

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского»**

Радиофизический факультет

(факультет / институт / филиал)

УТВЕРЖДЕНО
решением ученого совета ННГУ
протокол от
«20» апреля 2021г. № 1

Рабочая программа дисциплины

Квантовая и оптическая электроника

(наименование дисциплины (модуля))

Уровень высшего образования

специалитет

(бакалавриат / магистратура / специалитет)

Направление подготовки / специальность

10.05.02 Информационная безопасность телекоммуникационных систем

(указывается код и наименование направления подготовки / специальности)

Направленность образовательной программы

Системы подвижной цифровой защищенной связи

(указывается профиль / магистерская программа / специализация)

Форма обучения

очная

(очная / очно-заочная / заочная)

Нижний Новгород

2021 год

1. Место дисциплины в структуре ООП

Дисциплина «Квантовая и оптическая электроника» относится к дисциплинам, формируемым участниками образовательных отношений по специальности 10.05.02 «Информационная безопасность телекоммуникационных систем».

№ варианта	Место дисциплины в учебном плане образовательной программы	Стандартный текст для автоматического заполнения в конструкторе РПД
2	Блок 1. Дисциплины (модули) Дисциплины, формируемые участниками образовательных отношений	Дисциплина Б1.В.10 «Квантовая и оптическая электроника» относится к формируемой участниками образовательных отношений части ООП специальности 10.05.02 «Информационная безопасность телекоммуникационных систем».

2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями и индикаторами достижения компетенций)

Формируемые компетенции (код, содержание компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), в соответствии с индикатором достижения компетенции		Наименование оценочного средства
	Индикатор достижения компетенции (код, содержание индикатора)	Результаты обучения по дисциплине	
ПК-1. Способен исследовать методы построения и разрабатывать алгоритмы реализации систем безопасности телекоммуникационных каналов в подвижной цифровой защищенной связи	ПК-1.1. Знает: - национальные, межгосударственные и международные стандарты, систем подвижной цифровой защищенной связи - руководящие и методические документы уполномоченных федеральных органов исполнительной власти, устанавливающие требования к организации информационной безопасности средств защиты телекоммуникационных каналов связи - основные средства и способы обеспечения информационной безопасности, принципы построения	Знать: - сущность и основы построения современных телекоммуникационных каналов связи, современную элементную базу телекоммуникационных систем, включая оптические системы связи с использованием лазерных и оптоэлектронных систем - методы классификации современных систем передачи информации	Собеседование

	средств защиты систем подвижной цифровой защищенной связи		
	<p>ПК-1.2. Умеет:</p> <ul style="list-style-type: none"> - организовывать сбор, обработку, анализ и систематизацию научно-технической информации, отечественного и зарубежного опыта по проблемам информационной безопасности беспроводных каналов связи - составлять научно-технические отчеты, обзоры, публикации по результатам выполненных исследований 	<p>Уметь:</p> <ul style="list-style-type: none"> - анализировать и классифицировать научно-техническую информацию в области построения систем телекоммуникационной связи, в том числе – с использованием моделей квантовой электроники и лазерной физики 	<p>Задачи (практические задания)</p> <p>Лабораторный эксперимент</p>

3. Структура и содержание дисциплины

3.1 Трудоемкость дисциплины

	очная форма обучения	очно-заочная форма обучения	заочная форма обучения
Общая трудоемкость	3 ЗЕТ	___ ЗЕТ	___ ЗЕТ
Часов по учебному плану	108		
в том числе			
аудиторные занятия (контактная работа):			
- занятия лекционного типа	32		
- занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы)	32 (16/16)		
самостоятельная работа	43		
КСР	1		
Промежуточная аттестация – экзамен/зачет	зачет		

