

## **СИСТЕМЫ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ И СЕТЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

## **TELECOMMUNICATION SYSTEMS AND NETWORK TECHNOLOGIES**

Научная статья  
УДК 621.391.812.3  
<https://doi.org/10.24143/2072-9502-2024-2-111-119>  
EDN EQYDZI

### **Модели расчета распределения уровня мощности электромагнитного поля в системах подвижной радиосвязи для малых дистанций в летний период**

---

**Олег Николаевич Пищин<sup>✉</sup>, Дмитрий Сергеевич Пузанков**

*Астраханский государственный технический университет,  
Астрахань, Россия, o.pishin@yandex.ru<sup>✉</sup>*

---

**Аннотация.** Обосновано утверждение, что для проектирования систем подвижной радиосвязи на малых дистанциях до 1 000 м основные рекомендованные модели расчета имеют значительную погрешность, т. к. они были созданы для расчетов больших дистанций (как правило, от 1 до 50 км) и имеют ограничения в применении. В связи с тем, что на современном этапе развития систем подвижной радиосвязи в интенсивном исследовании и использовании находятся диапазоны частот не только 900 и 1 800 МГц, но и участки 450–800 МГц, а также от 2 100 до 6 000 МГц, которые ранее для систем сотовой связи не применялись, необходимо предложить дополнительные модели, необходимые для предварительного проектирования систем 3–5 поколений в диапазоне от 2 100 МГц. Дальность распространения радиоволн в диапазонах от 2 100 до 6 000 МГц значительно снижена по сравнению с диапазонами 1 800 или 900 МГц. Применение классических моделей расчета, таких как модели Okumura и COST-231 – Neta на дистанциях менее 1 км отличается значительными погрешностями и не рекомендовано самими авторами моделей к использованию на малых дистанциях. Для решения этой проблемы разработаны новые модели расчета затухания радиосигналов, предназначенные для оценки затухания на малых дистанциях.

**Ключевые слова:** распространение радиоволн, системы сотовой связи, системы подвижной радиосвязи, затухание сигнала, проектирование систем радиосвязи, малые дистанции, натурные испытания, Астраханская область

**Для цитирования:** Пищин О. Н., Пузанков Д. С. Модели расчета распределения уровня мощности электромагнитного поля в системах подвижной радиосвязи для малых дистанций в летний период // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2024. № 2. С. 111–119. <https://doi.org/10.24143/2072-9502-2024-2-111-119>. EDN EQYDZI.

Original article

## Models for calculating the distribution of the electromagnetic field power level in mobile radio communication systems for short distances in summer

Oleg N. Pishchin<sup>✉</sup>, Dmitry S. Puzankov

Astrakhan State Technical University,  
Astrakhan, Russia, o.pishin@yandex.ru<sup>✉</sup>

**Abstract.** The statement is substantiated that for the design of mobile radio communication systems at short distances up to 1 000 m, the main recommended calculation models have a significant error, since they were created for calculations of long distances (as a rule, from 1 to 50 km) and have limitations in application. Due to the fact that at the present stage of development of mobile radio communication systems, the frequency ranges are in intensive research and use not only 900 and 1 800 MHz, but also 450-800 MHz sections, as well as from 2 100 to 6 000 MHz, which were not previously used for cellular communication systems, it is necessary to propose additional models necessary for the preliminary design of 3-5 generation systems in the range from 2 100 MHz. The range of radio waves in the ranges from 2 100 to 6 000 MHz is significantly reduced compared to the ranges of 1 800 or 900 MHz. The use of classical calculation models such as the Okumura and COST-231-Hata models at distances less than 1 km is characterized by significant errors and is not recommended by the authors of the models themselves for use at short distances. To solve this problem, new models have been developed for calculating the attenuation of radio signals designed to estimate attenuation at short distances.

**Keywords:** radio wave propagation, cellular communication systems, mobile radio communication systems, signal attenuation, design of radio communication systems, short distances, field tests, the Astrakhan region

**For citation:** Pishchin O. N., Puzankov D. S. Models for calculating the distribution of the electromagnetic field power level in mobile radio communication systems for short distances in summer. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, computer science and informatics*. 2024;2:111-119. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/2072-9502-2024-2-111-119>. EDN EQYDZI.

