ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
АКАДЕМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Ж.И. АЛФЕРОВА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

194021, С.-Петербург, ул. Хлопина, 8,
корп. 3, лит. А
Телефон (факс): (812) 247-4484
www.spbau.ru
ОКПО 59503334, ОГРН 1027802511879
ИНН/КПП 7804161723/780401001

«УТВЕРЖДАЮ»
Проректор по науке
СПбАУ РАН им. Ж. И. Алферова
Мухин И.С.
«29» октября 2026 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алферова Российской академии наук»

на диссертацию

«Аппаратно-программные средства повышения быстродействия сканирующей ион-проводящей микроскопии»

Санкт-Петербург

2026 г.

Диссертация Пичахчи Степана Витальевича «**Аппаратно-программные средства повышения быстродействия сканирующей ион-проводящей микроскопии**», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.2 «Приборы и методы экспериментальной физики», выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт аналитического приборостроения Российской академии наук и в Федеральном государственном бюджетном учреждении высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алферова Российской академии наук».

В 2022 году Пичахчи Степан Витальевич окончил Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого по специальности «Транспортные средства специального назначения». В период с 2022 по 2026 год проходил обучение в очной аспирантуре Академического университета им. Ж.И. Алферова по направлению 1.3.8 «Физика конденсированного состояния».

В период подготовки диссертации работал в лаборатории сканирующей зондовой микроскопии и спектроскопии ИАП РАН в должности младшего научного сотрудника.

Научный руководитель — доктор физико-математических наук Голубок Александр Олегович, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией сканирующей зондовой микроскопии и спектроскопии ИАП РАН.

По результатам рассмотрения диссертации «**Аппаратно-программные средства повышения быстродействия сканирующей ион-проводящей микроскопии**» принято следующее заключение:

1. Актуальность диссертационной работы.

Актуальность диссертационной работы определяется потребностью нанодиагностики, клеточной биологии и биомедицины в средствах неинвазивного исследования живых объектов в жидкой среде с высоким пространственным и временным разрешением. Сканирующая ион-проводящая

микроскопия обладает необходимой деликатностью, однако ее применение ограничено сравнительно невысокой скоростью получения изображений.

Преодоление этого ограничения требует согласованного совершенствования пьезомеханических узлов, электронных средств регистрации и алгоритмов управления. Рассматриваемая работа направлена на решение этой научно-технической задачи и поэтому имеет существенную научную и практическую значимость.

2. Личное участие соискателя ученой степени в получении результатов, изложенных в диссертации.

Все изложенные в диссертации результаты получены автором лично либо при его непосредственном участии. Автором проведен аналитический обзор литературы, сформулированы цели и задачи исследования, разработаны конструкции инерциального привода и сбалансированного пьезосканера, выполнены их моделирование и экспериментальная отработка. Автор участвовал в разработке и реализации алгоритмов сканирования, выполнил эксперименты на тестовых и биологических образцах, обработал и интерпретировал полученные данные, принимал ведущее участие в подготовке публикаций.

3. Степень достоверности результатов, проведенных соискателем ученой степени исследований.

Достоверность результатов обеспечена корректной постановкой задач, использованием аналитического и конечно-элементного моделирования в среде COMSOL Multiphysics, моделирования в MATLAB Simulink, применением методов сканирующей зондовой, электронной и оптической микроскопии, а также согласованностью расчетных и экспериментальных данных. Основные результаты опубликованы в рецензируемых научных изданиях и прошли апробацию на российских и международных научных конференциях.

4. Новизна исследований, полученных результатов и выводов:

К числу результатов, определяющих научную новизну исследования, относятся следующие:

1. Экспериментально и с использованием конечно-элементного моделирования показано, что для подавления резонанса пьезосканера необходимо учитывать деформацию не только пьезопакетов, но и корпуса сканера; предложен способ эффективного подавления первой резонансной моды.

2. Экспериментально и расчетно обнаружено и объяснено существование оптимального электрического сопротивления в цепи разряда емкости пьезопакета, обеспечивающего максимальную среднюю величину шага инерциального двигателя.

3. Предложен и реализован аналоговый алгоритм сканирования СИПМ с аппаратным прерыванием, минимизирующий время нахождения зонда вблизи поверхности.

4. Предложена и апробирована аналоговая схема одновременного измерения параметров кривой подвода с использованием двух пороговых и пикового детекторов в hopping-режиме без увеличения времени измерения.

