

**Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)»**

**УТВЕРЖДЕНО**

**Директор физтех-школы  
прикладной математики и  
информатики**

**А.М. Райгородский**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Порождающие модели машинного обучения
<b>по направлению:</b>	Информатика и вычислительная техника
<b>профиль подготовки:</b>	Прикладная математика и информатика Физтех-школа Прикладной Математики и Информатики кафедра интеллектуальных систем
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 30 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 75 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Программу составил: Р.В. Исаченко, канд. физ.-мат. наук, ассистент

Программа обсуждена на заседании кафедры интеллектуальных систем 03.04.2024

## Аннотация

Целью курса является изучение фундаментальных основ построения современных порождающих моделей машинного обучения, современного состояния и тенденций развития области. Рассматриваются различные аспекты такого моделирования, классификация моделей и различные типы моделей.

### 1. Цели и задачи

#### Цель дисциплины

- изучение фундаментальных основ построения современных порождающих моделей машинного обучения, современного состояния и тенденций развития области.

#### Задачи дисциплины

- освоение студентами теоретической математической базы порождающего моделирования;
- приобретение практических умений и навыков реализации рассматриваемых моделей;
- оказание консультаций и помощи студентам в изучении современных научных статей, необходимых для их собственных теоретических исследований.

### 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ПК-2 Понимает и способен применить в научно-исследовательской и прикладной деятельности основные законы естествознания, современный математический аппарат и алгоритмы, современные информационно-коммуникационные технологии	ПК-2.1 Знает основы научно-исследовательской деятельности в области информационных технологий, владеет знанием основ философии и методологии науки; знанием методов научных исследований и навыками их проведения
	ПК-2.2 Умеет применять полученные знания в области фундаментальных научных основ теории информации и решать стандартные задачи в собственной научно-исследовательской деятельности
	ПК-2.3 Имеет практический опыт научно-исследовательской деятельности в области информационно-коммуникационных технологий
	ПК-2.4 Владеет методами и алгоритмами решения задач цифровой обработки сигналов, использования сети Интернет, аннотирования, реферирования, библиографического поиска, опыт работы с научными источниками
ПК-3 Владеет навыками участия в научных дискуссиях, выступления с сообщениями и докладами устного, письменного и виртуального (размещение в информационных сетях) характера, представления материалов собственных исследований	ПК-3.1 Знает основы ведения научной дискуссии и формы устного научного высказывания
	ПК-3.2 Умеет вести корректную дискуссию в области информационных технологий задавать вопросы и отвечать на поставленные вопросы по теме научной работы
	ПК-3.3 Имеет практический опыт участия в научных студенческих конференциях, очных, виртуальных, заочных обсуждениях научных проблем в области информационных технологий
ПК-1 Готов к включению в профессиональное сообщество; способен	ПК-1.1 Знает принципы построения научной работы, методы сбора и анализа полученного материала, способы аргументации; владеет навыками подготовки научных обзоров, публикаций, рефератов и библиографий по тематике проводимых исследований на русском и английском языке

проводить под научным руководством локальные исследования на основе существующих методов в конкретной области профессиональной деятельности

ПК-1.2 Умеет решать научные задачи с пониманием существующих подходов к верификации моделей программного обеспечения в связи с поставленной целью и в соответствии с выбранной методикой

ПК-1.3 Имеет практический опыт выступлений и научной аргументации при анализе объекта научной и профессиональной деятельности

### 3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- постановку задачи порождающего моделирования, основные математические подходы к решению задачи моделирования, методы доказательства основных теорем и утверждений.

уметь:

- анализировать современные теоретические научные статьи по теме, эффективно реализовывать рассмотренные модели с помощью современных библиотек глубокого обучения.

владеть:

- математическим аппаратом порождающего моделирования навыками реализации математического аппарата на практике.