### Введение

На современном этапе развития систем подвижной радиосвязи в интенсивном исследовании находятся диапазоны частот, которые ранее не использовались как менее перспективные ввиду отсутствия соответствующих технологий. Для систем радиосвязи это диапазоны от 2 000 до 6 000 МГц включительно, если вести речь о готовящихся к внедрению системах 5-го поколения, а также системах управления беспилотными летательными аппаратами. Этап развития систем сотовой связи от решения однозначной задачи достижения максимальной дальности распространения сигнала значительно расширен, и в настоящее время не менее важны пропускная способность системы и скорость передачи данных. Решение комплексной задачи невозможно без предварительного проектирования самих систем и моделирования трасс распространения радиосигналов. Однако при использовании инновационных технологий, использующих новые виды модуляции, и переходе в высшие участки диапазона радиоволн из-за естественного затухания уровня мощности, которое нарастает с увеличением частоты излучения.

В современных источниках [1–5], рекоменда-

циях [6], используемых при проектировании радиодоступа, имеются существенные ограничения в использовании математических моделей. Так, практически все модели, рекомендованные Международным союзом электросвязи (МСЭ) [6], имеют ограничения в использовании на дистанции менее 1 000 м. На первых этапах развития систем сотовой связи это было, видимо, неактуально, и основной пакет моделей имеет действующую область расчета для дистанций свыше 1 км. Только модель Уолфиша – Икегами для урбанизированного города рекомендована для дистанций менее 1 км, а для других типов местности (открытого пространства, пригорода и др.) модели расчета для дистанций менее 1 км отсутствуют. Имеющиеся актуальные стандарты [7, 8], регулирующие порядок проведения расчетов в системах подвижной радиосвязи, в случае необходимости проведения расчетов в диапазонах выше 2 000 ГГц рекомендуют использовать системы расчета, используемые для радиорелейных линий, что не дает адекватной оценки ситуации для систем широкополосного доступа, работающих широкой диаграммой направленности, в таких системах, как системы сотовой связи. Положения МСЭ при необходимости проектирования на расстояниях менее 1 км

рекомендуют использовать данные приложений, основывающиеся на мощностях передатчиков, равных 1 кВт, что не полностью соответствует используемым передатчикам в системах сотовой связи, ограниченных уровнем максимальной мощности от 20 до 45 Вт.

Проведен анализ ограничений в возможностях основных математических моделей, рекомендованных для проведения расчетов затухания в системах

подвижной радиосвязи (СПР) в научной и учебной литературе [2–5, 9–16]. Результат проведенных исследований минимизирован до основных моделей, рекомендуемых МСЭ для использования и наиболее часто применяемых для оценки результатов распространения электромагнитного поля. Это модели Okumura – Hata, Okumura, Hata, GOST-231 – Hata; результат занесен в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Table 1

**Применимость основных математических моделей для проведения расчетов затухания в СПР для различных частотных диапазонов**

**The applicability of basic mathematical models for calculating attenuation in the MRC for various frequency ranges**

Модель расчета	Рекомендованный диапазон, МГц			
	900	1 800	2 100	2 600
Okumura – Hata	+	–	–	–
COST-231 – Hata	–	+	–	–
Okumura	+	+	–	–
Hata	+	–	–	–

Таблица 2

Table 2

**Применимость моделей в зависимости от расстояния между базовой станцией и абонентским терминалом**

**The applicability of the models depends on the distance between the base station and the subscriber terminal**

Модель расчета	Рекомендованный диапазон, МГц		
	менее 1 км	от 1 до 20 км	более 20 км
Okumura – Hata	–	+	–
COST-231 – Hata	–	+	+
Okumura	–	+	+
Hata	–	+	–

**Постановка задачи**

Исходя из проведенного анализа, в целях повышения точности предварительного проектирования поставлена задача разработки дополнительных моделей для восполнения недостаточности математического аппарата при проведении моделирования распространения радиоволн в СПР.

