

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»  
(Новосибирский государственный университет, НГУ)

**Физический факультет  
Кафедра квантовой электроники**



ТВЕРЖДАЮ  
Декан ФФ, д.ф.-м.н.  
В.Е.Блинов  
2022 г.

**Рабочая программа дисциплины  
Квантовое машинное обучение**

Направление подготовки **03.04.02 Физика**  
Направленность (профиль): **Общая и фундаментальная физика**

Форма обучения **Очная**

Семестр	Общий объем	Виды учебных занятий (в часах)				Промежуточная аттестация (в часах)				
		Контактная работа обучающихся с преподавателем			Самостоятельная работа, не включая период сессии	Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем			
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия			Консультации	Зачет	Дифференцированный зачет	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
3	72	16	16		18	18	2			2
Всего 72 часа / 2 зачётные единицы, из них: - контактная работа 36 часов										
Компетенции ПК-1										

Руководитель программы  
д.ф.-м.н.

И.Б. Логашенко

**Новосибирск, 2022**

## Содержание

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы. ....	3
2. Место дисциплины в структуре образовательной программы .....	4
3. Трудоёмкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем .....	4
4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведённого на них количества академических часов и видов учебных занятий. ....	5
5. Перечень учебной литературы. ....	7
6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся. ..	7
7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.....	7
8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине. ....	8
9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине.....	8
10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине. ....	8

**1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы.**

Дисциплина «Квантовое машинное обучение» относится к циклу специальных дисциплин. В результате освоения курса у студентов физического факультета должно сформироваться представление о фундаментальных принципах, на которых базируется машинное обучение, о различных квантовых алгоритмах и физических реализациях квантового машинного обучения. Квантовое машинное обучение активно развивается последние 20 лет. Данный курс является вводным с одной стороны в машинное обучение, с другой – погружает в область квантовых вычислений с целью изучения алгоритмов квантового машинного обучения. Таким образом, курс входит в «экосистему» курсов направления «Квантовые информационные технологии».

Целью курса является овладение базовыми понятиями машинного обучения, его применения в квантовой информатике, а также освоение методов решения задач машинного обучения с помощью квантовых схем.

Дисциплина нацелена на формирование у обучающегося профессиональной компетенции:

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
<p><b>ПК-1</b> Способен использовать специализированные знания в области физики при решении поставленных задач в научно-исследовательской деятельности в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.</p>	<p><b>ПК 1.1</b> Применяет специализированные знания в области физики при решении конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.</p> <p><b>ПК 1.2</b> Выбирает наиболее эффективные методы решения конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.</p>	<p><b>Знать</b> методы и способы постановки и решения задач исследования в области элементарных (атомных) процессов на поверхности кристалла при формировании низкоразмерных структур; основы физики поверхности, в том числе атомные механизмы формирования поверхности кристаллических тел, механизмы роста низкоразмерных структур, многослойных гетероструктурах, базовые определения физики твердого тела и кристаллофизики.</p> <p><b>Уметь</b> самостоятельно ставить и решать конкретные физические задачи научных исследований в области квантового машинного обучения с использованием современной аппаратуры и компьютерных технологий, применять полученные знания при решении задач и чтении оригинальных статей в области квантового машинного обучения, для разработки алгоритмов квантового машинного обучения;</p> <p><b>Владеть</b> навыками постановки и решения задач научных исследований в области квантового машинного обучения с помощью современных методов и средств теоретических и экспериментальных исследований, базовыми принципами разработки классических и квантовых алгоритмов машинного обучения, моделирования процесса квантового машинного обучения.</p>

## 2. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Дисциплина реализуется в осеннем семестре 2-го курса магистратуры для студентов, обучающихся по направлению подготовки 03.04.02 Физика. Курс является одной из профессиональных дисциплин по выбору, реализуемых кафедрой квантовой электроники. Для освоения курса необходимы знания линейной алгебры (тензоры, линейные операторы, собственные числа, функции от матриц) и математического анализа, умение применять эти знания при решении задач, так как они составляют основу математического аппарата квантовой информатики. В цикле физических дисциплин: знание общей физики и квантовой механики. Курс предшествует выполнению квалификационной работы студента по данной специализации, так как дает ему необходимые знания, навыки и предоставляет инструменты для выполнения научных исследований в рамках подготовки его квалификационной работы.

