

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»
(СГУ)

Кафедра физики твёрдого тела

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

**МЕТОД РЕГИСТРАЦИИ И АНАЛИЗА ЛАЗЕРНОГО
ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО СИГНАЛА, ОСНОВАННЫЙ НА
АЛГОРИТМАХ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ**

студентки 4 курса 4051 группы

направления 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»

код и наименование направления

института физики

наименование факультета, института

Егоровой Аделины Александровны

фамилия, имя, отчество

Научный руководитель:

доцент, к.ф.-м.н., доцент

должность, уч. степень, уч. звание



подпись, дата

С.Ю. Добдин

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой:

профессор, д.ф.-м.н.

должность, уч. степень, уч. звание



подпись, дата

Ал.В. Скрипаль

инициалы, фамилия

Саратов 2025

ВВЕДЕНИЕ

Высокоточный контроль движения объектов в микро- и наномасштабах критически важен для микроэлектромеханических систем (MEMS) и прецизионных технологий. Лазерная интерферометрия, будучи неинвазивным методом с высокой разрешающей способностью, сталкивается с проблемами при анализе динамических перемещений в условиях нестационарности и шумовых помех. Традиционные подходы требуют значительных вычислительных ресурсов и бывают достаточно сложны для интерпретации.

В этой связи применение алгоритмов машинного обучения (МО) для обработки интерференционных сигналов представляется перспективным. МО обладает потенциалом для повышения точности, сокращения времени анализа и адаптации к нелинейным системам, преодолевая ограничения классических методов.

Цель работы: разработать метод регистрации и анализа лазерного интерференционного сигнала на основе алгоритмов машинного обучения.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

1. Провести анализ методов измерения параметров движения объекта, совершающего микро- и наноперемещения;
2. Разработать метод лазерной интерферометрии, позволяющий проводить измерения ускорения движения внешнего отражателя на основе алгоритмов машинного обучения;
3. Провести экспериментальные исследования, которые доказывают возможность применения разработанного метода для анализа параметров движения объекта.

Структура и объем работы: работа состоит из введения, 5-и глав, заключения, списка использованных источников и приложения А. Работа изложена на 58 страницах машинописного текста, содержит 23 рисунка, 10 таблиц и список литературы из 25 наименований. Приложение А содержит код программы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе работы изложены теоретические основы генерации лазерного излучения и принципы функционирования лазерных систем, являющиеся фундаментом для последующего рассмотрения методов интерферометрии.

Вторая глава посвящена анализу известных методов измерения ускорения. В ней рассмотрены и сравниваются следующие подходы: пьезоэлектрические датчики, лазерная интерферометрия (включая гомодинный и гетеродинный методы), полупроводниковый лазерный автодин, голографический метод и спекл-интерферометрический метод.

В третьей главе описываются алгоритмы машинного обучения, примененные в данной работе. Были исследованы следующие алгоритмы: линейная регрессия, полиномиальная регрессия, дерево решений, случайный лес, градиентный бустинг, а также модель стэкинга трех алгоритмов. Для повышения устойчивости моделей также рассмотрены методы регуляризации (L1 и L2).

В четвертой главе показан процесс компьютерного моделирования автодинного сигнала, с целью получить значения максимальной гармоник спектра автодинного сигнала и гармоники соответствующей середине спада.

Для задания траектории движения исследуемого объекта использовалась формула (рисунок 1):

$$f = V_0 + \left(\frac{a * t^2}{2}\right)$$

Где V_0 – начальная скорость движения отражателя,

a – ускорение внешнего отражателя,

t – время колебаний.

Впоследствии задали автодинный сигнал используя формулу (рисунок 2):

$$P = A * \cos\left(\theta + \frac{4\pi f}{\lambda}\right)$$

Где A – амплитуда движения,
 θ – набег фазы автодинного сигнала,
 λ – длина волны лазерного излучения.

Выполнили преобразование Фурье для получения спектра сигнала (рисунок 3). Нашли последнюю пиковую гармонику и записали её значение, а также значение гармоники соответствующей середине спада. Произвели данные манипуляции при различных значениях амплитуды колебаний внешнего отражателя. Из полученных значений, а также значения ускорения составили базу данных (рисунок 4).

