«УТВЕРЖДАЮ»

Председатель научного совета РАН «Квантовые технологии»,
академик-секретарь ОНИТ РАН,
академик РАН

Г.Я. Красников

«18» мая 2022 г.

ПРОТОКОЛ
расширенного заседания Бюро Научного совета РАН «Квантовые технологии» (далее — «Совет»)
по теме «Экспертное обсуждение отчета о реализации дорожной карты «Квантовые вычисления» в 2021 г.»

МЕСТО И ДАТА ПРОВЕДЕНИЯ: г. Москва, Ленинский пр-т, 32А, здание РАН, корп. Г, 3 эт., Синий зал. 12 мая 2022 г. с 10:00 до 14:01.

ФОРМАТ ПРОВЕДЕНИЯ: смешанный – очный и дистанционный (онлайн в Zoom).

ПРЕДСЕДАТЕЛЬСТВОВАЛ:

Председатель Совета, академик-секретарь Отделения нанотехнологий и информационных технологий (далее – ОНИТ) РАН, академик РАН Г.Я. Красников.

УЧАСТВОВАЛИ:

Члены Бюро Совета

1. Красников Геннадий Яковлевич, академик РАН	председатель Совета, руководитель приоритетного технологического направления по электронным технологиям, академик-секретарь ОНИТ РАН, генеральный директор АО «НИИМЭ» (очно)
2. Горбацевич Александр Алексеевич, академик РАН	заместитель председателя Совета, заведующий лабораторией ФИАН, заведующий кафедрой квантовой физики и наноэлектроники НИУ МИЭТ, заведующий лабораторией АО «НИИМЭ» (очно)

3. Холево Александр Семёнович, академик РАН	заместитель председателя Совета, заведующий отделом, главный научный сотрудник МИАН (онлайн)
4. Александров Евгений Борисович, академик РАН	руководитель лаборатории атомной радиоспектроскопии ФТИ им. А.Ф. Иоффе (онлайн)
5. Каляев Игорь Анатольевич, академик РАН	научный руководитель направления ЮФУ, главный научный сотрудник НИИ МВС ЮФУ, председатель Совета по приоритетному направлению СНТР РФ «Переход к цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, новым материалам и способам конструирования, создание систем обработки больших данных, машинного обучения и искусств (онлайн)
6. Кведер Виталий Владимирович, академик РАН	научный руководитель ИФТТ РАН (онлайн)
7. Латышев Александр Васильевич, академик РАН	директор ИФП СО РАН (онлайн)
8. Панченко Владислав Яковлевич, академик РАН	научный руководитель ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, председатель совета РФФИ (онлайн)
9. Сурис Роберт Арнольдович, академик РАН	главный научный сотрудник ФТИ им. А.Ф. Иоффе (онлайн)
10. Волович Игорь Васильевич, член-корреспондент РАН	заведующий отделом, главный научный сотрудник МИАН (онлайн)
11. Горнев Евгений Сергеевич, член-корреспондент РАН	заместитель руководителя приоритетного технологического направления АО «НИИМЭ» (очно)
12. Колачевский Николай Николаевич, член-корреспондент РАН	директор ФИАН (очно)
13. Красильник Захарий Фишелевич, член-корреспондент РАН	руководитель научного направления «Физика микро- и наноструктур» ИФМ РАН – филиала ИПФ РАН (онлайн)
14. Махлин Юрий Генрихович, член-корреспондент РАН	главный научный сотрудник ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН, заведующий лабораторией физики конденсированного состояния НИУ ВШЭ (онлайн)
15. Богданов Юрий Иванович, доктор физико-математических наук	главный научный сотрудник, руководитель лаборатории физики квантовых компьютеров ФТИАН им. К.А. Валиева РАН (онлайн)

16. Кулик Сергей Павлович, доктор физико-математических наук	научный руководитель Центра квантовых технологий физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова (очно)
17. Устинов Алексей Валентинович, доктор физико-математических наук	руководитель группы РКЦ, заведующий лабораторией «Сверхпроводящие метаматериалы» НИТУ «МИСиС», профессор, директор Физического института Технологический институт Карлсруэ (Германия) (онлайн)
18. Фельдман Эдуард Беньяминович, доктор физико-математических наук	заведующий лабораторией ИПХФ РАН (онлайн)
19. Тельминов Олег Александрович, кандидат технических наук	ученый секретарь Совета, начальник лаборатории АО «НИИМЭ», доцент базовой кафедры микро- и наноэлектроники МФТИ (очно)

Члены Совета

20. Двуреченский Анатолий Васильевич, член-корреспондент РАН	заведующий лабораторией неравновесных полупроводниковых систем ИФП СО РАН, профессор кафедры «Физика полупроводников» Новосибирского государственного университета (онлайн)
21. Никитов Сергей Аполлонович, член-корреспондент РАН	директор ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН (очно)
22. Рябцев Игорь Ильич, член-корреспондент РАН	заведующий лабораторией ИФП СО РАН (онлайн)
23. Калачёв Алексей Алексеевич, профессор РАН, доктор физико-математических наук	директор ФИЦ КазНЦ РАН (онлайн)
24. Печень Александр Николаевич, профессор РАН, доктор физико-математических наук	заведующий отделом МИАН (онлайн)
25. Абгарян Каринэ Карленовна, доктор физико-математических наук	главный научный сотрудник, руководитель отдела ФИЦ ИУ РАН, профессор факультета вычислительной математики и кибернетики МГУ имени М.В. Ломоносова, заведующий кафедрой 810Б «Информационные технологии в моделировании и управлении» на базе ФИЦ ИУ РАН МАИ (очно)

26. Аблаев Фарид Мансурович, доктор физико-математических наук	заведующий кафедрой теоретической кибернетики Казанского (Приволжского) федерального университета, главный научный сотрудник Физико-технического института ФИЦ КазНЦ РАН (онлайн)
27. Андрияш Александр Викторович, доктор физико-математических наук	научный руководитель ФГУП «ВНИИА» (онлайн)
28. Астафьев Олег Владимирович, доктор физико-математических наук	заведующий лабораторией искусственных квантовых систем МФТИ (очно)
29. Звездин Анатолий Константинович, доктор физико-математических наук	главный научный сотрудник ИОФ РАН (онлайн)
30. Моисеев Сергей Андреевич, доктор физико-математических наук	директор Казанского квантового центра («КАИ-КВАНТ») КНИТУ-КАИ, ООО «ККЦ» (онлайн)
31. Рязанов Валерий Владимирович, доктор физико-математических наук	заведующий лабораторией сверхпроводимости ИФТТ РАН (онлайн)
32. Сысоев Николай Николаевич, доктор физико-математических наук	декан физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова (онлайн)
33. Велихов Василий Евгеньевич, кандидат физико-математических наук	директор-координатор объединенного вычислительного кластера НИЦ «Курчатовский институт» (онлайн)
34. Глейм Артур Викторович, кандидат технических наук	начальник Департамента квантовых коммуникаций ОАО «РЖД» (онлайн)
35. Гуртовой Владимир Леонидович, кандидат физико-математических наук	старший научный сотрудник ИПТМ РАН (онлайн)
36. Юнусов Руслан Рауфович, кандидат физико-математических наук	руководитель проектного офиса по квантовым технологиям Госкорпорации «Росатом», генеральный директор ООО «СП «Квант» (Госкорпорация «Росатом») (очно)

От Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации

37. Паршин Максим Викторович	заместитель Министра цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации Минцифры России (онлайн)

От Министерства экономического развития Российской Федерации

38. Шипунов Владимир Александрович, кандидат химических наук, кандидат экономических наук	начальник отдела инновационных проектов Департамента стратегического развития и инноваций Минэкономразвития России (очно)

От Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом», г. Москва

39. Солнцева Екатерина Борисовна, кандидат физико-математических наук	директор по цифровизации Госкорпорации «Росатом» (очно)
40. Папай Сергей Александрович	директор проекта «Развитие квантовых вычислений» Госкорпорации «Росатом» (очно)

От Общества с ограниченной ответственностью «Совместное предприятие «Квантовые технологии» (Госкорпорация «Росатом»), г. Москва

41. Борисов Ярослав Михайлович	руководитель направления по новым проектам ООО «СП «Квант» (Госкорпорация «Росатом») (онлайн)
42. Вербенко Борис Владимирович	руководитель направления ООО «СП «Квант» (Госкорпорация «Росатом») (онлайн)
43. Князькин Максим Михайлович	руководитель направления ООО «СП «Квант» (Госкорпорация «Росатом») (очно)
44. Кольченко Михаил Алексеевич	начальник отдела ООО «СП «Квант» (Госкорпорация «Росатом») (онлайн)
45. Малахова Виктория Сергеевна	менеджер ООО «СП «Квант» (Госкорпорация «Росатом») (онлайн)
46. Насибулин Михаил Михайлович	заместитель генерального директора ООО «СП «Квант» (Госкорпорация «Росатом») (очно)
47. Поздняков Юрий Игоревич	директор по технологическим и научным разработкам ООО «СП «Квант» (Госкорпорация «Росатом») (онлайн)
48. Рябинина Анна Юрьевна	исполнительный директор ООО «СП «Квант» (Госкорпорация «Росатом») (онлайн)
49. Танкиев Магомед Ибрагимович	менеджер ООО «СП «Квант» (Госкорпорация «Росатом») (онлайн)

От ООО «МЦКТ» (Российский квантовый центр), г. Москва

50. Белотелов Владимир Игоревич, профессор РАН, доктор физико-математических наук	руководитель научной группы РКЦ, доцент МГУ имени М.В. Ломоносова (онлайн)

51. Кавокин Алексей Витальевич, доктор физико-математических наук	руководитель группы Квантовой Поляритоники РКЦ, руководитель лаборатории оптики спина СПбГУ (онлайн)
52. Федоров Алексей Константинович, кандидат физико-математических наук	руководитель проекта «Квантовые информационные технологии» РКЦ (очно)

От Открытого акционерного общества «Российские железные дороги», г. Москва

53. Дорожкин Павел Сергеевич, кандидат физико-математических наук	заместитель начальника Департамента квантовых коммуникаций ОАО «РЖД» (онлайн)

От Института физики микроструктур РАН — филиала Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук», г. Нижний Новгород

54. Новиков Алексей Витальевич, доктор физико-математических наук	директор ИФМ РАН – филиала ИПФ РАН (онлайн)

От Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск

55. Ненашев Алексей Владимирович, кандидат физико-математических наук	старший научный сотрудник ИФП СО РАН (онлайн)
56. Колесников Алексей Викторович	сотрудник ИФП СО РАН (онлайн)

От Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений», г.о. Солнечногорск Московской обл.

57. Пальчиков Виталий Геннадьевич, доктор физико-математических наук	главный научный сотрудник ФГУП «ВНИИФТРИ», профессор НИЯУ МИФИ (очно)

От Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)», г. Долгопрудный Московской обл.

58. Бугаев Александр Степанович, академик РАН	заведующий кафедрой МФТИ (очно)
59. Шарапов Андрей Анатольевич	аспирант базовой кафедры «Микро- и наноэлектроника» МФТИ, научный сотрудник АО «НИИМЭ» (очно)

От Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», г. Москва

60. Родионов Илья Анатольевич, кандидат технических наук	директор научно-образовательного центра «Функциональные Микро/Наносистемы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (онлайн)

От Физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», г. Москва

61. Крупенин Владимир Александрович, доктор физико-математических наук	ведущий научный сотрудник лаборатории «Криоэлектроника» Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, ведущий научный сотрудник Центра квантовых технологий физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова (очно)
62. Шорохов Владислав Владимирович, кандидат физико-математических наук	доцент кафедры физики полупроводников и криоэлектроники Физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, ведущий научный сотрудник Центра квантовых технологий физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова (очно)

От Центра квантовых технологий физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва

63. Страупе Станислав Сергеевич, кандидат физико-математических наук	руководитель сектора квантовых вычислений Центра квантовых технологий физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, руководитель научной группы РКЦ (очно)

ПОВЕСТКА ДНЯ:

академик РАН Красников Геннадий Яковлевич (АО «НИИМЭ»). Открытие заседания.

(1) к.ф.-м.н. Солнцева Екатерина Борисовна (Госкорпорация «Росатом»). Вступительное слово о деятельности Госкорпорации «Росатом» в области развития квантовых вычислений.

(2) д.ф.-м.н. Устинов Алексей Валентинович (РКЦ, НИТУ «МИСиС», Технологический институт Карлсруэ (Германия)). О разработке прототипа квантового процессора на основе сверхпроводников.

(3) к.ф.-м.н. Юнусов Руслан Рауфович (ООО «СП «Квант» (Госкорпорация «Росатом»)). Отчет об итогах реализации дорожной карты развития высокотехнологичной области «Квантовые вычисления» в 2021 году.
(4) член-корр. РАН Колачевский Николай Николаевич (ФИАН). О разработке прототипа квантового процессора на основе ионов в ловушках.
(5) член-корр. РАН Красильник Захарий Фишелевич (ИФМ РАН – филиал ИПФ РАН). Разработка кубитов на основе эпитаксиальных гетероструктур Si/SiGe.
(6) к.ф.-м.н. Федоров Алексей Константинович (РКЦ). Разработка квантовых алгоритмов и программного обеспечения.
(7) д.ф.-м.н. Кавокин Алексей Витальевич (РКЦ, СПбГУ). Поляритонный кубит: концепция и экспериментальная реализация.
(8) профессор РАН, д.ф.-м.н. Белотелов Владимир Игоревич (РКЦ, МГУ имени М.В. Ломоносова). Когерентные магноны в микродисках ЖИГ: на пути к квантовой магнонике.
(9) к.ф.-м.н. Страупе Станислав Сергеевич (МГУ имени М.В. Ломоносова, РКЦ). Атомные и оптические квантовые вычисления.
(10) д.ф.-м.н. Крупенин Владимир Александрович (Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Центр квантовых технологий Физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова). Кремниевые спиновые кубиты для универсальных квантовых вычислений.
(11) академик РАН Горбацевич Александр Алексеевич (ФИАН, НИУ МИЭТ, АО «НИИМЭ»). Экспертное мнение Совета об отчете о реализации дорожной карты развития высокотехнологичной области «Квантовые вычисления» в 2021 году.
Выработка рекомендаций по консолидации отчета. Подведение итогов заседания.

