результатов, производится выбор методики, ближе всего совпадающей с экспериментальными данными. Для оценивания параметров используется метод имитационного моделирования. В качестве среды разработки имитационной модели выбран программный пакет Matlab.

## II. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В качестве среды разработки имитационной модели выбран программный пакет Matlab [1-4]. Разработанная программа позволяет выбрать модель распространения радиоволн и по заданным параметрам вычислить затухание и дальность распространения радиосигнала [5]. Исходя из сложности трассы, рассматриваются следующие методы: метод параболического уравнения (МПУ) [6-11], метод Попова (МП) [12-13], и метод Введенского (МВ) [14]. По рекомендации ITU выбраны следующие модели: модель с превышением листы (International Telecommunication Union Recommendations

– ITU-R) модель максимального затухания (Maximum Attenuation International Telecommunication Union – ITU-R MA), и с учетом боковой волны (Lateral International Telecommunication Union- LITU-R) [15].

В качестве источника сигнала используется антенны фирмы Kathrein. Организован канал связи с применением малой земной станции спутниковой связи (МЗССС) [16], а предоставления услуг связи обеспечено стандартной базовой станцией (БС) сотовой связи. Эффективность методов оценивается по фактическому покрытию GSM. Схема организации связи представлена на рис. 1.

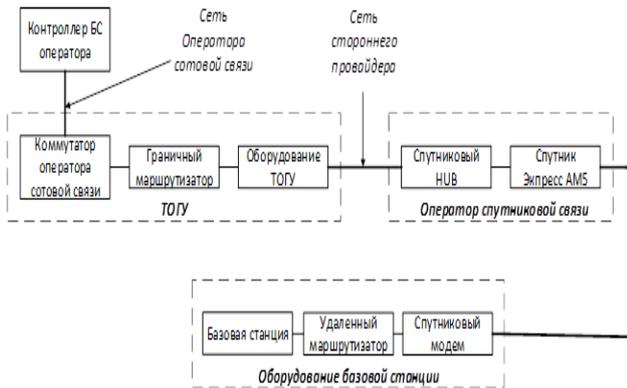


Рис.1. Интерфейс разработанной программы

Согласно данному проекту, Тихоокеанский государственный университет (ТОГУ) является связующим звеном, соединяющим сети операторов сотовой и спутниковой связи. Электроснабжение обеспечивается по схеме альтернативной энергетики [17-18]. Для измерений выбраны 3 географических участка на сложной по рельефу загородной трассе Лидога-Ванино Хабаровского края с разным типом леса. Расположение точек измерения и рельеф местности показано на рис. 2.

Измерения проводились летом 2021 года, в движении, для выяснения стабильности сигнала и в конкретных точках на внушительном отдалении от БС. Лес лиственный, хвойный и смешанный. Расстояние мест контрольных измерений было выбрано таким образом, чтобы измерительный комплекс находился в зоне излучения антенны. В состав измерительного оборудования входили: измерительный комплекс для анализа радиопокрытия; для мониторинга и контроля работы использовался персональный компьютер со специальным программным обеспечением. Для тестирования работы использовались 4 сотовых телефона фирмы Huawei, LG, Samsung и Apple.

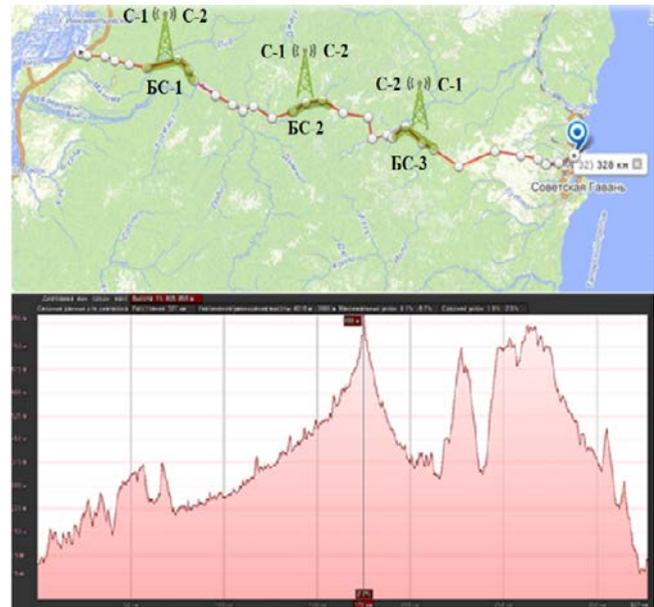


Рис. 2. Профиль трассы с указанием рельефа местности и точечным расположением БС

Для анализа полученных результатов в табл.1 представлены значения уровня сигнала, которые предложено считать соответствующими очень плохому, плохому, хорошему и очень хорошему качеству сигнала.