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

#### 4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Авторегрессионное моделирование	3	3		6
2	Вариационный автокодировщик	3	3		6
3	Модели нормализующих потоков	3	3		8
4	Дискретные данные	3	3		8
5	Связь потоков и генеративных моделей	3	3		8
6	Модели состязательных генеративных сетей	2	2		9
7	Расстояние Вассерштайна.	3	3		6
8	Оценивание генеративных моделей	2	2		6
9	Дискретные скрытые пространства	3	3		6
10	Нейронные дифференциальные уравнения	3	3		6
11	Диффузионные модели	2	2		6
Итого часов		30	30		75
Подготовка к экзамену		0 час.			
Общая трудоёмкость		135 час., 3 зач.ед.			

#### 4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

Семестр: 1 (Осенний)

##### 1. Авторегрессионное моделирование

Введение в генеративное моделирование. Постановка задачи. Задача минимизации дивергенций. Авторегрессионное моделирование. Авторегрессионные модели (WaveNet, PixelCNN).

## 2. Вариационный автокодировщик

Основы байесовского вывода. Модели скрытых переменных. Вариационная нижняя оценка (ELBO). EM-алгоритм, амортизированный вывод. Градиенты ELBO, репараметризация. Вариационный автокодировщик (VAE). Недостатки VAE. Коллапс апостериорного распределения VAE. Техники ослабления декодера. Выборка по значимости для ELBO.

## 3. Модели нормализующих потоков

Якобиан и теорема о замене переменных. Модели нормализующих потоков. Прямая и обратная KL дивергенции. Линейные потоки (Glow). Авторегрессионные потоки (гауссовский и обраный гауссовский поток). Слой связи (RealNVP). Связь нормализующих потоков и VAE.

## 4. Дискретные данные

Дискретные данные, непрерывная модель. Дискретизация модели (PixelCNN++). Равномерная и вариационная деквантизации (Flow++).

## 5. Связь потоков и генеративных моделей

Теорема об операции над ELBO. Оптимальное априорное распределение в VAE. Потоки в априорном распределении VAE. Потоки в априорном и апостериорном распределении VAE.

## 6. Модели состязательных генеративных сетей

Неявные генеративные модели без оценки правдоподобия. Модель генеративных состязательных сетей (GAN). Теорема об оптимальности GAN. Проблемы обучения GAN моделей (затухающие градиенты, коллапс мод). KL дивергенция vs JS дивергенция. VAE с неявным энкодером.

## 7. Расстояние Вассерштайна.

Топологические особенности обучения GAN моделей. Расстояние Вассерштейна. Дуальность Канторовича-Рубинштейна. GAN Вассерштейна (WGAN). Модель WGAN с градиентным штрафом. Модель WGAN со спектральной нормализацией. Вариационная минимизация f-дивергенций.

## 8. Оценивание генеративных моделей

Оценивание качества неявных моделей. Оценивание качества неявных моделей (Inception score, FID, Precision-Recall, truncation trick).

## 9. Дискретные скрытые пространства

VAE с дискретным скрытым пространством. Векторная квантизация, сквозной градиент (VQ-VAE). Гумбель-софтмакс трюк (DALL-E).

## 10. Нейронные дифференциальные уравнения

Нейронные обыкновенные дифференциальные уравнения. Метод сопряженных функций. Непрерывные во времени нормализационные потоки (FFJORD). Несмещенная оценка следа матрицы.

## 11. Диффузионные модели

Основы стохастических дифференциальных уравнений. Уравнение Колмогорова-Фоккера-Планка и динамика Ланжевена. Методы оценивания score функции. Модели оценки score функции (NCSM). Гауссовский диффузионный процесс. Диффузионная генеративная модель (DDPM).

### 5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

Учебная аудитория, оснащенная компьютером и мультимедийным оборудованием (проектор, звуковая система).

### 6. Перечень рекомендуемой литературы

#### Основная литература

1. Глубокое обучение / Я. Гудфеллоу, И. Бенджио, А. Курвилль . — Москва, ДМК Пресс, 2018.— URL: <https://e.lanbook.com/book/107901> (дата обращения: 29.01.2021). - Полный текст (Режим доступа : из сети МФТИ / Удаленный доступ)
- Машинное обучение (курс лекций, К.В.Воронцов)/2009 (в электронном виде)(ссылку в учебно-методической литературе).

