

# Оглавление

|  |           |
|--|-----------|
| <b>От издательства .....</b>                   | <b>14</b> |
| <b>Предисловие .....</b>                       | <b>15</b> |
| Структура книги .....                          | 15        |
| Типографские соглашения.....                   | 17        |
| Благодарности.....                             | 17        |
| <b>Глава 1. Введение.....</b>                  | <b>19</b> |
| Необходимая подготовка .....                   | 19        |
| Что такое QPU? .....                           | 21        |
| Практический подход .....                      | 22        |
| Учебник QCEngine .....                         | 22        |
| Отладка .....                                  | 24        |
| Низкоуровневые команды QPU .....               | 25        |
| Ограничения моделирования .....                | 28        |
| Аппаратные ограничения .....                   | 28        |
| QPU и GPU: некоторые общие характеристики..... | 29        |

## **ЧАСТЬ I. ПРОГРАММИРОВАНИЕ ДЛЯ QPU**

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Глава 2. Один кубит.....</b>        | <b>32</b> |
| Краткий обзор физических кубитов ..... | 34        |
| Круговая запись .....                  | 37        |
| Размер круга .....                     | 38        |
| Поворот .....                          | 39        |
| Первые операции QPU.....               | 41        |
| Команда QPU: NOT .....                 | 41        |

|   |           |
|---|-----------|
| Команда QPU: HAD .....  | 42        |
| Команда QPU: READ .....   | 43        |
| Команда QPU: WRITE .....  | 43        |
| Практический пример: идеально случайный бит .....   | 45        |
| Пример кода .....   | 46        |
| Пример кода .....   | 48        |
| Команды QPU: PHASE( $\theta$ ) .....  | 48        |
| Команды QPU: ROTX( $\theta$ ) и ROTY( $\theta$ ) .....                                      | 49        |
| COPY: недостающая операция .....  | 50        |
| Объединение операций QPU .....  | 50        |
| Команда QPU: ROOT-NOT .....   | 51        |
| Пример кода .....   | 52        |
| Практический пример: квантовая проверка защиты .....  | 53        |
| Пример кода .....   | 54        |
| Итоги .....   | 57        |
| <b>Глава 3. Группы кубитов .....</b>  | <b>58</b> |
| Круговая запись для многокубитных регистров .....   | 58        |
| Пример кода .....   | 60        |
| Изображение многокубитного регистра .....   | 61        |
| Однокубитные операции в многокубитных регистрах .....                                       | 62        |
| Чтение кубита в многокубитном регистре .....  | 64        |
| Наглядное представление большого количества кубитов .....                                   | 65        |
| Команды QPU: CNOT .....   | 67        |
| Практический пример: использование пар Белла для реализации<br>совместной случайности ..... | 70        |
| Пример кода .....   | 71        |
| Команды QPU: CPHASE и CZ .....  | 71        |
| Приемы программирования QPU: фазовый откат .....  | 73        |
| Пример кода .....   | 75        |
| Команда QPU: CCNOT (вентиль Тоффоли) .....  | 75        |
| Команды QPU: SWAP и CSWAP .....   | 76        |
| Проверка обменом .....  | 77        |
| Пример кода .....   | 78        |
| Построение произвольной условной операции .....   | 81        |

|  |           |
|--|-----------|
| Пример кода .....  | 82        |
| Практический пример: дистанционно управляемая случайность..... | 84        |
| Пример кода .....  | 84        |
| Итоги.....   | 87        |
| <b>Глава 4. Квантовая телепортация .....</b>                   | <b>88</b> |
| Практический пример: первые шаги в телепортации.....           | 88        |
| Пример кода .....  | 90        |
| Анализ программы.....  | 94        |
| Шаг 1: создание запутанной пары.....                           | 95        |
| Шаг 2: подготовка данных.....                                  | 95        |
| Шаг 3.1: связывание данных с запутанной парой.....             | 96        |
| Шаг 3.2: перевод кубита данных в суперпозицию .....            | 97        |
| Шаг 3.3: чтение обоих кубитов Алисы .....                      | 97        |
| Шаг 4: получение и преобразование .....                        | 98        |
| Шаг 5: проверка результата .....                               | 99        |
| Интерпретация результатов .....                                | 101       |
| Как используется телепортация? .....                           | 102       |
| Известные проблемы при телепортации .....                      | 102       |

