**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение**

**высшего образования**

**«Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»**

**Кафедра квантовой электроники**

УТВЕРЖДАЮ

Декан ФФ НГУ

Чл.-к. РАН\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ А. Е. Бондарь

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_\_\_\_2018 г.

**Квантовое машинное обучение**

Учебно-методический комплекс

**Физический факультет**

Направление подготовки

**03.04.02 Физика (уровень магистратуры)**

**Курс 2, семестр 3**

Профиль:

**Физика оптических явлений**

Форма обучения

**Очная**

**Новосибирск 2018**

Учебно-методический комплекс «Квантовое машинное обучение» предназначен для студентов магистратуры физического факультета НГУ, разработан в 2018 согласно требованиям Порядка организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам высшего образования от 05.04.2017г. и решению УС ФФ (протокол № 167 от 21.03.2018).В состав комплекса включены рабочая программа дисциплины «Квантовое машинное обучение», банк обучающих материалов, банк контролирующих материалов, фонд оценочных средств.

УМК одобрен на заседании кафедры Квантовой Электроники ФФ НГУ **04 апреля 2018 года, протокол № 1**

Разработчик: к.ф.-м.н. Е.Н. Павловский

Заведующий кафедрой КвЭл ФФ НГУ

академик РАН С.Н. Багаев

СОГЛАСОВАНО:

Ответственный за образовательную программу

заместитель декана ФФ по учебной работе

профессор, д.ф.-м.н. С.В. Цыбуля

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение**

**высшего образования**

**«Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»**

**Кафедра квантовой электроники**

УТВЕРЖДАЮ

Декан ФФ НГУ

Чл.-к. РАН\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ А. Е. Бондарь

«\_\_\_\_\_»\_\_\_\_\_\_\_\_2018 г.

**Квантовое машинное обучение**

Рабочая программа дисциплины

**Физический факультет**

Направление подготовки

**03.04.02 Физика (уровень магистратуры)**

**Курс 2, семестр 3**

Профиль:

**Физика оптических явлений**

Форма обучения

**Очная**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Семестр** | **Общий**  **объем** | **Виды учебных занятий (в часах)** | | | | | | **Промежуточная аттестация**  **(в период сессии) (в часах)** | | | | |
| Контактная работа обучающихся  с преподавателем | | | | | Самостоятельная работа, не включая период сессии | Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации | Контактная работа  обучающихся с  преподавателем | | | |
| Лекции | | Семинары | Практические занятия | Лабораторные занятия | Консультации | Зачет | Дифференцированный зачет | Экзамен |
| 1 | 2 | 3 | | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 3 | 72 | 16 | | 16 |  |  | 18 | 18 | 2 |  |  | 2 |
| Всего 72 часа / 2 зачетных единицы  из них:  - контактная работа 36 часов  - в интерактивных формах 16 часов | | | | | | | | | | | | |
| Компетенции | | | ПК-1, ПК-2 | | | | | | | | | |

**Новосибирск 2018**

Рабочая программа дисциплины «Квантовое машинное обучение», предназначенная для магистрантов физического факультета НГУ, разработана в 2018 году согласно требованиям Порядка организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам высшего образования от 05.04.2017г. и решению УС ФФ (протокол № 167 от 21.03.2018).

Место дисциплины в структуре учебного плана

Б.1 «Вариативная часть».

Рабочая программа дисциплины одобрена на заседании кафедры Квантовой Электроники ФФ НГУ **04 апреля 2018 года, протокол № 1**

Разработчик: к.ф.-м.н. Е.Н. Павловский

Заведующий кафедрой КвЭл ФФ НГУ

академик РАН С.Н. Багаев

СОГЛАСОВАНО:

