

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
(ФГБОУ ВО «ВГУ»)

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой  
электроники  
Усков Г.К.



31.01.2023г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**  
**Б1.В.11 Распространение электромагнитных волн**

**1. Код и наименование направления подготовки/специальности:**

*03.03.03 Радиофизика*

**2. Профиль подготовки/специализация:**

*Радиофизика и электроника*

**3. Квалификация выпускника: бакалавр**

**4. Форма обучения: очная**

**5. Кафедра, отвечающая за реализацию дисциплины: электроники**

**6. Составители программы: Степкин Владислав Андреевич, к.ф.-м.н.**

**7. Рекомендована:**

*НМС физического факультета 30.08.2021, № протокола: 8*

**8. Учебный год: 2025/2026**

**Семестр(ы)/Триместр(ы): 6**

## 9. Цели и задачи учебной дисциплины:

**Цель дисциплины:** освоение студентами компетенций в области обеспечения функционирования устройств в системах радиосвязи с учётом особенностей распространения радиоволн различных диапазонов и влияния подстилающей поверхности, тропосферы и ионосферы.

**Задачи дисциплины:** приобретение знаний и навыков решения задач в области распространения электромагнитных волн в свободном пространстве и различных средах, изучение особенностей взаимодействия электромагнитных волн со средой распространения, а также особенностей распространения электромагнитных волн различных диапазонов в свободном пространстве и в земных условиях, в том числе с учетом влияния тропосферы и ионосферы.

## 10. Место учебной дисциплины в структуре ООП:

Дисциплина относится к базовой части учебного плана образовательной программы подготовки бакалавров по направлению 03.03.03 Радиофизика.

Предшествующие дисциплины: «Математический анализ», «Электричество и магнетизм», «Колебания и волны, оптика», «Электродинамика»

## 11. Планируемые результаты обучения по дисциплине/модулю (знания, умения, навыки), соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями выпускников):

Компетенция		Планируемые результаты обучения
Код	Название	
ОПК-1	способностью к овладению базовыми знаниями в области математики и естественных наук, их использованию в профессиональной деятельности	знать: фундаментальные закономерности распространения радиоволн в различных условиях: свободное пространство, над земной поверхностью, с учетом влияния тропосферы и ионосферы уметь: использовать в профессиональной деятельности знание фундаментальных закономерностей распространения радиоволн в различных условиях: свободное пространство, над земной поверхностью, с учетом влияния тропосферы и ионосферы владеть (иметь навык(и)): базовыми навыками решения задач в области распространения радиоволн в различных условиях: свободное пространство, над земной поверхностью, с учетом влияния тропосферы и ионосферы
ПК-1	способностью понимать принципы работы и методы эксплуатации современной радиоэлектронной и оптической аппаратуры и оборудования	знать: методы решения задач в области распространения радиоволн в различных условиях: свободное пространство, над земной поверхностью, с учетом влияния тропосферы и ионосферы уметь: применять подходы и методы решения задач в области распространения радиоволн в различных условиях: свободное пространство, над земной поверхностью, с учетом влияния тропосферы и ионосферы владеть (иметь навык(и)): математическим аппаратом, необходимым для решения задач в области распространения радиоволн в различных условиях: свободное пространство, над земной поверхностью, с учетом влияния тропосферы и ионосферы

## 12. Объем дисциплины в зачетных единицах/час. — 4 / 144.

Форма промежуточной аттестации зачет.

### 13. Виды учебной работы

Вид учебной работы		Трудоемкость	
		Всего	По семестрам
			7 семестр
Аудиторные занятия		72	72
в том числе:	лекции	36	36
	практические	-	-
	лабораторные	36	36
Самостоятельная работа		72	72
в том числе: курсовая работа (проект)		-	-
Форма промежуточной аттестации (зачет – 0 час. / экзамен – ___ час.)		-	-
Итого:		144	144