## **ЧАСТЬ II. ПРИМИТИВЫ QPU**

|  |            |
|--|------------|
| <b>Глава 5. Квантовая арифметика и логика .....</b>                    | <b>106</b> |
| Странно и необычно.....  | 106        |
| Арифметика с QPU.....  | 108        |
| Практический пример: построение операторов инкремента и декремента.... | 109        |
| Пример кода .....  | 110        |
| Сложение двух квантовых целых чисел .....                              | 112        |
| Пример кода .....  | 113        |
| Отрицательные числа.....   | 114        |
| Практический пример: более сложные вычисления .....                    | 115        |
| Пример кода .....  | 116        |
| Переход на квантовый уровень .....                                     | 116        |
| Квантовое условное выполнение.....                                     | 116        |
| Пример кода .....  | 117        |

---

|   |            |
|---|------------|
| Фазовое кодирование результата .....                              | 118        |
| Пример кода .....   | 118        |
| Обратимость и служебные кубиты .....                              | 119        |
| Отмена вычислений.....  | 122        |
| Отображение булевой логики на операции QPU .....                  | 125        |
| Базовая квантовая логика .....                                    | 126        |
| Пример кода .....   | 127        |
| Итоги.....  | 128        |
| <b>Глава 6. Усиление комплексной амплитуды .....</b>              | <b>129</b> |
| Практический пример: преобразование между фазой и амплитудой..... | 129        |
| Пример кода .....   | 130        |
| Итерация усиления комплексной амплитуды .....                     | 132        |
| Больше итераций?.....   | 133        |
| Пример кода .....   | 134        |
| Инвертирование нескольких элементов .....                         | 136        |
| Пример кода .....   | 137        |
| Использование усиления комплексной амплитуды.....                 | 142        |
| AA и QFT при оценке суммы .....                                   | 142        |
| Ускорение традиционных алгоритмов с применением AA .....          | 143        |
| Внутри QPU .....  | 143        |
| Интуитивное понимание.....  | 143        |
| Итоги.....  | 146        |
| <b>Глава 7. QFT: квантовое преобразование Фурье .....</b>         | <b>147</b> |
| Скрытые закономерности .....                                      | 147        |
| Пример кода .....   | 148        |
| QFT, DFT и FFT .....  | 149        |
| Частоты в регистре QPU .....                                      | 150        |
| Пример кода .....   | 151        |
| Пример кода .....   | 154        |
| DFT .....   | 154        |
| Вещественные и комплексные входные данные для DFT .....           | 156        |
| Подробнее о DFT.....  | 158        |
| Пример кода .....   | 160        |
| Практическое применение QFT .....                                 | 163        |

|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| Скорость QFT .....                | 163 |
| Пример кода .....                 | 167 |
| Пример кода .....                 | 167 |
| Пример кода .....                 | 168 |
| Внутри QPU .....                  | 169 |
| Интуитивное объяснение.....       | 170 |
| Последовательность операций ..... | 172 |
| Пример кода .....                 | 173 |
| Итоги.....                        | 176 |

**Глава 8. Квантовая оценка фазы ..... 177**

|  |     |
|--|-----|
| Получение информации об операциях QPU .....              | 177 |
| Собственные фазы предоставляют полезную информацию ..... | 178 |
| Что делает оценка фазы.....                              | 180 |
| Как пользоваться оценкой фазы.....                       | 180 |
| Ввод.....  | 182 |
| Пример кода .....  | 182 |
| Вывод.....   | 184 |
| Предостережения .....                                    | 184 |
| Выбор размера выходного регистра .....                   | 185 |
| Сложность.....   | 186 |
| Условные операции.....                                   | 186 |
| Оценка фазы на практике.....                             | 186 |
| Внутри QPU .....   | 187 |
| Пример кода .....  | 187 |
| Интуитивное объяснение.....                              | 188 |
| Операция за операцией.....                               | 190 |
| Итоги.....   | 192 |

**ЧАСТЬ III.  
ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ QPU**

**Глава 9. Реальные данные..... 194**

|                     |     |
|---------------------|-----|
| Нецелые данные..... | 195 |
| QRAM .....          | 196 |