При компьютерном моделировании сигнала полупроводникового лазерного автодина были использованный следующие параметры: длина волны излучения полупроводникового лазера составила $\lambda = 655$ нм, частота вибраций пьезокерамики $F = 80$ Гц, начальной скоростью движения $V_0 = 0$ м/сек, набег фазы автодинного сигнала $\theta = [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{4}]$ с шагом в $\frac{\pi}{6}$, ускорение $a = [1 * 10^{-6}, 5 * 10^{-5}]$ с шагом в $1 * 10^{-6}$ м/сек².

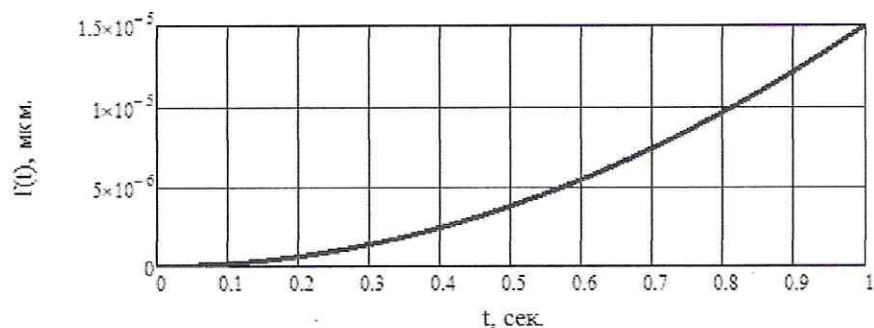


Рисунок 1 – Функция движения внешнего отражателя

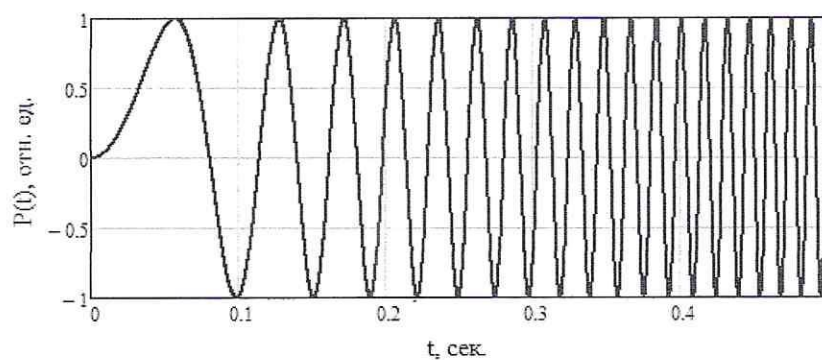


Рисунок 2 – Модель автодинного сигнала

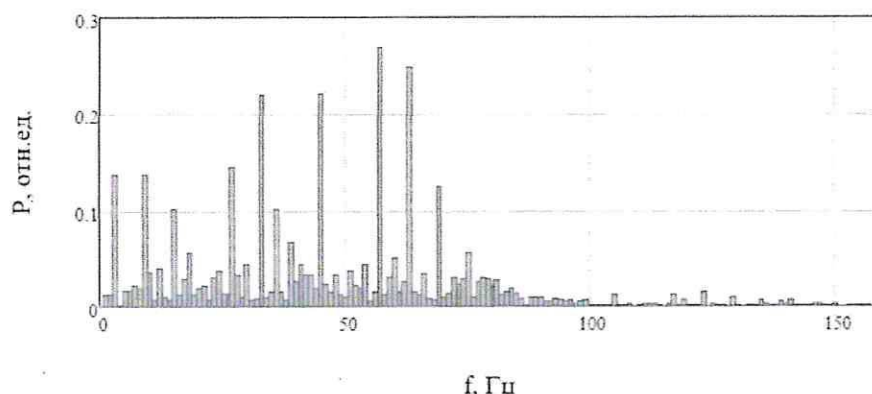


Рисунок 3 – Спектр автодинного сигнала

	n_max	angle	accel	maximum	max_half
0	2	-1.5710	0.000001	0.3113	0.2183
1	2	-1.0470	0.000001	0.3246	0.2573
2	2	-0.7854	0.000001	0.3505	0.2395
3	3	0.0000	0.000001	0.3268	0.2061
4	2	1.5710	0.000001	0.3113	0.2183
5	3	1.0470	0.000001	0.3435	0.1774

Рисунок 4 – База данных:

n – номер максимальной гармоники, angle – фаза сигнала (θ), accel – ускорение (a), maximum – значение максимальной гармоники, max_half – значение гармоники соответствующей середине спада

На подготовительном этапе анализа данных был проведён ряд процедур. Сначала выполнен анализ базы данных на предмет наличия пропусков. Затем для оценки взаимосвязей между переменными исследована корреляция по методам Пирсона, Спирмена и Кендалла. Визуализация попарных распределений признаков (PairPlot) подтвердила наличие сложных нелинейных зависимостей в данных. Далее исследована зависимость важности коэффициентов от их признаков с использованием метода SelectKBest. На основании полученных данных о структуре и взаимосвязях в наборе данных было принято решение обучить ансамбль из нескольких алгоритмов машинного обучения (перечисленных в описании третьей главы).