Таблица 1 – Значения уровня сигнала

Качество сигнала	Значение уровня сигнала, дБм
Очень хороший	$\geq -80$
Хороший	-80 до -90
Плохой	-90 до -100
Очень плохой	$\leq -100$

### III. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Рекомендации ITU широко используются, так как позволяют облегчить взаимодействие между сетями связи и помогают провайдерам предоставлять услуги по всему миру. Основная цель ITU – обеспечение связью и доступом к информации для каждого человека.

Рекомендация ITU P.833-8 содержит модели, позволяющие рассчитывать затухание сигналов, проходящих через лесные массивы, которые применяются к различным типам леса и геометрическим формам трасс. Рекомендация содержит также измеренные данные по динамике замираний в растительности и характеристикам разброса задержки в распространении сигнала.

Модель максимального затухания основана на эмпирической математической модели и позволяет определить затухание сигнала для диапазона частот 30 МГц - 30 ГГц. Затухание сигнала определяется по следующей формуле:

$$L_{ITU-R(MA)} = L_m \left( 1 - e^{\frac{-Rd_f}{L_m}} \right), \quad (1)$$

где  $L_m$  – максимальное затухание в дБ,  $R$  – начальный

наклон кривой затухания, а  $d_f$  – расстояние распространения с учетом деревьев в метрах.

Модель затухания сигнала с превышением листы основана на эмпирической математической модели и позволяет определить затухание сигнала для диапазона частот 300 МГц - 3 ГГц.

$$L_{ITU-R} = 0,2 f^{0,3} d_f^{0,6} \quad (2)$$

где  $f$  – частота в МГц,  $d$  – расстояние в метрах. Модель с учетом боковой волны основана на эмпирической математической модели и позволяет учитывать потерю сигнала через лес с учетом распространения боковой волны, которая применяется для больших расстояний. Затухание сигнала определяется по следующей формуле

$$L_{LITU-R} = 0,48 f^{0,43} (d_f)^{0,13} \quad (3)$$

Расстояние  $d_f$  в уравнениях (1)-(3) вычисляется с помощью уравнения:

$$d_f = \frac{H - Z}{Z_0 - Z} \sqrt{d^2 + (Z_0 - Z)^2} \quad (4)$$

где  $H$  – средняя высота дерева в лесу,  $d$  – расстояние между передатчиком и приемником,  $Z_0$  – высота антенны передатчика,  $Z$  – высота приемной антенны в метрах.

Лесная среда является одним из основных факторов, затрудняющих прохождение радиоволн практически во всех диапазонах частот [19-24]. Для моделирования лес представляется в виде слоистой структуры, с учетом рельефа и воздуха. Средняя высота дерева составляет до 25 метров, а зеленая часть деревьев находится в пределах от 1 до 23 метров от земной поверхности. Почвенный слой считается однородным и равномерным, но с небольшим уровнем рельефа. На рис. 3 представлена трехслойная модель леса.

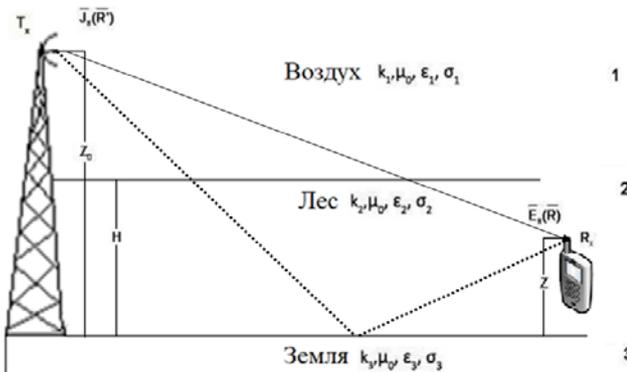


Рис. 3. Трехслойная модель распространения сигнала

Слой воздуха имеет постоянная распространения  $k_1$ , магнитная проницаемость  $\mu_0$ , диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_1 = \epsilon_0$  и проводимость  $\sigma_1$ . Слой леса имеет постоянную распространения  $k_2$ , магнитную

проницаемость  $\mu_0$ , диэлектрическую проницаемость  $\epsilon_2$  и проводимость  $\sigma_2$ . Слой земля, обладает небольшим разбросом по высоте от 0 до 1 метра – с постоянным распространением  $k_3$ , магнитная проницаемость  $\mu_0$ , диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_3$  и проводимость  $\sigma_3$ .

