

УДК 681.3.06

## МЕТОДЫ КВАНТОВОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ: ПОДХОДЫ К ФОРМИРОВАНИЮ ОНТОЛОГИИ И ФОРМАЛИЗАЦИИ СОВРЕМЕННОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ПАРАДИГМЫ В ОБРАЗОВАТЕЛЬНОМ ПРОЦЕССЕ

Крючков А.А., Князев М.А.

*МИРЭА – Российский технологический университет, г. Москва, Россия, kryuchkov\_a@mirea.ru*

**Аннотация.** Рассмотрен вопрос актуальности внедрения средств моделирования и разработки квантовых прикладных программ на квантовых вычислительных устройствах, определены и систематизированы формальные положения методов квантового программирования в рамках образовательного процесса подготовки инженерных кадров в условиях цифровизации экономики.

**Ключевые слова.** Методы квантового программирования, методы программирования, квантовые технологии, квантовые вычисления.

### Введение

В настоящее время предметная область научно-практических исследований в сфере квантовых технологий, квантовых вычислений – в частности, с каждым годом привлекает все большее количество профильных специалистов как из числа представителей научного сообщества, так и среди сотрудников государственных структур и коммерческих объединений.

В то время как государственные органы регулирования в условиях цифровизации экономики принимают активное участие в разработке и принятии нормативно-правовых документов и национальных программ по развитию предметной области, образовательные учреждения только приступают к внедрению профильных дисциплин по направлениям подготовки инженерных кадров по программе квантовых вычислений.

Представленная работа направлена на профессорско-преподавательский состав учебных заведений, проводящих подготовку специалистов по направлениям, входящих в перечень укрупненных групп специальностей 09.00.00 Информатика и вычислительная техника, а также 10.00.00 Информационная безопасность, и преследует цель систематизации накопленных знаний и формального определения научно-практического образовательного направления «Методы квантового программирования».

### Государственные программы и национальные проекты как катализатор развития предметной области

С каждым годом увеличивается количество мировых держав, осознающих неизбежность прихода на международный рынок новых технологичных отраслей экономики и принимающих превентивные меры по регулированию и централизованному управлению и развитию соответствующих областей.

В 2018 году Конгресс США опубликовал акт Национальной квантовой инициативы с планом развития Квантовых технологий в стране, а через четыре года были представлены закон H.R.7535 за подписью Президента об обеспечении готовности государственных учреждений к возможным последствиям появления квантовых вычислительных устройств, представляющих потенциальную угрозу имеющимся

системам обеспечения кибербезопасности, а также Меморандум о национальной безопасности и продвижения лидерства США в области квантовых вычислений [1-3].

Один из ключевых политических лидеров азиатского региона – Китайская Народная Республика, в 2021 году включила в 14-й Национальный экономический план развития исследования в области Квантовых технологий как одно из передовых направлений, подлежащее приоритетному развитию на период вплоть до 2035 года [4].

В марте 2023 года Великобритания опубликовала Национальную квантовую стратегию со сроком выполнения в 10 лет, направленную на превращение Объединенного Королевства в научно-техническую сверхдержаву, с учетом последовательного развития и своевременного внедрения в практическую плоскость технологии Квантовых вычислений [5].

В Российской Федерации в 2019 году была утверждена Дорожная карта развития «сквозной» цифровой технологии «Квантовые технологии», включающая в себя три направления: квантовые вычисления, квантовая криптография и сенсорные технологии. Исполнение Дорожной карты было установлено в пятилетний срок, однако, в рамках актуализации полученных результатов, в 2023 году работа программы была дополнена новыми мероприятиями и продлена до 2030 года [6].

О принимаемом участии в исследовании квантовых технологий на территории Республики Беларусь в открытых источниках информации не много. Известно о функционировании Центра «Квантовой оптики и квантовой информатики» Института физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси. Успешно функционирует проект «Наука в деталях», в рамках которого специалисты прикладных высокотехнологичных областей знаний проводят профильные лекции и образовательные мероприятия с молодыми учеными и инженерами. В стране регулярно организуются тематические конференции, а в 2021 году были озвучены планы по запуску проекта в сфере квантовых технологий совместно с ГК Росатом [7-9].