Для объективной оценки и сравнения эффективности обученных моделей использовались следующие метрики: коэффициент детерминации

(R^2), средняя абсолютная ошибка (MAE) и средняя абсолютная процентная ошибка (MAPE).

Результаты работы алгоритмов представлены в таблицах 1-8.

Таблица 1 – Модель линейной регрессии

	Метрики на train	Метрики на test
R^2	0.476	0.375
MAE	0.00000758	0.00000818
MAPE	129.660	182.547

Таблица 2 – Модель полиномиальной регрессии

	Метрики на train	Метрики на test
R^2	0.974	-70516778539.037
MAE	0.00000170	0.51485209
MAPE	10.602	25742489.955

Таблица 3 – Модель дерева решений

	Метрики на train	Метрики на test
R^2	1.000	0.981
MAE	0.00000001	0.00000069
MAPE	0.512	3.577

Таблица 4 – Модель случайного леса

	Метрики на train	Метрики на test
R^2	0.998	0.979
MAE	0.00000043	0.00000119
MAPE	2.471	5.913

Таблица 5 – Модель градиентного бустинга

	Метрики на train	Метрики на test
R^2	1.000	0.982
MAE	0.00000009	0.00000081
MAPE	1.194	4.266

Таблица 6 – Модель стейкинга 3-ёх алгоритмов

	Метрики на train	Метрики на test
R^2	1.000	0.983

MAE	0.00000015	0.00000078
MAPE	2.119	5.119

Таблица 7 – Модель L1 регуляризация (Lasso)

	Метрики на train	Метрики на test
R^2	0.476	0.376
MAE	0.00000761	0.00000821
MAPE	128.595	181.180

Таблица 8 – Модель L2 регуляризация (Ridge)

	Метрики на train	Метрики на test
R^2	0.476	0.376
MAE	0.00000759	0.00000817
MAPE	129.098	181.264

Как видно из таблиц – лучшие результаты получились у алгоритмов «Модель дерева решений», «Модель градиентного бустинга» и «Модель стакинга 3-ёх алгоритмов» высокое значение коэффициента детерминации и небольшая величина ошибки, а худший результат – «Модель полиномиальной регрессии». На основе алгоритмов с лучшими результатами будут определяться экспериментальные значения ускорения движения объекта.

В главе 5 представлено экспериментальное исследование, которое было выполнено при помощи установки, что представлена на рисунке 5.

При измерениях использовался лазерный диод - 1 с фотодетектором. Ему подавалось напряжение от генератора - 2. Излучение полупроводникового лазера, стабилизированного источником тока, направлялось на пьезокерамику. Изменение мощности излучения регистрировалось встроенным в лазерный диод фотодетектором. Сигнал с фотодетектора поступал через усилитель сигнала и фильтр - 3 на АЦП - 4. Цифровой сигнал с АЦП для последующего анализа сигнала сохранялся в памяти ПК - 5.



Рисунок 5 – Экспериментальная установка

Целью эксперимента было определение ускорения движения объектов. Для этого были зарегистрированы автодинные сигналы при разных амплитудах вибрации пьезокерамики, представленные на рисунках 6-8.

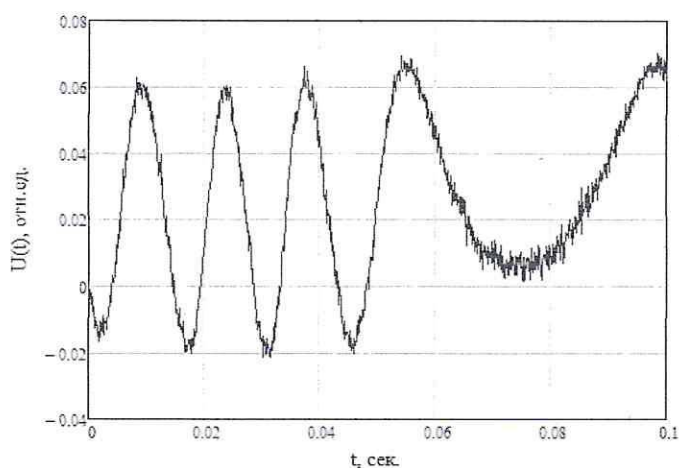


Рисунок 6 – Модель автодинного сигнала (signl_1.1)