Ответственный за образовательную программу

заместитель декана ФФ по учебной работе

профессор, д.ф.-м.н. С.В. Цыбуля

**Содержание**

Аннотация ..6

1. Цели освоения дисциплины 6

2. Место дисциплины в структуре ООП 6

3. Компетенции обучающегося, формируемые при освоении дисциплины 7

4. Структура и содержание дисциплины 7

5. Образовательные технологии ….9

6. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов...10

7. Фонд оценочных средств для проведения аттестации по итогам освоения

дисциплины: показатели, критерии оценивания компетенций, типовые

контрольные задания………………………………………………………….10

8. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

Рекомендованная литература к теоретическому курсу 10

9. Материально-техническое обеспечение дисциплины 11

**Аннотация**

Программа курса **«Квантовое машинное обучение»** составлена в соответствии с требованиями к обязательному минимуму содержания и уровню подготовки магистра по направлению подготовки03.04.02 Физика (уровень магистратуры), а также задачами, стоящими перед Новосибирским государственным университетом по реализации Программы развития НГУ. Дисциплина реализуется на физическом факультете федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет» (Новосибирский государственный университет, НГУ) кафедрой квантовой электроники. Дисциплина изучается студентами второго курса магистратуры физического факультета.

Преподавание дисциплины предусматривает следующие формы организации учебного процесса: лекции, семинары, контрольные работы, домашние задания, консультации, самостоятельная работа студента, экзамен.

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля:

Текущий контроль: выборочный опрос, контрольные, домашнее задание.

Промежуточная аттестация: экзамен.

Общая трудоемкость рабочей программы дисциплины составляет 2 зачетные единицы:

* занятия лекционного типа – 20 часов;
* занятия семинарского типа – 12 часов;
* самостоятельная работа обучающегося в течение семестра, не включая период сессии – 18 часов;
* промежуточная аттестация (подготовка к сдаче экзамена, консультация и экзамен) – 22 часов;

Объём контактной работы обучающегося с преподавателем (занятия лекционного типа, семинарского типа, групповые консультации, экзамен) составляет 36 часов. Работа с обучающимися в интерактивных формах составляет 16 часов.

## Цели освоения дисциплины

Цели курса – овладение базовыми понятиями современной квантовой информатики.

## Место дисциплины в структуре образовательной программы:

Курс «Квантовое машинное обучение» является дисциплиной специализации в образовательной магистерской программе «Квантовые информационные технологии», содержит одну часть годового цикла и необходим для овладения основными представлениями современной квантовой информатики.

Курс 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. 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. Выбор физических дисциплин, знание которых необходимо для освоения курса, обусловлен тем, что квантовая информатика опирается на квантовые свойства физических систем, а различные экспериментальные реализации квантовых вычислений имеют специфические свойства, индивидуальные для каждой физической системы.

Квантовое машинное обучение развивается в 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 «Квантовая информационные технологии».

1. **Компетенции обучающегося, формируемые при освоении дисциплины**

Дисциплина нацелена на формирование у выпускника следующих компетенций:

**научно-исследовательская деятельность:**

ПК-1: способность самостоятельно ставить конкретные задачи научных исследований в области квантового машинного обучения и решать их с помощью современной аппаратуры и информационных технологий с использованием новейшего российского и зарубежного опыта, в том числе:

ПК 1.1: знать методы и способы постановки и решения задач физических исследований в области квантового машинного обучения, возможности, методы и системы компьютерных технологий для физических теоретических и экспериментальных исследований в данной области.

ПК 1.2: уметь самостоятельно ставить и решать конкретные физические задачи научных исследований в области квантового машинного обучения с использованием современной аппаратуры и компьютерных технологий.

ПК 1.3: владеть навыками постановки и решения задач научных исследований в области квантового машинного обучения с помощью современных методов и средств теоретических и экспериментальных исследований.

**научно-инновационная деятельность:**

ПК-2: способность свободно владеть разделами физики, необходимыми для решения научно-инновационных задач в области квантового машинного обучения

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

ПК-2.1 знать: основные принципы квантового машинного обучения, свойства нейронных сетей, принципы квантовой кластеризации, принципы адиабатических квантовых вычислений.