---

|  |            |
|--|------------|
| Пример кода .....  | 198        |
| Пример кода .....  | 200        |
| Кодирование векторов .....   | 201        |
| Пример кода .....  | 203        |
| Ограничения комплексного амплитудного кодирования .....                  | 204        |
| Комплексное амплитудное кодирование и круговая запись .....              | 206        |
| Кодирование матриц .....   | 207        |
| Как матрицы могут представляться операциями QPU? .....                   | 208        |
| Квантовое моделирование .....  | 209        |
| <b>Глава 10. Квантовый поиск .....</b>                                   | <b>215</b> |
| Фазовая логика .....   | 216        |
| Построение элементарных операций фазовой логики .....                    | 218        |
| Построение сложных команд фазовой логики .....                           | 219        |
| Пример кода .....  | 221        |
| Решение логических головоломок .....                                     | 222        |
| О котятках и тиграх .....  | 223        |
| Пример кода .....  | 226        |
| Общий рецепт для решения задач выполнимости булевых формул .....         | 227        |
| Практический пример: задача выполнимости 3-SAT .....                     | 229        |
| Пример кода .....  | 229        |
| Практический пример: невыполнимая задача 3-SAT .....                     | 231        |
| Пример кода .....  | 232        |
| Ускорение традиционных алгоритмов .....                                  | 234        |
| <b>Глава 11. Квантовая избыточная выборка .....</b>                      | <b>236</b> |
| Применение QPU в компьютерной графике .....                              | 236        |
| Традиционная избыточная выборка .....                                    | 237        |
| Практический пример: вычисление изображений с фазовым кодированием ..... | 239        |
| Пиксельный шейдер .....  | 240        |
| Использование операции PHASE для рисования .....                         | 241        |
| Пример кода .....  | 242        |
| Рисование кривых .....   | 243        |
| Пример кода .....  | 244        |

|  |            |
|--|------------|
| Выборка в изображениях с фазовым кодированием.....           | 245        |
| Пример кода .....  | 247        |
| Более интересное изображение.....                            | 247        |
| Избыточная выборка .....                                     | 248        |
| Пример кода .....  | 250        |
| QSS и традиционная выборка методом Монте-Карло .....         | 251        |
| Как работает QSS.....  | 252        |
| Пример кода .....  | 255        |
| Добавление цветов.....                                       | 257        |
| Итоги.....   | 259        |
| <b>Глава 12. Алгоритм Шора.....</b>                          | <b>260</b> |
| Практический пример: алгоритм Шора на QPU .....              | 261        |
| Пример кода .....  | 262        |
| Что делает алгоритм Шора.....                                | 263        |
| Для чего вообще нужен QPU?.....                              | 264        |
| Пример кода .....  | 264        |
| Квантовое решение.....                                       | 266        |
| Шаг за шагом: разложение числа 15 на простые множители ..... | 268        |
| Пример кода .....  | 268        |
| Шаг 1: инициализация регистров QPU.....                      | 269        |
| Шаг 2: перевод в квантовую суперпозицию .....                | 270        |
| Шаг 3: условное умножение на 2 .....                         | 272        |
| Шаг 4: условное умножение на 4 .....                         | 274        |
| Шаг 5: квантовое преобразование Фурье .....                  | 276        |
| Шаг 6: чтение квантового результата.....                     | 276        |
| Шаг 7: цифровая логика.....                                  | 278        |
| Пример кода .....  | 279        |
| Шаг 8: проверка результата.....                              | 281        |
| Важные подробности.....                                      | 281        |
| Вычисление остатка .....                                     | 281        |
| Время и память .....   | 283        |
| Другие значения переменной <code>coprimes</code> .....       | 283        |

|  |            |
|--|------------|
| <b>Глава 13. Квантовое машинное обучение .....</b> | <b>284</b> |
| Решение систем линейных уравнений.....             | 285        |
| Описание и решение систем линейных уравнений.....  | 286        |
| Решение линейных уравнений на QPU.....             | 288        |
| Квантовый анализ главных компонент.....            | 298        |
| Традиционный анализ главных компонент .....        | 299        |
| PCA с QPU .....                                    | 301        |
| Квантовый метод опорных векторов.....              | 305        |
| Традиционный метод опорных векторов.....           | 306        |
| SVM с QPU.....                                     | 310        |
| Другие применения машинного обучения .....         | 315        |

#### **ЧАСТЬ IV. ПЕРСПЕКТИВЫ**

|  |            |
|--|------------|
| <b>Глава 14. Обзор литературы .....</b>                  | <b>318</b> |
| От круговой записи к комплексным векторам .....          | 318        |
| Некоторые нюансы и примечания по терминологии .....      | 321        |
| Измерительный базис.....                                 | 322        |
| Разложение и компиляция вентиляей.....                   | 324        |
| Телепортация вентиляей.....                              | 326        |
| Зал славы QPU.....                                       | 326        |
| Гонка между квантовыми и традиционными компьютерами..... | 327        |
| Алгоритмы на базе оракулов .....                         | 328        |
| Алгоритм Дойча—Джозы .....                               | 329        |
| Задача Бернштейна—Вазирани .....                         | 329        |
| Задача Саймона .....                                     | 330        |
| Языки квантового программирования.....                   | 330        |
| Перспективы квантового моделирования.....                | 332        |
| Исправление ошибок и устройства NISQ.....                | 332        |
| Что дальше?.....   | 333        |
| Книги .....  | 333        |
| Конспекты лекций.....                                    | 334        |
| Сетевые источники информации .....                       | 334        |