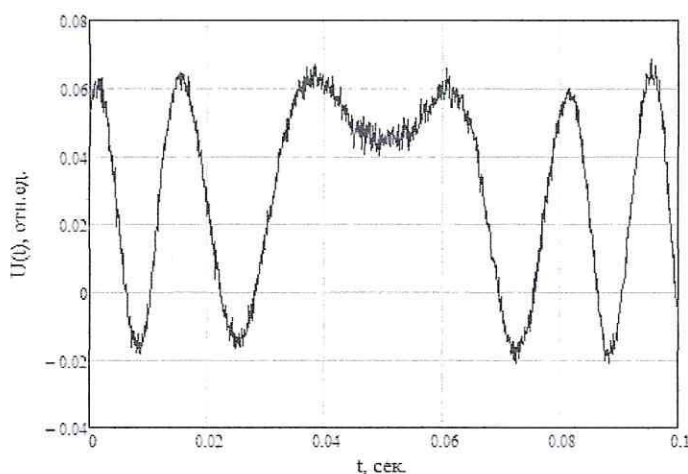


Рисунок 7 – Модель автодинного сигнала (signl_2.1)

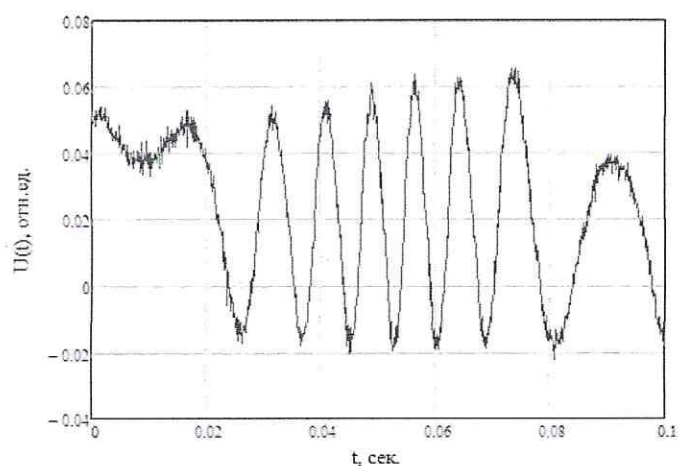


Рисунок 8 – Модель автодинного сигнала (signl_3.1)

Для полученных автодинных сигналов были построены спектры, представленные на рисунках 9-11.

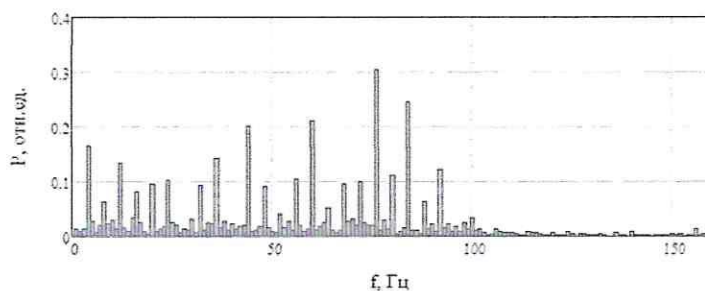


Рисунок 9 – Спектр автодинного сигнала (signl_1.1)

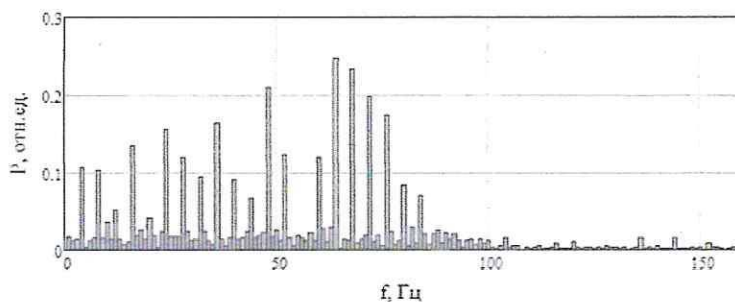


Рисунок 10 – Спектр автодинного сигнала (signl_2.1)

