

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

---

УТВЕРЖДЕНО

решением президиума Ученого совета ННГУ

протокол № 1 от 16.01.2024 г.

**Рабочая программа дисциплины**

Оптимальная обработка сигналов

---

Уровень высшего образования

Бакалавриат

---

Направление подготовки / специальность

02.03.02 - Фундаментальная информатика и информационные технологии

---

Направленность образовательной программы

Информационные системы и технологии

---

Форма обучения

очная

---

г. Нижний Новгород

2024 год начала подготовки

## 1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина Б1.В.ДВ.06.05 Оптимальная обработка сигналов относится к части, формируемой участниками образовательных отношений образовательной программы.

## 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	Для текущего контроля успеваемости	Для промежуточной аттестации
ПК-1: Способен собирать, обрабатывать и интерпретировать данные современных научных исследований, необходимые для формирования подходов, решений и выводов по соответствующим научным и профессиональным проблемам	<p>ПК-1.1: Знает методы обработки и интерпретации данных научных исследований</p> <p>ПК-1.2: Умеет собирать, обрабатывать и интерпретировать данные современных научных исследований</p> <p>ПК-1.3: Имеет практический опыт сбора, обработки и интерпретации данных научных исследований</p>	<p>ПК-1.1: Знает методы оптимальной обработки сигналов и оценивание параметров на фоне шумов и помех</p> <p>ПК-1.2: Умеет получать решающие статистики для различных случаев помеховой обстановки</p> <p>ПК-1.3: Владеет навыками сбора, обработки и статистического анализа сигналов и помех</p>	Собеседование	Зачёт: Контрольные вопросы Задачи

## 3. Структура и содержание дисциплины

### 3.1 Трудоемкость дисциплины

	очная
<b>Общая трудоемкость, з.е.</b>	<b>2</b>
<b>Часов по учебному плану</b>	<b>72</b>
в том числе	
<b>аудиторные занятия (контактная работа):</b>	
- занятия лекционного типа	22
- занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы)	0
- КСР	1
<b>самостоятельная работа</b>	<b>49</b>

<b>Промежуточная аттестация</b>	<b>0</b> <b>Зачёт</b>
---------------------------------	--------------------------

### 3.2. Содержание дисциплины

(структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий)

Наименование разделов и тем дисциплины	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 (практические занятия/лабораторные работы), часы	Всего	
	о ф о	о ф о	о ф о	о ф о	о ф о
Раздел 1. Обнаружение сигналов	36	11		11	25
Раздел 2. Оценка параметров сигналов	35	11		11	24
Аттестация	0				
КСР	1			1	
Итого	72	22	0	23	49

#### Содержание разделов и тем дисциплины

При чтении лекций используется активная форма, заключающаяся в разборе конкретных ситуаций, возникающих при анализе рассматриваемых физических явлений (анализ корректности постановки задачи, выявление физического смысла полученного результата).

Используются следующие интерактивные формы проведения занятий:

- Предоставление студентам адресов необходимых Интернет-ресурсов.
- Обмен со студентами адресами электронной почты для обеспечения оперативного взаимодействия.
- Отправка студентам электронных писем, содержащих необходимые образовательные ресурсы (материалы к лекциям, персональные задания к зачёту).
- Предоставление студентам возможности обсуждения проблем, возникающих при освоении дисциплины, с использованием сети Интернет.

В рамках данного учебного курса предусмотрены встречи с представителями российских и зарубежных компаний с целью формирования и развития профессиональных навыков обучающихся, решения прикладных задач с помощью компьютерных симуляций, стимулирования внеаудиторной работы.

Практические занятия /лабораторные работы организуются, в том числе, в форме практической подготовки, которая предусматривает участие обучающихся в выполнении отдельных элементов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью.

На проведение практических занятий / лабораторных работ в форме практической подготовки отводится: очная форма обучения - 3 ч.

#### **4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся**

Самостоятельная работа обучающихся включает в себя подготовку к контрольным вопросам и заданиям для текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины приведенным в п. 5.

Используются виды самостоятельной работы студента: в читальном зале библиотеки, в учебных кабинетах (лабораториях), компьютерных классах, с доступом к ресурсам Интернет и в домашних условиях. Порядок выполнения самостоятельной работы соответствует программе курса и контролируется в ходе проведения лекционных занятий и в конце курса при проведении экзамена по данной дисциплине. Самостоятельная работа подкрепляется учебно-методическим и информационным обеспечением, включающим рекомендованные учебники и учебно-методические пособия, а также конспекты лекций.