#### 13.1. Содержание дисциплины

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Содержание раздела дисциплины
<b>1. Лекции</b>		
1.1	Введение	Основные понятия. Классификация радиоволн.
1.2	Распространение радиоволн в свободном пространстве	Механизм распространения радиоволн. Принцип Гюйгенса-Френеля. Зоны Френеля. Дифракция радиоволн на круглом отверстии и краю непрозрачного экрана. Зависимость напряженности поля радиоволны от расстояния при распространении в свободном пространстве. Учет характеристик направленности излучателей.
1.3	Распространение земных радиоволн в непосредственной близости к поверхности	Относительная комплексная диэлектрическая проницаемость. Приближенные граничные условия Леонтовича. Структура поля радиоволны в пункте приема. Наклон фронта радиоволны, горизонтальные антенны. Формула Шулейкина-Ван дер Поля.
1.4	Распространение земных радиоволн при поднятых антеннах	Понятие поднятых антенн. Геометрия задачи. Интерференционные формулы. Формула Введенского. Учет сферичности Земли при использовании интерференционных формул. Дальность до горизонта и расстояние прямой видимости. Понятие приведенных высот. Границы применимости интерференционных формул. Представление о дифракционных формулах.
1.5	Влияние тропосферы на распространение земных радиоволн	Особенности влияния тропосферы на распространение радиоволн. Тропосферная рефракция. Учет рефракции в интерференционных формулах. Понятие эквивалентного радиуса Земли. Тропосферное рассеяние. Флуктуационные процессы в тропосфере. Многолучевость и замирания сигнала.
1.6	Особенности распространения ионосферных радиоволн	Особенности распространения радиоволн в ионосфере. Преломление и отражение. Фазовая и групповая скорости радиоволны, распространяющейся в ионосфере.
<b>2. Лабораторные работы</b>		
2.1	Введение	Расчет характеристик направленности излучателей.
2.2	Распространение радиоволн в свободном пространстве	Расчет, построение графиков и анализ зависимости от расстояния напряженности поля радиоволны, распространяющейся в свободном пространстве.
2.3	Распространение земных радиоволн в непосредственной близости к поверхности	Расчет, построение графиков и анализ зависимости от расстояния напряженности поля земной радиоволны, распространяющейся в непосредственной близости к поверхности.
2.4	Распространение земных радиоволн при поднятых антеннах	Расчет, построение графиков и анализ зависимости от расстояния напряженности поля земной радиоволны при поднятых передающей и приемной антеннах для плоской и сферической поверхности Земли.
2.5	Влияние тропосферы на распространение земных радиоволн	Расчет, построение графиков и анализ зависимости от расстояния напряженности поля земной радиоволны при поднятых передающей и приемной антеннах с учетом тропосферной рефракции.

### 13.2. Темы (разделы) дисциплины и виды занятий

№ п/п	Наименование темы (раздела) дисциплины	Виды занятий (часов)				Всего
		Лекции	Практические	Лабораторные	Самостоятельная работа	
1	Введение	4		4	8	16
2	Распространение радиоволн в свободном пространстве	6		8	12	26
3	Распространение земных радиоволн в непосредственной близости к поверхности	6		6	12	24
4	Распространение земных радиоволн при поднятых антеннах	8		12	20	40
5	Влияние тропосферы на распространение земных радиоволн	6		6	14	26
6	Особенности распространения ионосферных радиоволн	6			6	12
7	Итого:	36		36	72	144

### 14. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины

*Изучение материалов лекций и самостоятельная работа с рекомендуемой литературой является достаточным для успешного освоения дисциплины. Работа в семестре контролируется путем тестирования, в котором проверяется освоение базовых знаний, и выполнения лабораторных работ с подготовкой отчетов, посредством которых формируются навыки работы с научно-технической литературой, применения полученных знаний при решении практических задач, умение формулировать мысли.*

*При использовании дистанционных образовательных технологий и электронного обучения выполнять все указания преподавателей, вовремя подключаться к онлайн-занятиям, ответственно подходить к выполнению заданий для самостоятельной работы.*

### 15. Перечень основной и дополнительной литературы, ресурсов интернет, необходимых для освоения дисциплины

а) основная литература:

№ п/п	Источник
1	<i>Долуханов, Марк Павлович. Распространение радиоволн / М. Долуханов .— 4-е изд. — М. : Связь, 1972 .— 336 с. : черт.</i>
2	<i>Грудинская, Галина Петровна. Распространение радиоволн : учебное пособие для студ. радиотехн. спец. вузов / Г.П. Грудинская .— 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Высшая школа, 1975 .— 279,[1] с. : ил., табл.</i>

б) дополнительная литература:

№ п/п	Источник
1	<i>Баскаков, Святослав Иванович. Электродинамика и распространение радиоволн : Учебное пособие для студ. радиотехн. специальностей вузов / С.И. Баскаков .— М. : Высш. шк., 1992 .— 416 с. : ил. — ISBN 5060020371 : 13.75.</i>
2	<i>Атмосферная турбулентность и распространение радиоволн : Труды международного коллоквиума, Москва, 15-22 июня, 1965 г. / АН СССР, Междуведомственный геофизический комитет, Ин-т физики атмосферы; Под ред. А.М. Яелома и В.И. Татарского .— М. : Наука, 1967 .— 373,[1] с. : ил.</i>

в) информационные электронно-образовательные ресурсы (официальные ресурсы интернет):

№ п/п	Ресурс
1	<i>edu.vsu.ru – Электронный университет ВГУ</i>

2	Электронная библиотека Зональной научной библиотеки Воронежского госуниверситета : электронно-библиотечная система. URL : <a href="https://lib.vsu.ru/zgate?Init+elib.xml,simple_elib.xml+rus">https://lib.vsu.ru/zgate?Init+elib.xml,simple_elib.xml+rus</a>
3	Электронно-библиотечная система "Издательство "Лань" : электронно-библиотечная система. URL : <a href="https://lib.vsu.ru/?p=4&amp;t=2d&amp;id=1308">https://lib.vsu.ru/?p=4&amp;t=2d&amp;id=1308</a>
4	Электронно-библиотечная система "Университетская библиотека online": электронно-библиотечная система. URL : <a href="https://lib.vsu.ru/?p=4&amp;t=2d&amp;id=1307">https://lib.vsu.ru/?p=4&amp;t=2d&amp;id=1307</a>
5	Электронно-библиотечная система "Консультант студента": электронно-библиотечная система. URL : <a href="https://lib.vsu.ru/?p=4&amp;t=2d&amp;id=1306">https://lib.vsu.ru/?p=4&amp;t=2d&amp;id=1306</a>
6	Электронно-библиотечная система «ЮРАЙТ»: электронно-библиотечная система. URL : <a href="https://lib.vsu.ru/?p=4&amp;t=2d&amp;id=1457">https://lib.vsu.ru/?p=4&amp;t=2d&amp;id=1457</a>

## 16. Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы

№ п/п	Источник
1	<a href="http://edu.vsu.ru">edu.vsu.ru</a> – Электронный университет ВГУ

## 17. Информационные технологии, используемые для реализации учебной дисциплины, включая программное обеспечение и информационно-справочные системы

При реализации дисциплины могут использоваться технологии электронного обучения и дистанционные образовательные технологии на базе образовательного портала "Электронный университет ВГУ" по адресу [edu.vsu.ru](http://edu.vsu.ru), а также другие доступные ресурсы сети Интернет.

## 18. Материально-техническое обеспечение дисциплины:

Персональный компьютер

Комплекс для проведения лекций, семинаров и презентаций – 1 шт.

Проектор

Экран

## 19. Фонд оценочных средств:

### 19.1. Перечень компетенций с указанием этапов формирования и планируемых результатов обучения

Код и содержание компетенции (или ее части)	Планируемые результаты обучения (показатели достижения заданного уровня освоения компетенции посредством формирования знаний, умений, навыков)	Этапы формирования компетенции (разделы (темы) дисциплины или модуля и их наименование)	ФОС (средства оценивания)
ОПК-1 способностью к овладению базовыми знаниями в области математики и естественных наук, их использованию в профессиональной деятельности	знать: фундаментальные закономерности распространения радиоволн в различных условиях: свободное пространство, над земной поверхностью, с учетом влияния тропосферы и ионосферы	Разделы 1-6	Онлайн-тестирование на электронном курсе на портале Электронный университет ВГУ <a href="http://edu.vsu.ru">edu.vsu.ru</a>
	уметь: использовать в профессиональной деятельности знание фундаментальных закономерностей распространения радиоволн в различных условиях: свободное пространство, над земной поверхностью, с учетом влияния тропосферы и ионосферы	Разделы 2-6	Онлайн-тестирование и отчет по лабораторным работам на электронном курсе на портале Электронный университет ВГУ