#### Дополнительная литература

1. Christopher Bishop, 2006, Pattern Recognition and Machine Learning
2. David Barber, 2014, Bayesian Reasoning and Machine Learning
3. Goodfellow, Ian, Yoshua Bengio, and Aaron Courville, 2016, Deep learning.
4. Kevin Murphy, 2022. Probabilistic Machine Learning: Advanced Topics.

Машинное обучение (курс лекций, Н.Ю.Золотых) <http://www.machinelearning.ru/wiki/index.php>  
Машинное обучение (курс лекций, СГАУ, С.Лисицын)  
<http://www.machinelearning.ru/wiki/index.php>

### 7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)

<http://www.machinelearning.ru/wiki/index.php>  
видео лекции  
[http://shad.yandex.ru/lectures/machine\\_learning.xml](http://shad.yandex.ru/lectures/machine_learning.xml)

### 8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)

Не требуется.

### 9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)

Студент, изучающий дисциплину, должен с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике. В результате изучения дисциплины студент должен знать основные определения, понятия, аксиомы, алгоритмы.

Успешное освоение курса требует напряжённой самостоятельной работы студента. В программе курса приведено минимально необходимое время для работы студента над темой. Самостоятельная работа включает в себя:

– чтение и конспектирование рекомендованной литературы;

- проработку учебного материала (по конспектам лекций, учебной и научной литературе), подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения, доказательство отдельных утверждений, свойств;
- подготовку к дифференцированному зачету.

Руководство и контроль за самостоятельной работой студента осуществляется в форме индивидуальных консультаций.

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями к лектору.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

**по направлению:** Информатика и вычислительная техника  
**профиль подготовки:** Прикладная математика и информатика  
Физтех-школа Прикладной Математики и Информатики  
кафедра интеллектуальных систем  
**курс:** 1  
**квалификация:** магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Дифференцированный зачет

**Разработчик:** Р.В. Исаченко, канд. физ.-мат. наук, ассистент

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ПК-2 Понимает и способен применить в научно-исследовательской и прикладной деятельности основные законы естествознания, современный математический аппарат и алгоритмы, современные информационно-коммуникационные технологии	ПК-2.1 Знает основы научно-исследовательской деятельности в области информационных технологий, владеет знанием основ философии и методологии науки; знанием методов научных исследований и навыками их проведения
	ПК-2.2 Умеет применять полученные знания в области фундаментальных научных основ теории информации и решать стандартные задачи в собственной научно-исследовательской деятельности
	ПК-2.3 Имеет практический опыт научно-исследовательской деятельности в области информационно-коммуникационных технологий
	ПК-2.4 Владеет методами и алгоритмами решения задач цифровой обработки сигналов, использования сети Интернет, аннотирования, реферирования, библиографического поиска, опыт работы с научными источниками
ПК-3 Владеет навыками участия в научных дискуссиях, выступления с сообщениями и докладами устного, письменного и виртуального (размещение в информационных сетях) характера, представления материалов собственных исследований	ПК-3.1 Знает основы ведения научной дискуссии и формы устного научного высказывания
	ПК-3.2 Умеет вести корректную дискуссию в области информационных технологий задавать вопросы и отвечать на поставленные вопросы по теме научной работы
	ПК-3.3 Имеет практический опыт участия в научных студенческих конференциях, очных, виртуальных, заочных обсуждениях научных проблем в области информационных технологий
ПК-1 Готов к включению в профессиональное сообщество; способен проводить под научным руководством локальные исследования на основе существующих методов в конкретной области профессиональной деятельности	ПК-1.1 Знает принципы построения научной работы, методы сбора и анализа полученного материала, способы аргументации; владеет навыками подготовки научных обзоров, публикаций, рефератов и библиографий по тематике проводимых исследований на русском и английском языке
	ПК-1.2 Умеет решать научные задачи с пониманием существующих подходов к верификации моделей программного обеспечения в связи с поставленной целью и в соответствии с выбранной методикой
	ПК-1.3 Имеет практический опыт выступлений и научной аргументации при анализе объекта научной и профессиональной деятельности

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Порождающие модели машинного обучения» обучающийся должен:

### знать:

- постановку задачи порождающего моделирования, основные математические подходы к решению задачи моделирования, методы доказательства основных теорем и утверждений.

