

СИ 6. Квантовая инженерия

Ответственные за реализацию мероприятий дорожной карты стратегии развития НИТУ МИСИС по стратегической инициативе:



Малеева Наталия Андреевна

канд. физ.-мат. наук, доцент

Директор дизайн-центра квантового проектирования

Тел.:

E-mail: n.maleeva@misis.ru



Ковалюк Вадим Викторович

канд. физ.-мат. наук

Заведующий лабораторией фотонных газовых сенсоров

Тел.: 8 (926) 238-26-65

E-mail: kovalyuk.vv@misis.ru

1. НАУЧНЫЕ КОЛЛЕКТИВЫ / КОМАНДЫ

Тематика 1. Квантовые вычисления (сверхпроводниковые кубиты и квантовые процессоры)

1.1 Люди / Команды

№	Коллектив / лаборатория	Руководитель (ФИО, степень)	Основная специализация (кратко)	Ключевые компетенции для инициативы
1	Лаборатория сверхпроводниковых квантовых технологий	Устинов Алексей Валентинович, д.ф.-м.н.	Сверхпроводниковые кубиты (флаксоны, трансмоны), универсальные сверхпроводниковые квантовые процессоры	Создание универсальных сверхпроводниковых квантовых процессоров, с рекордными характеристиками
2	Дизайн-центр квантового	Малеева Наталия Андреевна, к.ф.-м.н.	Проектирование топологий элементов	Проектирование многокубитных

	проектирования		сверхпроводниковых квантовых процессоров	сверхпроводниковых процессоров
3	Лаборатория квантовых информационных технологий	Федоров Алексей Константинович, PhD	Квантовые алгоритмы на кубитах, декомпозиция многокубитных операций, моделирование квантовых систем	Теория и ПО для квантовых вычислений
4	Лаборатория криоэлектронных систем	Шитов Сергей Витальевич, д.ф.- м.н.	Криогенная электроника для квантовых вычислений	Обеспечение криогенной инфраструктуры для кубитов и сенсоров
5	Кафедра теоретической физики и квантовых технологий	Мухин Сергей Иванович, д.ф.-м.н., проф.	Теория физики конденсированного состояния, квантовое материаловедение	Теоретическая база направления, подготовка кадров

1.2 Проекты (НИР, НИОКР, ОКР, РИД)

№	Название проекта	Краткое описание (цель / результат)	Сроки	УГТ	Партнёр
1	Стратегический технологический проект (СТП) «Квантовый интернет» (Приоритет-2030)	Формирование отрасли квантовых технологий в РФ. Команда — 115 исполнителей: 18 д.н. (~16%), 35 к.н. (2 PhD, 14 — до 35 лет), 7 учёных в топ-2% мира (Elsevier), >75% — до 39 лет; 30 аспирантов (МИСИС, МФТИ, ВШЭ, Сколтех) и 16 студентов (МИСИС, МФТИ, МГУ, МТУСИ). Консорциум «Квантовый интернет»: МФТИ, МТУСИ, ООО «КуРэйт», ГУАП, НГТУ, ФИАН РАН, ИРЭ РАН, НИ ТГУ, ВСГУТУ, ООО «МЦКТ», ННГУ. Заключено 5 лицензионных договоров с ООО «КуРэйт» на программы ЭВМ на сумму 9 млн руб.	с 2021 — наст. время	4–5	ГК «Росатом», ОАО «РЖД», ПАО «Газпромб анк», ПАО «Сбербанк », ПАО «Газпромн ефть», ООО «Код безопаснос ти», ООО «КуСпэйс Технологи и», ИНМЭ РАН, ФИАН, РКЦ и др.
2	НИОКР «Квантовый процессор на основе сверхпроводников. Новые типы сверхпроводников ых кубитов»	Разработка конкурентоспособных технологий квантовых вычислений для создания универсальных масштабируемых квантовых вычислителей на основе сверхпроводниковых кубитов.	2021- 2024	4-5	Российски й квантовый центр, ГК «Росатом»
3	«Квантовые вычисления на основе сверхпроводников ых кубитов»	Создание масштабируемой архитектуры квантового компьютера на основе сверхпроводниковых кубитов и демонстрация прототипа сверхпроводникового квантового	2025- 2026	4-5	ООО «СП «Квант» (ГК «Росатом»)