(академик РАН Г.Я. Красников; академик РАН А.А. Горбацевич;
академик РАН И.А. Каляев; академик РАН Р.А. Сурис; академик РАН А.С. Холево;
член-корр. РАН И.В. Волович; член-корр. РАН Н.Н. Колачевский;
член-корр. РАН З.Ф. Красильник; член-корр. РАН И.И. Рябцев;
профессор РАН, д.ф.-м.н. В.И. Белотелов; профессор РАН, д.ф.-м.н. А.Н. Печень;
д.ф.-м.н. О.В. Астафьев; д.ф.-м.н. А.К. Звездин; д.ф.-м.н. А.В. Кавокин;
д.ф.-м.н. В.А. Крупенин; д.ф.-м.н. С.П. Кулик; д.ф.-м.н. В.Г. Пальчиков;
д.ф.-м.н. А.В. Устинов; к.т.н. И.А. Родионов; к.ф.-м.н. Е.Б. Солнцева;
к.ф.-м.н. С.С. Страупе; к.ф.-м.н. А.К. Федоров;
к.х.н., к.э.н. В.А. Шипунов; к.ф.-м.н. Р.Р. Юнусов)

1. В заседании приняли участие 36 из 46 членов Бюро Совета и членов Совета, а также 27 приглашенных ученых и специалистов – всего 63 человека из 48 организаций и их подразделений. В обсуждении повестки дня участвовало 23 человека.
2. Во вступительном слове при открытии заседания Председатель Совета, академик РАН Г.Я. Красников сообщил о подготовленном Госкорпорацией «Росатом» (ООО «СП «Квант») отчете о результатах реализации дорожной карты развития высокотехнологичной области «Квантовые вычисления» (далее – Дорожной карты) в 2021 году (далее – Отчет). Во исполнение пункта 7 протокола совещания у Заместителя Председателя Правительства Российской Федерации Чернышенко Д.Н. от 20.04.2021 № ДЧ-П10-34пр (далее – Поручение) Отчет, состоящий из 14 отчетов о выполнении мероприятий Дорожной карты в 2021 году, а также

отчета о достижении целевых показателей Дорожной карты в 2021 году, предварительно направлен всем членам Совета для подготовки экспертной оценки. Результатом настоящего заседания должна являться выработка рекомендаций по консолидации Госкорпорацией «Росатом» совместно с РАН Отчета с целью его последующего направления в Правительство Российской Федерации в срок, установленный Поручением – до 20.05.2022.

3. (1) к.ф.-м.н. Е.Б. Солнцева (Госкорпорация «Росатом») проинформировала о реализуемом во исполнение указания Президента Российской Федерации от 07.07.2021 № Пр-1196 комплексе мероприятий по разработке и внедрению специального режима управления работами по развитию квантовых вычислений, предусматривающего гибкий механизм согласования изменений Дорожной карты. Внедрение такого механизма обусловлено тем, что разработка квантовых процессоров находится на ранней стадии технологической готовности, многие принципиальные технологические вопросы ещё не решены, что требует ведения исследований по широкому кругу направлений, находящихся на передовом крае фундаментальной науки.

   Во исполнение указания Президента Российской Федерации и в соответствии с решением Правительства Российской Федерации Госкорпорацией «Росатом» ведется работа по разработке проекта Дорожной карты на период 2025-2030 гг. в рамках формирования долгосрочной программы развития квантовых вычислений в России до 2030 года.

4. (2) д.ф.-м.н. А.В. Устинов (РКЦ, НИТУ «МИСиС», Технологический институт Карлсруэ (Германия)) сообщил о результатах развития квантовых вычислений на основе сверхпроводников в 2020-2021 гг. в рамках Дорожной карты.

   Представлены результаты развития сверхпроводниковых кубитных систем на основе двух альтернативных платформ: кубиты-трансмоны и кубиты-флаксониумы. На основе кубитов-флаксониумов реализован двухкубитный квантовый процессор с перестраиваемым взаимодействием между кубитами, на котором продемонстрированы однокубитные вентильные операции с точностью более 99,97 % и двухкубитные вентильные операции с точностью более 99,2 %. Достигнутые результаты находятся на конкурентном мировом уровне и являются рекордными в России. Отмечено, что образцы процессора были изготовлены на базе совместного исследовательского центра «Функциональные микро/наносистемы» МГТУ им. Н.Э. Баумана и ФГУП «ВНИИА». Разработка квантовой схемы и экспериментальные исследования образцов проводились в лаборатории «Сверхпроводящие метаматериалы» НИТУ «МИСиС».

   В НИТУ «МИСиС» был разработан четырехкубитный квантовый процессор с перестраиваемым взаимодействием между кубитами-трансмонами. Тестовые образцы процессора были изготовлены в ЦКП МФТИ. Результаты первой реализации показали необходимость доработки топологии схемы и технологического процесса для достижения более высоких времен когерентности кубитов и соответствующих целевых показателей Дорожной карты.

   В МФТИ успешно реализован 5-кубитный квантовый симулятор на базе кубитов-трансмонов. Демонстрационная схема была рассчитана и разработана сотрудниками Лаборатории искусственных квантовых систем МФТИ и изготовлена на технологической базе ЦКП МФТИ. Проведена техническая демонстрация работы симулятора на основе операций iSWAP и отработан обмен

квантовым состоянием между тремя кубитами-трансмонами с точностью более 90%. Отмечена важность итерационного процесса разработки многокубитных систем, включающего отработку технологии и последовательную доработку топологии системы, позволившего увеличить времена релаксации кубитов с 200 нс до более 10 мкс.

Отмечены сложности в реализации квантовых процессоров с числом кубитов более 8 как на трансмонах, так и на флаксониумах, связанные, во-первых, с нехваткой СВЧ/ВЧ оборудования для контроля кубитов, а во-вторых, с необходимостью развития существующих и разработки новых технологических процессов. Решение второй проблемы возможно при привлечении к работам по Дорожной карте технологической базы совместного исследовательского центра «Функциональные микро/наносистемы» МГТУ им. Н.Э. Баумана и ФГУП «ВНИИА» и при дальнейшем развитии технологической базы ЦКП МФТИ.

5. (3) В своем выступлении генеральный директор ООО «СП «Квант» (Госкорпорация «Росатом»), член Совета к.ф.-м.н. Р.Р. Юнусов сообщил об Отчете и об основных научно-технологических, экосистемных и инфраструктурных достижениях в рамках реализации Дорожной карты в 2021 году:

3.1. Научные результаты:

3.1.1. В целях выполнения Дорожной карты ООО «СП «Квант» (созданный в контуре Госкорпорации «Росатом» оператор Дорожной карты, единый центр компетенций и проектный офис по квантовым технологиям) заключил договор с ООО «МЦКТ» (Российский квантовый центр) на выполнение научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы «Развитие высокотехнологичной области «Квантовые вычисления» (далее – НИОКР) от 05.10.2021 в срок до 31.12.2024. Весь комплекс НИОКР состоит из 125 этапов по направлениям и тематикам, предусмотренным Дорожной картой. Финансирование НИОКР осуществляется за счет внебюджетных средств, выделенных Госкорпорацией «Росатом».

Работы выполняются в кооперации с ведущими российскими вузами и научно-исследовательскими институтами и центрами, в т.ч. МГУ, ФИАН, Сколтех, МИСиС, МФТИ, ВШЭ, ННГУ им. Лобачевского, Институт физики микроструктур РАН, ФТИ им. Иоффе, Институт физики полупроводников им. Ржанова, Институт прикладной физики РАН, Институт химии высокочистых веществ им. Девятых РАН, МПГУ.

