

О работе и перспективах развития научной школы «Криогенная электроника и системы обработки сигналов в радиолокации, радионавигации, связи и автоматизации научного эксперимента»

А.Г. Вострецов, д.т.н., профессор, руководитель Лаборатории квантовой криогенной электроники НГТУ

Новосибирск-2026

Основные направления исследований

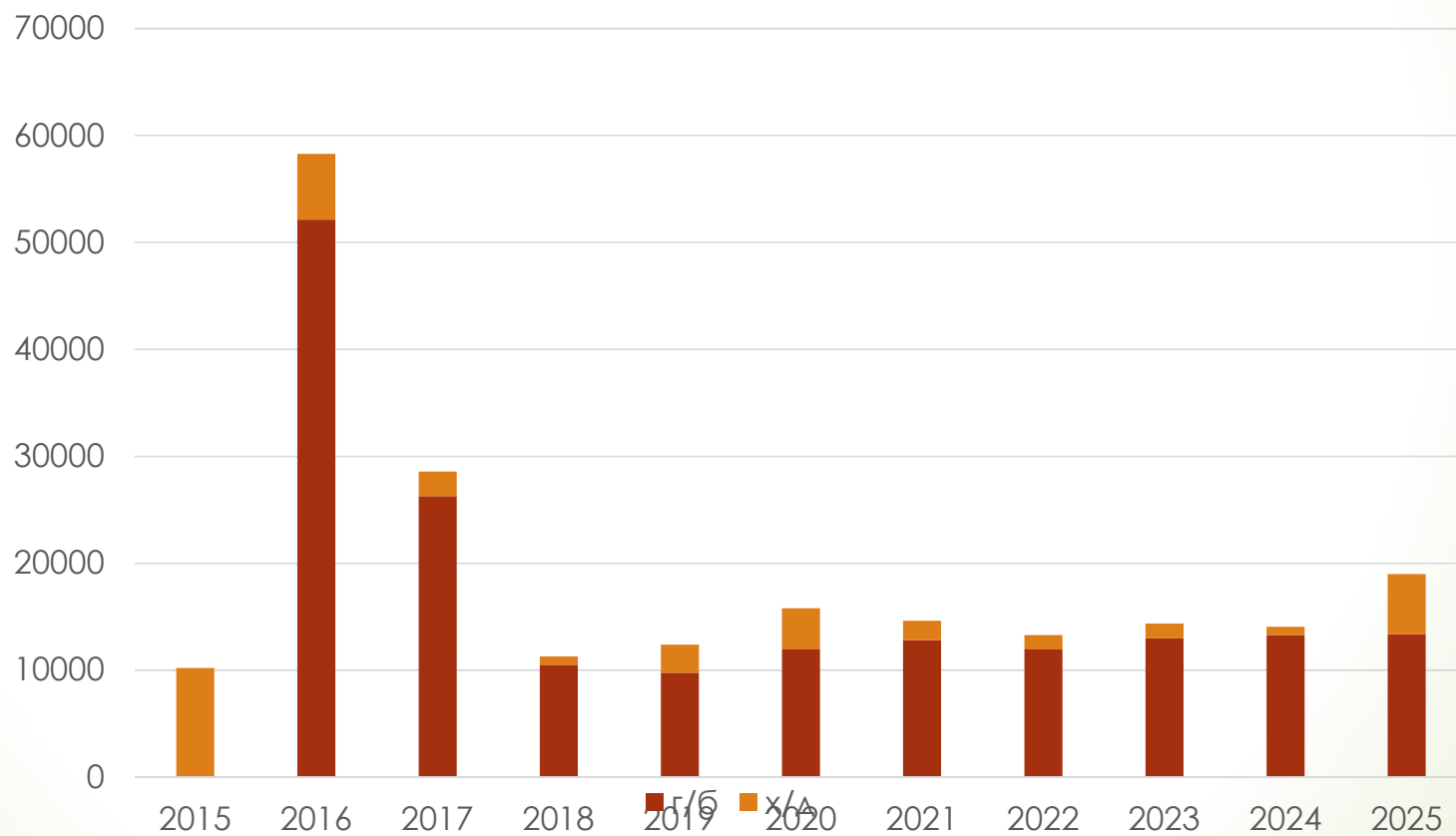
- Комплексные экспериментально-теоретические исследования фундаментальных процессов, лежащих в основе криогенной электроники, квантовых оптических систем и измерения их характеристик
- Разработка алгоритмов обнаружения, различения, оценки и измерения сигналов, устойчивых к действию шумов, в том числе негауссовских, пассивных и активных помех
- Разработка приборов и программно-аппаратных комплексов, реализующих перечисленные алгоритмы в радионавигационных системах, системах мониторинга напряженно-деформированного состояния породных массивов в рудниках и шахтах, гамма- и масс-спектрометрах, испытательных и измерительных стендах и комплексах для измерения параметров микроволновых квантовых структур, НЧ и СВЧ устройств, в том числе при криогенных температурах
- Разработка и экспериментальное исследование малошумящих полупроводниковых криогенных НЧ, ВЧ, СВЧ и фотонных устройств для работы при температурах вплоть до 4 К