		компьютера.			
4	Сверхпроводниковые технологии для обработки квантовой информации	Разработка новых инструментов и методов обработки квантовой информации с использованием сверхпроводниковых схем.	2021-2024	2	Российский научный фонд, МФТИ
5	Разработка сверхпроводящих параметрических усилителей с уровнем шумов близким к квантовому пределу для усиления микроволновых сигналов при считывании кубитов и других применений	Демонстрация работы параметрического усилителя СВЧ на кинетической индуктивности с уровнем добавленного шума на уровне квантового предела.	2021-2024	4	ООО «КуРэйт», ИРЭ РАН
6	Коллективная динамика и квантовый отжиг в цепочках взаимодействующих РТ-симметричных неэрмитовых сверхпроводниковых кубитов	Управление сверхпроводниковыми квантовыми сетями с большим количеством взаимодействующих кубитов	2026-2028	2	Российский научный фонд

Тематика 2. Квантовые сенсоры и детекторы

2.1 Люди / Команды

№	Коллектив / лаборатория	Руководитель (ФИО, степень)	Основная специализация (кратко)	Ключевые компетенции для инициативы
1	Лаборатория криоэлектронных систем	Шитов Сергей Витальевич, д.ф.-м.н.	Болометрические детекторы (RF TES)	Приборная база для радиоастрономии, биофотоники, лидаров
2	Центр НТИ, Лаборатория фотонных газовых сенсоров	Ковалюк Вадим Викторович, к.ф.-м.н.	Интегрально-оптические сенсоры, сверхпроводниковые однофотонные детекторы из новых материалов	ИК-детекторы для газоанализа, био- и квантовой фотоники
3	Центр НТИ, Лаборатория квантовых коммуникаций	Гольцман Григорий Наумович д.ф.-м.н., проф.	Волоконные сверхпроводниковые однофотонные детекторы (SNSPD), матричные SNSPDs	ИК-детекторы для квантовой криптографии

2.2 Проекты (НИР, НИОКР, ОКР, РИД)

№	Название проекта	Краткое описание (цель / результат)	Сроки	УГТ	Партнёр
1	Болометрические детекторы RFTES	Атто-ваттная чувствительность, рабочий диапазон 1–1000 ГГц	2024–2025	4	ООО «ЭТИКС», ИПФ РАН
2	Сверхпроводниковый нанопроволочный однофотонный детектор (SNSPD) на молибдене-рений (MoRe)	Эффективность регистрации фотонов до 98%	2024–2025	4	ООО «Сконтел»
3	Интегрально-оптический детектор на углеродных нанотрубках	Регистрация ИК-сигналов	2024–2025	3	ООО «Тинфотолика»
4	Сверхпроводящие детекторы для радиоастрономии	Работа при температурах ниже 1 К; патенты RU2801920C1 и RU2801961C1	2024	4	ИРЭ РАН
5	Нанозонд для неинвазивного измерения локального магнитного поля в материалах	Прототип, представлен на форуме «КВАНТ-2025»	2024–2025	2–3	МФТИ
6	Грант РНФ «Осаждение тонких аморфных MoSi плёнок и исследование их транспортных и сверхпроводящих свойств для изготовления сверхпроводниковых однофотонных детекторов»	Индивидуальный грант РНФ для молодых учёных. Руководитель — Ломакин Андрей, к.т.н., научный сотрудник лаборатории фотонных газовых сенсоров	2024–2026	2	РНФ
7	Патент на полезную модель № 240100 «Высокоэффективный микроволново-оптический преобразователь на основе интегральной оптической резонансной схемы из тонкоплёночного ниобата лития»	Патентообладатель — НИТУ МИСИС. Авторы: Невзоров А.А., Ковалюк В.В., Кобцев Д.М., Флоря И.Н., Проходцов А.И., Кузин А.Ю., Семенов А.Н., Баева Э.М., Гольцман Г.Н. Заявка №2025132317, приоритет 20.11.2025	зарегистрирован 24.12.2025 (действует до 20.11.2035)	3	—