5. На тестовых объектах показано, что регистрация амплитуды колебаний на частоте второго резонанса камертонного датчика в полуконтактном силовом режиме существенно повышает скорость сканирования при сохранении качества изображений.

5. Ценность научных работ соискателя ученой степени.

К основным результатам, определяющим научную и практическую значимость работы, относятся следующие:

1. Разработана и верифицирована конечно-элементная модель сбалансированного пьезосканера. Показано, что деформация корпуса влияет на положение центра масс и должна учитываться при подавлении первой резонансной моды. Экспериментально подтверждено четырехкратное увеличение скорости сканирования в hopping-режиме СИПМ и в режиме

сканирующей силовой микроскопии по сравнению с разбалансированной конфигурацией.

2. Установлено оптимальное сопротивление в цепи разряда емкости пьезопакета инерциального двигателя, при котором достигается максимальная средняя величина шага при устойчивой работе системы.

3. Разработан пьезорезонансный камертонный датчик с вольфрамовым зондом. Работа на второй колебательной моде частотой 63 кГц позволила увеличить максимальную скорость сканирования в сканирующей силовой микроскопии с 25 до 100 мкм/с при сохранении качества воспроизведения профиля.

4. Предложен адаптивный алгоритм hopping-сканирования с уменьшением высоты отвода нанопипетки. Для кадра 10 x 10 мкм² с разрешением 100 x 100 точек время получения изображения сокращено с 23 мин 36 с до 6 мин 18 с без ухудшения качества топографии и неинвазивности.

5. Предложен и реализован алгоритм сканирования с аппаратным прерыванием, использующий пороговое детектирование тока вместо непрерывной обратной связи. На твердых образцах достигнута скорость до 200 точек/с при высоте отвода 50 нм; для нейрональных клеток с перепадом высот до 10 мкм получена скорость около 15 точек/с.

6. Создана экспериментальная платформа на базе микроконтроллера RP2350, включающая высоковольтные усилители, 16-разрядные АЦП и ЦАП, преобразователь ток-напряжение, схемы порогового и пикового детектирования, выборки-хранения, аналоговой обратной связи и коммутации. Платформа апробирована на эталонных и биологических образцах.

6. Апробация работы.

Материалы диссертации представлены на российских и международных научных конференциях:

1. Особенности применения сканирующего микроскопа ионной проводимости / С. Ю. Лукашенко, О. М. Горбенко, М. Л. Фельштын, И. Д.

Сапожников, С. В. Пичахчи, М. В. Жуков, А. О. Голубок // Физика — наукам о жизни : тезисы докладов Шестой международной конференции со школой молодых ученых, 13–18 октября 2025 г. — СПб. : ФТИ им. А. Ф. Иоффе, 2025. — С. 30.

2. Оптимизация «hopping режима» в сканирующей микроскопии ионной проводимости / С. В. Пичахчи, М. Л. Фельштын, И. Д. Сапожников, О. М. Горбенко, С. Ю. Лукашенко, А. О. Голубок // Черноголовская конференция по электронной микроскопии КЭМ-25 с международным участием : тезисы докладов, Черноголовка, 16–19 июня 2025 г. — М. : Гефест, 2025. — С. 201.

3. Влияние конфайнмента водной среды на кривую подвода в СМИП / С. Ю. Лукашенко, О. М. Горбенко, М. Л. Фельштын, И. Д. Сапожников, С. В. Пичахчи, М. В. Жуков, А. О. Голубок // Особенности применения сканирующей зондовой микроскопии в вакууме и различных средах : V Всероссийская конференция, Черноголовка, 14–15 октября 2025 г. — Черноголовка, 2025.

4. Создание тестовых структур для сканирующей капиллярной микроскопии / М. В. Жуков, А. А. Банков, С. В. Пичахчи, С. Ю. Лукашенко // АналитБиоПрибор-2025 : тезисы докладов Четвертой ежегодной всероссийской молодежной конференции по методам и приборам для анализа биологических объектов, Санкт-Петербург, 2–3 декабря 2025 г. — СПб. : Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2025. — С. 151–153.

5. Инерциальный пьезопривод для сканирующего зондового микроскопа: моделирование и экспериментальные исследования / С. В. Пичахчи, М. Л. Фельштын, И. Д. Сапожников, С. Ю. Лукашенко, О. М. Горбенко, М. В. Жуков, А. О. Голубок // Нанофизика и наноэлектроника : тезисы докладов XXIX симпозиума, Нижний Новгород, 10–14 марта 2025 г. — Нижний Новгород, 2025. — С. 470.