Затухания сигнала между передающей и приемной антенной определяются следующим образом:

$$L_p = 10 \log\left(\frac{P_r}{P_t}\right) \quad (5)$$

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r}{L L_t L_r} \quad (6)$$

После объединения уравнения (5) и (6) получается:

$$L_p = 10 \log\left(\frac{G_t G_r}{L L_t L_r}\right) \quad (7)$$

где  $G_t, G_r$  – передающая и приемная антенны,  $L_t, L_r$  – затухание передающей и приемной антенны,  $L$  – затухание на распространение.

При распространении сигнала с учетом земли, в точке приема принимаются прямой и отраженный от земли сигнал.

Затухание от плоской модели земли составляет.

$$L_E = -40 \log(d) + 20 \log(Z_0) + 20 \log(Z) \quad (8)$$

где  $d$  – расстояние между передатчиком и приемником,  $Z_0$  – высота антенны передатчика, а  $Z$  – высота антенны приемника.

Затухание при распространении в свободном пространстве равны

$$L_F = -32,44 - 20 \log(d) - 20 \log(f) \quad (9)$$

где  $f$  – частота в МГц,  $d$  – расстояние в километрах

#### IV. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для сравнения точности различных моделей используется формула среднеквадратичной погрешности (Root mean square error – RMSE)

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(L_{mi} - L_{pi})^2}{N - 1}} \quad (10)$$

где  $L_{mi}, L_{pi}$  – измеренные и прогнозируемые значения потерь пути в точке  $i$  соответственно,  $N$  – количество точек данных [25-26].

Общий график затухания сигнала GSM-900 с учетом лиственного леса показаны на рис. 4, а результаты моделирования и экспериментальных данных показано на рис. 5.

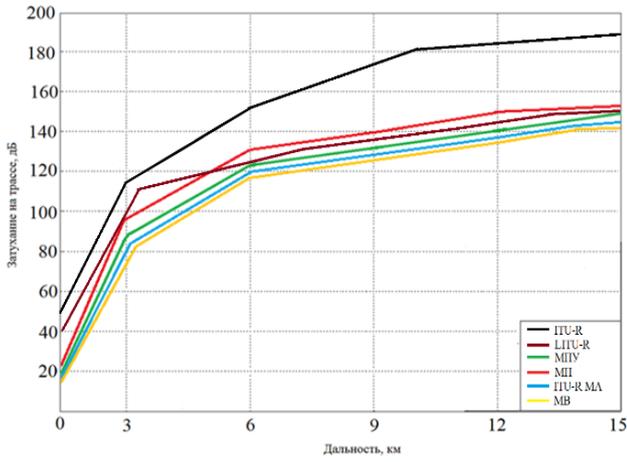


Рис. 4. Общий график затухания сигнала GSM-900 с учетом лиственного леса

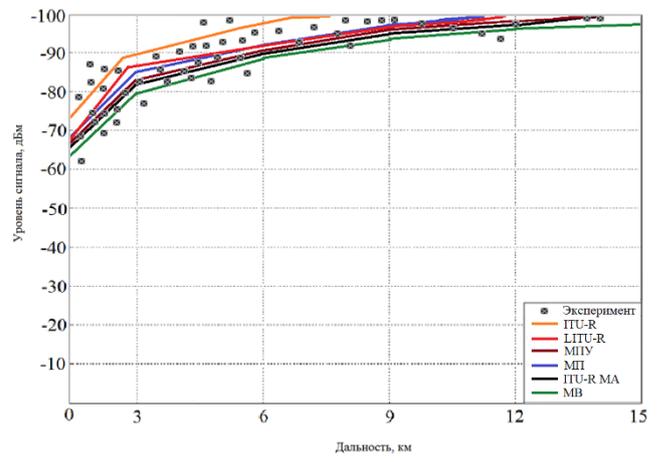


Рис. 7. Результаты моделирования и экспериментальных данных сигнала GSM-900 с учетом хвойного леса