Тематика 3. Квантовые коммуникации и криптография

3.1 Люди / Команды

№	Коллектив / лаборатория	Руководитель (ФИО, степень)	Основная специализация (кратко)	Ключевые компетенции для инициативы
1	Научно-	Ожегов Роман	Квантовое	Компетенции по

	образовательный центр «Центр квантовых коммуникаций НТИ» (создан в 2018 г. на базе НИТУ МИСИС)	Викторович, к.ф.-м.н.	распределение ключей (КРК), защищённые каналы связи	дорожной карте РЖД «Квантовые коммуникации»
2	Лаборатория криоэлектронных систем	Биленко Игорь Александрович, д.ф.-м.н., проф. (топ-2% цитируемых учёных мира, h=103), главный научный сотрудник	Компонентная база систем квантовой связи	Элементная база для КРК-систем
3	Лаборатория анализа практических уязвимостей систем квантовой криптографии	Макаров Вадим Викторович, PhD, проф. кафедры теоретической физики и квантовых технологий (топ-2% цитируемых учёных мира)	Тестирование стойкости и практической безопасности систем КРК	Оценка уязвимостей квантово-криптографических систем
4	Дизайн-центр квантового проектирования	Малеева Наталия Андреевна, к.ф.-м.н.	Проектирование и исследование систем квантовой связи между элементами сверхпроводниковых квантовых процессоров модульной архитектуры	Передача квантового состояния по микроволновому каналу связи
5	Лаборатория квантовых коммуникаций	Курочкин Владимир Леонидович, к.ф.-м.н.	Системы квантового распределения ключей в открытом пространстве	Спутниковые квантовые коммуникаций

3.2 Проекты (НИР, НИОКР, ОКР, РИД)

№	Название проекта	Краткое описание (цель / результат)	Сроки	УГТ	Партнёр
1	Аппаратно-программный комплекс квантового распределения ключей с автоматизированным обновлением	Представлено на форуме «КВАНТ-2025»	2024–2025	3–4	РЖД
2	Патент «Полуэмпирическая модель расчёта спутникового квантового ключа»	Хмелев А.В., Ивченко Е.И., Курочкин В.Л., №2025611034 от 16.01.2025	2025	2	—
3	Программа ЭВМ «Модель расчёта секретного ключа	Ивченко Е.И., Хмелев А.В., Чернов А.Н., Курочкин В.Л., №2025696608 от 18.12.2025	2025	2	—

	в системах спутниковой квантовой связи с пассивным выбором базиса и разбалансом между четырьмя детекторами»				
4	Эксперимент квантовой связи на расстояние 3500 км	Совместный эксперимент в рамках проекта «Квантовый интернет»	2021–2023	4	научные организации КНР
5	Малый космический аппарат «Импульс-1» — вспомогательные системы спутникового КРК	Протестирована и подтверждена работоспособность элементов вспомогательных систем спутникового КРК для передающего модуля системы КРК на орбите; спутник штатно функционирует	запуск 2023, испытания 2025	5	ГК«Роскосмос» (программа «УниверСат»)
6	«Квантовые технологии передачи информации в открытом пространстве» — расширение работ	В проекты по квантовым коммуникациям привлечено 12 студентов ВО; план на 2026 — расширение тематики с вовлечением молодёжи	план 2026	2	—