Историческая справка

- 1987 – 2021 г.г. – исследования в области помехоустойчивой обработки сигналов и автоматизации физического эксперимента в рамках научного направления кафедры КТРС.
Партнеры: ИГД СО РАН; ИЯФ СО РАН; Бердское СКБ «Вега», ОКБ «Яхонт»; ФГУП «ПО «Север» госкорпорации Росатом; ОАО «ВНИИРА» госкорпорации «Алмаз-Антей» (г. С.-Петербург); ООО «ИНДУСТРИЯ» (г. Москва); ООО «Автоматика» (г. Новосибирск); Центр инноваций и технологий института «Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА» (г. Мирный); АО «НПО «СПЛАВ» (г. Тула), АО «Навигатор» (г. С.-Петербург), ФГУП «ВНИИА» госкорпорации Росатом (г.Москва).
- 2015 г. – создание межфакультетской Лаборатории квантовой криогенной электроники (ФТФ-РЭФ – кафедры КТРС, ППИМЭ, ПиТФ).
Партнеры: Институт фотонных технологий (г. Йена, Германия), ФГУП «ВНИИА» госкорпорации Росатом (г. Москва), ИЛФ СО РАН.
- 2016 – 2018 г.г. Проект Фонда перспективных исследований «Создание низкотемпературной и СВЧ-электроники, развитие измерительных методик для исследования и функционирования схем на основе сверхпроводящих кубитов», оснащение лаборатории современным криогенным и высокотехнологичным оборудованием.
- 2020 г. – наст. время. Совместные междисциплинарные проекты кафедр КТРС, ППИМЭ и ЛС в рамках Госзадания по тематике создания фотонных криогенных устройств для применения в квантовых сверхпроводниковых системах обработки информации и компактных комбинированных стандартах частоты.

Объемы НИР и ОКР в 2015-2025 г.г.

Объемы выполненных работ, тыс. руб.



Достижения школы в 2021-2025 г.г.

➤ **Аспиранты:**

набор – 15

выпуск – 6

➤ **Количество защит кандидатских диссертаций: 3**

➤ **Статьи:**

Всего 46

WoS – 14

Scopus – 24

➤ **РИДы:**

Всего 13

Изобретения – 6

Полезные модели – 2

Свидетельства на ПО – 5

➤ **Объем выполненных НИР и ОКР:**

Всего 75,4 млн руб.

Х/д – 10,9 млн руб.

Г/б – 64,5 млн руб.

➤ **Коммерциализация разработок:**

Криогенные маломощные усилители СВЧ (созданы по программе «Приоритет 2030») реализованы:

- для ООО «Международный центр квантовой оптики и квантовых технологий» (Москва) – 4 шт.

- для ООО «Сверхпроводниковые нанотехнологии» (Москва) – 1 шт.

- для ФГБУН «Институт «МТЦ СО РАН» (Новосибирск) – 1 шт.

- для ФГБУН «ИХГК СО РАН» (Новосибирск) – 1 шт.

Выполненные разработки в 2021 – 2025 г.г.

