

# Приветствие

Этот курс позволит вам погрузиться в удивительный мир квантового машинного обучения!

## Почему именно этот курс?

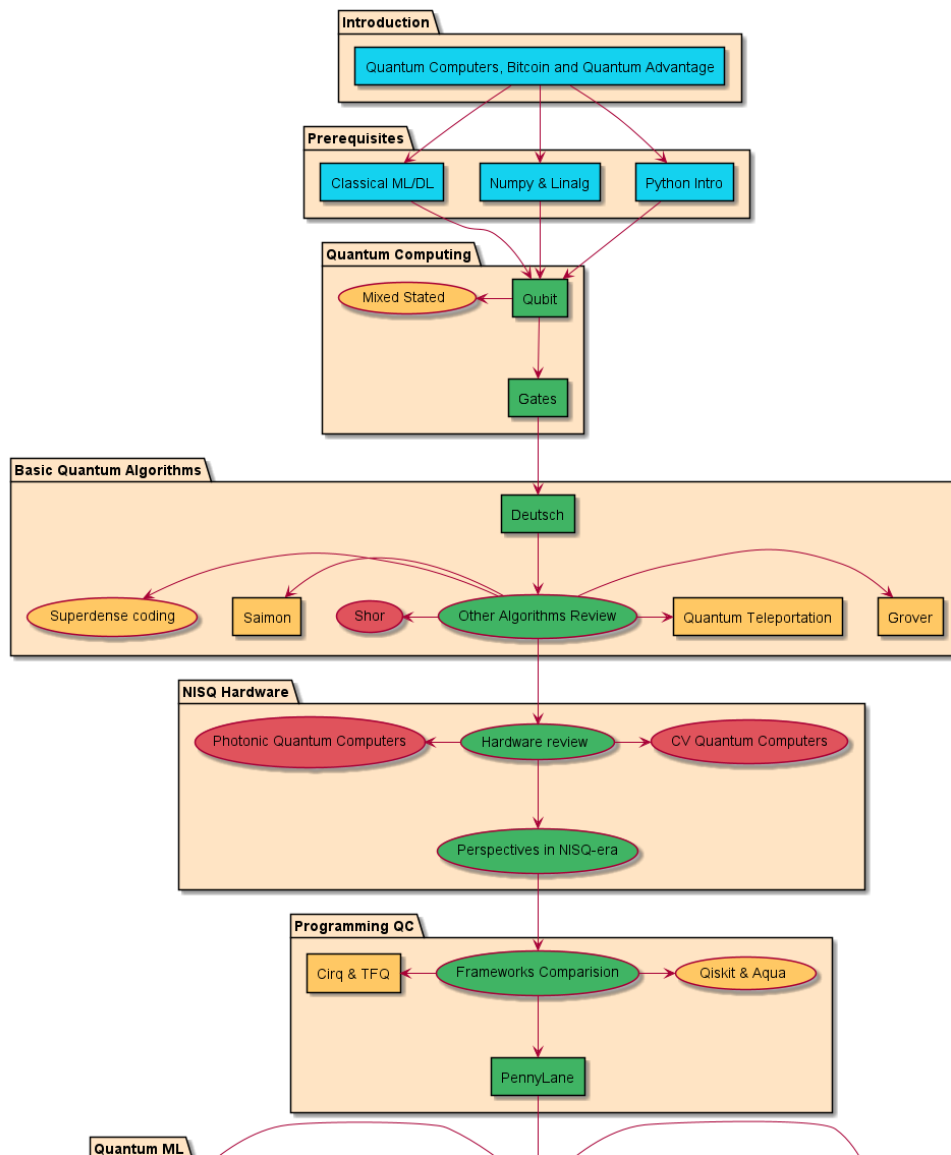
Наш курс отличается от других курсов по квантовым вычислениям:

- он адаптивный и содержит лекции разных уровней сложности и глубины;
- он практический, а все объяснения подкрепляются кодом;
- он про реальные методы, которые будут актуальны ближайшие 10-15 лет.

## Как устроен курс?

Наш курс разделен на логические блоки, каждый из которых содержит лекции разных уровней сложности:

- **ГОЛУБОЙ** – вводные лекции;
- **ЗЕЛЕНый** – лекции “основного” блока курса;
- **ЖЕЛТЫЙ** – лекции, глубже раскрывающие темы блоков;
- **КРАСНЫЙ** – лекции про физику и математику, которая стоит за всем этим;
- **БЕЛЫЙ** – факультативные лекции.