К числу стран, с недавнего времени уделяющих пристальное внимание Квантовым технологиям на государственном уровне, присоединились Дания,



Ирландия, Бразилия, Венгрия, Индия, Австралия, Канада, Южно-Африканская Республика и ряд других экономически развитых государств с устоявшимся научно-техническим потенциалом [10, 11].

Одним из наиболее значительных событий, подтверждающих актуальность поставленной темы исследования, является публикация в январе 2024 года Квантовой Стратегии НАТО, целью которой является обеспечение «Квантовой готовности» Североатлантического союза к внешним угрозам [12].

### **Механизмы системы образования в области подготовки специалистов в сфере Квантовых технологий**

В международном научном сообществе выделяют три направления Квантовых технологий:

- квантовые коммуникации;
- квантовые вычисления;
- квантовые сенсоры.

Квантовые сенсоры и метрология – совокупность высокоточных измерительных приборов, основанных на квантовых эффектах. Квантовые коммуникации подразумевают под собой технологию криптографической защиты, использующей индивидуальные квантовые частицы для распределения ключей симметричных алгоритмов шифрования. Квантовые вычисления – класс вычислительных устройств, использующий для решения задач принципы квантовой механики [6].

Квантовые сенсоры и метрология в той или иной степени своего проявления присутствуют в научных кругах, в исследовательских институтах и промышленных лабораториях с середины прошлого века. Данное направление является фундаментом двух смежных дисциплин – квантовой криптографии и квантовых вычислений. По всему миру успешно функционируют учреждения высшего образования, выполняющие подготовку кадров в области технологии материалов, нанотехнологий и прикладной физики. Механизм обучения и последующего включения молодых ученых в трудовую деятельность отлажен и стабильно удовлетворяет спрос на квалифицированных специалистов.

Идея квантовых коммуникаций впервые была опубликована в 1983 году [13] и на сегодняшний день имеет высокий уровень всесторонней проработки технологии. За последние 40 лет область квантовой криптографии вышла на уровень промышленного производства коммерческих систем по обеспечению процесса выработки и распределения ключей. Как за рубежом, так и в отечественных университетах имеются соответствующие программы подготовки студентов по квантовой криптографии, проводятся ежегодные форумы и конференции по отраслевой технологии, а также при частичной поддержке коммерческого сектора реализуются и внедряются дополнительные образовательные направления для юных инженеров, а также курсы повышения квалификации для действующих профильных специалистов.

Однако, совершенно иначе обстоит дело с подготовкой ученых и разработчиков в сфере квантовых вычислений. Несмотря на актуальность исследуемо-

го вопроса, а также с учетом возрастающего прикладного интереса к потенциальным возможностям практического применения квантовых компьютеров как со стороны государства, так и в плоскости интересов коммерческого сектора, уровень внедрения тематических образовательных программ в ВУЗах страны, а также работа по повышению информационной осведомленности среди технических специалистов и рядовых пользователей ИТ-инфраструктуры оставляет желать лучшего.

Квантовые вычисления зачастую преподаются в одном из трех вариантов повествования: поверхностное освещение ключевых положений и возможностей квантовых компьютеров в научно-популярном стиле изложения; лекции по линейной алгебре, теории множеств и комплексный анализ как основа квантовых вычислений; прикладная физика и материаловедение с точки зрения вопроса создания квантовых процессов.

Однозначно, каждый озвученный подход важен, однако, зачастую, ни один из указанных выше форматов обучения не подразумевает подготовку инженерных кадров в области программирования квантовых компьютеров. Представленное утверждение подтверждается практически полным отсутствием тематической технической литературы в русскоязычном сегменте и в странах СНГ, за исключением некоторых переводов иностранных книг и редких монографий, подготовленных самостоятельными усилиями молодых ученых.