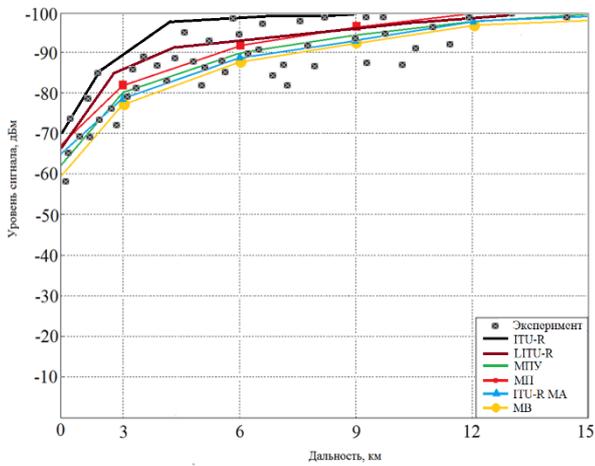


Рис. 5. Результаты моделирования и экспериментальных данных сигнала GSM-900 с учетом лиственного леса

Общий график затухания сигнала GSM-900 с учетом хвойного леса показаны на рис. 6, а результаты моделирования и экспериментальных данных показано на рис. 7.

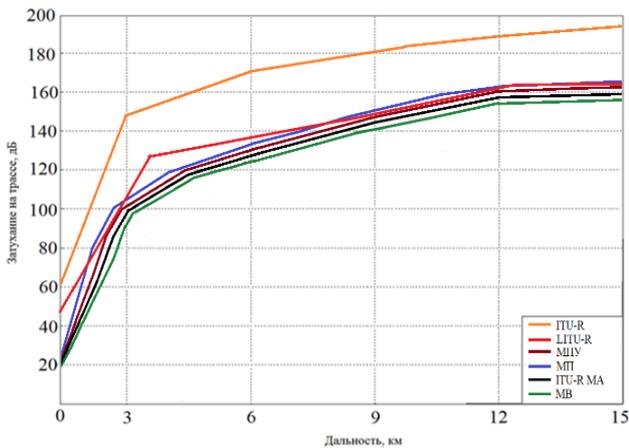


Рис. 6. Общий график затухания сигнала GSM-900 с учетом хвойного леса

Общий график затухания сигнала GSM-1800 с учетом смешанного леса показаны на рис. 8, а результаты моделирования и экспериментальных данных показано на рис. 9.

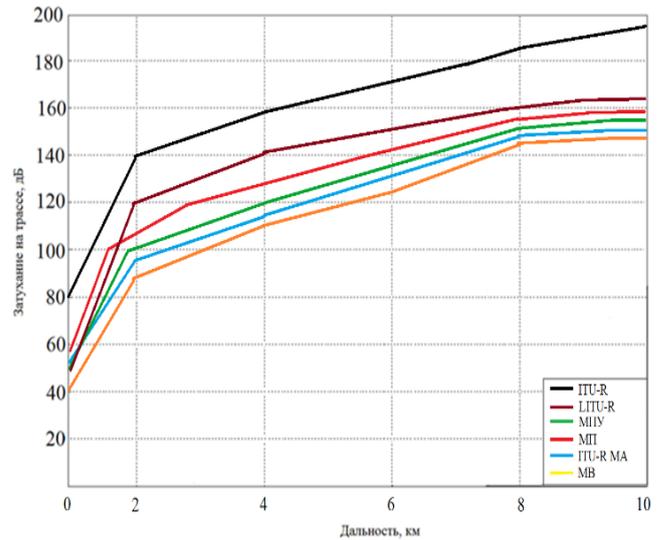


Рис. 8. Общий график затухания сигнала GSM-1800 с учетом смешанного леса

Таблица 2 – Дальность распространения сигнала в зависимости от выбранной модели и леса для GSM-900

Модель	Вид леса	
	Лиственный, дБм	Хвойный, дБм
ITU-R	9	7,8
ITU-R MA	15	14
LITU-R	13	11,8
МВ	>15	>15
МП	12	11,4
МПУ	15	13,6

Таблица 3 – Дальность распространения сигнала в зависимости от выбранной модели и леса для GSM-900

Модель	Вид леса
	Смешанный, дБм
ITU-R	6,8
ITU-R MA	9
LITU-R	8,3
МВ	>10
МП	8,4
МПУ	10