Необходимо получить модели расчета затухания радиоволн (радиосигнала в системах мобильной связи) в актуальных диапазонах: 1 800 и 2 100 МГц, доступных для проведения измерений в Астраханской области.

Целью исследования является повышение точности проектирования СПР на территории Астраханской области посредством цифровых карт на программно-расчетном комплексе ONEPLAN RPLS-DB [17], который является автоматизированным комплексом планирования и оптимизации

подвижной и фиксированной связи. Этот комплекс позволяет расширить имеющийся в нем математический аппарат путем внедрения в математический пакет новых моделей расчета, адаптированных под местные условия.

**Результаты экспериментальных исследований**

Натурные испытания организованы в трех населенных пунктах (сельская местность) Астраханской области: с. Икрязное, с размещением базовой станции (БС) на ул. Мира, д. 36, в р. п. Ильинка, с размещением БС на ул. Молодежная, д. 7, А, и в р. п. Красные Баррикады, с размещением БС на ул. Электрическая, д. 1. Основным типом местности в этих населенных пунктах является открытое пространство. При проведении измерений использовались точные данные о местах расположения БС, высотах подвеса антенн и азимутов излучения

оператора ПАО МТС. Для проведения процесса контроля уровня затухания в вышеобозначенных населенных пунктах Астраханским филиалом ПАО МТС была выделена система тестирования QualiPoc Freerider III, которая представляет собой высокопроизводительный инструмент для оптимизации, тестирования и контроля качества сетей мобильной связи. Измерительными устройствами являлись абонентский терминал (АТ) Oukitel WP12Pro и Sony XZ2 с установленными приложениями NetMonitor и QualiPoc соответственно, позволяющими контролировать значения уровня принимаемого сигнала в децибелах. Коэффициент усиления антенны АТ – 2 дБ. Программное обеспечение QualiPoc и аналогичные программы (NetMonitor, NetMonster и др.) позволяют контролировать практически все параметры сети сотовой связи, при этом АТ не должен быть специализированным измерительным прибором, это может быть любой смартфон, т. к. АТ с вышеуказанным программным обеспечением становится монитором, отображающим данные с контроллера сети сотовой связи для той местности, в которой он находится на момент проведения мониторинга (контроля).

В системах сотовой связи измерительным устройством является сама БС, которая по служебным каналам постоянно находится на связи с контроллером всей сети, передавая необходимые данные о каждом канале всех трансиверов, используемых в работе БС. Контроллер же, имея связь со всеми остальными БС в сети, имеет возможность сравнивать полученные данные для контроля внутрисистемных помех по основному и соседним

каналам, проведения оптимизации в исследуемом районе других параметров сети, что является критически важным для проведения оптимизации частотного планирования оператора.

Среди контролируемых данных – такие как уровень сигнала на входе АТ от каждого трансивера как ближайшей, так и удаленных БС, что позволяет контролировать уровень интерференции и работать над внутрисистемной электромагнитной совместимостью; причины разрыва соединений; отношение контролируемого (измеряемого) сигнала к помехе по основному и соседнему каналу и др.

Измерения выполнялись дистанцией через 50 м (с шагом 50 м) на расстоянии между БС и АТ от 50 до 1 000 м на высоте 1,5 м. Высоты размещения антенн в разных населенных пунктах варьировали от 17 до 40 м. В каждой точке исследования выполнялось 100 измерений. Для каждой точки, в которой проводились измерения, рассчитывалось математическое ожидание значения (уровня сигнала на входе приемного устройства). Программное обеспечение для мониторинга сети имеет возможность дискретного изменения временного шага измерений при мониторинге. Шаг измерений установлен в 5 с.

Измерения проводились в летний период в солнечную малооблачную погоду, которая является основным типом погоды для Астраханской области в летнее время, при температуре воздуха: +29–32 °С, что также является средней температурой для исследуемой области в сезон. Давление принималось 755 мм рт. ст.

Значения натуральных испытаний уровней электромагнитного поля на входе приемного устройства занесены в табл. 3.