6. Компактная измерительная головка СЗМ, адаптированная к совмещению с оптическим и электронным микроскопами / И. Д. Сапожников, О. М. Горбенко, М. В. Жуков, С. В. Пичахчи, М. Л. Фельштын, А. О. Голубок // Нанофизика и наноэлектроника : труды XXVIII Международного симпозиума,

Нижний Новгород, 11–15 марта 2024 г. — Нижний Новгород : ИПФ РАН, 2024. — Т. 2. — С. 905–906.

7. Об ионной проводимости зонда в виде капилляра с наноаппертурой / С. Ю. Лукашенко, О. М. Горбенко, М. В. Жуков, С. В. Пичахчи, И. Д. Сапожников, М. Л. Фельштын, А. О. Голубок // Нанофизика и наноэлектроника : труды XXVIII Международного симпозиума, Нижний Новгород, 11–15 марта 2024 г. — Нижний Новгород : ИПФ РАН, 2024. — Т. 2. — С. 929–930.

8. Высокоскоростной сканер для сканирующего зондового микроскопа: моделирование и экспериментальные исследования / С. В. Пичахчи, И. Д. Сапожников, О. М. Горбенко, М. Л. Фельштын, С. Ю. Лукашенко, А. О. Голубок // Нанофизика и наноэлектроника : труды XXVIII Международного симпозиума, Нижний Новгород, 11–15 марта 2024 г. — Нижний Новгород : ИПФ РАН, 2024. — Т. 2. — С. 943–944.

9. Инерциальные пьезоприводы в системах позиционирования и сканирования биоаналитического оборудования / С. В. Пичахчи, О. М. Горбенко, С. Ю. Лукашенко, И. Д. Сапожников, М. Л. Фельштын, А. О. Голубок // АналитБиоПрибор-2024 : тезисы докладов Третьей ежегодной всероссийской молодежной конференции по методам и приборам для анализа биологических объектов, Санкт-Петербург, 14–15 ноября 2024 г. — СПб. : Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2024. — С. 151–153.

10. Влияние геометрии апертуры СКМ-зонда на ионную проводимость: эксперимент и модель / С. Ю. Лукашенко, О. М. Горбенко, М. Л. Фельштын, И. Д. Сапожников, М. В. Жуков, С. В. Пичахчи, А. О. Голубок // АналитБиоПрибор-2024 : тезисы докладов Третьей ежегодной всероссийской молодежной конференции по методам и приборам для анализа биологических объектов, Санкт-Петербург, 14–15 ноября 2024 г. — СПб. : Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2024. — С. 153–156.

11. Изучение эффекта локального повышения ионной проводимости в наноразмерных трехмерных каналах Т-образной формы / М. В. Жуков, О. М. Горбенко, С. Ю. Лукашенко, И. Д. Сапожников, М. Л. Фельштын, С. В. Пичахчи,

А. О. Голубок // ФизикА.СПб/2023 : тезисы конференции, Санкт-Петербург, 23–27 октября 2023 г. — СПб., 2023.

12. Effect of increasing in ion current flowing through a nanocapillary approaching the charged surface in liquid / M. V. Zhukov, S. Yu. Lukashenko, I. D. Sapozhnikov, M. L. Felshtyn, O. M. Gorbenko, S. V. Pichakhchi, A. O. Golubok // 10th International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures : book of abstracts, Saint Petersburg, May 23–26, 2023. — Saint Petersburg : HSE University, 2023.

13. Выпрямление ионного тока в нанопипетках: эксперимент и моделирование / С. Ю. Лукашенко, О. М. Горбенко, М. В. Жуков, С. В. Пичахчи, И. Д. Сапожников, М. Л. Фельштын, А. О. Голубок // Open Science 2023 : сборник тезисов X Всероссийского молодежного научного форума с международным участием, Гатчина, 15–17 ноября 2023 г. — Гатчина : ПИЯФ, 2023. — С. 139.

14. О косвенном измерении апертуры зонда-нанопипетки сканирующего микроскопа ионной проводимости / С. Ю. Лукашенко, О. М. Горбенко, М. В. Жуков, С. В. Пичахчи, И. Д. Сапожников, М. Л. Фельштын, А. О. Голубок // Особенности применения сканирующей зондовой микроскопии в вакууме и различных средах : программа и тезисы докладов IV Всероссийской конференции, Черноголовка, 30 мая — 1 июня 2023 г. — Черноголовка, 2023. — С. 30. — DOI: 10.26201/ISSP2023.45.557/SPMAPPL-4.20.