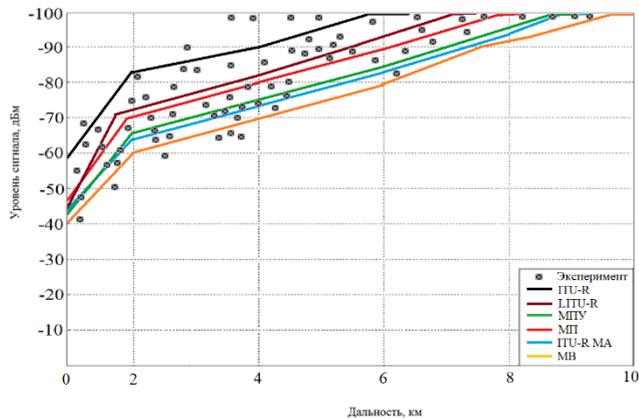


Рис. 9. Результаты моделирования и экспериментальных данных сигнала GSM-1800 с учетом смешанного леса

На основе полученных данных видно, что в различных типах лесной растительности можно получить разные результаты затухания и дальность распространения сигнала GSM. В условиях лиственного леса модель Введенского прогнозирует хороший уровень сигнала до 7 км и с возможным пропаданием более 15 км, для хвойного леса сигнал будет распространяться более 15 км, а для смешанного леса более 10 км. В условиях лиственного леса модель Попова прогнозирует хороший уровень сигнала до 5,7 км и с возможным пропаданием до 12 км, для хвойного леса сигнал будет распространяться до 11,4 км, а для смешанного леса до 8,4 км. В условиях лиственного леса модель максимального затухания прогнозирует хороший уровень сигнала до 6,8 км и с возможным пропаданием до 15 км, для хвойного леса сигнал будет распространяться до 14 км, а для смешанного леса до 9 км. В условиях лиственного леса модель с превышением листвы прогнозирует хороший уровень сигнала до 3 км и с возможным пропаданием до 9 км, для хвойного леса сигнал будет распространяться до 7,8 км, а для смешанного леса до 6,8 км. В условиях лиственного леса модель с учетом боковой волны прогнозирует хороший уровень сигнала до 9 км и с возможным пропаданием до 13 км, для хвойного леса сигнал будет распространяться до 11,8 км, а для смешанного леса до 8,3 км. В условиях лиственного леса МПУ прогнозирует хороший уровень сигнала до 6 км и с возможным пропаданием до 15 км, для хвойного леса сигнал будет распространяться до 13,6 км, а для смешанного леса до 10 км. Для удобного восприятия данные по GSM-900 в зависимости от леса сведены в таблицу 2, а данные по GSM-1800 в зависимости от типа в таблицу 3.

В таблице 4 представлена RMSE в зависимости от

выбранной модели и леса для GSM-900, а в таблице 5 для GSM-1800.

Таблица 4 – RMSE в зависимости от выбранной модели и леса для GSM-900

Модель	Вид леса	
	Лиственный, дБ	Хвойный, дБ
ITU-R	55,28	54,01
ITU-R MA	5,68	5,72
LITU-R	8,2	8,8
МВ	32	38
МП	12,84	13,5
МПУ	6,02	5,84

Таблица 5 – RMSE в зависимости от выбранной модели и леса для GSM-1800

Модель	Вид леса
	Смешанный, дБ
ITU-R	48,2
ITU-R MA	5,62
LITU-R	8,4
МВ	35
МП	12,9
МПУ	5,78

Выбор подходящей модели для расчетов необходимого участка местности, при различных условиях леса и диапазоне частот технологии GSM, зависит от достоверности предоставляемых данных и сложности в реализации. Эти критерии влияют на скорость проводимых расчетов, а также актуальность полученной информации. Основываясь на полученных в результате экспериментальных исследований данных на реальном участке автодороги Лидога-Ванино в Хабаровском крае, а также сложности в реализации для расчета дальности распространения радиосигнала GSM рекомендуются к использованию модель параболического уравнения, а из рекомендации ITU P.833-8 модель с максимальным затуханием.

## V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведен анализ распространения радиоволн на сложной по рельефу автомобильной трассе Лидога-Ванино Хабаровского края с учетом лесных массивов разного типа. Показаны результаты расчета дальности связи в зависимости от типа леса. Анализ полученных результатов показывает, что наибольшее влияние на распространение сигнала оказывает хвойный лес, а наименьшее лиственный. Это связано с разной структурой и высотой лесных массивов, а также количеству рассеивающих элементов. Рассмотренные по рекомендации ITU модели показывают, что значения, полученные моделью с превышением листвы и с учетом боковой волны, значительно отклоняются от измеренных данных. Это указывает на то, что данные модели затухания не подходит для прогнозирования распространения сигнала GSM на территории

Хабаровского края. Основываясь на практических показаниях покрытия GSM, полученных в результате экспериментальных исследований леса, а также от сложности в реализации, для дальнейшего выбора места расположения БС рекомендуется использовать модель с максимальным затуханием и метод параболического уравнения.

