

**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

	Рабочая программа дисциплины (модуля)
по дисциплине:	Оптимальный транспорт в порождающем моделировании
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: 2 (весенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 15 час.

семинары: 15 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 60 час.

Всего часов: 90, всего зач. ед.: 2

Количество контрольных работ, заданий: 1

Программу составили:

Г.С. Ксенофонов, аспирант

М.И. Персиянов, аспирант

Программа обсуждена на заседании кафедры интеллектуальных систем 20.01.2025

Аннотация

Курс посвящён изучению методов оптимального транспорта и их применению в порождающем моделировании. В ходе изучения курса слушатели познакомятся с ключевыми понятиями оптимального транспорта, включая формулировки Монжа и Канторовича, расстояние Васерштейна и регуляризацию энтропией. Рассматриваются современные подходы, такие как нейронный оптимальный транспорт и их развитие в контексте порождающих задач.

Особое внимание уделяется мостам Шрёдингера, которые расширяют концепцию оптимального транспорта с использованием диффузионных процессов. Благодаря этим мостам устанавливается важная связь между различными порождающими парадигмами, такими как состязательные нейронные сети, диффузионные модели и нормализующие потоки.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

Освоение фундаментальных основ оптимального транспорта и его роли в современных задачах машинного обучения.

Задачи дисциплины

1. Освоение студентами теоретической математической базы оптимального транспорта.
2. Приобретение практических умений и навыков реализации моделей оптимального транспорта.
3. Исследовать современные проблемы оптимального транспорта.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области информатики и вычислительной техники, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
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-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-1.3 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 оптимального транспорта,
- основные математические подходы к решению задач оптимального транспорта,

уметь:

- анализировать современные научные статьи по теме оптимального транспорта в порождающем моделировании.
- эффективно реализовывать рассмотренные модели с использованием современных библиотек глубокого обучения.

владеть:

- математическим аппаратом оптимального транспорта,
- навыками практической реализации математического аппарата.

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	Классический оптимальный транспорт	2	2		10
2	Энтропийный оптимальный транспорт	2	2		10
3	Диффузия в оптимальном транспорте	2	2		10
4	Мосты Шрёдингера	2	2		10
5	Итеративная пропорциональная и марковская подгонка	2	2		10
6	Потоки в оптимальном транспорте	5	5		10
Итого часов		15	15		60
Подготовка к экзамену		0 час.			
Общая трудоёмкость		90 час., 2 зач.ед.			

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

Семестр: 2 (Весенний)

1. Классический оптимальный транспорт

Введение в оптимальный транспорт, формулировки Монжа и Канторовича, формулировка задачи доменной адаптации, нейронный оптимальный транспорт.

2. Энтропийный оптимальный транспорт

Энтропийный оптимальный транспорт и мосты Шрёдингера, энергетический подход для нейронного оптимального транспорта, основы диффузионных процессов.

3. Диффузия в оптимальном транспорте

Статическая постановка мостов Шрёдингера, связь мостов Шрёдингера с оптимальным транспортом и стохастическим оптимальным управлением, энтропийный нейронный оптимальный транспорт.

4. Мосты Шрёдингера

Динамическая постановка мостов Шрёдингера, алгоритмы итеративной пропорциональной подгонки решения задачи мостов Шрёдингера, score-based подход для аппроксимации алгоритма.

5. Итеративная пропорциональная и марковская подгонка

Алгоритмы итеративной марковской подгонки решения задачи мостов Шрёдингера, bridge-matching подход для аппроксимации алгоритма.

6. Потоки в оптимальном транспорте

Связь подхода bridge-matching с flow-matching, частный случай мостов Шрёдингера на основе flow-matching, rectified flows и другие методы выпрямления потоков.

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. Peyré, G. Computational Optimal Transport: With Applications to Data Science / G. Peyré, M. Cuturi // Foundations and Trends® in Machine Learning. – 2019. – Т. 11. – Computational Optimal Transport. – № 5-6. – С. 355-607.
2. Santambrogio, F. Optimal Transport for Applied Mathematicians: Calculus of Variations, PDEs, and Modeling : Progress in Nonlinear Differential Equations and Their Applications. Vol. 87. Optimal Transport for Applied Mathematicians / F. Santambrogio. – Cham : Springer International Publishing, 2015.
3. Figalli, A. An invitation to optimal transport, Wasserstein distances, and gradient flows : EMS Textbooks in Mathematics / A. Figalli, F. Glaudo. – Berlin : EMS Press, 2021. – 136 с.

Дополнительная литература

1. Villani, C. Optimal transport: old and new : Grundlehren der mathematischen Wissenschaften. Optimal Transport / C. Villani. – Berlin Heidelberg : Springer, 2009. – Вып. 338. – 973 с.
2. Ambrosio, L. Gradient flows: in metric spaces and in the space of probability measures : Lectures in mathematics ETH Zürich. Gradient flows / L. Ambrosio, N. Gigli, G. Savaré. – Boston : Birkhäuser, 2005. – 333 p.
3. Flow Matching Guide and Code / Y. Lipman, M. Havasi, P. Holderrieth, [и др.] arXiv:2412.06264 [cs]. – arXiv, 2024. – URL: <http://arxiv.org/abs/2412.06264> (дата обращения: 24.01.2025). – Текст : электронный.

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

- Вики кафедры: <http://www.machinelearning.ru/wiki/index.php>
- Сайт кафедры: <https://intsystems.github.io/>
- Сайт для поиска ответов на вопросы: <https://stackoverflow.com/>
- Сайт с данными: <https://www.kaggle.com/>

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

- видеоконференцсвязь: <https://www.zoom.com/>, <https://meet.google.com/>, <https://calls.vk.com/>
- мессенджер: <https://web.telegram.org/>

- система контроля версий: <https://github.com/>
- интерактивные ноутбуки: <https://colab.research.google.com/>

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 напряженной 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

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:	<u>1</u>
квалификация:	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Дифференцированный зачет

Разработчики:

Г.С. Ксенофонов, аспирант

М.И. Персиянов, аспирант

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области информатики и вычислительной техники, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
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-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-1.3 Имеет практический опыт выступлений и научной аргументации при анализе объекта научной и профессиональной деятельности

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Оптимальный транспорт в порождающем моделировании» обучающийся должен:

знать:

- постановку задачи оптимального транспорта,
- основные математические подходы к решению задач оптимального транспорта,

уметь:

- анализировать современные научные статьи по теме оптимального транспорта в порождающем моделировании.
- эффективно реализовывать рассмотренные модели с использованием современных библиотек глубокого обучения.

владеть:

- математическим аппаратом оптимального транспорта,
- навыками практической реализации математического аппарата.

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. Формулировки Монжа и Канторовича, формулировка задачи доменной адаптации.
2. Идея нейронного оптимального транспорта. Отличие такой постановки от GAN-based подходов.
3. Идея энергетического подхода для моделирования вероятностного многообразия данных.
4. Связь энергетических моделей и нейронного оптимального транспорта.

5. Основные понятия диффузионных процессов.
6. Статическая постановка мостов Шрёдингера.
7. Связь мостов Шрёдингера с оптимальным транспортом и стохастическим оптимальным управлением.
8. Энтропийный нейронный оптимальный транспорт.
9. Динамическая постановка мостов Шрёдингера.
10. Алгоритмы итеративной пропорциональной подгонки решения задачи мостов Шрёдингера.

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.