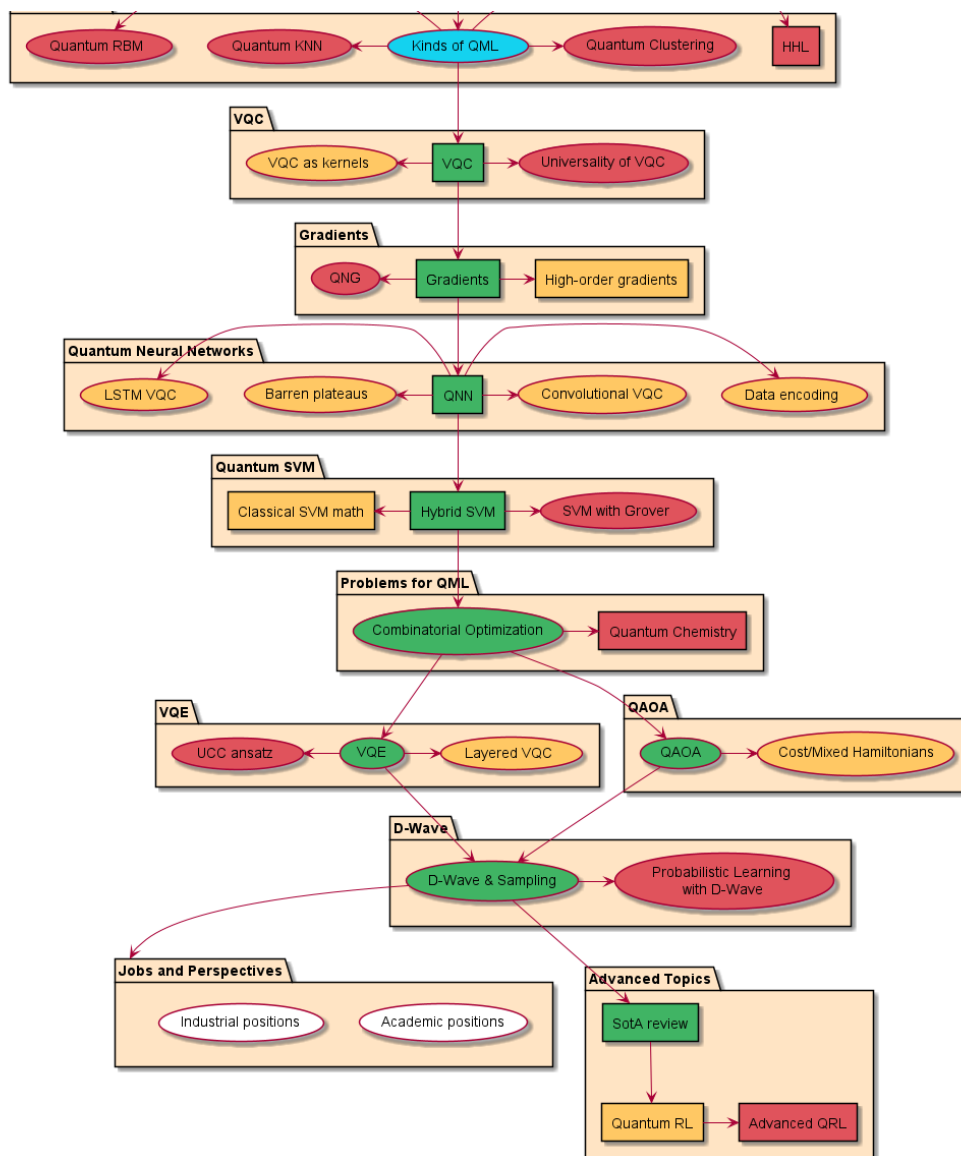


Fig. 1 Программа курса

## Как будет проходить этот курс?

Рекомендуем проходить курс в порядке, обозначенном на схеме.

Желаем успехов!

## Список литературы

### [And19]

Neculai Andrei. A diagonal quasi-newton updating method for unconstrained optimization. *Numerical Algorithms*, 81(2):575–590, 2019. doi:<https://doi.org/10.1007/s11075-018-0562-7>.

### [AAB+19]

Frank Arute, Kunal Arya, Ryan Babbush, Dave Bacon, Joseph C Bardin, Rami Barends, Rupak Biswas, Sergio Boixo, Fernando GSL Brandao, David A Buell, and others. Quantum supremacy using a programmable superconducting processor. *Nature*, 574(7779):505–510, 2019. doi:<https://doi.org/10.1038/s41586-019-1666-5>.