Предложенные методы, модели и технические решения позволяют учесть распространение радиоволн еще на этапе проектирования радиосистем и устройств связи для практической реализации современной инфраструктуры передачи голоса и данных на сложных по рельефу загородных трассах. Полученные результаты могут быть полезны инженерам и планировщикам телекоммуникационных систем для принятия решений о размещении новых базовых станций в условиях лесных массивов для технологии GSM.

#### БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Мельников Ю.Н. Достоверность информации в сложных системах. Книга. М.: Сов. радио, 1973. - стр. 192
- [2] Мидлтон Д. Введение в статистическую теорию связи: Пер. с англ./ Под ред. Б.Р. Левина. Т.1. М.: Сов. радио. 1961. 782 с.
- [3] Пирс У. Построение надежных вычислительных машин – М. Мир, 1968 г.
- [4] Шастова, Г.А. Кодирование и помехоустойчивость передачи телемеханической информации / Г.А. Шастова. — М. : Энергия, 1966.
- [5] Вегера, Д. В. Оценка распространения GSM сигнала на трассе со сложным рельефом и хвойным лесом / Д. В. Вегера, Г. В. Жиба, В. П. Писаренко // International Journal of Open Information Technologies. – 2021. – Т. 9. – № 10. – С. 52-61.
- [6] Михайлов М.С., Пермяков В.А., Малевич Е.С. Расчет поля методом параболического уравнения в трехмерном пространстве с препятствиями // Известия высших учебных заведений. Физика, 2016, Т. 59, No.12-3 – с. 144–148.
- [7] Akhilarov V.V. The parabolic equation method in the theory of diffraction // Advances in modern radioelectronics. – 2010. – № 9. – p. 72 – 80.
- [8] Barclay L.W. Propagation of Radio Waves. – London, Institution of Engineering and Technology, 2008. – 460 p.
- [9] Ozgun, O. Recursive two-way parabolic equation approach for modeling terrain effects in tropospheric propagation / O. Ozgun // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. — 2009. — Т. 57, № 9. — С. 2706.
- [10] Permyakov V. A., Mikhailov M. S., Malevich E. S. Calculation of the radar station field in 3D space in the presence of forest and other obstacles by the method of parabolic equation // 2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium – Spring (PIERS), St. Petersburg, Russia, 2017. – Pp. 3754-3757.
- [11] Sazonov D.M. The Matrix Theory of Antenna Arrays. –Taganrog: YuFU, 2013, 98 p.
- [12] Попов В.И. Основы сотовой связи стандарта GSM. М.: Эко-Трендз. 2005. – 296 с.
- [13] Попов, В.И. Распространение радиоволн в лесах / В.И. Попов. - М.: Горячая линия -Телеком , 2015. - 392 с.
- [14] Методы расчета покрытия URL:[http://studbooks.net/2364837/tehnika/metody\\_rascheta\\_pokrytiya](http://studbooks.net/2364837/tehnika/metody_rascheta_pokrytiya)
- [15] Рекомендация МСЭ-R P.833-8. Ослабление сигналов растительностью. 2013. 13 с.
- [16] Вегера Д. В., Власов В. Н., Писаренко В. П., Терещенко В. Д. Особенности организации спутниковых каналов связи в Ku и Ka диапазонах на примере ИСЗ Экспресс-AM5 // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и Технические Науки. -2018. -№04. -С. 34-37
- [17] Использование альтернативной энергетики в системах энергоснабжения телекоммуникационного оборудования / Д. В. Вегера, В. Н. Власов, В. П. Писаренко, В. Д. Терещенко // Мониторинг. Наука и технологии. – 2018. – № 1(34). – С. 77-81.
- [18] Vegera, D. V. Possibility of using alternative electric power industry for power supply of autonomous infocommunication complexes / D. V. Vegera, G. V. Zhiba, V. P. Pisarenko // Journal of Physics: Conference Series, Vladivostok, 07–08 октября 2021 года. – Vladivostok, 2021. – P. 012055. – DOI 10.1088/1742-6596/2096/1/012055.
- [19] T.Tamir, On radio wave propagation in forest environments. IEEE Tr. AP, vol. AP-15, No. 6, pp. 806-817, Nov. 1967
- [20] D. Dence, T.Tamir. Radio loss of lateral waves in forest environments. Radio Sci. Vol.4, No.4, pp. 307-318, April 1969.
- [21] T. Tamir, Radio wave propagation along mixed paths in forest environments. IEEE Tr. AP, vol. AP-25, No. 4, pp. 471-477, July 1977.
- [22] Y.S.Meng, Y.H. Lee, B.C. Ng. Study of propagation loss prediction in forest environment. PIER B, vol.17, 117-133, 2009.
- [23] Li L.W., Yeo T.S., Kooi P.S., Leong M.S. Radio wave propagation along mixed paths through a four – layered model of rain forest: an analytical approach./ IEEE Trans. Antennas and Propagat., Vol. 46, No. 7, 1098-1111, 1998.
- [24] Koh J.H., Li L.W., Kooi P.S., Yeo T.S., Leong M.S. Dominant lateral waves in canopy layer of a four – layered forest. /Radio Sci., Vol. 34, No.3, 681—691, 1999.
- [25] Чернов Л.А. Волны в случайно-неоднородных средах. – М.: Наука, 1977. – 172 с.
- [26] Sevgi L., Uluisik C., Akleman F. A MATLAB-based two-dimensional parabolic equation radiowave propagation package. – IEEE Antennas and Propagation magazine, 2005, vol. 47, no.4, pp.164-175.
- [27] Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. Т.2 М.: Мир, 1981.
- [28] W. C.Y. Lee, “Mobile Cellular Telecommunications”, McGraw Hill, New York, 1995.
- [29] J. Wu and D. Yuan, “Propagation Measurements and Modeling in Jinan City”, IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Boston, MA, USA, Vol. 3, pp. 1157-1159, 8-11 September 1998