## 3. Трудоёмкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем

Семестр	Общий объем	Виды учебных занятий (в часах)				Промежуточная аттестация (в часах)				
		Контактная работа обучающихся с преподавателем			Самостоятельная работа, не включая период сессии	Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем			
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия			Консультации	Зачет	Дифференцированный зачет	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
3	72	16	16		18	18	2			2
Всего 72 часа / 2 зачётные единицы, из них: - контактная работа 36 часа										
Компетенции ПК-1										

Реализация дисциплины предусматривает практическую подготовку при проведении следующих видов занятий, предусматривающих участие обучающихся в выполнении отдельных элементов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью.

Преподавание дисциплины предусматривает следующие формы организации учебного процесса: лекции, практические занятия, самостоятельная работа студента и ее контроль преподавателем, консультации, экзамен.

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля:

Текущий контроль успеваемости: контроль посещения, опрос по материалам пройденному материалу, решение задач.

Промежуточная аттестация: – экзамен.

Общая трудоёмкость рабочей программы дисциплины составляет 72 часа, 2 зачетных единицы:

- занятия лекционного типа – 16 часов;
- практические занятия – 16 часов;
- самостоятельная работа обучающегося в течение семестра, не включая период сессии – 18 часов.
- промежуточная аттестация (самостоятельная подготовка, консультация, экзамен) – 22 часа;
- Объём контактной работы обучающегося с преподавателем (занятия лекционного типа, практические занятия, консультации, экзамен) составляет 36 часов.

**4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведённого на них количества академических часов и видов учебных занятий.**

№ п/п	Раздел дисциплины	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоёмкость (в часах)				Промежуточная аттестация (в часах)
			Всего	Аудиторные часы		Сам. работа во время занятий (не включая период сессии)	
				Лекции	Практические занятия		
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Введение в квантовое машинное обучение <i>Домашнее задание</i>	1-4	10	4	4	2	
2	Обучение без учителя <i>Промежуточный контроль – выборочный опрос</i>	5-6	6	2	2	2	
3	Обучение с учителем, нейронные сети <i>Промежуточный контроль – выборочный опрос</i>	7-8	6	2	2	2	
4	Квантовая кластеризация <i>Промежуточный контроль – выборочный опрос, сдача и разбор домашнего задания</i>	9-10	8	2	2	4	
5	Квантовая классификация <i>Промежуточный контроль – выборочный опрос, сдача домашнего задания</i>	11-12	6	2	2	2	
6	Томография квантовых процессов <i>Разбор домашнего задания</i>	13-14	6	2	2	2	
7	Бустинг и адиабатические квантовые вычисления	15	4	1	1	2	
8	Квантовый подход к машинному обучению	16	4	1	1	2	
9	Самостоятельная подготовка обучающегося к экзамену		18				18
10	Групповая консультация		2				2
11	Экзамен		2				2
<b>ВСЕГО</b>				<b>16</b>	<b>16</b>	<b>18</b>	<b>24</b>

**Программа и основное содержание лекций (16 часов)**

**1. ВВЕДЕНИЕ В КВАНТОВОЕ МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ. (4 часа)**

- 1.1. Статистическая теория обучения.
- 1.2. Гибридные модели вычислений.
- 1.3. Квантовые подходы к классическому машинному обучению.
- 1.4. Признаковые пространства. Измерительные шкалы.
- 1.5. Сложность моделей.

- 1.6. Смешанные состояния и суперпозиция.
- 1.7. Квантовая относительная энтропия.

**2. ОБУЧЕНИЕ БЕЗ УЧИТЕЛЯ. (2 часа)**

- 2.1. Метод главных компонент.
- 2.2. Векторные представления в многообразиях.
- 2.3. Метод  $k$ -средних и  $k$ -медиан.
- 2.4. DBSCAN.