3.2. Содержание дисциплины

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины, форма промежуточной аттестации по дисциплине	Всего (часы)	В том числе				
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них				Самостоятельная работа обучающегося, часы
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Занятия лабораторного типа	Всего	
Введение	4	2			2	2
Квантовая теория излучения и поглощения	13	4	4		8	5
Элементы квантовой кинетики и теории спектральных линий	11	4	2		6	5
Взаимодействие двухуровневой среды с резонансным электромагнитным полем	13	4	2	2	8	5
Квантовые усилители и генераторы, информационные системы на их основе	30	8	4	8	20	10
Методы управления лазерным излучением	16	4	2	4	10	6
Методы регистрации оптических сигналов	10	2	2	2	6	4
Современная элементная база оптоэлектроники	10	4			4	6
Итого:	107	32	16	16	64	43

В процессе изучения дисциплины используются следующие образовательные технологии: проблемный метод изложения материала и диалогичная форма проведения практических занятий. Лабораторный практикум предусматривают демонстрацию

физических опытов, а также изучение лазерных и оптоэлектронных моделей с привлечением инструментальной приборной базы и информационных технологий.

Практические занятия и лабораторные работы организуются в форме, которая предусматривает участие обучающихся в выполнении отдельных элементов работ и приобретении практических навыков, связанных с будущей профессиональной деятельностью. В процессе реализации практических занятий и лабораторных работ осуществляется текущий контроль успеваемости обучающихся студентов.

4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Контрольные вопросы и задания для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины приведены в п. 5.2.

5. Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине (модулю),

включающий:

5.1. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине

Уровень сформированности компетенций (индикатора достижения компетенций)	Шкала оценивания сформированности компетенций						
	не зачтено		зачтено				
<u>Знания</u>	Отсутствие знаний теоретического материала. Невозможность оценить полноту знаний вследствие отказа обучающегося от ответа	Уровень знаний ниже минимальных требований. Грубые ошибки в решении практических задач.	Минимально допустимый уровень знаний. Допущен ряд негрубых ошибок.	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки.	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько несущественных ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки, без ошибок.	Уровень знаний в объеме, превышающем программу подготовки.
<u>Умения</u>	Отсутствие минимальных умений . Невыполнение практических заданий Невозможность оценить наличие умений вследствие отказа	При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения. Имели место грубые ошибки.	Продemonстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, но не в	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, в полном	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи . Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с	Продemonстрированы все основные умения, решены все основные задачи с отдельными несущественным недочетами, выполнены	Продemonстрированы все основные умения,. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без

	обучающегося от ответа		полном объеме.	объеме, но некоторые с недочетами.	недочетами.	все задания в полном объеме.	недочетов
<u>Навыки</u>	Отсутствие владения материалом. Невозможность оценить наличие навыков вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые навыки. Имели место грубые ошибки.	Имеется минимальный набор навыков для решения стандартных задач	Продemonстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторыми недочетами	Продemonстрированы базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов.	Продemonстрированы навыки при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов.	Продemonстрирован творческий подход к решению нестандартных задач

Шкала оценки при промежуточной аттестации

Оценка	Уровень подготовки
зачтено	Все части компетенции, на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «превосходно», продемонстрированы знания, умения, владения по соответствующим компетенциям на уровне, выше предусмотренного программой
	Все части компетенции, на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично»
	Все части компетенции, на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо»
	Все части компетенции, на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо»
	Все части компетенции, на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «удовлетворительно»
не зачтено	Компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно»,
	Компетенция сформирована на уровне «плохо»

5.2. Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения.