# Evaluation of the use of ITU recommendations in forest areas for the propagation of the GSM signal

S. Burkov, D. Vegeera, V. Vlasov, G. Zhiba

**Abstract**— The creation of a modern voice transmission infrastructure on country roads with difficult terrain, remote and hard-to-reach settlements is one of the most important problems. Forest attenuation is an important factor in the design of new base stations. This is due to the significant influence of forest vegetation on the parameters of electromagnetic radiation of almost any range.

There are many techniques to determine the influence of the forest on signal propagation. Each has its own advantages and disadvantages, which contribute to the determination of signal attenuation in forest conditions. Recommendations developed by the International Telecommunication Union enjoy a high reputation and are applied all over the world. Therefore, using the example of already existing communication facilities, methods for calculating the attenuation and propagation range of a radio signal for GSM technology, taking into account forest areas, are compared with actual indicators and the relevance of using the selected recommendations is assessed. A brief description of the methodology for conducting experiments and the methods used is given. The results of modeling the attenuation and propagation range of a radio signal depending on the type of forest are presented. The proposed methods, models and technical solutions make it possible to take into account the propagation of radio waves even at the stage of designing radio systems and communication devices for the practical implementation of a modern voice and data transmission infrastructure on country roads with difficult terrain, remote and hard-to-reach settlements. To solve the tasks set, methods of mathematical modeling, computational mathematics, system analysis, programming methods and full-scale experimental research are used.