ПК-2.2 уметь применять полученные знания при решении задач и чтении оригинальных статей в области квантового машинного обучения, для разработки алгоритмов квантового машинного обучения;

ПК-2.3 владеть базовыми принципами разработки классических и квантовых алгоритмов машинного обучения, моделирования процесса квантового машинного обучения.

1. **Структура и содержание дисциплины «Квантовое машинное обучение»**

Общая трудоемкость дисциплины составляет 2зачетных единицы, 72 часа.

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **№**  **п/п** | **Раздел**  **дисциплины** | **Неделя семестра** | **Всего** | **Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)** | | | **Промежуточная аттестация (в период сессии)**  **(в часах)** |
| Аудиторные часы | | Сам.работа в течение семестра (не включая период сессии) |
| Лекции  (кол-во часов) | Семинары  (кол-во  часов) |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 1 | Введение в квантовое машинное обучение  *Промежуточный контроль – домашнее задание* | 1 | 3 | 2 |  | 1 |  |
| 2 | Обучение без учителя  *Промежуточный контроль – выборочный опрос* | 2-3 | 6 | 2 |  | 2 |  |
| 3 | Обучение с учителем,нейронные сети, бустинг  *Промежуточный контроль – выборочный опрос* | 4–5 | 6 | 2 |  | 2 |  |
| 4 | Квантовая кластеризация  *Промежуточный контроль – выборочный опрос, сдача и разбор домашнего задания* | 6–7 | 7 | 2 | 4 | 3 |  |
| 5 | Квантовая классификация  *Промежуточный контроль – выборочный опрос, сдача домашнего задания* | 8-10 | 9 | 2 | 4 | 3 |  |
| 6 | Томография квантовых процессов  *Домашняя контрольно-графическая работа, разбор домашнего задания* | 11-12 | 7 | 2 | 4 | 3 |  |
| 7 | Бустинг и адиабатические квантовые вычисления | 13-14 | 6 | 2 | 2 | 2 |  |
| 8 | Квантовый подход к машинному обучению | 15-16 | 6 | 2 | 2 | 2 |  |
| 9 | Самостоятельная подготовка обучающегося к экзамену |  | 18 |  |  |  | 18 |
| 10 | Групповая консультация |  | 2 |  |  |  | 2 |
| 11 | Экзамен |  | 2 |  |  |  | 2 |
| **Всего** | | | **72** | **16** | **16** | **18** | **22** |

**Программа курса лекций**

* 1. Введение в квантовое машинное обучение.
  2. Статистическая теория обучения.
  3. Гибридные модели вычислений.
  4. Квантовые подходы к классическому машинному обучению.
  5. Признаковые пространства. Измерительные шкалы.
  6. Сложность моделей.
  7. Смешанные состояния и суперпозиция.
  8. Квантовая относительная энтропия.

1. Обучение без учителя*.*
   1. Метод главных компонент.
   2. Векторные представления в многообразиях.
   3. Метод *k*-средних и *k*-медиан.
   4. Иерархическая кластеризация, FRiS-Tax.
   5. DBSCAN.
2. Обучение с учителем, нейронные сети, бустинг.
   1. Метод *k-*ближайших соседей.
   2. Ядерные функции.
   3. Принцип наименьших квадратов.
   4. Многослойный перцептрон.
   5. Глубокое обучение.
   6. Слабые классификаторы, коллектив.
   7. AdaBoost.
3. Квантовая кластеризация
   1. Квантовая память случайного доступа.
   2. Вычисление скалярного произведения.
   3. Кластеризация k-средних.
   4. Иерархическая кластеризация.
4. Квантовая классификация.
   1. Квантовые нейросети. Физические реализации
   2. Квантовый*k-*ближайших соседей.
   3. Квантовый метод главных компонент.
   4. SVM с экспоненциальным ускорением.
   5. Вычислительная сложность.
5. Томография квантовых процессов.
   1. Двойственность каналов и состояний.
   2. Квантовая томография состояний.
   3. Сведения из теории групп и теории представлений.
6. Бустинг и адиабатические квантовые вычисления.
   1. Квантовый отжиг.
   2. Модель Изинга.
   3. QBoost.
   4. Отображение на вычислительные узлы.
7. Квантовый подход к машинному обучению.
   1. Кодирование изображений квантовыми состояниями.
   2. Квантовая семантика языка.
   3. Суперпозиция обучающих выборок.