15. Об ионной проводимости зонда сканирующего капиллярного микроскопа / С. Ю. Лукашенко, О. М. Горбенко, М. В. Жуков, С. В. Пичахчи, И. Д. Сапожников, М. Л. Фельштын, А. О. Голубок // Сканирующая зондовая микроскопия для биологических систем — 2023 (BioSPM-2023) : 5-я Международная конференция, Москва, 6–7 декабря 2023 г. — М., 2023.

16. Изучение пик-эффекта на кривых ток–расстояние в сканирующем микроскопе ионной проводимости / М. В. Жуков, О. М. Горбенко, С. Ю. Лукашенко, С. В. Пичахчи, И. Д. Сапожников, М. Л. Фельштын, А. О. Голубок // Особенности применения сканирующей зондовой микроскопии в вакууме и

различных средах : III Всероссийская конференция, Черноголовка, 1–3 июня 2022 г. — Черноголовка, 2022..

7. Научная специальность, которой соответствует диссертация

Научные положения и результаты диссертации соответствуют паспорту научной специальности 1.3.2 «Приборы и методы экспериментальной физики» по пунктам 3 и 4:

3. Разработка и создание научной аппаратуры и приборов для экспериментальных исследований в различных областях физики.

4. Разработка и создание экспериментальных установок для проведения экспериментальных исследований в различных областях физики.

8. Публикации

Основные результаты по теме диссертации изложены в 9 статьях, индексируемых в базах Scopus, Web of Science и РИНЦ.

Статьи, опубликованные в изданиях, включённых в системы цитирования Web Of Science и SCOPUS:

1. Сканер с балансом центра масс для сканирующего зондового микроскопа / С. В. Пичахчи, О. М. Горбенко, С. Ю. Лукашенко, М. Л. Фельштын, И. Д. Сапожников, А. О. Голубок // Письма в Журнал технической физики. – 2026. – Т. 52, вып. 7. – С. 3–7. – DOI: 10.61011/PJTF.2026.07.62513.20453.

2. Effect of nanoscale water media confinement on the approach curve in SICM / S. Yu. Lukashenko, O. M. Gorbenko, M. L. Felshtyn, I. D. Sapozhnikov, S. V. Pichakhchi, M. V. Zhukov, A. O. Golubok // Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics. – 2025. – Vol. 16, no. 6. – P. 770–777. – DOI: 10.17586/2220-8054-2025-16-6-770-777.

3. Ionic conductivity in nanopipettes: experiment and model / S. Yu. Lukashenko, O. M. Gorbenko, M. L. Felshtyn, I. D. Sapozhnikov, D. A. Kirilenko, S. V. Pichakhchi, M. V. Zhukov, A. O. Golubok // Nanosystems: Physics, Chemistry,

Mathematics. – 2025. – Vol. 16, no. 4. – P. 441–449. – DOI: 10.17586/2220-8054-2025-16-4-441-449.

4. Уменьшение времени получения изображения в сканирующем микроскопе ионных токов в «hopping»-моде / С. В. Пичахчи, О. М. Горбенко, С. Ю. Лукашенко, М. Л. Фельштын, И. Д. Сапожников, И. С. Свайкин, А. О. Голубок // Письма в Журнал технической физики. – 2024. – Т. 50, вып. 20. – С. 48–51. – DOI: 10.61011/PJTF.2024.20.58939.19984.

5. Inertial nanostep piezoelectric drive: modeling and experiment / O. M. Gorbenko, S. Y. Lukashenko, S. V. Pichakhchi, I. D. Sapozhnikov, M. L. Felshtyn, A. O. Golubok // Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics. – 2024. – Vol. 15, no. 5. – P. 643–653. – DOI: 10.17586/2220-8054-2024-15-5-643-653.

6. Влияние поверхностного заряда на ионную проводимость электролита в наноканале / М. В. Жуков, О. М. Горбенко, С. Ю. Лукашенко, И. Д. Сапожников, М. Л. Фельштын, С. В. Пичахчи, А. О. Голубок // Физика твердого тела. – 2023. – Т. 65, вып. 12. – С. 2208–2211. – DOI: 10.61011/FTT.2023.12.56762.5110k.

7. О пространственном разрешении пьезорезонансного зондового датчика с вольфрамовой иглой / О. М. Горбенко, М. В. Жуков, С. Ю. Лукашенко, С. В. Пичахчи, И. Д. Сапожников, М. Л. Фельштын, А. О. Голубок // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2023. – № 5. – С. 58–64. – DOI: 10.31857/S1028096023050060.