5.2.1 Контрольные вопросы

Вопросы	Код формируемой компетенции
1. Понятие фотона. Понятие электромагнитного вакуума.	ПК-1
2. Квантовая теория излучения. Однофотонные переходы в первом порядке теории возмущений. Матричные элементы оператора энергии взаимодействия поля с веществом для процессов однофотонного излучения и поглощения.	ПК-1
3. Индуцированное и спонтанное излучение фотона. Соотношение между вероятностями индуцированного и спонтанного процессов. Вероятности излучения и поглощения в электродипольном	ПК-1

приближении.	
4. Добротность спектральной линии. Оценки величин. Физические основы построения квантовых стандартов частоты.	ПК-1
5. Механизмы уширения спектральных линий.	ПК-1
6. Поведение двухуровневой среды при ее взаимодействии с резонансным электромагнитным полем. Стационарные решения уровней двухуровневой среды, взаимодействующей с резонансным полем.	ПК-1
7. Эффекты насыщения и просветления среды в сильном электромагнитном поле. Мощность, поглощаемая средой из электромагнитного поля. Насыщающая мощность (интенсивность).	ПК-1
8. Термодинамически неравновесная система. Инверсия населенностей. Трех- и четырех-уровневые системы. Метод оптической накачки. Инверсия населенностей в Nd ³⁺ лазере.	ПК-1
9. Уравнение переноса излучения в усиливающей среде. Коэффициент и показатель усиления. Оценки величины показателя усиления для различных сред.	ПК-1
10. Условие самовозбуждения оптического квантового генератора. Зависимость порога генерации от параметров активной среды и резонатора.	ПК-1
11. Мощность квантового генератора. Оценка мощности для различных типов лазеров.	ПК-1
12. Нестационарные режимы генерации. Методы повышения мощности генерации лазеров. Метод модулированной добротности. Метод синхронизации мод в лазерах. Генерация гигантских импульсов.	ПК-1
13. Полупроводниковый инжекционный лазер, спектральные, мощностные и модуляционные характеристики.	ПК-1
14. Шумы излучения лазеров. Применение полупроводниковых лазеров в оптических системах передачи информации.	ПК-1
15. Волоконные световоды. Моды волоконных световодов. Уширение импульсов при распространении в оптическом волноводе: материальная и волноводная дисперсия. Потери в волноводах.	ПК-1
16. Волоконно-оптические линии связи. Спектральное уплотнение каналов.	ПК-1
17. Модуляторы оптического излучения. Электрооптическая и магнитооптическая модуляция. Взаимодействие света с акустическими волнами; дифракция Брэгга и Рамана-Ната. Электрооптические и акустооптические модуляторы и дефлекторы.	ПК-1
18. Детектирование оптических сигналов. Прямое детектирование и гетеродинирование. Классификация фотоприемников. Фоторезисторы и фотодиоды (лавинные фотодиоды и pin - диоды); принцип действия. Фотогальванический и фотодиодный режим работы. Шумы приемников излучения.	ПК-1

5.2.2. Типовые тестовые задания для оценки сформированности компетенции ПК-1

1. Сформулировать правила отбора для гармонического осциллятора.
2. Обосновать применимость теории возмущения в атоме водорода при возбуждении его электрическим полем на частоте ($\lambda=121$ нм) с плотностью мощности