# 5. Образовательные технологии

1. Интерактивные лекции с использованием Jupyter Notebook.
2. Математическое моделирование квантовых алгоритмов с использованием открытых программных средств, включая процессоры IBM и симуляторы на языках Q#, PyQuil.
3. Реферирование публикаций на английском языке.
4. Самостоятельная подготовка доклада с презентацией.
5. Выполнение заданий по написанию алгоритмов.

# Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов.

Предлагается подготовить расчетно-графическую работу на тему выполнения квантового алгоритма с использованием имеющихся в открытом доступе симуляторов квантовых вычислений и квантовых процессоров. Возможные темы работ:

1. Кластеризация Ирисов алгоритмом k-средних.
2. Кодирование изображений кубитами.
3. Создание суперпозиционных выборок изображений на примере MNIST.

Публикации для подготовки заданий:

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 кубит нейросетевой 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.pф/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.

# 7. Фонд оценочных средств для проведения аттестации по итогам освоения дисциплины: показатели, критерии оценивания компетенций, типовые контрольные задания

Оценочным средством для текущего контроля успеваемости в части самостоятельной работы является регулярная сдача-приемка домашних заданий и написание контрольной работы. Оценочным средством окончательного контроля является экзамен. Освоение компетенций оценивается по способности проводить самостоятельные исследования в области квантового машинного обучения и владению современным состоянием дел в этой области.

Освоение компетенций оценивается по пятибалльной шкале. Положительная оценка по дисциплине выставляется в том случае, если заявленные компетенции сформированы не ниже порогового уровня в полном объеме в той части, которая соответствует содержанию дисциплины.

## Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

Рекомендованная литература

1. **P.Wittek**Quantum Machine Learning: What Quantum Computing Means to Data Mining [Electornic 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>.
2. 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.

**8.1. Программное обеспечение для лиц с ограниченными возможностями здоровья**

Таблица 8.2

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **№** | **Наименование ПО** | **Назначение** | **Место размещения** |
| 1 | Jaws for Windows | Программа экранного доступа к системным и офисным приложениям, включая интернет-обозреватели. Информация с экрана считывается вслух, обеспечивая возможность речевого доступа к самому разнообразному контенту. Jaws также позволяет выводить информацию на обновляемый дисплей Брайля. JAWS включает большой набор клавиатурных команд, позволяющих воспроизвести действия, которые обычно выполняются только при помощи мыши. | Ресурсный центр, читальные залы библиотеки НГУ, компьютерные классы (сетевые лицензии) |
| 2 | Duxbury Braille Translator v11.3 для Брайлевского принтера | Программа перевода текста в текст Брайля, и печати на Брайлевском принтере | Ресурсный центр |
| 3 | "MAGic Pro 13" (увеличение+речь) | Программа для людей со слабым зрением и для незрячих людей. Программа позволяет увеличить изображение на экране до 36 крат, есть функция речевого сопровождения | Ресурсный центр, читальные залы библиотеки НГУ |

# Материально-техническое обеспечение дисциплины:

Требуется аудитория с использованием мультимедийного проектора и доступом в ЛВС НГУ.