### [HavlivcekCorcolesT+19]

Vojtěch Havlíček, Antonio D Córcoles, Kristan Temme, Aram W Harrow, Abhinav Kandala, Jerry M Chow, and Jay M Gambetta. Supervised learning with quantum-enhanced feature spaces. *Nature*, 567(7747):209–212, Mar 2019. URL: <https://arxiv.org/abs/1804.11326>, doi:[10.1038/s41586-019-0980-2](https://doi.org/10.1038/s41586-019-0980-2).

### [MBK21]

Andrea Mari, Thomas R. Bromley, and Nathan Killoran. Estimating the gradient and higher-order derivatives on quantum hardware. *Physical Review A*, 103(1):012405, Jan 2021. URL: <https://arxiv.org/abs/2008.06517>, doi:[10.1103/physreva.103.012405](https://doi.org/10.1103/physreva.103.012405).

### [MNKF18]

Kosuke Mitarai, Makoto Negoro, Masahiro Kitagawa, and Keisuke Fujii. Quantum circuit learning. *Physical Review A*, 98(3):032309, Sep 2018. URL: <https://arxiv.org/abs/1803.00745>, doi:[10.1103/PhysRevA.98.032309](https://doi.org/10.1103/PhysRevA.98.032309).

### [NSS+08]

Chetan Nayak, Steven H. Simon, Ady Stern, Michael Freedman, and Sankar Das Sarma. Non-abelian anyons and topological quantum computation. *Reviews of Modern Physics*, 80(3):1083–1159, Sep 2008. URL: <http://dx.doi.org/10.1103/RevModPhys.80.1083>, doi:[10.1103/revmodphys.80.1083](https://doi.org/10.1103/revmodphys.80.1083).

### [Sch21]

Maria Schuld. Quantum machine learning models are kernel methods. *arXiv e-prints*, pages 26 pages, 2021. URL: <https://arxiv.org/abs/2101.11020>, arXiv:[2101.11020](https://arxiv.org/abs/2101.11020).

### [SYG+20]

Yudai Suzuki, Hiroshi Yano, Qi Gao, Shumpei Uno, Tomoki Tanaka, Manato Akiyama, and Naoki Yamamoto. Analysis and synthesis of feature map for kernel-based quantum classifier. *Quantum Machine Intelligence*, 2(1):1–9, Jul 2020. URL: <https://arxiv.org/abs/1906.10467>, doi:[10.1007/s42484-020-00020-y](https://doi.org/10.1007/s42484-020-00020-y).

### [89]

Лифшиц Е. М. Ландау Л. Д. *Квантовая механика: Нерелятивистская теория*. Наука, 1989. URL: <https://www.math.purdue.edu/~eremenko/dvi/LL.pdf>.

### [15]

Иванов М.Г. *Как понимать квантовую механику*. Регулярная и хаотическая динамика, 2015. URL: <https://mipt.ru/upload/medialibrary/533/quant-2.pdf>.

## Список авторов курса

### Создатели курса

1. [Семен Синченко](#)
2. [Юрий Кашницкий](#)
3. [Виктор Трохименко](#)

### Основные авторы

1. [Семен Синченко](#)
2. [Илья Беседин](#)
3. [Сергей Ширкин](#)
4. [Александр Березутский](#)

## Основные ревьюеры

1. [Юрий Кашницкий](#)
2. [Виктор Трохименко](#)
3. [Борис Зимка](#)
4. [Николай Карелин](#)
5. [Евгений Желтоножский](#)

## Редакторы

1. [Наталья Маркова](#)

## Техническая поддержка

1. [Дмитрий Коржов](#)

## Полный список авторов

А	▼
Б	▼
В	▼
Г	▼
Д	▼
Е	▼
Ж	▼
З	▼
И	▼
К	▼
Л	▼
М	▼
Н	▼
О	▼

п	▼
р	▼
с	▼
т	▼
у	▼
ф	▼
х	▼
ц	▼
ш	▼
э	▼
ю	▼
я	▼

## Благодарности

Команда курса выражает благодарность:

- сообществу [Open Data Science](#) за предоставление платформы для размещения курса и техническую поддержку;

## Глоссарий

### А

#### Алгоритм Гровера

Англ. Grover's algorithm

#### Алгоритм квантового приближения для задачи оптимизации

(QAOA, quantum approximate optimization algorithm), <https://www.osp.ru/os/2019/03/13055118>,  
<https://habr.com/ru/post/513474/>

### Б

#### Бра-вектор

Англ. bra-vector

### В

## Вакуумное состояние

Англ. Vacuum state, также используется название “основное состояние” (basic state). Так часто называется квантовое состояние с вектором  $|\ket{0}\rangle$ . Термин заимствован из квантовой оптики, чаще всего не имеет ничего общего с “обыденным” понятием “вакуума”.