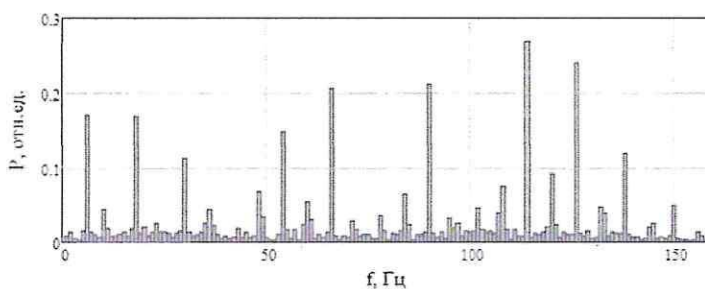


Рисунок 11 – Спектр автодинного сигнала (signl_3.1)

В таблице 9 представлены значения максимальных гармоник (maximum) и гармоник, соответствующих середине спада (max_half) для сигналов с разными величинами амплитуд.

Таблица 9 – Данные гармоник

Сигнал	maximum	max_half
signl_1.1	0.241	0.108
signl_1.2	0.302	0.135
signl_1.3	0.277	0.118
signl_2.1	0.218	0.085
signl_2.2	0.269	0.124
signl_2.3	0.289	0.119
signl_3.1	0.29	0.116
signl_3.2	0.269	0.119
signl_3.3	0.276	0.117

На основе данных из 9 таблицы лучшими алгоритмами машинного обучения было проведено моделирование для вычисления значений ускорения движения объекта. Результаты вычисления ускорения, зарегистрированных автодинных сигналов приведены в таблице 10.

Таблица 10 – Результаты вычисления ускорения

Метод	Ускорение, м/сек ²
Теоретическая модель	$3.0 * 10^{-5}$
Модель Древа решений	$3.311 * 10^{-5}$
Модель Градиентного бустинга	$3.468 * 10^{-5}$
Модель Стакинга	$3.397 * 10^{-5}$

Как видно из таблицы выше, результат дерева решений наиболее близок к результату теоретической модели.

Полученные результаты моделирования показывают возможность применения алгоритма решения для определения ускорения движения объекта по автодинному сигналу с высокой точностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Лазерная интерферометрия, объединённая с алгоритмами машинного обучения, открывает новые возможности для анализа микро- и наноперемещений за счёт автоматизации обработки интерференционных сигналов и сокращения вычислительной сложности.

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы были решены следующие задачи:

1. Проведен анализ методов измерения параметров движения объекта, совершающего микро- и наноперемещения;
2. Разработан метод лазерной интерферометрии, позволяющий проводить измерения ускорения движения внешнего отражателя на основе алгоритмов машинного обучения;
3. Проведены экспериментальные исследования, которые доказывают возможность применения разработанного метода для анализа параметров движения объекта.

В ходе проведения экспериментальных исследований были получены следующие значения ускорения объекта: $3.311 \cdot 10^{-5}$, $3.468 \cdot 10^{-5}$, $3.397 \cdot 10^{-5}$ м/сек². Наиболее близкие результаты показал метод Дерева решений.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Пасынков, В. В. Полупроводниковые приборы: Учеб. пособие для студентов / В. В. Пасынков, Л. К. Чиркин. Санкт-Петербург: Изд-во Лань, 2023. 480 с.
2. Крылов К.И. Основы лазерной техники: Учеб. пособие для студентов приборостроительных спец. Вузов / К.И. Крылов, В.Т. Прокопенко, В.А. Тарлыков. Ленинград: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1990. 316 с.
3. Голубев В.С. Лазерная техника и технология. / В. С. Голубев, Ф. В. Лебедев; под ред. А.Г. Григорьянца. М.: Высш. Шк., 1987. 176 с.
4. Прохоров А. М. Физическая энциклопедия в 5 томах Т. 1 / Гл. ред. А. М. Прохоров, Ред. кол. Д. М. Алексеев, А. М. Балдин, А. М. Бонч-Бруевич, А. С. Боровик-Романов и др. М.: Сов. энциклопедия, 1988. 705 с.
5. Гапоненко С. О. Установка для калибровки пьезоэлектрических датчиков / С. О. Гапоненко, А. Е Кондратьев, Е. Е. Костылева, А. Р. Загретдинов. Известия вузов. Проблемы энергетики №7-8, 2016. 79-86 с.
6. Шарапов В. М. Пьезоэлектрические датчики / В. М. Шарапов, М. П. Мусиенко, Е. В. Шарапова. М.: Техносфера, 2006. 632 с.
7. Короленко П. В. Интерферометрия / П. В. Короленко. М.: Изд-во МГУ, 2024. 13 с.
8. Добряков В. А. Лазерный интерферометр как элемент информационно-измерительной системы для прецизионного металлообрабатывающего оборудования / В. А. Добряков, А. А. Игнатьев, Е. А. Сигито. Саратов: Изд-во СГТУ, 2007. 22 с.
9. Усанов Д. А., Скрипаль А. В. Гомодинные методы измерения / Д. А. Усанов, А. В. Скрипаль, В. А. Вагарин, М. Р. Васильев. Зарубеж. Радиоэлектрон № 6, 1995. 135-141 с.
10. Tiedje T., Brown A. Performance limits for the scanning tunneling microscope / T. Tiedje, A. Brown. Appl. Phys. V. 68. № 2, 1990. 649-655 с.