10 Вт/см²

3. Почему происходит уширение спектральных линий поглощения (излучения) вещества в сильных полях?
4. Почему в оптическом диапазоне длин волн для измерения ширины линии можно использовать явление флуоресценции, а в радиодиапазоне – только вынужденное излучение или поглощение среды?
5. Для выбранного механизма получить выражение для неоднородно уширенного контура линии. Для выбранных условий оценить её ширину.
6. Известно, что время жизни электрона в возбужденном состоянии τ . Получить выражение для спектральной формы линии.
7. Отношение населенностей двух уровней для вещества, находящегося в состоянии равновесия при температуре 300°K, равно 10. Вычислить частоту излучения, соответствующую переходу между этими уровнями.
8. Типичное время жизни для разрешённого электродипольного перехода в видимом диапазоне ~ 10 нс. Оценить естественную ширину линии рентгеновского лазера, излучающего в диапазоне 10 нм.
9. Механизмы однородного уширения. Вывести выражение для однородно уширенного контура линии. Дать оценку её ширины (в см⁻¹) для одного из радиационных переходов Ne.
10. Механизмы неоднородного уширения. Для выбранного механизма получить выражение для неоднородно уширенного контура линии. Для выбранных условий оценить её ширину (в см⁻¹).
11. Доплеровская ширина линии 500 МГц. Оценка времени жизни уровня 10⁻⁸с. Предложить метод измерения ширины лоренцевского контура.
12. Обосновать принципиальные трудности создания УФ и рентгеновских активных сред.
13. Связь коэффициента ненасыщенного усиления с коэффициентами Эйнштейна. Сравнить зависимости коэффициента усиления от мощности накачки в случае однородного и неоднородного насыщения усиления.
14. Двух-, трёх- и четырёхуровневая схемы лазеров: возможности реализации, достоинства и недостатки. Оптимальная ширина уровней.
15. Nd:АИГ лазер: квантовая схема, преимущество матрицы, организация эффективной накачки.
16. Традиционное устройство Nd лазера известно. Почему бы не сделать лазер того же диапазона на парах неодима? На газообразном соединении Nd, например, с галогеном?
17. Почему в лазерах, работающих на молекулярных переходах, используют полированные металлические зеркала, а в лазерах, работающих на электронных переходах, – диэлектрические?
18. Показать, что абсолютная ширина линии открытого оптического резонатора с плоскими зеркалами не зависит от частоты. Оценить (в см⁻¹) интервал между продольными модами и ширину линии такого резонатора для R=0,99 и L= 1 м.
19. Изобразить структуру мод (линии уровня интенсивности, поляризацию, профиль напряжённости поля) TEM₀₀ и TEM₁₁ открытого резонатора с круглыми зеркалами. Для какой из них следует ожидать больших дифракционных потерь?
20. Изобразить и обосновать спектральный контур насыщенного усиления в резонаторе газового лазера при возбуждении в нём одной моды с частотой, лежащей в стороне от центра линии вещества.
21. Оценить число продольных мод, генерируемых He-Ne лазером длиной ~ 1 м, считая, что температура разряда не слишком отличается от комнатной. Зависит ли ширина провала в насыщенном контуре усиления и ширина линии излучения лазера от длины резонатора?

22. Найти значение ненасыщенного коэффициента усиления для полупроводникового лазера с длиной активной области 100 мкм при использовании сколов по кристаллическим поверхностям в качестве зеркал.

23. Оценить ширину Лэмбовского провала для He-Ne лазера и сравнить полученное значение с доплеровской шириной линии.

24. Объяснить принцип действия и преимущества ДГС с отдельным ограничением. Типичные оптические параметры ДГС. Изобразить зонную диаграмму, привести вариант используемых материалов.

25. Обосновать необходимость многокомпонентных материалов для приготовления диодных структур. Преимущества и недостатки соединения AlGaAs как материала для лазерных диодов. Привести пример материалов для диодной структуры на «телекоммуникационный» диапазон $\sim 1,3$ мкм

26. Особенности гетероструктуры на основе InGaAsP/InP. Вид ватт-амперной характеристики, спектр лазера и светодиода на её основе.

27. Чем определяется ширина полосы лазерного диода как источника информации? Почему светодиоды уступают им по этому параметру? Указать оценки для обоих случаев.

28. Как и почему зависит от температуры рабочая частота лазерного диода? Почему с ростом температуры снижается эффективность генерации?

29. Чем определяется толщина активной области лазерного диода, выполненного на основе простейшей гомоструктуры?

30. Указать и обосновать преимущества лазерных диодов с распределённой обратной связью и распределённым брэгговским отражением по сравнению с диодами простейшей геометрии.

31. Сравнить эффективность управления сигналами от лазерного диода путём модуляции накачки, модуляции добротности и модуляции выходного пучка.