### уметь:

- анализировать современные теоретические научные статьи по теме, эффективно реализовывать рассмотренные модели с помощью современных библиотек глубокого обучения.

### владеть:

- математическим аппаратом порождающего моделирования навыками реализации математического аппарата на практике.



### 3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю

С целью контроля освоения обучающимися учебного материала проводится устный опрос в начале занятия или в конце занятия по пройденной теме.

### 4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся

1. Введение в генеративное моделирование. Постановка задачи.
2. Задача минимизации дивергенций. Авторегрессионное моделирование.
3. Авторегрессионные модели (WaveNet, PixelCNN).
4. Основы байесовского вывода. Модели скрытых переменных.
5. Вариационная нижняя оценка (ELBO). EM-алгоритм, амортизированный вывод. Градиенты ELBO, репараметризация.
6. Вариационный автокодировщик (VAE). Недостатки VAE. Коллапс апостериорного распределения VAE.
7. Техники ослабления декодера. Выборка по значимости для ELBO.
8. Якобиан и теорема о замене переменных.
9. Модели нормализующих потоков.
10. Прямая и обратная KL дивергенции.
11. Линейные потоки (Glow). Авторегрессионные потоки (гауссовский и обранный гауссовский поток).
12. Слой связи (RealNVP). Связь нормализующих потоков и VAE.
13. Дискретные данные, непрерывная модель.
14. Дискретизация модели (PixelCNN++).
15. Равномерная и вариационная деквантизации (Flow++).
16. Связь потоков и генеративных моделей.
17. Теорема об операции над ELBO. Оптимальное априорное распределение в VAE.
18. Потоки в априорном распределении VAE.
19. Потоки в априорном и апостериорном распределении VAE.
20. Неявные генеративные модели без оценки правдоподобия.
21. Модель генеративных состязательных сетей (GAN). Теорема об оптимальности GAN.
22. Проблемы обучения GAN моделей (затухающие градиенты, коллапс мод).
23. KL дивергенция vs JS дивергенция. VAE с неявным энкодером.
24. Топологические особенности обучения GAN моделей.
25. Расстояние Вассерштейна.
26. Дуальность Канторовича-Рубинштейна.
27. GAN Вассерштейна (WGAN). Модель WGAN с градиентным штрафом.
28. Модель WGAN со спектральной нормализацией. Вариационная минимизация f-дивергенций.
29. Оценивание генеративных моделей.
30. Оценивание качества неявных моделей (Inception score, FID, Precision-Recall, truncation trick).
31. Дискретные скрытые пространства.
32. VAE с дискретным скрытым пространством. Векторная квантизация, сквозной градиент (VQ-VAE). Гумбель-софтмакс трюк (DALL-E).
33. Нейронные обыкновенные дифференциальные уравнения.
34. Метод сопряженных функций.
35. Непрерывные во времени нормализационные потоки (FFJORD). Несмещенная оценка следа матрицы.
36. Диффузионные модели.
37. Основы стохастических дифференциальных уравнений.
38. Уравнение Колмогорова-Фоккера-Планка и динамика Ланжевена.
39. Методы оценивания score функции. Модели оценки score функции (NCSM).
40. Гауссовский диффузионный процесс. Диффузионная генеративная модель (DDPM).

## Критерии оценивания

Оценка отлично 10 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 9 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 8 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.

Оценка хорошо 7 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка хорошо 6 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка хорошо 5 баллов - выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка удовлетворительно 4 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка удовлетворительно 3 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка неудовлетворительно 2 балла - выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка неудовлетворительно 1 балл - выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

## 5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности

Во время проведения дифференцированного зачета обучающиеся могут пользоваться программой дисциплины, а также справочной литературой, вычислительной техникой, конспектами лекций.

Дифференцированный зачет проводится путем организации специального опроса, проводимого в устной форме.