**3. ОБУЧЕНИЕ С УЧИТЕЛЕМ, НЕЙРОННЫЕ СЕТИ. (2 часа)**

- 3.1. Метод  $k$ -ближайших соседей.
- 3.2. Ядерные функции.
- 3.3. Принцип наименьших квадратов.
- 3.4. Многослойный перцептрон.
- 3.5. Глубокое обучение

**4. КВАНТОВАЯ КЛАСТЕРИЗАЦИЯ. (2 часа)**

- 4.1. Квантовая память случайного доступа.
- 4.2. Вычисление скалярного произведения.
- 4.3. Кластеризация  $k$ -средних.
- 4.4. Иерархическая кластеризация.

**5. КВАНТОВАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ. (2 часа)**

- 5.1. Квантовые нейросети. Физические реализации.
- 5.2. Квантовый  $k$ -ближайших соседей.
- 5.3. Квантовый метод главных компонент.
- 5.4. SVM с экспоненциальным ускорением.
- 5.5. Вычислительная сложность.
- 5.6. Вариационные схемы.

**6. ТОМОГРАФИЯ КВАНТОВЫХ ПРОЦЕССОВ. (2 часа)**

- 6.1. Двойственность каналов и состояний.
- 6.2. Квантовая томография состояний.
- 6.3. Сведения из теории групп и теории представлений.

**7. БУСТИНГ И АДИАБАТИЧЕСКИЕ КВАНТОВЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ. (1 час)**

- 7.1. Квантовый отжиг.
- 7.2. Модель Изинга.
- 7.3. QBoost.
- 7.4. Отображение на вычислительные узлы.

**8. КВАНТОВЫЙ ПОДХОД К МАШИННОМУ ОБУЧЕНИЮ. (1 час)**

- 8.1. Кодирование изображений квантовыми состояниями.
- 8.2. Квантовая семантика языка.
- 8.3. Суперпозиция обучающих выборок.

**Программа практических занятий (16 часов)**

1. Введение в квантовое машинное обучение. (4 часа)
2. Обучение без учителя. (2 часа)
3. Обучение с учителем, нейронные сети. (2 часа)
4. Квантовая кластеризация. (2 часа)

5. Квантовая классификация. (2 часа)
6. Томография квантовых процессов. (2 часа)
7. Бустинг и адиабатические квантовые вычисления. (1 час)
8. Квантовый подход к машинному обучению. (1 час)

### Самостоятельная работа студентов (36 часов)

Перечень занятий на СРС	Объем, час
Изучение теоретического материала, не освещаемого на лекциях	2
Решение задач	16
Подготовка к экзамену	18

#### 5. Перечень учебной литературы.

1. Павловский Е. Н. Квантовое машинное обучение [Электронный ресурс] : электронный учебно-методический комплекс / Е. Н. Павловский ; Новосиб. гос. ун-т. - Новосибирск, [2018]. - Режим доступа: <https://bigdata.nsu.ru/QML/> (доступ только для домена g.nsu.ru). - Загл. с экрана.

#### 6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся.

1. Chen G. et al. Learning Music Emotions via Quantum Convolutional Neural Network //International Conference on Brain Informatics. – Springer, Cham, 2017. – С. 49-58.
2. А.И. Иванов. Численная оценка показателей квантовой сцепленности выходных кубитнейросетевой молекулы преобразователя биометрических данных [Электронный ресурс] : учебное пособие. Пенза [2018]. – Издательство АО «Пензенский научно-исследовательский электротехнический институт» (АО «ПНИЭИ») – 27 с. Свободный доступ: <http://пниэи.пф/activity/science/noc/BOOK18-2.pdf>.
3. Zhang H. et al. mixup: Beyond empirical risk minimization //arXiv preprint arXiv:1710.09412. – 2017.
4. Inoue H. Data augmentation by pairing samples for images classification //arXiv preprint arXiv:1801.02929. – 2018.
5. Tokozume Y., Ushiku Y., Harada T. Between-class learning for image classification //Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2018. – С. 5486-5494.
6. Guo H., Mao Y., Zhang R. MixUp as Locally Linear Out-Of-Manifold Regularization //arXiv preprint arXiv:1809.02499. – 2018.
7. Verma V. et al. Manifold Mixup: Learning Better Representations by Interpolating Hidden States. – 2018.
8. Schuld M., Petruccione F. Supervised Learning with Quantum Computers. – Springer, 2018. DOI 10.1007/978-3-319-96424-9 URL: <https://link.springer.com/book/10.1007%2F978-3-319-96424-9>
9. P.Wittek Quantum Machine Learning: What Quantum Computing Means to Data Mining [Electronic resource] / Peter Wittek // Academic Press, preprint. - 2014. -199p.URL: [https://www.researchgate.net/publication/264825604\\_Quantum\\_Machine\\_Learning\\_What\\_Quantum\\_Computing\\_Means\\_to\\_Data\\_Mining](https://www.researchgate.net/publication/264825604_Quantum_Machine_Learning_What_Quantum_Computing_Means_to_Data_Mining).