– во время лекций формулируются проблемы, которые студенты должны решить самостоятельно. На последующих лекциях проводится открытое обсуждение полученных результатов и даётся правильное решение.

– задания для проведения промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины выдаются студентам заранее. В случае необходимости проводятся индивидуальные консультации.

#### **5. Фонд оценочных средств для текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)**

**5.1 Типовые задания, необходимые для оценки результатов обучения при проведении текущего контроля успеваемости с указанием критериев их оценивания:**

##### **5.1.1 Типовые задания (оценочное средство - Собеседование) для оценки сформированности компетенции ПК-1:**

1. Статистическая модель канала связи.
2. Влияние априорной информации на качество обнаружения..
3. Функционал отношения правдоподобия.
4. Байесовские оценки
5. Оценки МСКО.
6. Оценки МАВ
7. Импульсная характеристика оптимального фильтра.
8. Частотная характеристика оптимального фильтра
9. Структурная схема оптимального обнаружителя.
10. Структурные схемы реализации алгоритмов оценивания.
11. Показатели качества обнаружителя – вероятности ложной тревоги, пропуска цели, полной вероятности ошибочных решений.
12. Многоканальная схема реализации алгоритма МП оценивания параметров радиосигналов.
13. Сравнение оценок МСКО и МАВ
14. Простая функция потерь

**Критерии оценивания (оценочное средство - Собеседование)**

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Уровень знаний соответствует программе подготовки.
не зачтено	Уровень знаний ниже допустимого минимума. Студент не отвечает на вопросы или допускает грубые ошибки.

## 5.2. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине при промежуточной аттестации

### Шкала оценивания сформированности компетенций

Уровень сформированности компетенций (индикатора достижения компетенций)	плохо	неудовлетворительно	удовлетворительно	хорошо	очень хорошо	отлично	превосходно
	не зачтено			зачтено			
<u>Знания</u>	Отсутствие знаний теоретического материала. Невозможность оценить полноту знаний вследствие отказа обучающегося от ответа	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место грубые ошибки	Минимально допустимый уровень знаний. Допущено много негрубых ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько негрубых ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько несущественных ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Ошибок нет.	Уровень знаний в объеме, превышающем программу подготовки.
<u>Умения</u>	Отсутствие минимальных умений. Невозможность оценить наличие умений вследствие отказа обучающегося от ответа	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 полном объеме	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами.	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с отдельными несущественными недочетами, выполнены все задания в полном объеме	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без недочетов
<u>Навыки</u>	Отсутствие базовых навыков. Невозможность оценить наличие навыков вследствие отказа	При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые навыки. Имели место грубые ошибки	Имеется минимальный набор навыков для решения стандартных задач с	Продemonстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторым	Продemonстрированы базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и	Продemonстрированы навыки при решении нестандартных задач без	Продemonстрирован творческий подход к решению нестандартных задач

	обучающегося от ответа		некоторым и недочетами	и недочетами	недочетов	ошибок и недочетов	
--	---------------------------	--	------------------------------	-----------------	-----------	-----------------------	--

### Шкала оценивания при промежуточной аттестации

Оценка		Уровень подготовки
зачтено	превосходно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «превосходно», продемонстрированы знания, умения, владения по соответствующим компетенциям на уровне выше предусмотренного программой
	отлично	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично».
	очень хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо»
	хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо».
	удовлетворительно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «удовлетворительно», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «удовлетворительно»
не зачтено	неудовлетворительно	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно».
	плохо	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

### 5.3 Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения на промежуточной аттестации с указанием критериев их оценивания:

#### 5.3.1 Типовые задания (оценочное средство - Контрольные вопросы) для оценки сформированности компетенции ПК-1

1. Классификация задач оптимальной обработки сигналов. Статистическая модель канала связи. Оптимальное обнаружение, различение, измерение параметров, фильтрация сигналов.

2. Оптимальное обнаружение сигналов при дискретных наблюдениях. Двухальтернативная постановка задачи. Критерий идеального наблюдателя. Отношение правдоподобия. Структурная схема оптимального обнаружителя. Геометрическая интерпретация. Достаточная статистика. Другие критерии оптимальности.

3. Обнаружение детерминированных полезных сигналов на фоне гауссовских помех.

Модель сигналов и наблюдений. Правило обнаружения в общем случае коррелированных отсчетов шума. Различные схемы реализации оптимального обнаружителя.