Таким образом, несмотря на синхронное развитие теории квантовых вычислений и квантовой криптографии (первые работы о квантовых компьютерах появились в 1980-х годах [14, 15]), практическая область квантовых вычислений и смежные технологические подразделения естественной науки значительно отстают от сформулированной за последние десятилетия теории, что разительно отличается в сравнении с аналогичным течением развития квантовых коммуникаций. Более того, в случае сопоставления Россия – мир, становится очевидно, что локальные успехи соотечественников еще сильнее отстают от результатов иностранных научных объединений, что также отмечается в Дорожной карте развития квантовых технологий в Российской Федерации.

В связи с этим авторы уверены, что существует острая необходимость во включении направления «Методы квантового программирования» в существующие программы обучения технических специалистов в формате самостоятельной дисциплины, либо как отдельный глобальный тематический блок в рамках предмета «Технологии и методы программирования».

### **Методы квантового программирования**

Зачастую методы программирования преподаются в контексте более расширенной дисциплины «Технологии и методы программирования» и лишь в отдельных случаях выносятся в качестве отдельного предмета (см. 10.05.01). В любом случае, предполагается внедрение программы «Методы квантового программирования» в одну из указанных выше дис-



циплин, либо, вынесение ее в отдельное поле в качестве самостоятельного направления.

Перед введением нового определения, приведем толкование устоявшихся терминов и формулировок:

*Технологии программирования* – изучение производственных процессов, приводящих к созданию программного обеспечения [16].

*Метод* (от греч. *methodos* — путь исследования или познания) – совокупность относительно однородных приемов, операций практического или теоретического освоения действительности, подчиненных решению конкретной задачи [17].

Строгое определение термина «Методы программирования» в научно-технической литературе отсутствует. За годы развития системы образования и в свете периодической смены образовательных стандартов на сегодняшний день дисциплина «Методы программирования» в подавляющем большинстве своих вариаций за незначительными исключениями охватывает изучение способов представления данных и элементы теории алгоритмов.

После многочасовых дискуссий с учеными и практикующими программистами, с молчаливого согласия коллег авторы берут на себя смелость и осторожно предлагают следующую формулировку:

*Методы программирования* – совокупность теоретико-практических способов представления данных в компьютерных программах, набор принципов построения и реализации алгоритмов работы со структурами данных с последующей оценкой сложности рассматриваемых алгоритмов.

Данное определение будет необходимо для понимания различий между направлением «Методы программирования» и «Методы квантового программирования».

Перед тем, как ввести в употребление новое определение по исследуемому вопросу в квантовой области, приведем фундаментальные логические блоки, изучение которых, по мнению авторов, в обязательном порядке должно быть представлено в рамках обучения профильных специалистов на занятиях по методам квантового программирования.

В первом приближении, авторами предлагается обучение методам квантового программирования в два последовательных этапа, которые в дальнейшем могут дробиться и изменяться в зависимости от уровня подготовки слушателей, а также от преследуемой цели обучения и наличия смежных образовательных программ в рамках реализации конкретного направления подготовки.

1. Теоретические аспекты технологии квантовых вычислений – ознакомительный раздел направлен на постепенное погружение обучающихся в предметную область квантовых вычислений для формирования цельного представления об исследуемой технологии.

1.1. Квантовые компьютеры с точки зрения информатики. Квантовые компьютеры, как и их классические аналоги, направлены на решение вычислительных задач с применением некоторых алгоритмов. Однако, квантовые вычислительные устройства не подпадают под классическое определение машины

Тьюринга, в связи с чем необходимо в предварительном ознакомлении с новой вычислительной парадигмой подробно проработать вопрос концепции, которая стоит за идеей квантовых компьютеров. Существует небольшое количество работ, исследующих вопрос формализации технологии квантовых вычислений [15, 18, 19]. Их идеи не всегда совпадают, а некоторые области затронуты косвенно. Тем не менее, квантовые компьютеры однозначно не подпадают под определение ни стандартной, ни универсальной машины Тьюринга, что является отправной точкой принципиально иного научного подхода к построению квантовых компьютеров, отличающихся от классических уже на базовых принципах создания вычислительных устройств.