#### 7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.

- Для освоения дисциплины используются следующие ресурсы:
- электронная информационно-образовательная среда НГУ (ЭИОС);

- образовательные интернет-порталы:
- информационно-телекоммуникационная сеть Интернет.

### **7.1 Современные профессиональные базы данных**

Не используются

### **7.2. Информационные справочные системы**

Не используются.

## **8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.**

Для обеспечения реализации дисциплины используется стандартный комплект программного обеспечения (ПО), включающий регулярно обновляемое лицензионное ПО Windows и MSOffice.

Использование специализированного программного обеспечения для изучения дисциплины не требуется.

## **9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине.**

Для реализации дисциплины используются специальные помещения:

1. Учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа, практических занятий, курсового проектирования (выполнения курсовых работ), групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля, промежуточной и итоговой аттестации.

2. Помещения для самостоятельной работы обучающихся.

Учебные аудитории укомплектованы специализированной мебелью и техническими средствами обучения, служащими для представления учебной информации большой аудитории.

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

Материально-техническое обеспечение образовательного процесса по дисциплине для обучающихся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья осуществляется согласно «Порядку организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам для инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья в Новосибирском государственном университете».

## **10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.**

### **10.1 Порядок проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине**

#### ***Текущий контроль***

Текущий контроль осуществляется путем контроля посещения лекций и практических занятий, опроса по пройденному материалу, проверкой решения задач.

#### ***Промежуточная аттестация***

Освоение компетенций оценивается согласно шкале оценки уровня сформированности компетенции. Положительная оценка по дисциплине выставляется в том случае, если заявленная компетенция ПК-1 сформирована не ниже порогового уровня в части, относящейся к формированию способности использовать специализированные знания в области статистической оптики в профессиональной деятельности.

Окончательная оценка работы студента в течение семестра происходит на экзамене. Экзамен проводится в конце семестра в устной форме.



Вывод об уровне сформированности компетенций принимается преподавателем. Каждый вопрос билета оценивается от 0 до 5 баллов. Положительная оценка ставится, когда все компетенции освоены не ниже порогового уровня. Оценки «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» означают успешное прохождение промежуточной аттестации.

### Соответствие индикаторов и результатов освоения дисциплины

Таблица 10.1

Индикатор	Результат обучения по дисциплине	Оценочные средства
<p><b>ПК 1.1</b> Применяет специализированные знания в области физики при решении конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.</p>	<p><b>Знать</b> методы и способы постановки и решения задач исследования в области элементарных (атомных) процессов на поверхности кристалла при формировании низкоразмерных структур; основы физики поверхности, в том числе атомные механизмы формирования поверхности кристаллических тел, механизмы роста низкоразмерных структур, многослойных гетероструктурах, базовые определения физики твердого тела и кристаллофизики.</p>	<p>Опрос в начале каждой лекции, экзамен.</p>
<p><b>ПК 1.2</b> Выбирает наиболее эффективные методы решения конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.</p>	<p><b>Уметь</b> самостоятельно ставить и решать конкретные физические задачи научных исследований в области квантового машинного обучения с использованием современной аппаратуры и компьютерных технологий, применять полученные знания при решении задач и чтении оригинальных статей в области квантового машинного обучения, для разработки алгоритмов квантового машинного обучения;</p> <p><b>Владеть</b> навыками постановки и решения задач научных исследований в области квантового машинного обучения с помощью современных методов и средств теоретических и экспериментальных исследований, базовыми принципами разработки классических и квантовых алгоритмов машинного обучения, моделирования процесса квантового машинного обучения.</p>	<p>Опрос в начале каждой лекции, экзамен.</p>

## 10.2 Описание критериев и шкал оценивания индикаторов достижения результатов обучения по дисциплине «Квантовое машинное обучение».