В рамках НИОКР должны быть выполнены исследования и проработки по следующим направлениям (в соответствии с тематиками НИОКР из раздела Дорожной карты «Приоритетные технологии»):

– разработка полного стека программного обеспечения для квантовых вычислений;

– реализация квантовых вычислений на основе сверхпроводников, нейтральных атомов, ионов в ловушках, фотонных чипов, а также на основе перспективных способов реализации кубитов.

3.1.2. В рамках реализации Дорожной карты в 2021 году на базе Физического института имени П.Н. Лебедева РАН проведен эксперимент по демонстрации работы 4-х кубитного квантового процессора на основе ионов в ловушках и выполнению квантовых операций с использованием кудитных состояний. В рамках работы продемонстрирована система из 4 кубитов без наращивания

числа ионов, с применением оригинальной технологии масштабирования квантовых процессоров с использованием многоуровневых носителей информации – кудитов.

В ходе эксперимента исследователи захватили в вакуумной камере 2 иона и с помощью лазера провели над ними набор однокудитных операций, двухкубитную операцию внутри кудита, а также операцию по перепутыванию частиц (Мёльмера-Соренсона).

В соответствии с пунктом 4.3.4 методики расчета показателя «Количество кубитов в квантовом процессоре на отчетный год», утвержденной приказом Минцифры России от 29.10.2021 № 1113 (актуальная методика, соответствующая нижеописанной, утверждена приказом Минцифры России от 28.02.2022 № 143):

количество кубитов в квантовом процессоре (К) на основе ионов в ловушке определяется по формуле:

$$K = N*\log_2(D),$$

где:

N – количество ионов в процессоре, которое измеряется по числу флюоресцирующих ионов на изображении ионного кристалла;

D – количество состояний в ионе, используемых для кодирования информации.

В зависимости от конфигурации системы D может принимать значение 2 или 4.

Расчет:

в проведенном эксперименте D равняется 4 (четыре) – кудиты в четырех состояниях (кукварты);

N равняется 2 (два);

$$K = 2*\log_2 4 = 2*2 = 4.$$

Прототип квантового процессора состоял из двух ионов, в каждом из которых информация кодировалась в четырех состояниях. Таким образом, количество кубитов в данном квантовом процессоре равняется 4 (четыре).

По итогам эксперимента подготовлен соответствующий протокол испытаний от 24.12.2021, содержащий подробное описание и сведения о достижении результата, который был представлен в составе материалов Совета.

Данный результат, полученный на ионной квантовой платформе, является впервые успешно продемонстрированным в российской науке достижением, благодаря которому Россия по итогам 2021 года, вместе с США и Австрией, входит в тройку стран, показавших работу перспективных квантовых процессоров на основе многоуровневых носителей информации – кудитов.

Достигнутое в рамках проведенного эксперимента значение в 4 кубита в квантовом процессоре на основе ионов в ловушках соответствует значению результата «Разработаны прототипы квантовых процессоров в соответствии с мероприятиями дорожной карты «Квантовые вычисления» (далее – Результат) федерального проекта «Цифровые технологии» национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации» и показателя «Количество кубитов в квантовом процессоре», установленным в 2021 году.

3.1.3. В рамках развития систем облачного доступа к квантовым компьютерам, а также разработки прикладного и системного программного обеспечения для квантовых вычислений в соответствии с Дорожной картой в 2021 году:

– разработаны три модуля облачной платформы (модуль подавления и коррекции ошибок, модуль квантовых алгоритмов, модуль интерфейсов доступа к квантовым эмуляторам);

– реализовано и разработано 5 квантовых алгоритмов (алгоритм Дойча-Йожи классификации сбалансированных и константных функций, алгоритм Саймона определения периода булевой функции по отношению к операции «исключающее ИЛИ», алгоритм обменного теста сравнения квантовых состояний, алгоритм из семейства алгоритмов квантовой приближенной оптимизации, алгоритм симуляции протокола квантового распределения ключей);

– проведено 1547 экспериментов на облачной платформе путем запуска тестового алгоритма.

3.2. Экосистемные результаты.

3.2.1. В 2020 году подписано соглашение о создании консорциума «Национальная квантовая лаборатория» (далее – консорциум НКЛ) для развития в Российской Федерации высокотехнологичной области «Квантовые вычисления», в том числе путем развития иных квантовых и смежных с квантовыми технологий, взаимосвязанных с квантовыми вычислениями, для достижения синергетического эффекта в рамках реализации Дорожной карты.

Участниками консорциума НКЛ стали: ООО «СП «Квант» (лидер консорциума), ООО «МЦКТ» (Российский квантовый центр), Фонд «Сколково», НИТУ «МИСиС», ФИАН, НИУ «Высшая школа экономики», МФТИ.

Проводится работа по присоединению к консорциуму НКЛ новых участников, среди которых в т.ч. Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Южный федеральный университет, Дальневосточный федеральный университет, Томский государственный университет, Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Южно-Уральский государственный университет.

Для функционирования экосистемы в рамках консорциума НКЛ в 2021 году проводились инфраструктурные мероприятия, позволяющие осуществлять предусмотренные Дорожной картой работы. Подписано соглашение о партнерстве от 25.05.2021 между Фондом «Сколково», Госкорпорацией «Росатом» и ООО «СП «Квант», в соответствии с которым Госкорпорация «Росатом» намеревается осуществлять исследовательскую деятельность на территории инновационного центра «Сколково» через ООО «СП «Квант» как центр НИОКР.

3.2.2. В целях создания в России научно-технологической экосистемы квантовых вычислений, включая развитие кадрового потенциала, создание образовательных программ, формирование профессиональных сообществ, взаимодействие с технологическими и финансовыми партнерами, в рамках Дорожной карты реализованы следующие ключевые мероприятия (достигнуты результаты):

– 5 ВУЗов-партнеров реализуют образовательные программы магистратуры и аспирантуры по квантовым вычислениям:

- МФТИ (программа магистратуры «Прикладные квантовые технологии», программы аспирантуры «Теоретическая физика», «Оптика», «Физика конденсированного состояния»);
- МИФИ (программа магистратуры «Квантовые вычислительные системы и прецизионные измерения»);

- МГУ им. М.В. Ломоносова (программа магистратуры «Квантовые вычисления»);
- НИУ «Высшая школа экономики» (программа магистратуры «Наноэлектроника и квантовые технологии»);
- НИТУ «МИСиС» (программа магистратуры «Квантовое материаловедение», программа аспирантуры «Физика конденсированного состояния и квантовые технологии»);

– также в России в 2021 году осуществлялась подготовка специалистов по квантовым вычислениям в МИЭТ, ЮУрГУ, ЮФУ, ДВФУ;

– 35 специалистов, закончивших магистратуру (специалитет) по соответствующему направлению в России в 2021 г. (МФТИ, МГУ им. М.В. Ломоносова, МИЭТ, ЮУрГУ, МИСиС);

– обеспечен широкий охват в сфере общего образования – 723 человека в 11 мероприятиях: лекции во Всероссийском детском центре «Смена» и школе «Летово», кружок по квантовой физике для школьников 10-11 классов под руководством Львовского А.И. (руководитель направления «Аналоговый оптический симулятор», научный руководитель группы «Квантовая оптика» Российского квантового центра, профессор Оксфордского университета), экскурсии школьников в Российский квантовый центр и пр.;

– разработаны 3 программы дополнительного профессионального образования по квантовым вычислениям:

- дополнительная профессиональная программа повышения квалификации «Квантовые вычисления» (утверждена приказом АНО «Корпоративная Академия Росатома» от 20.12.2021);
- дополнительная профессиональная образовательная программа повышения квалификации «Физические основы квантовых вычислений» (утверждена приказом ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет» от 30.04.2021);
- дополнительная профессиональная программа повышения квалификации «Квантовая физика и квантовые технологии в содержании и методике преподавания физики в основном и среднем общем образовании» (утверждена ГАОУ ВО г. Москвы «Московский городской педагогический университет» от 24.12.2021).