4 Оптимальное обнаружение сигналов при непрерывных наблюдениях.

Функционал отношения правдоподобия. Случай обнаружения детерминированного сигнала на фоне белого гауссовского шума. Корреляционный приемник. Согласованный фильтр. Характеристики согласованного фильтра. Отношение сигнал/шум на выходе согласованного фильтра.

5. Оптимальные и согласованные линейные фильтры. Максимизация отношения сигнал/шум. Постановка и решение задачи максимизации отношения сигнал/шум линейными системами (детерминированный полезный сигнал на фоне шума с заданной спектральной плотностью мощности). Импульсная и частотная характеристика оптимального фильтра

6. Реализация оптимального фильтра с помощью выбеливающего фильтра и согласованного фильтра. Пример физически реализуемого «обеляющего» фильтра. Сравнение с задачей обнаружения сигналов на фоне шумов

7. Анализ эффективности оптимального обнаружителя. Показатели качества обнаружителя – вероятности ложной тревоги, пропуска цели, полной вероятности ошибочных решений в случае аддитивного белого гауссовского шума. Обобщение результатов в случае коррелированных шумов. Кривые обнаружения в случае использования критерия Неймана-Пирсона.

8. Оптимальное обнаружение квазидетерминированных сигналов при непрерывных наблюдениях. Постановка и решение задачи в случае критерия идеального наблюдателя. Условное отношение правдоподобия. Схема реализации оптимального обнаружителя. Влияние априорной информации на качество обнаружения.

9. Обнаружение радиосигнала со случайной начальной фазой. Достаточная статистика и различные схемы реализации: корреляционный квадратурный оптимальный обнаружитель, согласованный фильтр с квадратурными сигналами и оптимальный некогерентный приемник (с линейным детектором огибающей узкополосного сигнала). Анализ характеристик некогерентного приемника-обнаружителя. Распределения Релея и Райса для огибающей узкополосного гауссовского радиосигнала. Геометрическая интерпретация.

10. Оптимальное обнаружение радиосигнала со случайной начальной фазой и случайной амплитудой. Модель федингующего радиосигнала. Отношение правдоподобия в случае сигнала с амплитудой, распределенной по Релею. Обобщение на случай произвольного априорного распределения амплитуды сигнала. Анализ эффективности оптимального обнаружителя. Сравнение различных схем обработки. Влияние априорной информации на качество обнаружения.

11. Оптимальное оценивание параметров сигналов. Постановка задачи. Байесовские оценки. Функции потерь - квадратичная, в виде модуля линейной функции, простая функция потерь. .

12. Оптимальные оценки – в среднеквадратичном смысле (МСКО), медианная и оценка по критерию максимума апостериорной вероятности (МАВ). Структурные схемы реализации алгоритмов оценивания. Сравнение оценок МСКО и МАВ. Пример оценивания неизвестного постоянного случайного напряжения

13. Оценки максимального правдоподобия (МП). Пример оценивания среднего значения и дисперсии по выборке независимых гауссовских шумов

14. Оценки максимального правдоподобия параметров детерминированного радиосигнала на фоне белого гауссовского шума. Многоканальная схема реализации алгоритма МП оценивания параметров радиосигналов.

15. Энергетические и неэнергетические параметры. Примеры: оценка амплитуды детерминированного радиосигнала, оценка начальной фазы радиоимпульса, оценка временного положения детерминированного сигнала. Различные схемы реализации оптимальных алгоритмов.

16. Точность оценок МП. Дисперсия оптимальной оценки в первом приближении при большом отношении сигнал/шум.

### Критерии оценивания (оценочное средство - Контрольные вопросы)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Уровень знаний соответствует программе подготовки.
не зачтено	Уровень знаний ниже допустимого минимума. Студент не отвечает на вопросы или допускает грубые ошибки.

### 5.3.2 Типовые задания (оценочное средство - Задачи) для оценки сформированности компетенции ПК-1

#### Вариант 1

##### Задача 1.

Постоянный сигнал  $m$  на выходе приемника маскируется аддитивным стационарным гауссовым шумом:  $x(t) = m + \chi(t)$ . Вероятность наличия сигнала ( $I=1$ ) равна  $p$ , а отсутствия ( $I=0$ ) –  $q=1-p$ . Производится  $N$  выборок выходного процесса через одинаковый интервал  $Dt$ , превышающий время корреляции шума. Найти алгоритм обработки отсчетов, минимизирующий полную вероятность ошибки обнаружения сигнала. Проанализировать, как зависит минимальная вероятность ошибки  $P_{ош}$  от таких параметров, как  $N$ ,  $S\chi$ ,  $m$ , положив  $P=0,5$  ( $m$  – известная детерминированная константа).