Таблица 3

Table 3

**Погрешность модели Okumura в расчетах уровня сигнала на входе приемника на малых дистанциях по сравнению с данными натурных испытаний**

**The error of the Okumura model in calculating the signal level at the receiver input at short distances compared with the data of field tests**

Расстояние между БС и АТ, м	Измеренный уровень сигнала на входе приемника, дБ	Уровень сигнала на входе приемника, полученный на основе расчета с помощью модели Okumura, дБ	Разница между значениями, дБ	«Погрешность модели Okumura», % (относительная ошибка результирующих значений модели Okumura)
200	120	25	95	79
400	125	41	84	67
600	125	50	75	60
800	111	61	50	44
1 000	109	104	5	5

Согласно плану эксперимента на первом этапе реализован сравнительный анализ результатов рас-

четов, полученных с помощью одной из основных моделей расчета затухания с реальными данными

на расстояниях до 1 000 м и подтверждена актуальность проводимых исследований.

Минимальной погрешностью модель Okumura обладает в зоне действия сигнала 1 км (см. табл. 3), т. е. на больших дистанциях, а на малых дистанциях имеет значительную долю ошибки. Это подтверждает границы адекватности использования модели Okumura и необходимость выбора альтер-

нативного способа расчета уровней приема на входе приемника на малых дистанциях.

В результате исследований были собраны данные (уровень затухания на различных расстояниях в диапазоне от 50 до 1 000 м для частот 2 100 и 1 800 МГц), математические ожидания которых отражены в табл. 4, 5 соответственно.

Таблица 4

Table 4

**Результаты зависимости затухания сигнала сотовой связи от расстояния в диапазоне 2 100 МГц**

**The results of the attenuation dependence on the distance in the 2 100 MHz range**

Показатель	Значение									
	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Расстояние между АТ и БС, м	103	112	115	114	110	108	114	112	116	120
Значения затухания, дБ	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1 000
Расстояние между АТ и БС, м	117	125	122	130	129	125	123	130	133	128
Значения затухания, дБ										

Таблица 5

Table 5

**Результаты зависимости затухания сигнала сотовой связи от расстояния в диапазоне 1 800 МГц**

**The results of the attenuation dependence on the distance in the 1 800 MHz range**

Показатель	Значение									
	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Расстояние между АТ и БС, м	97	110	118	116	115	110	120	129	130	131
Значения затухания, дБ	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1 000
Расстояние между АТ и БС, м	127	135	130	128	131	125	128	129	122	118
Значения затухания, дБ										

Согласно данным (см. табл. 4, 5) в районе 300 м от антенны происходит небольшой всплеск усиления уровня принимаемого сигнала, обусловленный типовой формой диаграммы направленности антенн в системах сотовой связи.

**Построение моделей**

На основе данных табл. 4 и 5 была проведена аппроксимация полученных значений. Аппроксимация проводилась в программе MathCad. Значения математических ожиданий, полученных при проведенном исследовании, объединены в кривую, имеющую логарифмическую зависимость уровня измеренного сигнала на входе приемника от расстояния, коэффициенты подбирались вручную для совпадения логарифмической кривой с математическими ожиданиями значений затухания, усредненные для всех населенных пунктов, участвовавших в исследовании.

Таким образом, получены модели, отражающие новую зависимость уровней сигнала на входе при-

емного устройства от расстояния на малых дистанциях (до 1 000 м). Модели могут быть использованы в расчетах вышеуказанных значений для районов пригородной или открытой (сельской) местности в Астраханской области в диапазоне 2 100 МГц

$$L(f_{2100 \text{ MHz}}) = 20,8 \cdot \log R + 67,8,$$

где  $L$  – затухание сигнала сотовой связи, дБ;  $R$  – дистанция радиосвязи, м, в диапазоне 1 800 МГц

$$L(f_{1800 \text{ MHz}}) = 20,15 \cdot \log R + 66,4$$

в летний период.

**Сравнение новых моделей с существующими**

Проведено сравнение результатов расчетов, полученных с помощью новых моделей, и расчетов, полученных с помощью действующих, классических моделей Okumura и COST-231 – Hata (табл. 6, 7).