Таблица 10.2

Критерии оценивания результатов обучения	Планируемые результаты обучения (показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)	Уровень освоения компетенции			
		Не сформирован (0 баллов)	Пороговый уровень (3 балла)	Базовый уровень (4 балла)	Продвинутый уровень (5 баллов)
1	2	3	4	5	6
Полнота знаний	ПК 1.1	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имеют место грубые ошибки.	Демонстрирует общие знания базовых понятий по темам/разделам дисциплины. Допускается значительное количество негрубых ошибок.	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Допускается несколько негрубых/несущественных ошибок. Не отвечает на дополнительные вопросы.	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Свободно и аргументированно отвечает на дополнительные вопросы.
Наличие умений	ПК 1.2	Отсутствие минимальных умений. Не умеет решать стандартные задачи. Имеют место грубые ошибки.	Продемонстрированы частично основные умения. Решены типовые задачи. Допущены негрубые ошибки.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задания с негрубыми ошибками или с недочетами.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задания в полном объеме без недочетов и ошибок.
Наличие навыков (владение опытом)	ПК 1.2	Отсутствие владения материалом по темам/разделам дисциплины. Нет навыков в решении стандартных задач. Наличие грубых ошибок.	Имеется минимальный набор навыков при решении стандартных задач с некоторыми недочетами.	Имеется базовый набор навыков при решении стандартных задач с некоторыми недочетами.	Имеется базовый набор навыков при решении стандартных задач без ошибок и недочетов. Продемонстрированы знания по решению нестандартных задач.

## 10.3 Типовые контрольные задания и материалы, необходимые для оценки результатов обучения

### Задачи для самостоятельного решения

1. Реализовать структуру глубокой нейросети на языке Python с абстракцией функции активации и типизацией слоёв (полносвязный – для порогового уровня, сверточный – для базового уровня, LSTM – для продвинутого уровня).

2. Написать классификатор рукописных цифр с использованием свёрточной нейронной сети. Вывести матрицу соответствий.
3. Реализовать кодирование пикселей в виде квантовых состояний и закодировать изображение в виде смеси квантовых состояний.
4. Реализовать на языке Python кроссэнтропийную функцию потерь.
5. Реализовать выходной слой нейросети как матрицу плотности.
6. Реализовать функцию потерь в виде квантовой относительной энтропии.
7. Реализовать квантовую нейронную сеть для задачи распознавания эмоций в музыке. Продемонстрировать результаты, сравнимые со статьёй [1].
8. Реализовать квантовый алгоритм кластеризации  $k$ -средних (пороговый уровень), продемонстрировать корректность на симуляторе Cirq.
9. Реализовать квантовый алгоритм классификации  $k$ -ближайших соседей (базовый уровень), продемонстрировать корректность на симуляторе Cirq.
10. Реализовать нейросетевую молекулу [2] как модель кубита для задач биометрической идентификации (продвинутой).

### Пример билета к экзамену

1. Квантовые подходы к классическому машинному обучению.
2. Признаковые пространства. Измерительные шкалы. Представление информации для квантовых алгоритмов.

Форма экзаменационного билета представлена на рисунке

<p><b>МИНОБРНАУКИ РОССИИ</b></p> <p><i>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования</i></p> <p><i>«Новосибирский национальный исследовательский государственный университет» (Новосибирский государственный университет, НГУ)</i></p> <p><b>Физический факультет</b></p>
<p><b>ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № _____</b></p> <p>1. ....</p> <p>2. ....</p> <p>Составитель _____ /Ф.И.О. преподавателя/ (подпись)</p> <p>« ____ » _____ 20 ____ г.</p>

Оценочные материалы по промежуточной аттестации, предназначенные для проверки соответствия уровня подготовки по дисциплине требованиям СУОС, хранятся на кафедре-разработчике РПД в печатном и электронном виде.