Оборудование, обеспечивающее адаптацию электронных и печатных образовательных ресурсов для обучающиеся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья

Таблица 9.1

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **№** | **Наименование оборудования** | **Назначение** | **Место размещения** |
|  | Принтер Брайля | Печать рельефно-точечным шрифтом Брайля | Ресурсный центр |
|  | Увеличитель Prodigi Duo Tablet 24 | Устройство для чтения и увеличения плоскопечатного текста | Ресурсный центр, читальные залы библиотеки НГУ |
|  | Специализированное мобильное рабочее место «ЭлНот 311» | Мобильный компьютер с дисплеем брайля | Ресурсный центр |
|  | Портативный тактильный дисплей Брайля “Focus 40 Blue” | Навигация в операционных системах, программах и интернете с помощью отображения рельефно-точечным шрифтом Брайля получаемой информации | Ресурсный центр, читальные залы библиотеки НГУ |
|  | Устройство для печати тактильной графики «PIAF» | Печать тактильных графических изображений | Ресурсный центр |
|  | Портативный видео-увеличитель RUBY XL HD | Увеличение текста и подбор контрастных схем изображения | Ресурсный центр |
|  | Складной настольный электронный видео-увеличитель «TOPAZ PHD 15» | Увеличение текста и подбор контрастных схем изображения | Ресурсный центр |
|  | Электронный ручной видео-увеличитель ONYX Deskset HD 22” | Увеличение текста и подбор контрастных схем изображения | Ресурсный центр |
|  | Смартфон EISmart G3 | Смартфон клавишным управлением и озвученным интерфейсом, обучение спутниковой навигации. | Ресурсный центр |
|  | FM-система «Сонет-РСМ» РМ-3-1 | Звуковая FM-система для людей с нарушением слуха, улучшающая восприятие голосовой информации | Большая физическая аудитория главного корпуса НГУ |

**II. Банк обучающих материалов, рекомендации по организации самостоятельной работы студентов, выполнению курсовых проектов и лабораторных работ**

Студенты могут использовать обучающие материалы по языку программирования Python:

Программирование на Python – Stepik [Электронный ресурс]: электронный учебно-методический комплекс /Институт биоинформатики // Веб-сайт Stepik.org. – Москва, [2018]. – Режим доступа: <https://stepik.org/course/67/>. – Загл. с экрана.

Информацию по методам иерархической кластеризации и методу FRiS-Tax можно уяснить, используя открытый онлайн-курс:

Аналитика больших массивов данных [Электронный ресурс] : электронный учебно-методический комплекс / Е. Н. Павловский, Ю.А. Аникин, Н.Г. Загоруйко, И.А. Борисова, А.О. Зырянов; НОУ ИНТУИТ. - Москва, [2014]. - Режим доступа: <http://www.intuit.ru/studies/courses/12385/1181/info>. - Загл. с экрана.

Мультимедийные презентации с лекционным материалом:

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.

# III. Банк контролирующих материалов

Экзамен проходит в виде студенческих презентаций (длительностью 15-20 мин.), на которых студенты представляют результаты выполнения расчетно-графического задания, с ответами на вопросы преподавателя и студентов. Оценка выставляется в зависимости от качества презентации, полноты отражения темы презентации и полноты ответов на вопросы

1. Квантовые подходы к классическому машинному обучению.
2. Признаковые пространства. Измерительные шкалы. Представление информации для квантовых алгоритмов.
3. Кроссэнтропия. Квантовая относительная энтропия.
4. Функция эмпирического риска, вицинальный риск. Метод наименьших квадратов.
5. Функция потерь. Виды, примеры. Функция потерь в квантовых алгоритмах.
6. Метод главных компонент.Квантовый метод главных компонент
7. Векторные представления, матричные представления в многообразиях.
8. Метод k-средних: классический и квантовый.
9. Ядерные функции. SVM – классический и квантовый. Преимущества и недостатки.
10. Методы кластеризации, основанные на плотности.
11. Двойственность каналов и состояний. Квантовая томография состояний.
12. Теория групп и теория представлений для квантового машинного обучения.
13. Квантовый отжиг.
14. Модель Изинга.
15. QBoost.
16. Квантовая семантика языка.
17. Суперпозиция обучающих выборок.