Таблица 6

Table 6

**Сравнение моделей, применяемых для проектирования в диапазоне 1 800 МГц**

**Comparison of models used for design in the 1 800 MHz range**

Показатель	Расстояние между БС и АТ, м				
	200	400	600	800	1 000
Затухание, полученное по новой модели для Астраханской области, дБ	112	118	122	124	126
Затухание, полученное по модели COST-231 – Hata, дБ	91	102	108	112	116
Затухание, полученное по модели Okumura, дБ	25	41	50	61	104
Абсолютная разница значений между моделью для Астраханской области и моделью COST-231 – Hata, дБ	21	16	14	12	10
Абсолютная разница значений между моделью для Астраханской области и моделью Okumura, дБ	87	77	72	63	22
Относительная разница значений между формулами модели для Астраханской области и модели COST-231 – Hata, %	18	13	11	9	7
Относительная разница значений между моделью для Астраханской области и моделью Okumura, %	77	65	59	50	17

Таблица 7

Table 7

**Сравнение моделей, применяемых для проектирования в диапазоне 2 100 МГц**

**Comparison of models used for design in the 2 100 MHz range**

Показатель	Расстояние между БС и АТ, м				
	200	400	600	800	1 000
Затухание, полученное по новой модели для Астраханской области, дБ	115	121	125	128	130
Затухание, полученное по модели COST-231 – Hata, дБ	93	104	110	115	118
Абсолютная разница значений между формулами модели для Астраханской области на частоте 2 100 МГц и моделью COST-231 – Hata, дБ	22	17	15	23	12
Относительная разница значений между формулами модели для Астраханской области на частоте 2 100 МГц и моделью COST-231 – Hata, %	19	14	12	17	12

В результате проведенного сравнительного анализа эффективности «новой модели для Астраханской области» расчет, проводимый с помощью новой модели (рис. 1), на 11,5 % точнее определяет затухание сигнала в сельской (открытой) местности Астраханской области, чем модель COST-231 – Hata, и на 53,6 % точнее определяет затухание сигнала в сельской (открытой) местности Астраханской области, чем модель Okumura, для частот в диапазоне 1 800 МГц; для диапазона 2 100 МГц (рис. 2) «новая модель для Астраханской области» на 15 % точнее определяет уровень затухания сигнала в сельской (открытой) местности Астраханской области, чем модель COST-231 – Hata.

На рис. 1 и 2 линия «Модель для Астраханской области» соответствует эталонным значениям, полученным в ходе исследований (натурных испытаний) на территории Астраханской области. Графически наглядно видно, насколько классические модели могут вносить погрешности на малых дистанциях (до 1 000 м).

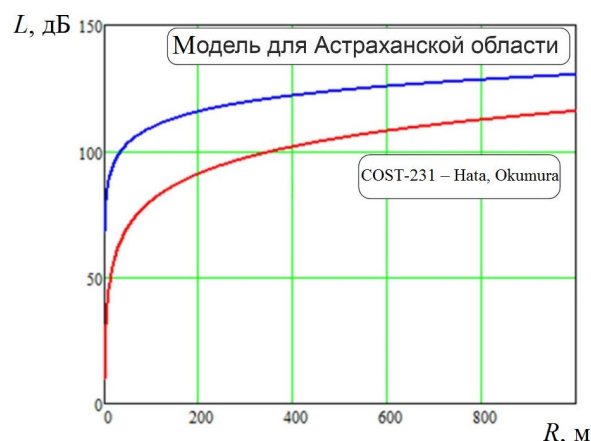


Рис. 1. Графическое сравнение результатов использования новой модели (для Астраханской области) с моделью COST-231 – Hata в диапазоне 1 800 МГц

Fig. 1. Graphical comparison of the results of using the new model (for the Astrakhan region) with the COST-231–Hata model in the 1 800 MHz range