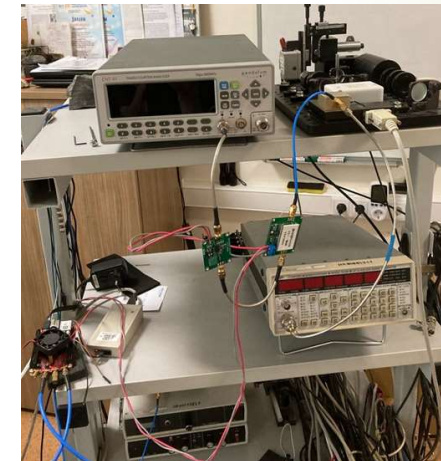
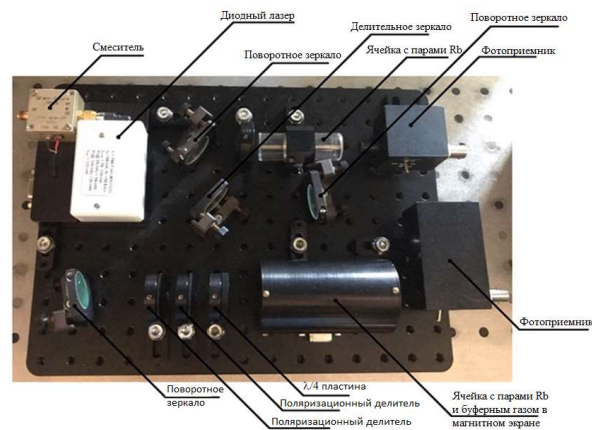
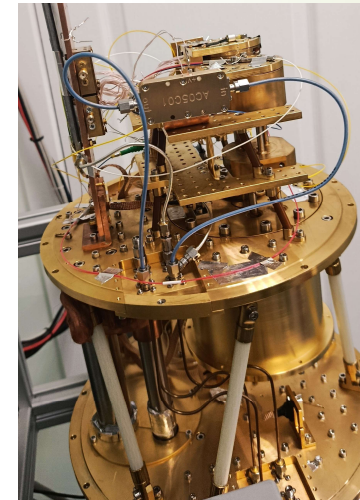
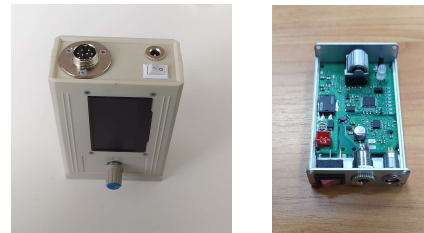
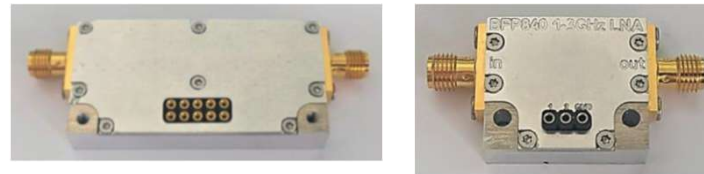
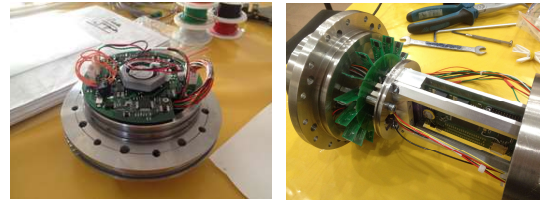
6

Бортовая система сбора данных для нефтепроводов (УЗ дефектоскоп)

Криогенные малошумящие усилители различных диапазонов СВЧ

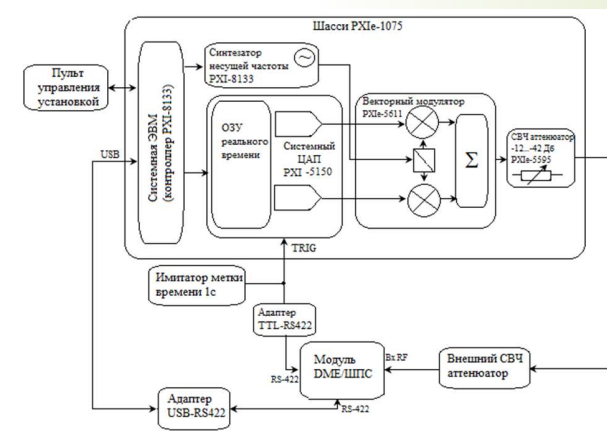
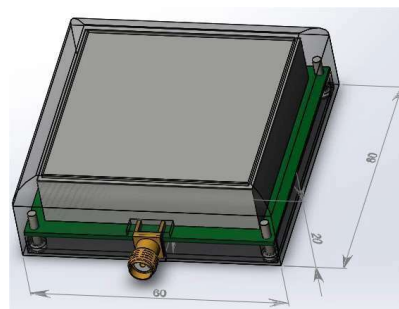
Источник питания для криогенных усилителей СВЧ

Экспериментальный образец комбинированного рубидиевого стандарта частоты оптического и СВЧ диапазонов на основе диодного лазера с внешним резонатором.