– проведено 26 международных и внутрироссийских мероприятий по формированию и развитию профессиональных сообществ, включая VI Международную конференцию по квантовым технологиям ICQT-2021;

– с 4 индустриальными заказчиками заключены соглашения о намерениях для формирования центров компетенций;

– заключен меморандум о сотрудничестве и взаимодействии в рамках кластера промышленного развития перспективных технологий в области квантовых вычислений и фотоники;

– сформировано международное сотрудничество по развитию технологий квантовых вычислений со Швейцарией и Китаем (подписаны соглашения с целью установления и развития совместных исследовательских программ в области квантовых вычислений), а также с Индией (соглашение на стадии подписания).

3.3. Инфраструктурные и финансовые результаты.

3.3.1. В целях формирования необходимой материально-технической базы и инфраструктуры квантовых лабораторий, где научные группы реализуют проекты по разработке многокубитных квантовых вычислителей в рамках Дорожной карты, в 2021 году в целях реализации Дорожной карты на сумму 3 369,0 млн рублей бюджетных средств (100% от предусмотренного Результатом федерального проекта «Цифровые технологии» и Дорожной картой финансового

обеспечения) проведены закупки соответствующего высокотехнологичного лабораторного оборудования; поставлено более 200 единиц научного высокотехнологичного оборудования.

3.3.2. В целях выполнения НИОКР в рамках Дорожной карты, приобретения необходимого научного оборудования, формирования лабораторной инфраструктуры, а также финансирования текущих расходов Госкорпорацией «Росатом» в 2021 году выделено внебюджетное финансирование в объеме 2 725,4 млн рублей собственных средств: 100% от установленного Результатом федерального проекта «Цифровые технологии» и Дорожной картой в 2021 году показателя внебюджетного финансирования.

3.4. Общее выполнение Дорожной карты.

3.4.1. В результате реализации Дорожной карты в 2021 году выполнено 14 из 14 предусмотренных мероприятий, 31 из 34 целевых показателей.

3.4.2. В соответствии с пунктом 4 раздела V протокола заседания президиума Правительственной комиссии по цифровому развитию, использованию информационных технологий для улучшения качества жизни и условий ведения предпринимательской деятельности от 20.07.2021 № 24 в качестве отчетного показателя о выполнении целевых показателей Дорожной карты по итогам каждого календарного года используется «Интегральный показатель, отражающий уровень реализации Дорожной карты».

По результатам реализации Дорожной карты в 2021 году Интегральный показатель, отражающий уровень реализации Дорожной карты (показатель № 2 в форме «Целевые показатели» Дорожной карты), характеризующий сводный индекс выполнения Дорожной карты, составляет 107,4% (за счет перевыполнения плановых значений ряда целевых показателей).

6. (4) член-корр. РАН Н.Н. Колачевский (ФИАН) представил результаты работ по квантовым вычислениям на ионах, выполненные в рамках выполнения Дорожной карты и программы ЛИЦ «Квантовые вычисления». Был проведен краткий обзор принципов работы ионного квантового вычислителя. Описаны отличия созданного квантового вычислителя от зарубежных аналогов. В частности, впервые использовался квадрупольный оптический переход в ионе иттербия-171 для кодирования квантовой информации, что дает ряд преимуществ при масштабировании вычислений, а также применялись кудиты на зеемановских подуровнях. Показана эквивалентность ионного вычислителя на двух кудитах с четырьмя состояниями в каждом ионе (кукварт) четырехкубитному вычислителю. Описаны ключевые подсистемы и компоненты экспериментальной установки. Приведены результаты проведения однокудитных (осцилляции Раби между различными кудитными подуровнями) и двухкудитных операций (вентиль Мёльмера-Зоренсена). Приведены оценки достоверности однокудитных и двухкудитных операций (двухчастичное перепутывание), составившие 85 % и 69 %, соответственно. Также приведены достоверности других экспериментальных примитивов, таких как подготовка квантового состояния (более 95 %), считывание (более 98 %), охлаждение до основного колебательного состояния (среднее $n \sim 0{,}07$), а также достоверность двухкубитной операции в одном кукварте (85 %).
7. (5) член-корр. РАН З.Ф. Красильник (ИФМ РАН – филиал ИПФ РАН) представил результаты исследований в 2021 г. в рамках реализации Дорожной карты

по направлению разработки и реализации перспективных способов реализации кубитов на основе гетероструктуры SiGe.

Работа выполнялась консорциумом ряда институтов РАН и университета Лобачевского, обладающих компетенциями в области кремниевых технологий и современной технологической и аналитической экспериментальной инфраструктурой.

Базовая структура спинового кубита на основе кремний-германиевой гетероструктуры представляет собой напряженную кремниевую квантовую яму толщиной 10-12 нм, окруженную SiGe барьерами. Сверху структура закрыта оксидом Al, на котором сформированы затворы, потенциалом которых формируются в квантовой яме отдельные квантовые точки. Двухуровневая система спиновых состояний электронов образуется за счет одноосной деформации кремния в яме, эффекта размерного квантования и эффекта Зеемана. Величина междолинного расщепления невелика, поэтому крайне важно минимизировать факторы, дополнительно ее уменьшающие: сегрегацию Ge; неупорядоченность состава твердого раствора; наличие остаточного легирования; шероховатость гетероинтерфейсов; прорастающие дефекты, магнитные шумы ядер решетки с отличным от нуля магнитным моментом.

Для устранения магнитных шумов ядер решетки в проекте предусмотрен рост эпитаксиальных гетероструктур из моноизотопных источников. На текущем этапе работ в рамках Дорожной карты получен в необходимом количестве очищен изотопно-обогащенный газ моносилан (99,9 ат. %) по реакции тетрафторида ^{28}Si с гидридом кальция в проточном реакторе. Путем пиролиза моносилана получен поликристаллический Si массой 70 с содержанием основного изотопа ^{28}Si на уровне 99,9 ат. %, а изотопа ^{29}Si на уровне 800 ppm.

В ходе первого этапа работ выполнены расчеты величины междолинного расщепления нижних электронных состояний в Si/SiGe квантовой ям на основе одномерной модели в приближении сильной связи в зависимости от толщины квантовой ямы, величины электрического поля, а также высоты и размытия Si/SiGe гетеробарьера. Получены зависимости междолинного расщепления от толщины Si КЯ и высоты барьера, величины электрического поля, размытия гетерограницы и других факторов. Установлено, что для квантовой ямы толщиной ~10 нм при размытии Si/SiGe гетерограницы на уровне (0.5÷1) нм величина расщепления нижних уровней электронов может превышать 0,2 мэВ.