1.2. Концепции и абстрактное представление вычислительных машин. Еще один важный и незаслуженно игнорируемый понятийный аспект, который зачастую не упоминается при обучении в представленной предметной области, заключается в следующем. Классические компьютеры являются аналоговыми устройствами, элементная база которых подвержена дискретизации в целях цифрового представления и хранения данных. Квантовые вычислительные устройства также являются аналоговыми машинами. Однако, не беря во внимание операцию измерения квантового состояния, дискретная составляющая в квантовых вычислениях полностью отсутствует. Более того, существует некоторый класс квантовых схем, являющийся в некотором смысле набором аналоговых вычислителей, которые могут быть успешно симулированы на квантовых компьютерах. Данная концепция подлежит обязательному рассмотрению на занятиях со слушателями прикладных курсов.

1.3. Физика и техническое исполнение квантовых устройств. У обучающихся уровень представления и осознания методов работы инновационной технологии пропорционально зависит от детальности формирования общей картины исследуемого направления. В связи с этим, обязательным тематическим блоком должен выступить материал научно-теоретического характера о физических топологиях квантовых компьютеров, под которыми понимаются сведения о механизмах создания квантовых вычислительных устройств. К основным инженерным направлениям проектирования таких компьютеров относят устройства: на ионных ловушках; взаимодействие с фотонами; использование сверхпроводников; применение нейтральных атомов.

1.4. Вспомогательные сведения. На данном этапе стоит проговорить важные формальные определения – отличие физического кубита от логического, критерии ди Винченцо к требованиям по созданию квантовых компьютеров [20], а также предполагаемую последовательность сменяемых друг друга периодов развития квантовых вычислительных устройств (текущий период – NISQ, Noisy Intermediate-Scale Quantum computers) [21] и прогнозируемые временные и качественные характеристики развития кван-



товых вычислений в среднесрочной и долгосрочной перспективе.

1.5. Математический аппарат квантовых вычислений. После того, как у слушателей сформировалось прочное представление о том, как устроены и по каким законам работают квантовые компьютеры, требуется демонстрация математических правил и законов, в соответствии с которыми происходит взаимодействие с квантовыми состояниями и манипуляция квантовыми битами и квантовыми вентилями. Зачастую предполагается, что слушатели уверенно владеют математическим анализом и линейной алгеброй, в связи с чем, при необходимости, следует провести вспомогательные практические занятия по теории групп, после чего у обучающегося будет иметься полный арсенал инструментов по выполнению математического моделирования квантовых вычислений.

2. Программирование квантовых вычислительных устройств. На следующем этапе реализуется переход обучения в практическую плоскость, в рамках которого выполняется подготовка специалистов в области программирования квантовых компьютеров.

2.1. Сложности алгоритмов. Исследование подходов к оценке сложности алгоритмов и расширение множества классов сложности выполнения прикладных задач до возможностей квантовых компьютеров, дополняющих существующий зоопарк [сложностей] множествами VQP, EQP, QMA и другими [22, 23].

2.2. Алгоритмы. Из предыдущего пункта закономерно следует обзор и математическое моделирование алгоритмов, выполнение которых на квантовых машинах подразумевает ускорение по времени в сравнении с классическими аналогами. На данном этапе становится очевидным, какие задачи квантовые компьютеры способны выполнять результативнее классических и для каких действий их применение видится бессмысленным.

2.3. Инструменты программирования. Обзор и анализ применения наиболее востребованных и перспективных фреймворков и библиотек разработки для квантового компьютерного программирования.

2.4. Программирование квантовых вычислительных устройств. Практическое изучение облачных квантовых вычислительных машин и локальных квантовых симуляторов через программирование прикладных квантовых алгоритмов.