11. Hashizume T. A role of tip geometry of STM image / T. Hashizume, I. Kamiya, Y. Hasegawa и др. Зарубеж. Journal of Microscopy V. 152. № 2, 1988. 347-354 с.
12. Чанилов О. И. Определение параметров движения отражателя в интерференционной системе с помощью Фурье- и вейвлет-преобразований / О. И. Чанилов. Саратов: Изд-во СГУ, 2005. 114 с.
13. Дарзбек С. А. Лазерный интерферометрический измеритель наноперемещений / С. А. Дарзбек, Ж. Желкобаев, В. В. Календин, Ю. А. Новиков. М.: Труды института общей физики им. А.М. Прохорова Т.62, 2006. 14-37 с.
14. Скрипаль А. В., Добдин С. Ю. Интерферометрия ускорения по спектру автодинного сигнала полупроводникового лазера / А. В. Скрипаль, С. Ю. Добдин, А. В. Джафаров, К. А. Садчикова, И. А. Дубровская. Саратов: Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. Т. 19. №4, 2019. 279–287 с.
15. Тодуа П. А. Метрология в нанотехнологии / П. А. Тодуа. М.: ОАО «Научно-исследовательский центр по изучению свойств поверхности и вакуума», 2006. 69 с.
16. Кузин А. Ю. Методы и средства измерений линейных размеров в нанометровом диапазоне / В. Н. Марютин, В. В. Календин. Нано и микросистемная техника. №4, 2001. 49-51 с.
17. Тарлыкова В. А. Когерентная оптика / В. А. Тарлыкова. Санкт-Петербург: СПбГУ ИТМО, 2011. 168 с.
18. Сохина, С. А. Машинное обучение. Методы машинного обучения / С. А. Сохина, С. А. Немченко. Современная наука в условиях модернизационных процессов: проблемы, реалии, перспективы. Сборник научных статей по материалам V Международной научно-практической конференции, Уфа: Вестник науки, 2021. 165-168 с.

19. Ерошевич К. В. Линейная регрессия / К. В. Ерошевич, отв. ред. К. С. Костиков и др. Кемерово: Сборник материалов XIV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, 2022. 51-55 с.
20. Мухамедиев Р. И., Амиргалиев Е. Н. Введение в машинное обучение / Р. И. Мухамедиев, Е. Н. Амиргалиев. Алматы, 2022. 288 с.
21. Кугаевских А. В., Муромцев Д. И., Кирсанова О. В. Классические методы машинного обучения / А. В. Кугаевских, Д. И. Муромцев, О. В. Кирсанова. Санкт-Петербург: Изд-во Университет ИТМО, 2022. 53 с.
22. Ивкина М. С. Решение задачи классификации на основе случайного леса / М. С. Ивкина. Рязань: сборник трудов международного научно-технического форума «Современные технологии в науке и образовании СТНО-2018», Т. 3, под общ. ред. О. В. Миловзорова, 2018. 61-65 с.
23. Королев О. Л. Бустинг как метод машинного обучения в data science / О. Л. Королев, Ю. С. Крупеник. Симферополь: труды XIX Всероссийской с международным участием научно-практической конференции, 2020. 176-177 с.
24. Воронина В. В., Михеев А. В. Теория и практика машинного обучения : учебное пособие / В. В. Воронина, А. В. Михеев, Н. Г. Ярушкина, К. В. Святков. Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2017. 290 с.
25. Картер Дж. Машинное обучение / Дж. Картер. Изд-во SelfPub, 2023. 230 с.