8. Особенности поведения кривой подвода сканирующего микроскопа ионной проводимости / С. Ю. Лукашенко, О. М. Горбенко, М. В. Жуков, С. В. Пичахчи, И. Д. Сапожников, М. Л. Фельштын, А. О. Голубок // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2023. – № 5. – С. 65–72. – DOI: 10.31857/S1028096023050102.

9. Многомодовый сканирующий микроскоп ионной проводимости с системой пьезоинерциального перемещения / М. В. Жуков, С. Ю. Лукашенко, И. Д. Сапожников, М. Л. Фельштын, О. М. Горбенко, С. В. Пичахчи, А. О. Голубок

// Научное приборостроение. – 2022. – Т. 32, № 4. – С. 68–87. – DOI: 10.18358/np-32-4-i6887

9. Оценка выполненной соискателем работы.

На научном семинаре присутствовали 16 человек, в том числе доктора физико-математических наук: Цырлин Г.Э., Голубок А.О., Мухин И.С., а также кандидаты физико-математических наук: Наумов А.Р., Байрамуков В.Ю., Шаров В.А., Воробьев А.А., Ваулин Н.В., Федоров В.В. Было задано 7 вопросов, на которые соискатель дал обстоятельные ответы.

По результатам доклада С.В. Пичахчи на научном семинаре утверждены следующие положения:

1. Балансировка конструкции пьезосканера с двумя разнонаправленными упругими мембранами с учетом как активного смещения материала пьезоактюатора под действием обратного пьезоэффекта, так и пассивного смещения материала несущего корпуса, возникающего в результате упругих деформаций, позволяет в 7 раз уменьшить амплитуду резонансного пика по сравнению с разбалансированной конструкцией.

2. В инерциальном линейном шаговом двигателе с пьезоактюатором, работающем по механизму «проскальзывание-залипание», необходимо обеспечить оптимальное значение потерь в колебательной системе путем подбора электрического сопротивления в цепи разряда пьезоактюатора, при которых, с одной стороны, демпфируются колебания, дестабилизирующие работу двигателя, а, с другой стороны, ускорение стержня в момент разряда пьезопакета достаточно для возникновения фазы «проскальзывание».

3. Аппаратное прерывание сканирования по пороговому значению тока и совместное использование двух пороговых детекторов и пикового детектора улучшает быстродействие сканирующего ион-проводящего микроскопа по сравнению с использованием непрерывного регулятора, и позволяет за один цикл подвода нанопипетки регистрировать топографию поверхности, угол

наклон спадающей ветви кривой подвода I(Z) и максимальное значение ионного тока

В выступлениях дана положительная оценка диссертационной работы, отмечены актуальность поставленных задач и высокий профессиональный уровень проведенных исследований. Выступлений с отрицательной оценкой не было.

Диссертация соответствует требованиям, установленным пунктом 14 Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 года № 842, (в редакции постановлений Правительства Российской Федерации от 30.07.2014 № 723, от 21.04.2016 № 335, от 02.08.2016 № 748, от 29.05.2017 № 650, от 28.08.2017 № 1024, от 01.10.2018 № 1168, от 20.03.2021 № 426, от 11.09.2021 № 1539).

Заслушав доклад Пичахчи С.В. об основных положениях выполненной диссертации, рассмотрев и обсудив диссертацию, коллектив научного семинара постановил:

1. Считать, что диссертационная работа С.В. Пичахчи является законченным научно-квалификационным трудом и имеет научную и практическую ценность.

2. Диссертационная работа С.В. Пичахчи «Аппаратно-программные средства повышения быстродействия сканирующей ион-проводящей микроскопии» рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.2 «Приборы и методы экспериментальной физики».

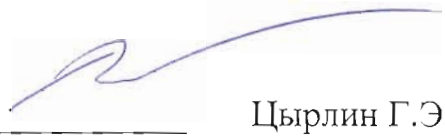
В голосовании по протоколу семинара приняло участие 16 человек. Результаты голосования: «за» — 16, «против» — 0, воздержавшихся — 0.

Протокол № 7 от «29» октября 2026 г.

Диссертационная работа рассмотрена и настоящее заключение подготовлено и утверждено на научном семинаре федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования и науки

«Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алферова Российской академии наук».

Д.ф.-м.н., заведующий лабораторией
Эпитаксиальных нанотехнологий
СПбАУ РАН им. Ж.И. Алферова



Цырлин Г.Э.