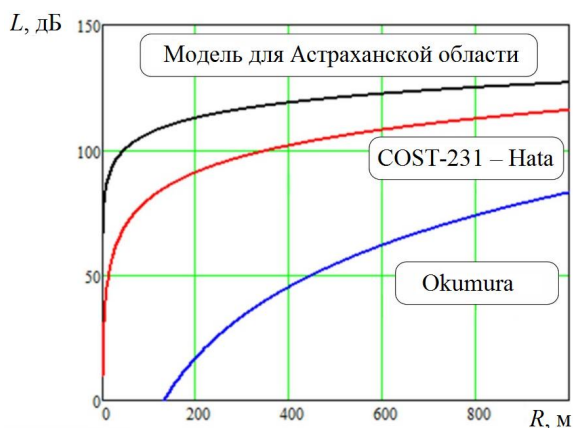


Рис. 2. Графическое сравнение результатов использования новой модели с моделями расчета затухания в диапазоне 2 100 МГц COST-231 – Hata и Okumura

Fig. 2. Graphical comparison of the results of using the new model with the models for calculating attenuation in the 2 100 MHz range COST-231–Hata and Okumura

Поэтому, создавая проекты радиосвязи на малых дистанциях, что сейчас становится все более актуально, необходимо использовать корректирующие (новые) модели расчета. Полученные результаты будут использованы для внедрения в модуль математического аппарата программно-расчетного комплекса ONEPLAN RPLS-DB [17], позволяющего адаптировать математический аппарат под реальные условия функционирования сетей сотовой связи на цифровых картах.

#### Список источников

1. Милютин Е. Р., Василенко Г. О., Сиверс М. А., Волков А. Н., Певцов Н. В. Методы расчета поля в системах связи дециметрового диапазона. СПб.: Триада, 2003. 159 с.
2. Весоловски К. Системы подвижной радиосвязи / под ред. А. И. Ледовского. М.: Горячая линия – Телеком, 2006. 536 с.
3. Попов В. И. Основы сотовой связи стандарта GSM. М.: Эко-Тренз, 2005. 296 с.
4. Пищин О. Н., Пузанков Д. С., Лыдкина К. С. Методика расчета влияния фактора сезонности на распространение радиоволн в южных регионах России вблизи гидросферных объектов в диапазоне ультравысоких частот // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Управление, вычислительная техника и информатика. 2022. № 3. С. 51–60.
5. Дмитриев В. Н., Пищин О. Н. Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства в системах подвижной радиосвязи: учеб. пособие. Астрахань: Изд-во АГТУ, 2022. 156 с.
6. Рекомендация МСЭ-Р Р. 1546-4. Метод прогнозирования для трасс связи «пункта с зоной» для наземных служб в диапазоне частот от 30 МГц до 3000 МГц. Сер.: Р. Распространение радиоволн (10/2009). URL: [https://](https://studylib.ru/doc/2033269/rekomendaciya-mse-r-r-p.1546-4)

7. ГОСТ 55897-2013. Системы подвижной радиосвязи. Зоны обслуживания. Методы расчета. М.: Стандартинформ, 2014. 16 с.
8. ГОСТ Р 53363-2009. Цифровые радиорелейные линии. Показатели качества. Методы расчета. М.: Стандартинформ, 2010. 39 с.
9. Пузанков Д. С., Пищин О. Н. Анализ математических моделей для УВЧ диапазона для современных и перспективных систем мобильной связи // 73-я Междунар. студенч. науч.-техн. конф. (Астрахань, 17–22 апреля 2023 г.): материалы. Астрахань: Изд-во АГТУ, 2023. С. 646–648.
10. Дворников С. В., Балыков А. А., Котов А. А. Упрощенная модель расчета потерь сигнала в радиолинии, полученная путем сравнения квадратичной формулы Введенского с существующими эмпирическими моделями // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 2. С. 87–99. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10204.
11. Мамченко М. В., Зорин В. А., Романова М. А. Эмпирическая модель расчета затухания сигнала с учетом коэффициента застройки местности для беспилот-



ных транспортных средств // Изв. Кабардино-Балкар. науч. центра РАН. 2022. № 1 (105). С. 59–73.

12. Бабков В. Ю. Сотовые системы мобильной радиосвязи. СПб.: БХВ-Петербург, 2013. 432 с.

13. Дворников А. С., Дворников С. В., Котов А. А., Муравцов А. А. Анализ моделей затухания радиосигналов дециметровых волн // Информация и космос. 2018. № 2. С. 6–11. URL: <https://infokosmo.ru/file/article/16629.pdf> (дата обращения: 19.01.2024).