			edu.vsu.ru
	владеть (иметь навык(и)): базовыми навыками решения задач в области распространения радиоволн в различных условиях: свободное пространство, над земной поверхностью, с учетом влияния тропосферы и ионосферы	Разделы 2-6	Отчет по лабораторным работам на электронном курсе на портале Электронный университет ВГУ edu.vsu.ru
ПК-1 способностью понимать принципы работы и методы эксплуатации современной радиоэлектронной и оптической аппаратуры и оборудования	знать: методы решения задач в области распространения радиоволн в различных условиях: свободное пространство, над земной поверхностью, с учетом влияния тропосферы и ионосферы	Разделы 1-6	Онлайн-тестирование на электронном курсе на портале Электронный университет ВГУ edu.vsu.ru
	уметь: применять подходы и методы решения задач в области распространения радиоволн в различных условиях: свободное пространство, над земной поверхностью, с учетом влияния тропосферы и ионосферы	Разделы 2-6	Онлайн-тестирование и отчет по лабораторным работам на электронном курсе на портале Электронный университет ВГУ edu.vsu.ru
	владеть (иметь навык(и)): математическим аппаратом, необходимым для решения задач в области распространения радиоволн в различных условиях: свободное пространство, над земной поверхностью, с учетом влияния тропосферы и ионосферы	Разделы 2-6	Отчет по лабораторным работам на электронном курсе на портале Электронный университет ВГУ edu.vsu.ru

## 19.2. Описание критериев и шкалы оценивания компетенций (результатов обучения) при промежуточной аттестации

Критерии оценивания компетенций	Уровень сформированности компетенций	Шкала оценок
Обучающийся владеет теоретическими основами дисциплины, владеет необходимым математическим аппаратом, способен применять подходы и методы решения задач в области распространения радиоволн в различных условиях: свободное пространство, над земной поверхностью, с учетом влияния тропосферы и ионосферы. Может допускать не критичные ошибки в применении терминологии, понимании физических явлений, анализе результатов при решении задач.	Пороговый уровень	Зачтено
Обучающийся демонстрирует отрывочные, фрагментарные знания, допускает грубые ошибки в применении терминологии, понимании физических явлений, решении задач и анализе результатов этих решений		Не зачтено

## 19.3. Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, характеризующие этапы формирования компетенций в процессе освоения образовательной программы

### 19.3.1. Перечень вопросов к зачету:

1. ЭМ и радиоволны волны. Волновой процесс. Радиотрасса. Классификация радиоволн по способу распространения.
2. Потери при распространении. Понятие множителя ослабления.

3. Понятие комплексной диэлектрической проницаемости среды. Физический смысл.
4. Понятие поднятой антенны. Диаграмма направленности, коэффициент направленного действия, коэффициент усиления антенны. Диаграмма направленности антенны в свободном пространстве и над поверхностью Земли.
5. Область пространства, эффективно участвующая в передаче энергии радиоволн. Зоны Френеля.
6. Интерференционные формулы в условиях распространения радиоволн над плоской поверхностью. Их суть (физический смысл).
7. Формула Введенского. Физический смысл. Пояснить зависимость напряженности поля радиоволны от расстояния. Связь с интерференционной формулой.
8. Приближенные граничные условия Леонтовича. Их суть (физический смысл).
9. Задача распространения радиоволн непосредственно над разделом двух сред (земля-воздух). Формула Шулейкина-Ван дер Поля.
10. Структура поля волны в точке приема при распространении непосредственно над поверхностью Земли. Наклон фронта волны. Горизонтальные антенны.
11. Понятие прямой видимости. Расчет параметров поля волны с учетом сферичности поверхности.
12. Расчет параметров поля волны, распространяющейся над неоднородной поверхностью.
13. Тропосферная рефракция: причины, виды. Радиус кривизны траектории. Расчет параметров поля радиоволны, распространяющейся в условиях рефракции.
14. Сверхрефракция: причины, условия, в чем проявляется. Расчет параметров поля радиоволны, распространяющейся в условиях сверхрефракции.
15. Диэлектрическая проницаемость ионосферы. Причины возникновения явления преломления при распространении радиоволн в ионосфере.
16. Условия отражения от ионизированного слоя.
17. Фазовая и групповая скорости волны в ионосфере.
18. Многолучевость: причины ее возникновения, виды. Замирания сигнала, характеристики замираний.