Тематика 4. Квантовые материалы и теория

4.1 Люди / Команды

№	Коллектив / лаборатория	Руководитель (ФИО, степень)	Основная специализация (кратко)	Ключевые компетенции для инициативы
1	НИЛ «Функциональные квантовые материалы»	Васильев Александр Николаевич, д.ф.-м.н., профессор, зав. лабораторией	Материалы для квантовых приложений, магнетизм, фазовые переходы	Синтез и исследование новых квантовых материалов
2	Лаборатория моделирования и разработки новых материалов	Шулятев Дмитрий Александрович, к.т.н., зав. лабораторией	Моделирование материалов для квантовых устройств	Расчётная поддержка материаловедческих задач направления
3	Кафедра теоретической физики и квантовых технологий	Мухин Сергей Иванович, д.ф.-м.н., проф., зав. кафедрой; П.Д. Григорьев, д.ф.-м.н., профессор	Квантовое материаловедение, теория конденсированного состояния	Подготовка магистров и аспирантов, теоретическая поддержка

4.2 Проекты (НИР, НИОКР, ОКР, РИД)

№	Название проекта	Краткое описание (цель / результат)	Сроки	УГТ	Партнёр
---	------------------	-------------------------------------	-------	-----	---------

1	Функциональные квантовые материалы	Исследование и оптимизация материалов, полезные свойства которых определяются квантовыми кооперативными эффектами	2021–2023	1	МГУ
2	Спиновая, зарядовая, упругая и орбитальная подсистемы в теллуридах редкоземельных металлов	Исследование механизмов взаимодействия различных степеней свободы, а именно спиновой, зарядовой, решеточной и орбитальной подсистем, в обширном семействе соединений теллуридов редкоземельных элементов	2022–2024	1	МГУ
3	Компьютерный дизайн новых перспективных конструкционных материалов для ядерной энергетики	Исследование свойств перспективных радиационно-стойких материалов для разработки новых материалов на их основе с использованием квантовомеханических расчетов и инструментов машинного обучения и искусственного интеллекта	2022–2024	1	-
4	Разработка методики построения межатомных потенциалов для моделирования поликристаллической структуры многокомпонентных твердых растворов	Проект направлен на решение проблемы учета масштабных эффектов, возникающих в материалах на микроуровне с помощью перехода от атомистического моделирования к поликристаллическому, используя машинно-обучаемые потенциалы межатомного взаимодействия для классической молекулярной динамики	2026–2028	1	-
5	Теоретические и экспериментальные исследования свойств радиационно-стойких высокоэнтропийных сплавов с ОЦК структурой	Исследование механизмов формирования и эволюции дефектов, индуцированных радиационным облучением в высокоэнтропийных сплавах на основе вольфрама	2026–2028		

Тематика 5. Образование и подготовка кадров

5.1 Люди / Команды

№	Коллектив / лаборатория	Руководитель (ФИО, степень)	Основная специализация (кратко)	Ключевые компетенции для инициативы
1	Лаборатория квантовых информационных технологий	Федоров Алексей Константинович, PhD	Квантовые алгоритмы на кудитах, декомпозиция многокубитных операций, моделирование квантовых систем	Теория и ПО для квантовых вычислений
2	Кафедра теоретической	Проф. Печень Александр	Управление квантовыми	Теория квантовых вычислений

	физики и квантовых технологий	Николаевич, д. ф.-м.н.	системами, математические проблемы квантовых технологий, стохастическая динамика открытых квантовых систем	
--	-------------------------------	------------------------	--	--

5.2 Проекты (НИР, НИОКР, ОКР, РИД)

№	Название проекта	Краткое описание (цель / результат)	Сроки	УГТ	Партнёр
1	Разработка модуля преобразования данных в оптимизационную математическую модель для последующего решения задач с использованием гибридных квантово-вдохновленных алгоритмов	задача долгосрочного планирования топливообеспечения реакторов на быстрых нейтронах с учетом потребности, производственных мощностей, допустимых источников топлива, развития производств, хранения и организации поставок	2026-2027	6	ГК «Росатом»
2	Методы реализации квантовых алгоритмов с использованием многоуровневых квантовых систем – кудитов	Исследование потенциала многоуровневых квантовых систем и разработку методов реализации на них квантовых алгоритмов.	2024-2026	4-5	РНФ
3	Симуляция и обучение квантовых вариационных алгоритмов	изучение вариационных квантовых алгоритмов с точки зрения разложения целевой функции в ряд Фурье	2023-2025	4-5	РНФ