Выполненные разработки в 2021 – 2025 г.г.

- Система обработки сигналов в составе бортового радионавигационного модуля DME/ШПС для определения расстояния между воздушным судном и наземной станцией.
- Лабораторная установка для полунатурного имитационного моделирования бортовой системы обработки сигналов на базе платформы PXI компании National Instruments.
- Многодиапазонная активная антенна GPS-ГЛОНАСС-Galileo-BeiDou, с применением керамических пластин с металлизацией АО «НЭВЗ-Керамикс»



Основные научные результаты в 2021 - 2025 г.г.

8

- Результат «Генерация и распределение закрытых ключей безопасности на физическом уровне с помощью сверхдлинного волоконного лазера) (авторы Б.Н. Нюшков и И.И. Корель) – **отмечен как один из наиболее значимых фундаментальных результатов научных исследований, полученных в 2024 году по профилю Объединенного ученого совета по физическим наукам СО РАН (единственный из вузов Новосибирска).**
- Разработаны физико-технические основы переключения оптоволоконной телекоммуникационной линии в режим сверхдлинного лазера и разработан метод отслеживания вмешательства в линию по изменению параметров генерации такого лазера.
- Проведены численные эксперименты прохождения импульсных паттернов по оптическому волокну с особенностями пространственного распределения дисперсионного профиля.
- Зарегистрированы спектры излучения диодного лазера с внешним резонатором при внешней электрооптической модуляции СВЧ частотой при одновременном действии СВЧ модуляции тока инжекции.
- Создан экспериментальный макетный образец комбинированного рубидиевого стандарта частоты оптического и СВЧ диапазонов на основе диодного лазера с внешним резонатором. Достигнутая стабильность колебаний СВЧ – 10^{-11} и оптической – 10^{-8} .
- Предложена схема стабилизации оптической частоты на основе использования третьей гармоники сканирующего сигнала частотой 15 кГц.
- Предложен метод стабилизации радиочастоты на основе использования первой гармоники сканирующего сигнала с частотой 120 Гц.

Основные научные результаты в 2021 - 2025 г.г.

9

- Экспериментально установлены особенности применения SiGe транзисторов для создания криогенных малошумящих СВЧ усилителей.
- Впервые проведено экспериментальное исследование современных малошумящих кремниевых биполярных n-p-n и p-n-p транзисторов при криогенных температурах и продемонстрирована возможность их применения при создании криогенных дифференциальных малошумящих усилителей с экстремально низким уровнем фликкер-шума.
- Для уменьшения результирующей погрешности при обработке результатов измерений предложен новый способ, основанный на использовании метода моментов для полных достаточных статистик.
- Предложен новый способ моделирования цифровых отсчетов стационарных случайных процессов по их энергетическим спектрам.
- Предложена эквивалентная схема СКВИДа постоянного тока в виде параллельного соединения нелинейных резистивных элементов. На ее основе разработан алгоритм для автоматического измерения критического тока и нормального сопротивления СКВИДа.
- Создана частотно-селективная система измерений параметров микроволновых квантовых структур при криогенных температурах, позволяющая значительно уменьшить влияние шумов и электромагнитных помех.

Материальная база исследований

10



Рефрижератор с модулем He-7 Entropy
минимальная рабочая температура 300 мК;
температурные этапы охлаждения: 50 К, 4 К, 1 К, 300 мК;
4 коаксиальных микроволновых линии до частоты 20 ГГц;
3x24 линии постоянного тока.
Нами дополнен оптическим вводом.
Производитель: Entropy (Германия)



Рефрижератор растворения BF-LD400
с антивибрационной рамой, Mu-металлическим экраном, безмаслянным компрессором для подачи сжатого воздуха, минимальная рабочая температура 10 мК;
рабочие температуры этапы охлаждения: 50 К, 4 К, 1 К, 100 мК, 10 мК;
8 коаксиальных микроволновых линий: 4 линии до частоты 20 ГГц, 4 линии до частоты 40 ГГц;
3x24 линии постоянного тока.
Производитель: BlueForce (Финляндия)



Лазерное оборудование

- Фемтосекундный волоконный лазер-синтезатор частот MenloSystems FC1500
- Стабилизированный гелий-неоновый лазер Newport R-39727
- Лазерный спектрометр атомов рубидия оптического и СВЧ диапазонов