Для эпитаксиального роста гетероструктур задействовано две установки МПЭ, на одной из которых, отрабатывалась степень шероховатости растущих поверхностей: виртуальной подложки, барьерного слоя и конечной структуры в целом. Рост виртуальных подложек осуществлялся на второй установке МПЭ. данном этапе работ использовались кристаллические источники Si и Ge природного изотопического состава. Отрабатывалось снижение шероховатости ростовой поверхности, процедура химико-механической полировки.

В области создания системы затворов, служащих для формирования квантовых точек и одноэлектронного транзистора, управления спиновыми состояниями отдельных электронов и регистрации состояний спинов по кулоновскому воздействию зарядов квантовых точек на ток через одноэлектронный транзистор отрабатывалось получение омических контактов с использованием имплантации ионов фосфора, или мышьяка. Найдены оптимальная энергия ионов для имплантации и температура отжига.

Отмечены последние достижения компании Intel, свидетельствующие о значительном инновационном потенциале разработок спиновых кубитов на основе кремниевых структур.

8. (6) к.ф.-м.н. А.К. Федоров (РКЦ) представил отчет о результатах выполнения Дорожной карты в части квантовых алгоритмов и программного обеспечения. В части квантовых алгоритмов были продемонстрированы реализованные известные квантовые алгоритмы, а также разработаны оригинальные, в частности, для задач комбинаторной оптимизации и моделирования процесса передачи квантовой информации. Были продемонстрированы работы по эмуляторам квантовых процессов. Основной научной новизной обладают новые методы для моделирования квантовых систем на основе MERA-анзаца, а также новый способ эмуляции бозонного сэмплинга. Были продемонстрированы результаты по экспериментальным тестам кодов коррекции ошибок. Показаны результаты работы по облачной платформе квантовых вычислений. Также был дан обзор результатов по сопутствующим проектам: программе ЛИЦ «Квантовые вычисления», а также работ по разработке квантовых алгоритмов в интересах индустрии.
9. (7) д.ф.-м.н. А.В. Кавокин (РКЦ, СПбГУ) сообщил о концепции поляритонного кубита, основанного на суперпозиции кольцевых сверхтекучих токов свето-материальных квазичастиц, экситонных поляритонов, которая была сформулирована, теоретически обоснована и подтверждена результатами компьютерного моделирования. В лабораториях СПбГУ и РКЦ (Сколтех) проводятся эксперименты, направленные на поверку и подтверждение данной концепции. В частности, проверено выполнение пяти критериев Ди Винченцо для поляритонного кубита. Установлено, что инициализация кубита в заданном квантовом состоянии может быть осуществлена оптическим методом с использованием пространственно-оптического модулятора. Логические операции на кубите проводятся с использованием пи-импульсом света или наносекундных импульсов внешнего электрического поля. Считывание информации осуществляется методами ближнеполевой фотолюминесценции и интерферометрии. Время когерентности поляритонного конденсата оценивается в несколько наносекунд. Характерное время логической операции – сто пикосекунд. Пространственная когерентность в кольцевых сверхтекучих токах поляритонов сохраняется миллисекунды. Что касается масштабируемости поляритонных кубитов, удалось экспериментально продемонстрировать 1000 поляритонных конденсатов, формирующих макроскопическое когерентное состояние. Эти измерения показывают, что поляритонные кубиты могут служить базовыми блоками для реализации квантовых процессоров, основанных на полупроводниковых микрорезонаторах.

10. (8) профессор РАН, д.ф.-м.н. В.И. Белотелов (РКЦ, МГУ им. М.В. Ломоносова) сообщил об одном из перспективных направлений для создания кубитов – квантовой магнонике. В основе данной платформы лежат когерентные квантовые состояния магнонов – магнонный Бозе-Эйнштейновский конденсат (мБЭК). В рамках первого этапа проекта «Квантовая магноника» в рамках Дорожной карты проведены систематические исследования свойств магнонного конденсата в диэлектрических ферримагнитных плёнках железо иттриевого граната (ЖИГ). Получены фундаментальные научные результаты, подтверждающие макроскопические квантовые свойства мБЭК при комнатной

температуре. Разработаны методы регистрации когерентной спиновой динамики в микродисках ЖИГ за счет считывания индукционного сигнала в микрополосковой линии и за счет магнитооптического считывания на основе эффекта Фарадея, возникающего при двойном прохождении сфокусированного лазерного луча через образец.

Одной из принципиальных задач данного направления является создание образцов с максимально длинными временами жизни возбуждённых магнонов. Подобная задача стоит перед лабораториями всего мира. Нашей научной группе удалось найти очень существенный механизм релаксации в стандартных образцах плёнок ЖИГ и предложить путь к устранению этой причины. Полученные первые образцы вселяют большую надежду в возможности прорыва в этом направлении, что существенно приблизит возможность осуществления кубитов на основе мБЭК. Разработан технологический процесс изготовления ЖИГ с требуемыми параметрами, изготовлены образцы плёнок ЖИГ.

Наконец, на основе программного пакета Mumax3 создан программный код для расчета когерентной спиновой динамики в микродисковых образцах ЖИГ, что необходимо для последующего проектирования конфигурации и параметров магнонных кубитов.

11. (9) к.ф.-м.н. С.С. Страупе (МГУ имени М.В. Ломоносова, РКЦ) осветил основные результаты исследований в рамках первых этапов проектов Дорожной карты, посвященным квантовым вычислениям на нейтральных атомах и линейно-оптическим квантовым вычислениям.

    В части доклада, посвящённой нейтральным атомам, отражены теоретические исследования, проведённые в рамках проекта. В частности, описаны основные механизмы декогеренции кубитов, реализованных на основе сверхтонких подуровней основного состояния одиночных атомов рубидия в оптических микроловушках и использованная теоретическая модель для их описания. Приведены результаты расчётов, хорошо описывающих наблюдаемые экспериментальные данные. Также обсуждались результаты моделирования двухкубитных гейтов на основе ридберговского возбуждения, и применение этих моделей для реализации классического симулятора с реалистичной моделью ошибок, реализованного в ходе работ по проекту.

    В части доклада, посвящённой результатам линейно-оптического проекта, были отражены основные идеи численной модели линейно-оптического квантового вычислителя и продемонстрированы результаты симуляций, свидетельствующих о применимости такого типа вычислителей для реализации вариационных квантовых алгоритмов. Обсуждались вопросы увеличения размерности гильбертова пространства, доступного при использовании заданного линейно-оптического интерферометра. Кратко обсуждались результаты работ соисполнителей проекта по совершенствованию методов создания однофотонных источников на основе полупроводниковых квантовых точек и сверхпроводящих детекторов фотонов в интегральном исполнении.

12. (10) д.ф.-м.н. В.А. Крупенин (Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Центр квантовых технологий Физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова) сообщил о предлагаемом проекте, ориентированном на разработку, изготовление и исследование наноструктур на основе кремния, в которых реализуются квантовые когерентные системы с зарядовыми и спиновыми степенями свободы.

Целью проекта является разработка квантовых вычислительных платформ – спиновых дырочных кубитов на основе управляемых затвором квантовых точек в Si. Решаемые задачи: (1) разработка технологических подходов к созданию кремниевых спиновых кубитов; (2) оптимизация методов инициализации, управления и считывания кубитов; (3) поиск способов улучшения квантовых характеристик создаваемых систем; (4) теоретическое исследование и моделирование разрабатываемых спиновых кубитов.