### 19.3.2. Перечень практических заданий

1. Построить зависимости напряженности поля радиоволны, распространяющейся в свободном пространстве:

$$E_1(r, \varphi) = 173 \frac{\sqrt{P_1 D_1(\varphi)}}{r}$$

2. Построить зависимости напряженности поля радиоволны, распространяющейся над плоской поверхностью Земли при поднятых антеннах:  
 $h_1 = 15 \text{ м}, h_2 = 30 \text{ м}$

$$E_2(r, \varphi) = 173 \frac{\sqrt{P_1 D_1(\varphi)}}{r} \cdot F_2;$$

$$F_2 = 2 \left| \sin\left(\frac{2\pi h_1 h_2}{\lambda r}\right) \right|$$

3. Построить зависимости напряженности поля радиоволны, распространяющейся над плоской поверхностью Земли при поднятых антеннах при расстоянии между ними, превышающем  $18h_1 h_2 / \lambda$ :

$$E_3(r, \varphi) = 173 \frac{\sqrt{P_1 D_1(\varphi)}}{r} \cdot F_3;$$

$$F_3 = \frac{4\pi h_1 h_2}{\lambda r}$$

4. Построить зависимости напряженности поля радиоволны, распространяющейся в непосредственной близости над плоской поверхностью Земли: для двух случаев  $\varepsilon_1 = 40$ ;  $\sigma_1 = 0.01$  и  $\varepsilon_2 = 3$ ;  $\sigma_2 = 10000$

$$E_4(r, \varphi) = 245 \frac{\sqrt{P_1 D_1(\varphi)}}{r} \cdot F_4;$$

$$F_4 = \frac{2 + 0,3x}{2 + x + 0,6x^2}; x = \frac{\pi \cdot r}{\lambda} \cdot \frac{1}{\sqrt{\varepsilon^2 + (60\lambda\sigma)^2}}$$

5. Построить зависимости напряженности поля радиоволны, распространяющейся над сферической поверхностью Земли при поднятых антеннах:

$$E_5(r, \varphi) = 173 \frac{\sqrt{P_1 D_1(\varphi)}}{r} \cdot F_5;$$

$$r_1 = r \frac{h_1}{h_1 + h_2}$$

$$r_2 = r \frac{h_2}{h_1 + h_2}$$

для  $r \ll r_0$

[0; 0,1r<sub>0</sub>]

$$F_5 = 2 \left| \sin\left(\frac{2\pi h_1' h_2'}{\lambda r}\right) \right|;$$

или

$$r_1 = r \frac{\sqrt{h_1}}{\sqrt{h_1 + h_2}}$$

для  $r \rightarrow r_0$

[0,7r<sub>0</sub>; 0,8r<sub>0</sub>]

$$h_1' = h_1 - \frac{r_1^2}{2a}$$

$$h_2' = h_2 - \frac{r_2^2}{2a}$$

$$r_2 = r \frac{\sqrt{h_2}}{\sqrt{h_1 + h_2}}$$

при  $r = [0,1 r_0; 0,7 r_0]$  брать среднее арифметическое между двумя значениями

$a = 6371$  км

6. Построить зависимости напряженности поля радиоволны, распространяющейся над сферической поверхностью Земли при поднятых антеннах и с учетом тропосферной рефракции:

Использовать формулы п.5, подставив вместо радиуса Земли ( $a$ ) эквивалентный радиус ( $a_e$ ), найденный для параметров нормальной тропосферы.

### 19.3.3. Тестовые задания

Тестовые задания и банки вопросов размещены в электронном курсе на портале Электронный университет ВГУ по адресу: <https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=4342>

### 19.4. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, характеризующих этапы формирования компетенций

Оценка знаний, умений и навыков, характеризующая этапы формирования компетенций в рамках изучения дисциплины осуществляется в ходе текущей и промежуточной аттестаций.

Текущая аттестация проводится в соответствии с Положением о текущей аттестации обучающихся по программам высшего образования Воронежского государственного университета. Текущая аттестация проводится в формах выполнения практико-ориентированных заданий - лабораторных работ и тестирования на портале Электронный университет ВГУ. Критерии оценивания приведены выше.

Промежуточная аттестация проводится в соответствии с Положением о промежуточной аттестации обучающихся по программам высшего образования.

При оценивании используются качественные шкалы оценок. Критерии оценивания приведены выше.