Измерительное оборудование

- Векторный анализатор цепей ZVL-13
- Генератор шума Agilent 346C
- Осциллограф Tektronix DP0 72304SX
- Генератор СВЧ сигналов Keysight N5173B
- Анализатор спектра Stanford SR780
- Прецизионный источник тока
- Измерительный комплекс National Instruments на базе шасси PXIe-1075 с контроллерами PXIe-8133

- среды разработки – LabView, LabWindows CVI
- Многоканальный спектрометр с параллельной записью информации в диапазоне 1500-1600 нм

Программное обеспечение

- Sonnet
- Lab view
- Mathcad 15
- ST Microwave Studio Solid Works

Кадровый состав научной школы (работающих в НГТУ-НЭТИ)

- ▶ Всего – 19
- ▶ Докторов наук – 2
- ▶ Кандидатов наук – 8
- ▶ Аспирантов – 3
- ▶ Студентов – 6
- ▶ Сотрудников в возрасте до 39 лет – 10 (53%)

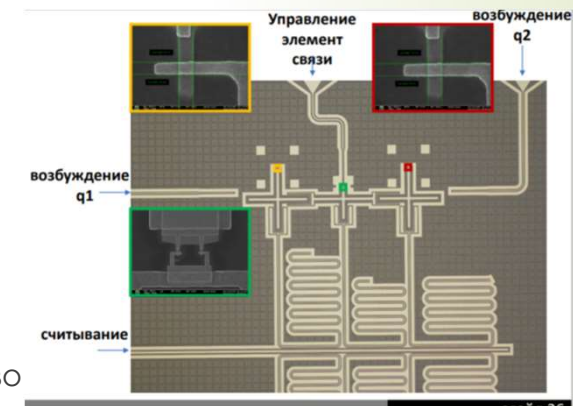
- ▶ Над докторскими диссертациями работают 3 сотрудника;
- ▶ Над кандидатскими диссертациями работают 3 сотрудника.

Текущее состояние научных исследований

- Создание квантовых систем обработки информации – современный тренд развития науки и техники. Существует несколько концепций создания таких систем. Одними из перспективных являются системы на основе микроволновых сверхпроводниковых квантовых битов (кубитов), **рабочая температура** которых **составляет десятки милликельвинов**, а **уровни мощности** сигналов на их выходах **не более нескольких фемтоватт**.
- Для управления такими объектами необходимо их сопряжение с системами управления и считывания управляющих и измерительных сигналов, работающими при комнатных температурах.

Современный интерфейс между системой управления и кубитами квантовых процессоров построен на СВЧ линиях связи, установленных в рефрижераторы растворения, обладающих следующими недостатками:

- высокая тепловая нагрузка на рефрижератор, ограничивающая число кубитов;
 - ограниченное свободное пространство рефрижератора лимитирует количество каналов связи;
 - появление фотонов высокой энергии в линии связи, что снижает время сохранения кубита в квантовом состоянии;
 - СВЧ линии связи имеют паразитные индуктивно-емкостные элементы, которые вызывают амплитудно-фазовые искажения сигнала.
- Возникла идея устранить данные ограничения, критичные для многокубитных квантовых процессоров, за счет создания и применения криогенного фотонного интерфейса связи на основе имеющихся решений в современных метрологических лазерных системах и волоконно-оптических линиях связи. На сегодняшний день поведение фотонных устройств, волоконной оптики и лазерных систем при криогенных температурах является практически неисследованным.



Текущее состояние научных исследований

- ▶ В 2026 году была поддержана наша заявка на выполнение междисциплинарного проекта «Многоканальный криогенный фотонный интерфейс для сверхпроводниковых квантовых технологий» (проект № FSUN-2026-0007 на 2026-2028 г.г.).

Работа является междисциплинарной и направлена на создание и исследование многоканального фотонного интерфейса для сверхпроводниковых квантовых технологий. Концептуально рассматриваются два возможных подхода формирования управляющих и считывающих сигналов для сверхпроводниковых кубитов: 1) непосредственная СВЧ модуляция оптической несущей частоты, генерируемой одночастотным лазерным источником; 2) гетеродинирование разнесенных лазерных частот и использование разностной частоты СВЧ диапазона.

До сих пор многоканальный криогенный фотонный интерфейс для управления и считывания многокубитного процессора не был продемонстрирован. В России данное направление является пионерским, так как в имеющихся научных центрах, работающих со сверхпроводниковыми кубитами, используется традиционный интерфейс на основе СВЧ линий передачи сигналов.