##### Задача 2.

Построить критерий отношения правдоподобия для проверки гипотез:

$$H_1: W_1(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2}, \quad -\infty < x < \infty;$$

$$H_0: W_0(x) = \begin{cases} 1/2 & \text{при } -1 < x < 1; \\ 0 & \text{при других } x. \end{cases}$$

а). при пороге, равном единице, найти область решения

б). использовать критерий Неймана-Пирсона при вероятности ложной тревоги  $P_{fa}=\alpha$

##### Задача 3



Пусть наблюдается единичный отсчет  $x[0]=A+w[0]$ , где  $w[0] \sim N(0, \sigma^2)$ . Найти границу Крамера-Рао для постоянной  $A$

#### Задача 4.

Пусть имеются наблюдения  $x[n]=A+w[n]$ ,  $n=0,1,\dots,N-1$ , где  $w[n]$ - БГШ. Найти границу Крамера-Рао для постоянной  $A$

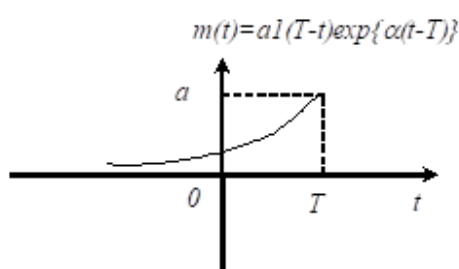
#### Задача 5.

Пусть наблюдается сумма сигнала и шума

$$X[n]=A\cos(2\pi f_0 n + \Phi) + w[n], \quad n=0,1,2,\dots,N-1,$$

где  $w[n]$ - БГШ,  $w[n] \sim N(0, \sigma^2)$ , а амплитуда  $A$  и частота  $f_0$  считаются известными. Найти оценку фазы  $\Phi$ .

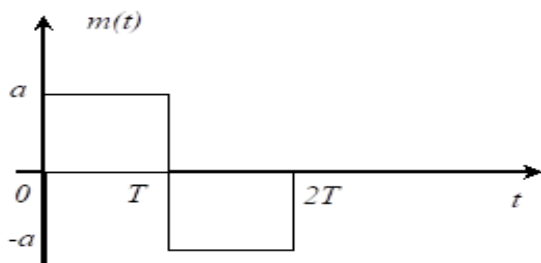
#### Задача 6.



На вход фильтра, согласованного с сигналом  $m(t)$  (см. рис.), поступает аддитивная смесь сигнала и "белого" шума  $x(t)=m(t)+\xi(t)$  ( $K_X[t]=D_X d(t)$ )

Найти импульсную переходную характеристику, отклик на полезный сигнал, корреляционную функцию шумовой составляющей на выходе, отношение сигнал/шум на выходе и предложить схему реализации фильтра.

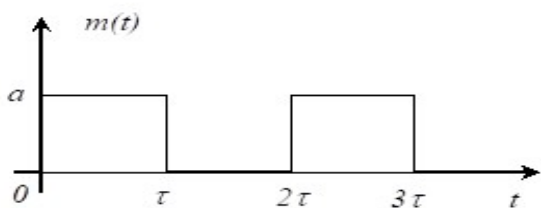
#### Задача 7.



На вход фильтра, согласованного с сигналом  $m(t)$  (см. рис.), поступает аддитивная смесь сигнала и "белого" шума  $x(t)=m(t)+\xi(t)$  ( $K_X[t]=D_X d(t)$ )

Найти импульсную переходную характеристику, отклик на полезный сигнал, корреляционную функцию шумовой составляющей на выходе, отношение сигнал/шум на выходе и предложить схему реализации фильтра.

#### Задача 8.



На вход фильтра, согласованного с сигналом  $m(t)$  (см. рис.), поступает аддитивная смесь сигнала и "белого" шума  $x(t)=m(t)+\xi(t)$  ( $K_X[t]=D_X d(t)$ )

Найти импульсную переходную характеристику, отклик на полезный сигнал, корреляционную функцию шумовой составляющей на выходе, отношение сигнал/шум на выходе и предложить схему реализации фильтра.