Тематика 6. Образование и подготовка кадров

6.1 Люди / Команды

№	Коллектив / лаборатория	Руководитель (ФИО, степень)	Основная специализация (кратко)	Ключевые компетенции для инициативы
1	Кафедра теоретической физики и	Мухин Сергей Иванович, д.ф.-м.н., проф.	Квантовое материаловедение, физика	Подготовка кадров для отрасли квантовых технологий

	квантовых технологий		конденсированного состояния	
2	Программа БВО по специальности «Физика», треки - «Квантовые технологии»; - «Инженерия квантовых технологий»; - Моделирование физических процессов в материалах; - Термодинамика и кинетика в физике конденсированного состояния	Мухин Сергей Иванович, д.ф.-м.н., проф.	Базовая и инженерная подготовка кадров для отрасли квантовых технологий	Подготовка кадров для отрасли квантовых технологий
3	Межвузовский квантовый университет (сетевая магистратура, инициирована ГК «Росатом»; координатор — НИТУ МИСИС)	Малеева Наталия Андреевна, к.ф.-м.н.	Совместная подготовка кадров с НИЯУ МИФИ, МФТИ, МГТУ им. Баумана, МГУ	Кадровое обеспечение отрасли для задач атомной промышленности
4	Программа СпецВО по специальности «Физика», профиль «Квантовое материаловедение»	Мухин Сергей Иванович, д.ф.-м.н., проф.	Совместная подготовка кадров с базовой кафедрой Российского квантового центра в МФТИ	Подготовка кадров для отрасли квантовых технологий
5	Магистратура по специальности «Физика», профиль «Quantum Physics for Advanced Materials Engineering / Квантовая физика для современной инженерии материалов»	Мухин Сергей Иванович, д.ф.-м.н., проф.	Программа реализуется на английском языке	Подготовка кадров для отрасли квантовых технологий
6	Аспирантура «Физика конденсированного состояния и квантовые технологии»	Мухин Сергей Иванович, д.ф.-м.н., проф.	Фундаментальные и прикладные направления в области создания элементов твердотельной памяти, хранения и обработки квантовой информации	Подготовка кадров высшей квалификации для отрасли квантовых технологий

7	Студенческое проектное бюро	Малеева Наталия Андреевна, к.ф.-м.н.	Реализуется на базе Дизайн-центра квантового проектирования	Обучение студентов и школьников основам проектирования квантовых интегральных микросхем
---	-----------------------------	--------------------------------------	---	---

2. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕМАТИКИ

Квантовые вычисления на флаксонаумах

Основная задача - преодоление препятствий, ограничивающих практическое применение квантовых вычислений. Наряду с развитием квантовых процессоров из наиболее распространенных на сегодняшний день кубитов - трансмонов, наши усилия сконцентрированы на разработке альтернативного подхода: создании процессоров из флаксонаумов, которые более эффективны для построения универсальных масштабируемых квантовых процессоров с точки зрения устойчивости и точности операций. Для эффективной научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы по созданию элементной базы для квантовых вычислений необходим обеспечить полный цикл работ: разработка – изготовление – тестирование. Для обеспечения результативного быстрого изготовления и оперативного тестирования экспериментальных и опытных образцов, отдельное направление - качественное расширение научно-исследовательской инфраструктуры университета, включая развитие созданного ранее технологического комплекса для изготовления микро и нанoeлектронных схем. Важным аспектом в преодолении препятствий, ограничивающих практическое применение квантовых вычислений, является тесное взаимодействие с партнерами проекта. НИТУ МИСИС активно сотрудничает с ведущими университетами, научными центрами и промышленными партнерами. Широкая кооперация способствует интеграции научного задела в коммерчески значимые приложения, включая апробацию разработанных решений на реальных задачах промышленных партнеров. Ключевые партнеры: ГК «Росатом», ООО «МЦКТ», АО «Газпромбанк», ПАО «Газпром нефть», ИНМЭ РАН и др. Проект объединяет накопленную экспертизу, аппаратные инновации, прикладные эксперименты и технологическое развитие, закрепляя лидирующую роль НИТУ МИСИС в разработке и реализации сверхпроводниковых квантовых процессоров и создавая основы для перехода научных разработок из исследовательских лабораторий в коммерческие и промышленные приложения.