## Вариационная квантовая схема

Англ. Variational Quantum Circuits (VQC)

## Вариационное машинное обучение

Англ. variational machine learning

# Г

## Гейты

Англ. Quantum gates

## Гейт Адамара

Англ. Hadamard gate

## Гейт C-NOT

## Гейт NOT

## Т-гейт

## Гейты поворота

## Phase-shift гейт

## Единичный гейт

## Гейт iSWAP

## fSim

# И

## Измерение

Англ. Quantum measurement

# К

## Квантовая информация

Также используется термин “квантовая информатика”, англ. Quantum Information

## Квантовый оператор

Англ. Quantum operator

## Квантово-классическое обучение

Англ. Quantum-classical machine learning

## Квантовое состояние

Англ. Quantum state

## Кет-вектор

Англ. ket-vector

## Кот Шредингера

Англ. Schrödinger’s cat

## Кубит

Также кюбит или q-бит, англ. Qubit, от quantum bit. Минимальная единица информации на квантовом компьютере. Как и (классический) бит, кубит допускает два состояния, которые обычно обозначаются кет-векторами  $|\ket{0}\rangle$  и  $|\ket{1}\rangle$ , а на уровне реализации кубит – это двухуровневая квантовая система, такая как две поляризации фотона или спина электрона.

# М

## Матрица плотности

Также используется термин “оператор плотности”, англ. Density matrix или Density operator

## Метод квантового локального подбора

(QLS, quantum local search), <https://www.osp.ru/os/2019/03/13055118>

## Многокубитные гейты

Англ. Multiqubit gates

# Н

## Нотация Дирака

Англ. Dirac notation, формализм (система обозначения) для описания квантовых состояний на основе бра- и кет-векторов (англ. bra-ket от bracket, скобка). В этой системе обозначений  $|\psi\rangle$  обозначает вектор состояния,  $\langle\psi|$  – сопряженный вектор состояния, а  $\langle\psi|\hat{H}|\psi\rangle$  – среднее (математическое ожидаемое) значения наблюдаемой для оператора  $\hat{H}$  в состоянии  $|\psi\rangle$  (также говорят о свертке оператора  $\hat{H}$  с бра-вектором  $\langle\psi|$  и кет-вектором  $|\psi\rangle$ ). Система обозначений Дирака позволяет отделить вектора состояния  $|\psi\rangle$  от самого состояния  $\psi$  или конкретного математического описания (в виде волновой функции или вектора).

## О

### Операторы Паули

Также используется термин “матрицы Паули”, англ. Pauli operators или Pauli matrices

## П

### Правило сдвига параметров

(\*) Англ. Parameter-shift rule

## С

### Смешанные состояния

Англ. Mixed states

### Собственный вектор

Англ. Eigenvector

### Собственное значение

Англ. Eigenvalue

### Соотношение неопределенности

Также используется термин “принцип неопределенности”, англ. Uncertainty relation или Uncertainty principle

### Суперпозиция

Англ. Superposition

### Сфера Блоха

Англ. Bloch sphere

## У

### Унитарный оператор

Англ. Unitary operator

## Ш

### «Шумные» квантовые компьютеры промежуточного масштаба (Noisy intermediate-scale quantum, NISQ, NISQ Hardware)

Термин введен Прескиллом в работе <https://arxiv.org/abs/1801.00862> для описания современного состояния квантовых вычислений, когда “настоящие” квантовые вычисления (на миллионах кубит) еще невозможны, но современные квантовые компьютеры уже могут выполнять вычисления, которые невозможны на обычных, классических компьютерах. См. также краткое обсуждение в <https://quantumcomputing.stackexchange.com/questions/1885/what-is-meant-by-noisy-intermediate-scale-quantum-nisq-technology>, и перевод на термина русский <https://www.osp.ru/os/2019/03/13055130>

## Э

### Энтропия

Англ. Entropy