2.5. Перспективы. Формирование общего представления о возможных дальнейших сценариях развития области квантовых вычислений с учетом общемирового опыта в представленной индустрии. Данный подраздел является логическим завершением рассматриваемого образовательного курса.

На основе вышесказанного, а также отталкиваясь от собственного опыта преподавательской деятельности в исследуемой области, авторы предлагают следующую трактовку определения «Методы квантового программирования»:

*Методы квантового программирования* – междисциплинарная совокупность физико-математических приемов построения квантовых вычислительных устройств, теоретико-практических способов

реализации квантовых алгоритмов с последующей оценкой сложности рассматриваемых квантовых алгоритмов.

Представленная формулировка служит наглядной демонстрацией отличия методов квантового программирования от методов [классического] программирования, и является фундаментом построения и создания соответствующих образовательных программ системы высшего образования, направленных на повышение уровня ИТ-грамотности профильных специалистов, что в перспективе неизбежно приведет к квантовому превосходству активно развивающейся отечественной высокотехнологичной отрасли квантовых вычислений.

### **Критика**

Несмотря на серьезное внимание и некоторый контроль к области квантовых вычислений со стороны государственных органов и коммерческих структур, существуют критические подходы к оценке перспектив зарождающейся высокотехнологичной отрасли экономики [24-27]. На сегодняшний день, действительно, вопрос о возможности создания масштабируемого и эффективного квантового компьютера остается открытым, и практическая применимость подобного устройства в ближайшем будущем остается под вопросом. Однако, международный масштаб исследований и «квантовая гонка», негласно возникшая в конце 2010-х годов не оставляет сомнений, что участие в научно-практических исследованиях по данному направлению, пусть и не является приоритетным, но однозначно должно быть обязательным для исполнения лидирующими научными организациями страны, чтобы избежать негативных последствий возможного сценария технологического отставания в сфере квантовых технологий, как это произошло с развитием микроэлектронных компонентов в наши дни.

### **Дальнейшие исследования**

В рамках представленного доклада и имеющихся организационных ограничений не представляется возможным полное изложение всех аспектов формализации методов квантового программирования. Более детально раскрытие подходов к формированию онтологии рассматриваемого направления, а также предложения по наполнению рабочей программы дисциплины (РПД), будет представлено в полнотекстовой статье и учебно-методическом пособии, подготовка которых находится на финальном этапе своего создания.

### **Заключение**

Данная работа является предварительным шагом на пути к созданию онтологии и формализации современной вычислительной парадигмы в образовательном процессе в контексте направления Методов квантового программирования.

Подтверждена актуальность необходимости внедрения новой дисциплины, рассмотрены ключевые аспекты научно-практического направления и предложено формальное определение термина «Методы квантового программирования». Представленные результаты служат отправной точкой для дальнейшего

закрепления фундаментальных положений расстраиваемой дисциплины.