Конвертация между микроволновым и оптическим излучением в квантовом режиме

Проект направлен на разработку и внедрение инновационных технологий передачи квантового состояния и обеспечения безопасности передачи информации с использованием принципов квантовой механики. Одна из ключевых и амбициозных задач проекта - изучение возможности создания преобразователя электромагнитного сигнала из микроволнового в оптический диапазон и обратно, способного работать в квантовом режиме, чтобы, впоследствии, использоваться для передачи квантового состояния кубита как между сверхпроводниковыми процессорами, так и для связи с квантовыми процессорами на ионах/атомах/фотонах. Преобразование микроволнового сигнала в оптический является одной из ключевых операций в

системе квантового интернета, поскольку обеспечивает согласование аппарата потребителя с волоконно-оптической передающей линией. Однако передача квантового состояния при такой операции требует увеличения к.п.д. преобразования на несколько порядков по сравнению с существующими промышленными конверторами при уровне добавленного шума менее одного шумового фотона на один информационный фотон. Поведение преобразующих систем при уровне сигнала, соответствующем квантовому режиму требует масштабных исследований.

Квантовая связь по микроволновому каналу

Важная веха на пути масштабирования сверхпроводниковых квантовых процессоров - разработка методов передачи квантовых состояний между отдельными узлами сверхпроводниковых квантовых процессоров по микроволновому каналу связи. Цель – создание систем нелокально связанных сверхпроводниковых кубитов, с сохранением возможности выполнять двухкубитные запутывающие операции с высокой точностью путем обмена одиночными микроволновыми фотонами. Подобный подход в ближней перспективе ускорит масштабирование квантовых процессоров сверхпроводниковой платформы, позволив собирать распределенные устройства из нескольких взаимосвязанных интегральных схем (ИС), а также в рамках одной ИС позволит использовать более эффективные коды детектирования и коррекции квантовых ошибок по типу LDPC, требующим более связанных архитектур процессоров с количеством соседей >4 путем добавления дополнительных нелокальных соседей каждому кубиту.

Квантовое распределение ключей

Одной из наиболее практически значимых задач проекта является развитие систем квантового распределения ключей. Квантовое распределение ключей позволяет двум удалённым пользователям установить между собой теоретически абсолютно секретный канал связи. Однако практические реализации систем квантовой коммуникации сталкиваются с неидеальностью реального оборудования. В ходе реализации проекта планируется создать систему, способную генерировать и распределять криптографические ключи между удаленными пользователями со скоростью, превышающей существующие аналоги, при этом гарантируя защиту от любых попыток взлома благодаря фундаментальным законам квантовой механики.

Разработка медицинских изделий с квантовыми детекторами для применений в медицине (на стыке тематик)

FRET (Фёрстеровский резонансный перенос энергии) — это метод определения наноразмерных расстояний (1–10 нм) по безызлучательной передаче энергии между молекулами, а FLIM (микроскопия времени жизни флуоресценции) — технология визуализации, регистрирующая время затухания свечения для картирования микроокружения и метаболизма клеток. В медицине интеграция этих методов с квантовыми детекторами единичных фотонов (SPAD, SNSPD) критически актуальна для ультрананной детекции онкологии и пикосекундного глубинного биоимиджинга. Благодаря коммерциализации портативных диагностических систем, мировой рынок медицинских квантовых сенсоров демонстрирует взрывной рост и, по оценкам аналитиков, к 2030 году превысит \$1,5–2 млрд с высоким среднегодовым темпом роста в 12–15%.