## Вариант 2

### Задача 1

Пусть  $\theta$  – случайный параметр и наблюдение  $Y$  имеет плотность распределения  $W(y/\theta) = (\theta/2)e^{-\theta|y|}$ , а априорное распределение параметра  $\theta$  таково, что

$$W(\theta) = \begin{cases} \frac{1}{\theta}, & 1 \leq \theta < e \\ 0, & \theta < 1; \theta > e \end{cases} \quad \text{Найти МАВ оценку } \theta.$$

### Задача 2

Пусть  $\theta$  – случайный параметр и наблюдение  $Y$  имеет плотность распределения  $W(y/\theta) = (\theta/2)e^{-\theta|y|}$ , а априорное распределение параметра  $\theta$  таково, что

$$W(\theta) = \begin{cases} \frac{1}{\theta}, & 1 \leq \theta < e \\ 0, & \theta < 1; \theta > e \end{cases} \quad \text{Найти МСКО оценку } \theta$$

### Задача 3

Пусть  $\theta$  – случайный параметр с априорной плотностью вероятности  $W(\theta) = \begin{cases} \alpha e^{-\alpha\theta}, & \theta \geq 0 \\ 0, & \theta < 0 \end{cases}$

где  $\alpha > 0$  – известный коэффициент. Наблюдаемая случайная величина подчиняется закону Пуассона

$$P(y/\theta) = P(Y = y | \Theta = \theta) = \frac{\theta^y e^{-\theta}}{y!}, \quad y = 0, 1, 2, \dots \quad \text{Найти МАВ оценку параметра } \theta.$$

### Задача 5

Пусть  $\theta$  – случайный параметр с априорной плотностью вероятности

$$W(\theta) = \begin{cases} e^{-\theta}, & \theta \geq 0 \\ 0, & \theta < 0 \end{cases}$$

Случайная величина  $Y$  имеет условную плотность вероятности  $W(y/\theta) = 1/2 e^{-|y-\theta|}$   
Найти МАВ оценку параметра  $\theta$

### Задача 6

Пусть  $\theta$  – случайный параметр с априорной плотностью вероятности  $W(\theta) = \begin{cases} e^{-\theta}, & \theta \geq 0 \\ 0, & \theta < 0 \end{cases}$

Случайная величина  $Y$  имеет условную плотность вероятности  $W(y/\theta) = 1/2 e^{-|y-\theta|}$   
Найти МСКО оценку параметра  $\theta$

### Задача 7

Пусть наблюдается N отсчетов одинаково распределенных независимых случайных величин, имеющих гауссовскую плотность вероятностей:

$$W(x, \mu) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2}}$$

Найти оценку неизвестного параметра методом максимального правдоподобия.

### Задача 8

Пусть наблюдается N отсчетов одинаково распределенных независимых случайных величин, имеющих показательную плотность вероятностей:

$$W(x, \lambda) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x}, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}$$

Найти оценку неизвестного параметра методом максимального правдоподобия.

Наблюдаемая случайная величина подчиняется закону Пуассона

### Критерии оценивания (оценочное средство - Задачи)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Уровень знаний соответствует программе подготовки.
не зачтено	Уровень знаний ниже допустимого минимума. Студент не отвечает на вопросы или допускает грубые ошибки.

## 6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля)

Основная литература:

1. Тихонов Василий Иванович. Статистическая радиотехника. - М. : Советское радио, 1966. - 678 с. : ил. - 2.54., 3 экз.

Дополнительная литература:

1. Тихонов Василий Иванович. Статистическая радиотехника. - 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Радио и связь, 1982. - 624 с. : ил. - 2.90., 95 экз.

Программное обеспечение и Интернет-ресурсы (в соответствии с содержанием дисциплины):

1. [http://www.rfwave.unn.ru/sites/default/files/bolkhovskaya\\_2015\\_detection\\_theory\\_basis.pdf](http://www.rfwave.unn.ru/sites/default/files/bolkhovskaya_2015_detection_theory_basis.pdf)

## 7. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

Учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных образовательной программой, оснащены мультимедийным оборудованием (проектор, экран), техническими средствами обучения, компьютерами.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечены доступом в электронную информационно-образовательную среду.

Программа составлена в соответствии с требованиями ОС ННГУ по направлению подготовки/специальности 02.03.02 - Фундаментальная информатика и информационные технологии.

Автор(ы): Болховская Олеся Викторовна, кандидат физико-математических наук, доцент.

Рецензент(ы): Грязнова Ирина Юрьевна, кандидат физико-математических наук.

Заведующий кафедрой: Мальцев Александр Александрович, доктор физико-математических наук.

Программа одобрена на заседании методической комиссии от 18 декабря 2023г., протокол № 09/23.