32. Оценить ширину линии излучения и интервал между продольными модами для типичного лазерного диода

5.2.3. Типовые задания/задачи для оценки сформированности компетенции ПК-1

1. Для идеальной квантовой ямы (потенциальный двусторонний барьер с бесконечными стенками) указать незапрещённые в электродипольном взаимодействии переходы. Вычислить матричные элементы оператора электродипольного взаимодействия для перехода с 1 на 2 энергетические уровни.

2. Получить выражение коэффициента Эйнштейна для стимулированного излучения через матричный элемент оператора взаимодействия. Получить связь коэффициентов Эйнштейна для стимулированного и спонтанного излучения.

3. Вычислить частоту Раби осцилляций при точном резонансе для перехода с 1 на 2 энергетические уровни идеальной квантовой ямы. Ширина ямы 10 нм, плотность мощности поля 10 Вт/см²

4. Рассчитать ширину линии для 2p-1s перехода в атоме водорода.

5. Для выбранного механизма получить выражение для неоднородно уширенного контура линии. Для выбранных условий оценить её ширину.

6. Найти ширину линии спонтанного излучения квантового гармонического осциллятора при переходе E1-E0. Наблюдаема ли такая ситуация в эксперименте.

7. Определить линейный коэффициент усиления слабого сигнала в 2-х уровневой среде. Если концентрация инверсии $N_0 = 10^9$ см⁻³, вероятность спонтанного излучения 10^7 сек⁻¹. Линия имеет форму Лоренца с шириной, определяемой спонтанным излучением.

8. Оценить минимальную мощность лампы-накачки (к.п.д. = 100 %), необходимую для создания инверсии в твердотельном лазере с концентрацией активных частиц $n = 10^{19} \text{ см}^{-3}$, объемом кристалла $V = 10 \text{ см}^3$. Частота середины полосы оптической накачки равна $\nu = 6 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$, время жизни частиц на верхнем рабочем уровне $t_{\text{сп}} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ сек}$.

9. Линия люминесценции иона Nd^{3+} в стекле для рабочего перехода Nd лазера имеет полуширину $\sim 30 \text{ нм}$. Найти ширину верхнего лазерного уровня, если нижний дезактивируется со скоростью 10^8 с^{-1} .

10. Используя классическое определение добротности резонатора (контура) Q_s : $|dW/dt|$ (мощность потерь) = $\omega_s/Q_s \cdot W$ (запасенная в резонаторе энергия) и концепцию плоских волн в резонаторе Фабри-Перо с коэффициентом отражения по мощности R_1 и R_2 , покажите, что добротность Q_s такого резонатора равна $Q_s = - 2L \cdot w_s / (c \cdot \ln R_1 R_2)$, где L - длина резонатора.

11. Рассчитать добротность Q_p и время жизни фотона τ_f в резонаторе Фабри-Перо с плоскими зеркалами. Расстояние между зеркалами $L = 1 \text{ м}$, коэффициенты отражения зеркал $R_1 = R_2 = 0,95$, рабочая длина волн $\lambda = 0,6 \text{ мкм}$. Коэффициент поглощения среды, заполняющей резонатор, $\alpha = 0,01 \text{ см}^{-1}$. Дифракционными потерями пренебречь.

12. Газовый лазер работает на однородно-уширенном переходе, ширина линии 200 МГц . Вероятность спонтанного излучения на рабочем переходе ($\lambda = 1 \text{ мкм}$) $A_{\text{сп}} = 10^7 \text{ с}^{-1}$. Параметры резонатора Фабри-Перо: длина $L = 1 \text{ м}$, полные потери $0,02$. Определить пороговую концентрацию инверсии.

13. Рассчитать необходимую пороговую инверсию перехода газового лазера ($\lambda = 510 \text{ нм}$), если вероятность перехода $A_{\text{ик}} = 5 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$. Однородная ширина линии $\Delta\nu^{\text{одн}} = 20 \text{ МГц}$, длина резонатора $L = 20 \text{ см}$, а потери в резонаторе при двойном проходе составляют 5% .