Текущее состояние научных исследований (продолжение)

- В 2026 году также была поддержана в рамках программы развития **НГТУ «Приоритет 2030»** наша заявка на выполнение проекта «Создание полнофункционального прототипа криогенного погружного зонда для электронного парамагнитного резонанса (ЭПР)» (проект № СЦ2-7 на 2026-2027 г.г.).

Целью проекта является создание полнофункционального прототипа криогенного ЭПР-зонда для последующей поставки потребителям, модернизирующих действующие ЭПР-спектрометры, а также для комплектования ЭПР-спектрометра, планируемого к серийному выпуску Международным томографическим центром СО РАН.



- ЭПР-зонд предназначен для проведения измерений при криогенных температурах (4–77 К). В состав разрабатываемого устройства входит механическая погружная конструкция, СВЧ-тракт с криогенным малошумящим усилителем, переключателем и ограничителем мощности, а также система датчиков и управляющих линий. Использование криогенного усилителя в непосредственной близости к резонатору позволяет существенно снизить шумовую температуру приемного тракта и существенно повысить чувствительность ЭПР-измерений

Текущее состояние научных исследований (продолжение)

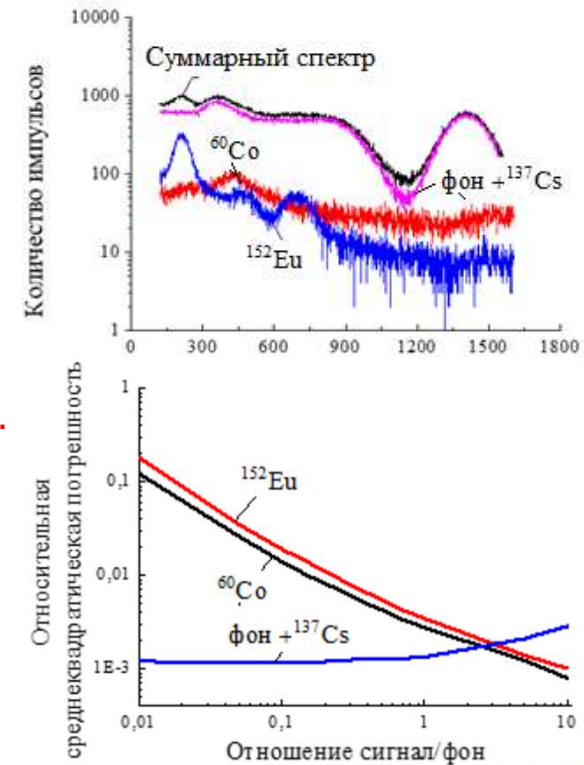
- Разработка цифровых статистических моделей гамма-спектра на выходе спектрометров при исследовании образцов с различными радионуклидами и вторичного гамма-излучения при облучении образцов нейтронами или первичным гамма-излучением.



Модель представляет собой многомерную плотность распределения вероятностей отсчетов на выходе АЦП детектора гамма-излучения:

$$w(\mathbf{l}, \mathbf{n}) = \frac{\exp(-\sum_{i=1}^N h_i - \Phi)}{\prod_{i=1}^N (n_i! l_i!)} \exp \left\{ \sum_{i=1}^N [\log(\Phi v_i)] l_i + \sum_{i=1}^N [\log(h_i)] n_i \right\}.$$

Такая модель позволяет синтезировать оптимальные алгоритмы прецизионных измерений параметров спектра и оценить их погрешность.



Перспективы развития

- ▶ Создание полнофункционального прототипа многоканального криогенного фотонного интерфейса для сверхпроводниковых квантовых технологий.
- ▶ Участие в подготовке серийного производства погружного ЭПР-зонда.
- ▶ Разработка прецизионных алгоритмов измерения параметров квантовых структур при криогенных температурах, параметров спектров при различных спектрометрических измерениях, характеризующихся малыми и сверхмалыми отношениями сигнал/шум.
- ▶ Развитие кадрового потенциала за счет подготовки молодых исследователей.
- ▶ Расширение сотрудничества с научными учреждениями и предприятиями реального сектора экономики (квантовые центры России, МТЦ СО РАН, ИХКГ СО РАН, ИЛФ СО РАН, Научно-производственное предприятие геофизической аппаратуры «Луч»).

Спасибо за внимание!