Разработка элементной базы устройств квантовых коммуникаций и оптоэлектроники

Создание отечественной элементной базы для устройств квантовых коммуникаций и интегральной оптоэлектроники, включающей источники одиночных фотонов на квантовых точках и волноводные схемы управления (ФИС) на кремниевых платформах, критически необходимо для технологического суверенитета и перехода к серийному производству защищенных систем связи. В рамках этой задачи проект по интеграции сверхпроводниковых нанопроволочных детекторов одиночных фотонов (SNSPD) непосредственно на чипе (Waveguide-integrated SNSPD) обладает стратегической актуальностью: размещение наноструктур поверх волноводов устраняет потери на стыковке с волокном за счет поглощения света затухающим полем, радикально сокращает массогабаритные характеристики (SWaP) для спутниковых систем КРК и позволяет масштабировать архитектуру до многоканальных квантовых процессоров на одном кристалле. Коммерческая значимость такого решения подтверждается стремительным развитием глобального рынка фотонных интегральных схем (PIC), объем которого, подгоняемый спросом на оптические интерконнекты для ИИ и квантовую инфраструктуру, по прогнозам аналитиков, движется к отметке \$9,3 млрд к 2032 году с устойчивым ежегодным темпом роста около 13%.

Аудит безопасности и пентест систем КРК.

Проведение внешнего независимого аудита безопасности и пентеста систем квантового распределения ключей (КРК), развиваемое научной группой мирового лидера в области квантового хакинга Вадима Макарова, имеет критическую государственную и коммерческую актуальность для создания доверенных сетей связи. Несмотря на теоретическую абсолютную стойкость квантовой криптографии, её реальное аппаратное воплощение неизбежно страдает от инженерных несовершенств (Implementation Loopholes), таких как физические дефекты однофотонных детекторов или лазерная засветка, позволяющих перехватывать до 98,97% секретного ключа в автоматическом режиме «черного ящика» без внесения ошибок в линию связи. Деятельность лаборатории В. Макарова по поиску новых уязвимостей, разработке программно-аппаратных контрмер и развертыванию испытательных сертификационных стендов (включая совместные проекты с QRate и НИТУ МИСИС) обеспечивает практическую защищенность КРК перед их регуляторной сертификацией. Высокая коммерческая значимость пентеста обусловлена лавинообразным внедрением квантовых магистралей в банковском секторе и критической информационной инфраструктуре: глобальный рынок систем квантовой связи стремительно масштабируется и, по прогнозам аналитиков, вырастет с \$6,7 млрд до \$20,1 млрд к 2030 году с совокупным ежегодным темпом роста (CAGR) в 20,1%, формируя массовый спрос на стандартизированные услуги непрерывного квантового аудита и кибериспытаний

Высокоскоростные квантовые генераторы случайных чисел (QRNG)

Разработка и миниатюризация квантовых генераторов случайных чисел (QRNG), базирующихся на фундаментальной недетерминированности законов микромира, является стратегическим ответом на угрозу взлома классической криптографии грядущими квантовыми компьютерами. В отличие от математических алгоритмов (PRNG) и тепловых

шумов (TRNG), подверженных скрытым закономерностям и внешнему деструктивному вмешательству, QRNG используют квантовые оптические процессы — измерение фазовых флуктуаций вакуума или регистрацию времени прихода одиночных фотонов. Актуальность проекта обусловлена глобальным трендом на перевод QRNG-технологий из громоздких лабораторных установок на миллиметровые полупроводниковые чипы. Коммерческая ценность направления подтверждается стремительным формированием массового рынка: по прогнозам ведущих аналитических агентств, глобальный объем индустрии аппаратных модулей QRNG вырастет до \$2,4 млрд к 2031 году с высоким среднегодовым темпом роста (CAGR) на уровне 22,7%, подгоняемый жесткими регуляторными требованиями к безопасности в финансовом секторе, облачных технологиях и государственном секторе.