14. Лазерная среда имеет доплеровский профиль усиления с шириной $\Delta\nu = 2 \text{ ГГц}$. Однородная ширина равна $\Delta\nu^{\text{одн}} = 50 \text{ МГц}$, а вероятность перехода $A_{\text{ик}} = 10^8 \text{ с}^{-1}$. Пусть частота одной из мод резонатора ($L = 30 \text{ см}$) совпадает с центральной частотой профиля усиления. Какова пороговая инверсия для центральной моды и при какой инверсии генерация начнется на соседних модах, если потери в резонаторе составляют 10% ?

15. Для соседних продольных мод резонатора Фабри-Перо длиной 1 м , заполненного активной средой с шириной лоренцевой линии излучения на рабочем переходе $\Delta\omega = 2 \cdot 10^{12} \text{ рад/сек}$ (рубин), сделайте оценку относительной разницы коэффициентов (показателей) усиления.

16. Резонатор инжекционного полупроводникового лазера образован естественными гранями кристалла с коэффициентами отражения $R_1 = R_2 = 0,37$. Определите пороговый уровень усиления для резонаторов длиной $L = 400 \text{ мкм}$ и $L = 100 \text{ мкм}$, если внутренние потери составляют $\alpha_{\text{внут}} = 5 \text{ см}^{-1}$. Что произойдет, если на грани резонатора нанести отражающие покрытия с $R_1 = 0,98$ и $R_2 = 1$?

17. Мощность непрерывной генерации полоскового полупроводникового лазера равна 10 мВт , длина волны излучения $\lambda = 0,8 \text{ мкм}$, ширина спектральной линии $\Delta\nu = 100 \text{ МГц}$, размеры ближнего поля - $1 \text{ мкм} \times 10 \text{ мкм}$. До какой температуры надо нагреть абсолютно черное тело, чтобы его спектральная яркость в заданном диапазоне достигла яркости на зеркале лазера?

6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

а) основная литература:

1. Страховский Г.Н., Успенский А.В. *Основы квантовой электроники* - М.: «Высшая школа», 1979, 336с.
2. Карлов Н.В. *Лекции по квантовой электронике* - М.: «Наука», 1983, 320с.
3. Ярив А. *Квантовая электроника* - М.: «Сов.радио», 1980, 460с.

б) дополнительная литература:

1. Адамс М. *Введение в теорию оптических волноводов* М. «Мир», 1984г.
2. Гауер Дж. *Оптические системы связи* М., 1989г.
3. Гроднев И.И. *Волоконно-оптические линии связи* М. «Радио и связь», 1990г.
4. *Полупроводниковые инжекционные лазеры* / Под ред. У.Тсанга – М. «Радио и связь», 1990г.
5. Ханин Я.И. *Лекции по квантовой радиофизике* Н.Н., ИПФ РАН, 2005г.
6. Сорокин Ю.М., Ширяев В.С. *Оптические потери в световодах* Н.Н., ННГУ, 2000г.
7. Демтредер В. *Лазерная спектроскопия. Основные принципы и техника эксперимента* - М. «Наука», 1985, 580с.

7. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Для обучения дисциплине имеются специальные помещения для проведения занятий лекционного типа, практических занятий, текущего контроля и промежуточной аттестации, а также учебно-исследовательская лаборатория спецпрактикума «Оптические квантовые генераторы на твердом теле». Учебные аудитории укомплектованы специализированной мебелью и техническими средствами обучения, а лаборатория спецпрактикума дополнительно оснащена современным оптико-электронным оборудованием и вычислительными средствами на базе комплекса ЭВМ.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО по специальности 10.05.02 «Информационная безопасность телекоммуникационных систем».

Автор (ы) _____ А.В.Маругин

Заведующий кафедрой
квантовой радиофизики и электроники _____ С.А.Бельков

Программа одобрена на заседании методической комиссии радиофизического факультета от «23» марта 2021 года, протокол № 02/21.