**Keywords**—GSM, parabolic equation method, Vvedensky formula, radio wave propagation, ITU-R, ITU-R MA, LITU-R.

## REFERENCES

- [1] Melnikov Yu.N.. Reliability of information in complex systems. Book. M.: Sov. radio, 1973. - p. 192.
- [2] Middleton D. Introduction to Statistical Communication Theory: Trans. from Eng./ edited by B.R. Levina. T.I. M.: Sov. radio. 1961. 782 p.
- [3] Pirs U. Building Reliable Computing Machines – M. World, 1968 y.
- [4] Shastova, G.A. Coding and noise immunity of telemechanical information transmission / G.A. Shastova. — M. : Energy, 1966.
- [5] Vegeera, D. V. Estimation of GSM signal propagation on a route with difficult terrain and coniferous forest / D. V. Vegeera, G. V. Zhiba, V. P. Pisarenko // International Journal of Open Information Technologies. – 2021. – T. 9. – № 10. – P. 52-61.
- [6] Mikhailov M.S., Permyakov V.A., Malevich E.S. Calculation by the method of parabolic equation in three-dimensional space with obstacles // Russian Physics Journal, 2016, Vol. 59, No.12-3 – Pp. 144–148.
- [7] Akhiyarov V.V. The parabolic equation method in the theory of diffraction // Advances in modern radioelectronics. – 2010. – № 9. – p. 72 – 80.
- [8] Barclay L.W. Propagation of Radio Waves. – London, Institution of Engineering and Technology, 2008. – 460 p.
- [9] Ozgun, O. Recursive two-way parabolic equation approach for modeling terrain effects in tropospheric propagation / O. Ozgun // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. — 2009. — T. 57, № 9. — C. 2706.
- [10] Permyakov V. A., Mikhailov M. S., Malevich E. S. Calculation of the radar station field in 3D space in the presence of forest and other obstacles by the method of parabolic equation // 2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium – Spring (PIERS), St. Petersburg, Russia, 2017. – Pp. 3754-3757.
- [11] Sazonov D.M. The Matrix Theory of Antenna Arrays. –Taganrog: YuFU, 2013, 98 p.
- [12] Popov V.I. GSM Cellular Basics. M.: Eco-Trends. 2005. – 296 p.
- [13] Popov, V.I. Propagation of radio waves in forests / V.I. Popov. - M.: Hotline - Telecom, 2015. - 392 p.
- [14] Coverage calculation methods  
URL:[http://studbooks.net/2364837/tehnika/metody\\_rascheta\\_pokrytiya](http://studbooks.net/2364837/tehnika/metody_rascheta_pokrytiya)
- [15] Recommendation ITU-R P.833-8. Attenuation in vegetation. 2013. 13 p.
- [16] Vegeera D. V., Vlasov V. N., Pisarenko V. P., Tereshchenko V. D. Features of the organization of satellite communication channels in the Ku and Ka bands on the example of satellite Express-AM5 // Modern Science: Actual Problems of Theory and Practice. Series: Natural and Technical Sciences. -2018. -№04. -P. 34-37
- [17] Use of alternative energy in power supply systems for telecommunications equipment Vegeera D.V., Vlasov V.N., Pisarenko V.P., Tereshchenko V.D. Science and technology. 2018. № 1 (34). P. 77-81.
- [18] Vegeera, D. V. Possibility of using alternative electric power industry for power supply of autonomous infocommunication complexes / D. V. Vegeera, G. V. Zhiba, V. P. Pisarenko // Journal of Physics: Conference Series, Vladivostok, 07–08 October 2021. – Vladivostok, 2021. – P. 012055. – DOI 10.1088/1742-6596/2096/1/012055.
- [19] Tamir, On radio wave propagation in forest environments. IEEE Tr. AP, vol. AP-15, No. 6, pp. 806-817, Nov. 1967
- [20] D. Dence, T.Tamir. Radio loss of lateral waves in forest environments. Radio Sci. Vol.4, No.4, pp. 307-318, April 1969.
- [21] T. Tamir, Radio wave propagation along mixed paths in forest environments. IEEE Tr. AP, vol. AP-25, No. 4, pp. 471-477, July 1977.
- [22] Y.S.Meng, Y.H. Lee, B.C. Ng. Study of propagation loss prediction in forest environment. PIER B, vol.17, 117-133, 2009.
- [23] Li L.W., Yeo T.S., Kooi P.S., Leong M.S. Radio wave propagation along mixed paths through a four – layered model of rain forest: an analytical approach./ IEEE Trans. Antennas and Propagat., Vol. 46, No. 7, 1098-1111, 1998.
- [24] Koh J.H., Li L.W., Kooi P.S., Yeo T.S., Leong M.S. Dominant lateral waves in canopy layer of a four – layered forest. /Radio Sci., Vol. 34, No.3, 681—691, 1999.
- [25] Chernov L.A. Waves in randomly inhomogeneous media. – M.: The science, 1977. – 172 p.
- [26] Sevgi L., Uluisik C., Akleman F. A MATLAB-based two-dimensional parabolic equation radiowave propagation package. – IEEE Antennas and Propagation magazine, 2005, vol. 47, no.4, pp.164-175.
- [27] Ishimaru A. Wave propagation and scattering in randomly inhomogeneous media. T.2 M.: World, 1981.
- [28] W. C.Y. Lee, “Mobile Cellular Telecommunications”, McGraw Hill, New York, 1995.
- [29] J. Wu and D. Yuan, “Propagation Measurements and Modeling in Jinan City”, IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Boston, MA, USA, Vol. 3, pp. 1157-1159, 8-11 September 1998