За последние десять лет произошел значительный технологический прогресс в разработке твердотельных кубитов. Взрывной рост количества журнальных публикаций по кремниевым кубитам в 2018-2022 гг., а также привлечение полупроводниковых гигантов, таких как Intel и Microsoft, подтверждают растущий интерес к исследованиям кремниевых квантовых систем.

В предлагаемом проекте предполагается новый подход к изготовлению кубитных наноструктур и близок к уже продемонстрированной технологии FinFET – формирование электростатически наведенных дырочных квантовых точек в кремниевом нанопроводе, сформированном в верхнем слое подложки кремний-на-изоляторе (КНИ), с помощью управляющих электродов затвора.

Предлагаемый нами новый подход к формированию наноструктур кубитов имеет целью уменьшить флуктуационное влияние электродинамического окружения на характеристики кубитов. Мы предлагаем существенно изменить структуру КНИ пластины и разработать оригинальны метод формирования структуры кубита.

На заключительном этапе проекта будут продемонстрированы двухкубитные операции. Это будет сделано с помощью системы из четырех квантовых точек, две из которых будут использоваться как кубиты, а две другие – как считывающие элементы. Структура обеспечит гибкую платформу для проведения экспериментов с одиночными и связанными кубитами с контролируемыми связями между ними. В будущем эта структура может быть расширена для создания прототипа квантового процессора. Предложенная структура кубита оригинальна и ранее не демонстрировалась.

Коллектив обладает многолетним теоретическим и экспериментальным опытом (более 30 лет) изучения одноэлектронных и различных кремниевых наноструктур. Наши лаборатории оснащены самыми современными установками для их изготовления, диагностики и характеризации, в том числе при сверхнизких температурах в магнитном поле.

В результате выполнения проекта будет создана конкурентоспособная технология построения квантовых систем на основе кремниевых спиновых кубитов, разработаны методы измерения их характеристик и моделирования их поведения, подготовлен пул высококвалифицированных исследователей с соответствующими навыками и опытом, будет разработана учебная программа по квантовым технологиям.

13. (11) академик РАН А.А. Горбацевич (ФИАН, НИУ МИЭТ, АО «НИИМЭ») сообщил экспертное мнение Совета, сформированное при предварительном анализе Отчета.
14. Вместе с тем в ходе экспертизы отчетных материалов был сделан ряд замечаний, по которым были получены необходимые разъяснения.

14.1. Вопрос к.т.н. И.А. Родионова (МГТУ им. Н.Э. Баумана): «В случае, если речь идет о квантовом процессоре, то:

1) необходима реализация произвольных однокубитных операций, т.е. произвольных вращений, не только на 90°;
2) необходимо измерение точностей (или достоверностей) проведения однокубитных и двухкубитных операций;
3) необходима возможность проведения любых (произвольных) последовательностей этих операций.
В представленном протоколе, если мы правильно понимаем, этих результатов нет. Возможно они есть где-то в отчетах, но нам этого найти не удалось.
Точности операций не измерены, результатов по калибровкам управляющих воздействий тоже нет. Работа проделана большая, но Вы считаете корректным назвать это квантовым процессором? Как проведена оценка точностей в 2022 году?».

Ответ член-корр. РАН Н.Н. Колачевского (ФИАН): «Согласно определению, зафиксированному в методике расчета показателя «Количество кубитов в квантовом процессоре на отчетный год», утвержденной приказом Минцифры России от 29.10.2021 № 1113 (прим.: актуальная методика утверждена приказом Минцифры России от 28.02.2022 № 143, в части квантовых вычислений соответствует ранее изданной), квантовым процессором называется «устройство, предназначенное для кодирования и хранения информации в состояниях квантовых систем, выполнения логических операций и измерений над этими состояниями (с использованием дополнительного оборудования)».

Количество кубитов в ионном квантовом процессоре определяется как $K = N*\log_2(D)$, где N – количество ионов в процессоре, которое измеряется по числу флюоресцирующих ионов на изображении ионного кристалла; D – количество состояний в ионе, используемых для кодирования информации. При этом в определении квантового процессора нет требований на конкретный набор поддерживаемых квантовых логических операций или требований к их достоверности. Работы и мероприятия в рамках Дорожной карты проводятся в соответствии с данными определениями.

В рамках контрольного эксперимента в 2021 году была подтверждена возможность кодирования и хранения квантовой информации в четырех ионных кубитах (на базе двух ионных кудитов с четырьмя состояниями), продемонстрирована возможность проведения квантовых логических операций над ними, а также считывания состояния квантового регистра. Характеризация достоверностей квантовых операций и демонстрация полного набора операций не являлись необходимыми для подтверждения работоспособности квантового процессора, а также определения числа кубитов, на что был направлен контрольный эксперимент. Бенчмаркинг квантовых процессоров сам по себе является сложной научной задачей, плохо масштабирующейся с ростом количества кубитов. В частности, ведущие научные группы в мире не используют полную характеризацию квантовых систем, а приводят частичную характеризацию, позволяющую понять производительность системы в конкретных задачах.

Несмотря на это, в данном эксперименте были продемонстрированы и проведение полного набора операций, и охарактеризованы достоверности отдельных операций, и показана возможность проведения нескольких последовательных квантовых вентилей. Результаты всех этих экспериментов отражены в протоколе испытаний.

В частности:

1) Приведены осцилляции Раби между всеми подуровнями кудитов в каждом из ионов (что соответствует операции $R^{0j}(\phi,\theta)$, где ϕ – направление оси вращения, а θ – угол вращения). Осцилляции Раби показывают возможность вращения вектора состояния на сфере Блоха на произвольные углы θ, а не только на π. Угол π выделяется тем, что он наиболее часто применяется для разложения произвольных однокубитных операций по однокудитным, поэтому достоверность оценивалась именно для этого угла. Однако, так как в протоколе приведены графики всех осцилляций Раби, из них можно аналогичным образом оценить достоверности и вращений на произвольные другие углы θ. Возможность контроля и задания произвольного направления оси ϕ, относительно которой производятся вращения на сфере Блоха подтверждается в ходе исследования двухкудитной операции, а именно при измерении осцилляций четности. В ходе этого эксперимента после выполнения операции типа Мельмера-Зоренсена к каждому из ионов прикладывался однокубитный вентиль $R^{01}(\phi,\frac{\pi}{2})$ и в протоколе приведен график зависимости четности от угла ϕ. Таким образом, протокол эксперимента подтверждает возможность проведения при помощи исследованного квантового процессора однокудитных операций типа $R^{0j}(\phi,\theta)$ при произвольных углах ϕ и θ. В программах и методиках также в явном виде показано, что в совокупности с также продемонстрированной двухкудитной операцией $MS_{01}^{01}(\pi/4)$ эти операции составляют полный набор квантовых операций для четырехкубитного квантового процессора.