14. Sargsyan E. R., Ryndin A. A. Research into calculation models of radio signals losses in radio access networks // Modeling, Optimization and Information Technology. 2021. V. 9 (4). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1078> (дата обращения: 12.09.2023).

1. Miliutin E. R., Vasilenko G. O., Siviers M. A., Volkov A. N., Pevtsov N. V. *Metody rascheta polia v sistemakh svyazi detsimetrovogo diapazona* [Field calculation methods in decimeter range communication systems]. Saint Petersburg, Triada Publ., 2003. 159 p.

2. Vesolovski K. *Sistemy podvizhnoi radiosvyazi* [Mobile radio communication systems]. Pod redaktsiei A. I. Ledovskogo. Moscow, Goriachaiia liniia – Telekom Publ., 2006. 536 p.

3. Popov V. I. *Osnovy sotovoi svyazi standarta GSM* [Basics of GSM cellular communication]. Moscow, Eko-Trenz Publ., 2005. 296 p.

4. Pishchin O. N., Puzankov D. S., Lydkina K. S. Metodika rascheta vliianiia faktora sezonnosti na rasprostranenie radiovoln v iuzhnykh regionakh Rossii vblizi gidrosfernykh ob"ektov v diapazone ul'travysokikh chastot [A method for calculating the influence of the seasonality factor on the propagation of radio waves in the southern regions of Russia near hydrosphere objects in the ultra-high frequency range]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naia tekhnika i informatika*, 2022, no. 3, pp. 51-60.

5. Dmitriev V. N., Pishchin O. N. *Rasprostranenie radiovoln i antenno-fidernye ustroistva v sistemakh podvizhnoi radiosvyazi: uchebnoe posobie* [Radio wave propagation and antenna-feeder ranges in mobile radio communication systems: a textbook]. Astrakhan', Izd-vo AGTU, 2022. 156 p.

6. *Rekomendatsiia MSE-R R. 1546-4. Metod prognozirovaniia dlia trass svyazi «punkta s zonoii» dlia nazemnykh sluzhb v diapazone chastot ot 30 MGts do 3000 MGts. Seriya P. Rasprostranenie radiovoln (10/2009)* [Recommendation ITU-R R. 1546-4. A forecasting method for “point-to-zone” communication routes for ground services in the frequency range from 30 MHz to 3000 MHz. Series P. Radio wave propagation (10/2009)]. Available at: <https://studylib.ru/doc/2033269/rekomendaciya-mse-r-p.1546-4> (accessed: 10.08.2023).

7. *GOST 55897-2013. Sistemy podvizhnoi radiosvyazi. Zony obsluzhivaniia. Metody rascheta* [ISS 55897-2013. Mobile radio communication systems. Service areas. Calculation methods]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 16 p.

8. *GOST R 53363-2009. Tsifrovye radioreleinye linii. Pokazateli kachestva. Metody rascheta* [ISS R 53363-2009. Digital radio relay lines. Quality indicators. Calculation methods]. Moscow, Standartinform Publ., 2010. 39 p.

9. Puzankov D. S., Pishchin O. N. Analiz matematicheskikh modelei dlia UVCh diapazona dlia sovremennykh

15. Пищин О. Н., Волошин А. А., Буцкая О. Б. Воздействие изменения температуры атмосферы на затухание сигналов сотовой связи // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Управление, вычислительная техника и информатика. 2011. № 2. С. 132–136.

16. Печаткин А. В. Системы мобильной связи: учеб. пособие. Рыбинск: Изд-во РГАТА им. П. А. Соловьева, 2009. Ч. 1: Принципы организации, функционирования и частотного планирования систем мобильной связи. 121 с.

17. Программный комплекс ONEPLAN RPLS-DB планирования и оптимизации подвижной и фиксированной связи (сетевая версия). URL: <https://reestr.digital.gov.ru/reestr/310318/> (дата обращения: 19.09.2023).