### Литература

1. H.R.6227 – National Quantum Initiative Act, 2017 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.congress.gov/bill/115th-congress/house-bill/6227/text>
2. H.R.7535 – Quantum Computing Cybersecurity Preparedness Act, 2021 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.congress.gov/bill/117th-congress/house-bill/7535/text>
3. National Security Memorandum on Promoting United States Leadership in Quantum Computing While Mitigating Risks to Vulnerable Cryptographic Systems, 05.2022 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2022/05/04/national-security-memorandum-on-promoting-united-states-leadership-in-quantum-computing-while-mitigating-risks-to-vulnerable-cryptographic-systems/>
4. Outline of the People's Republic of China 14th Five-Year Plan for National Economic and Social Development and Long-Range Objectives for 2035 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://cset.georgetown.edu/publication/china-14th-five-year-plan/>
5. Policy paper: National quantum strategy [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.gov.uk/government/publications/national-quantum-strategy>
6. Дорожная карта развития «сквозной» цифровой технологии «Квантовые технологии [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://digital.gov.ru/ru/documents/6650/>
7. Проект «Наука в деталях» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://naukavdetalyah.tilda.ws/>
8. Центр «Квантовая оптика и квантовая информатика» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://master.basnet.by/lqo>
9. Заявление о намерениях запуска проекта в сфере квантовых технологий [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://smartpress.by/news/10684/>
10. Quantum Economy Blueprint, 2024 [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://www3.weforum.org/docs/WEF\\_Quantum\\_Economy\\_Blueprint\\_2024.pdf](https://www3.weforum.org/docs/WEF_Quantum_Economy_Blueprint_2024.pdf)
11. Overview of Quantum Initiatives Worldwide, 2023 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://qureca.com/overview-of-quantum-initiatives-worldwide-2023/>
12. NATO's Quantum Technologies Strategy [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://www.nato.int/cps/en/natohq/official\\_texts\\_221777.htm](https://www.nato.int/cps/en/natohq/official_texts_221777.htm)
13. S.J. Wiesner. Conjugate Coding. SIGACT News 15:1, pp. 78–88, 1983.
14. Манин Ю.И. Вычислимое и невычислимое. – М.: Сов. радио, 1980. – 128 с.
15. R.P. Feynman. Simulating Physics with Computers. IJTP, Vol. 21, Nos. 6/7, 1982.
16. Анашкина Н.В., Петухова Н.Н., Смолянинов В.Ю. Технологии и методы программирования – М.: Издательский центр «Академия», 2012. – 384 с.
17. Коджаспирова Г.М., Коджаспиров А.Ю. Педагогический словарь. – М.: Издательский центр «Академия», 2000. – 176 с.
18. D. Deutsch. Quantum theory, the Church-Turing principle and the universal quantum computer. Proc. R. Soc. Lond. A 400, pp. 97-117, 1985.
19. M. Ozawa. On the Halting Problem for Quantum Turing Machines. Sch. Inf. Science, Vol 1066, pp. 174-183, 1998.
20. D.P. DiVincenzo. The Physical Implementation of Quantum Computation. arXiv:quant-ph/0002077v3 13 Apr 2000.
21. J. Preskill. Quantum Computing in the NISQ Era and Beyond. Quantum, Vol. 2, pp. 79-99. July 2018.
22. S Aaronson. The Limits of Quantum Computers. Scientific American, March 2008.
23. S. Aaronson, G. Kuperberg. The Complexity Zoo [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://complexityzoo.net/Complexity\\_Zoo](https://complexityzoo.net/Complexity_Zoo)
24. Financial Times: The quantum computing bubble [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.ft.com/content/6d2e34ab-f9fd-4041-8a96-91802bab7765>
25. Дьяконов М.И. Будет ли у нас когда-нибудь квантовый компьютер? В защиту науки. Бюллетень №21, при Президиуме Российской академии наук – М.: ПРОБЕЛ-2000, 2018. – 140 с.
26. Article: If Quantum Computers are not Possible Why are Classical Computers Possible [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://gilkalai.wordpress.com/2017/10/16/if-quantum-computers-are-not-possible-why-are-classical-computers-possible/>
27. MIT Scientist Offers \$100,000 to Anyone Who Can Prove Quantum Computing Is Impossible [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.popsci.com/science/article/2012-02/mit-scientist-offers-100000-anyone-who-can-prove-quantum-computing-impossible/>

## QUANTUM PROGRAMMING METHODS: APPROACHES TO THE FORMATION OF ONTOLOGY AND FORMALIZATION OF THE MODERN COMPUTING PARADIGM IN THE EDUCATIONAL PROCESS

A.A. Kryuchkov, M.A. Knyazev

MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russian Federation, [kryuchkov\\_a@mirea.ru](mailto:kryuchkov_a@mirea.ru)

**Abstract.** The issue of the relevance of the integration of modeling tools and the development of quantum application programs on quantum computing devices are considered, the formal provisions of quantum programming methods are defined and systematized as part of the educational process of learning and preparation engineers in the context of digitalization of the economy.

**Keywords.** Quantum programming methods, programming methods, quantum technology, quantum computing.