2) Утверждение, что не были измерены точности операций, не является корректным. В эксперименте были проведены оценки достоверностей как однокудитных операций, так и двухкудитной. Использованные для этого методы позволяют произвести измерение достоверности с точностью порядка нескольких процентов. Применимость подтверждается их использованием в наиболее авторитетных группах в мире в области ионных квантовых вычислений [1-4]. Даже такие измерения требуют существенного времени на подготовку и проведение, хотя более точные методы, такие как рандомизированный бенчмаркинг и квантовая томография, требуют значительно более сложных и длительных измерений. Ввиду отсутствия прямой необходимости точной оценки достоверности операций, в ходе эксперимента были выбраны наиболее простые методы измерения. Более того, корректность полученных в ходе контрольного эксперимента оценок достоверности однокудитных операций в последующих экспериментах была подтверждена соответствием с результатами квантовой томографии вентилей $R_0^{01}(0,\pi/2)$, $R_0^{01}(\pi/2\,,\pi/2)$, $R_1^{01}(0,\pi/2)$, $R_1^{01}(\pi/2\,,\pi/2)$. Данный метод является наиболее полным и точным из возможных.

3) Возможность последовательного проведения различных операций была также подтверждена в эксперименте и отражена в протоколе. В частности, для исследования достоверности однокудитных операций каждый эксперимент состоял из трех последовательных однокудитных операций (перевод состояния кудита в произвольное заранее выбранное состояние, сама исследуемая однокудитная операция и дополнительная однокудитная операция для считывания населенности на конкретном подуровне кудита). При исследовании двухкудитной операции (измерение осцилляций четности) сначала проводилась сама двухкудитная операция, после чего к кудитам прикладывалась однокудитная операция $R^{01}(\phi,\pi/2)$.

Таким образом, несмотря на то, что данные исследования не были необходимы для подтверждения возможности назвать разработанное устройство квантовым процессором и подсчета количества кубитов (что являлось основными целями проведения контрольного эксперимента), упомянутые исследования тем не менее были выполнены в дополнение к основным задачам и их результаты отражены в протоколе.

[1] Benhelm J. Precision spectroscopy and quantum information processing with trapped calcium ions //PhD Thesis. – 2008. – University of Innsbruck

[2] Benhelm J. et al. Towards fault-tolerant quantum computing with trapped ions //Nature Physics. – 2008. – Т. 4. – №. 6. – С. 463-466.

[3] Leibfried D. et al. Experimental demonstration of a robust, high-fidelity geometric two ion-qubit phase gate //Nature. – 2003. – Т. 422. – №. 6930. – С. 412-415.

[4] Debnath S. A Programmable Five Qubit Quantum Computer Using Trapped Atomic Ions // PhD thesis. – 2016. – University of Maryland.

15. Д.ф.-м.н. С.П. Кулик (МГУ им. М.В. Ломоносова) высказал мнение о том, что использование Интегрального показателя, отражающего уровень реализации Дорожной карты, не отражает реальной ситуации по реализации мероприятий Дорожной карты.
16. Член-корреспондент РАН И.И. Рябцев (ИФП СО РАН) высказал мнение о наличии на текущем этапе развития технологии значительных научно-технологических сложностей и вызовов в части, касающейся вопросов физической реализации квантовых процессоров, и необходимости в связи с этим расширения числа участников и привлеченных организаций РАН по направлению развития квантовых вычислений в России.
17. К.х.н., к.э.н. В.А. Шипунов (Минэкономразвития России) сообщил о важности достигнутых результатов реализации Дорожной карты и положительной динамике демонстрируемых ежегодных результатов. Выражено пожелание в адрес РАН – рассмотреть целесообразность распространения практики экспертизы в РАН ежегодных отчетов о результатах реализации иных дорожных карт развития отдельных высокотехнологичных областей.
18. В заключительном слове Председатель Совета, академик РАН Г.Я. Красников поблагодарил авторов за предоставленные Отчет, доклады и их экспертное обсуждение, выразил уверенность в интеграции усилий РАН и Госкорпорации «Росатом» в части развития механизма экспертизы ежегодных отчетов о результатах реализации Дорожной карты.

РЕШИЛИ:

1. Принять к сведению Отчет, который включает 14 отчетов о выполнении мероприятий Дорожной карты в 2021 году и отчет о достижении целевых показателей Дорожной карты в 2021 году.
2. Согласиться с предложением профессора РАН, д.ф.-м.н. А.Н. Печеня (МИАН) – в отчете по мероприятию 1.2.4 «Мероприятия в сфере высшего профессионального образования» Дорожной карты за 2021 год учесть магистерскую программу МФТИ «Методы квантовых технологий и математическая физика» на базе Математического института им. В.А. Стеклова.
3. Согласиться с предложением профессора РАН, д.ф.-м.н. А.Н. Печеня (МИАН) – приложить к отчету о выполнении целевых показателей Дорожной карты в 2021 году перечень публикаций российских резидентов в научных журналах,

индексируемых в базе данных «Сеть науки» (WEB of Science), по соответствующим отраслевым рубрикаторам.

4. Согласиться с предложением академика РАН А.С. Холево (МИАН) – исключить из отчета о достижении целевых показателей Дорожной карты в 2021 году упоминание пункта № 8.1.4 целевых показателей, для которого в 2021 году не предусмотрено плановое количественное значение.
5. Отметить, что, с учетом доработки по вышеуказанным предложениям (пункты 2 – 4 раздела «Решили» настоящего протокола), содержащаяся в Отчете информация отвечает Дорожной карте и в основном носит характер актуальной, полной, достоверной и корректной.
6. Отметить достижение Интегрального показателя, отражающего уровень реализации Дорожной карты (показатель № 2 в форме «Целевые показатели» Дорожной карты), в значении 107,4% в 2021 году.
7. В целях исполнения Поручения считать Отчет консолидированным с РАН и рекомендовать его к направлению Госкорпорацией «Росатом» в Правительство Российской Федерации с приложением настоящего протокола заседания Совета.
8. Рекомендовать Госкорпорации «Росатом» направить консолидированный с РАН Отчет в Минэкономразвития России в целях исполнения поручения Председателя Правительства Российской Федерации от 19.07.2021 № ММ-П41-9626 по обеспечению общего мониторинга и контроля реализации соглашений компаний-лидеров с Правительством Российской Федерации по развитию высокотехнологичных направлений и поручения Заместителя Председателя Совета безопасности Российской Федерации (протокол от 22.07.2021 г. № А21-1П-7ДМ), которым на Минэкономразвития России возложена обязанность обеспечить общий мониторинг и контроль реализации соглашений (с представлением регулярных докладов о результатах мониторинга в Правительство Российской Федерации).
9. В рамках дальнейшей реализации Дорожной карты рекомендовать Госкорпорации «Росатом»:
   9.1. Проработать вопрос возможности учета в отчете по мероприятию 1.2.4. «Мероприятия в сфере высшего профессионального образования» Дорожной карты иных образовательных программ по квантовой тематике, реализуемых в МФТИ, в случае их соответствия критериям Порядка расчета и оценки достижения значений целевых показателей Дорожной карты (Приложение № 1 к отчету о выполнении целевых показателей Дорожной карты) (профессор РАН, д.ф.-м.н. А.Н. Печень (МИАН)).
   9.2. В рамках проведения актуализации Дорожной карты в 2022 году рассмотреть возможность корректировки планового количественного значения целевого показателя № 6.1 «Количество патентов, ежегодно регистрируемых российскими физическими и юридическими лицами по процедуре российского патентного законодательства, по соответствующим отраслевым рубрикаторам» Дорожной карты, установленного на 2022 год (к.х.н., к.э.н. В.А. Шипунов (Минэкономразвития России)).

Ученый секретарь Совета,
к.т.н. Тельминов О.А.