## References

i perspektivnykh sistem mobil'noi svyazi [Analysis of mathematical models for the UHF band for modern and promising mobile communication systems]. *73-ia Mezhdunarodnaia studencheskaia nauchno-tekhnicheskaiia konferentsiia (Astrakhan', 17–22 apreliia 2023 g.): materialy*. Astrakhan', Izd-vo AGTU, 2023. Pp. 646-648.

10. Dvornikov S. V., Balykov A. A., Kotov A. A. Upryshchennaia model' rascheta poter' signala v radiolinii, poluchennaia putem sravneniia kvadratichnoi formuly Vvedenskogo s sushchestvuiushchimi empiricheskimi modeliami [A simplified model for calculating signal losses in a radio line obtained by comparing Vvedensky's quadratic formula with existing empirical models]. *Sistemy upravleniia, svyazi i bezopasnosti*, 2019, no. 2, pp. 87-99. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10204.

11. Mamchenko M. V., Zorin V. A., Romanova M. A. Empiricheskaia model' rascheta zatukhaniia signala s uchetchom koefitsienta zastroiki mestnosti dlia bespilotnykh transportnykh sredstv [An empirical model for calculating signal attenuation taking into account the coefficient of terrain development for unmanned vehicles]. *Izvestiia Kabardino-Balkarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2022, no. 1 (105), pp. 59-73.

12. Babkov V. Iu. *Sotovye sistemy mobil'noi radiosvyazi* [Cellular mobile radio communication systems]. Saint Petersburg, BKhV-Peterburg Publ., 2013. 432 p.

13. Dvornikov A. S., Dvornikov S. V., Kotov A. A., Muravtsov A. A. Analiz modelei zatukhaniia radiosignalov detsimetrovykh voln [Analysis of decimeter wave radio signal attenuation models]. *Informatsiia i kosmos*, 2018, no. 2, pp. 6-11. Available at: <https://infokosmo.ru/file/article/16629.pdf> (accessed: 01.19.2024).

14. Sargsyan E. R., Ryndin A. A. Research into calculation models of radio signals losses in radio access networks. *Modeling, Optimization and Information Technology*, 2021, vol. 9 (4). Available at: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1078> (accessed: 12.09.2023).

15. Pishchin O. N., Voloshin A. A., Butskaia O. B. Vozdeistvie izmeneniia temperatury atmosfery na zatukhanie signalov sotovoi svyazi [The effect of changes in atmospheric temperature on the attenuation of cellular signals]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naia tekhnika i informatika*, 2011, no. 2, pp. 132-136.

16. Pechatkin A. V. *Sistemy mobil'noi svyazi: uchebnoe posobie* [Mobile communication systems: a textbook]. Ry-



binsk, Izd-vo RGATA im. P. A. Solov'eva, 2009. Part 1: Printsipy organizatsii, funktsionirovaniia i chastotnogo planirovaniia sistem mobil'noi sviazi. 121 p.

17. *Programmyi kompleks ONEPLAN RPLS-DB planirovaniia i optimizatsii podvizhnoi i fiksirovannoi sviazi*

(setevaia versia) [ONEPLAN RPLS-DB software package for planning and optimizing mobile and fixed communications (network version)]. Available at: <https://reestr.digital.gov.ru/reestr/310318/> (accessed: 19.09.2023).

Статья поступила в редакцию 03.11.2023; одобрена после рецензирования 26.02.2024; принята к публикации 12.04.2024  
The article was submitted 03.11.2023; approved after reviewing 26.02.2024; accepted for publication 12.04.2024

### **Информация об авторах / Information about the authors**

**Олег Николаевич Пищин** – кандидат технических наук, доцент; заведующий кафедрой связи; Астраханский государственный технический университет; o.pishin@yandex.ru

**Дмитрий Сергеевич Пузанков** – студент, направление обучения «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»; Астраханский государственный технический университет; Puzankov\_dmitriy\_astu@mail.ru

**Oleg N. Pishchin** – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Head of the Department of Telecommunications; Astrakhan State Technical University; o.pishin@yandex.ru

**Dmitriy S. Puzankov** – Student, training area “Infocommunication technologies and communication systems”; Astrakhan State Technical University; Puzankov\_dmitriy\_astu@mail.ru

