

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Дальневосточный федеральный университет»
(ДВФУ)

690922, Приморский край, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10, Тел. (423) 243 34 72, факс (423) 243 23 15
Эл.почта: rectorat@dvfu.ru, сайт: <http://www.dvfu.ru>
ОКПО 02067942, ОГРН 1022501297785, ИНН/КПП 2536014538/254001001

ИНСТИТУТ НАУКОЁМКИХ ТЕХНОЛОГИЙ И ПЕРЕДОВЫХ МАТЕРИАЛОВ
Департамент общей и экспериментальной физики

ОТЗЫВ НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ

на диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

«Влияние конкуренции анизотропии формы и магнитокристаллической анизотропии на магнетизм одномерных ферромагнитных наноструктур на основе переходных 3d металлов»

по научной специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния

Собирова Мухаммада Илхомиддиновича

Актуальность темы

Диссертационное исследование М. И. Собирова посвящено одной из наиболее востребованных и быстро развивающихся областей современной физики конденсированного состояния – наномagnetизму и, в частности, поиску путей управления магнитными свойствами в низкоразмерных системах. Работа выполнена в русле мирового тренда перехода от традиционных планарных технологий хранения информации, которые практически исчерпали свои возможности по плотности записи и быстродействию, к трёхмерным архитектурам магнитной памяти.

Особую актуальность исследованию придаёт выбор объектов – одномерных ферромагнитных наноструктур с нетривиальной геометрией (нанопроволоки типа «медуза», сегментированные и градиентные системы). В таких системах ключевую роль играет конкуренция анизотропии формы и магнитокристаллической анизотропии, что позволяет не только углубить фундаментальные представления о микромагнетизме, но и предложить новые принципы построения запоминающих устройств, включая память на движущихся доменных стенках (racetrack memory). Работа М. И. Собирова органично вписывается в данное направление, а предложенные им оригинальные методики синтеза и комплексного анализа массивов нанопроволок имеют высокий научный и прикладной потенциал, что подтверждается поддержкой исследования рядом грантов РНФ и государственных заданий.

Научная новизна и оригинальность идей

В ходе выполнения диссертации М. И. Собировым получен ряд новых фундаментальных и прикладных результатов, которые существенно расширяют понимание физики наномagnetизма:

1. **Новизна экспериментального подхода.** Впервые разработан и реализован оригинальный метод получения двухслойных пористых матриц оксида алюминия с

контролируемым соотношением диаметров пор в слоях (от 1:5 до 1:3). Это позволило методом электроосаждения синтезировать массивы нанопроволок Ni типа «медуза» и двухсегментные Co/Ni структуры с уникальной геометрией, что значительно расширяет технологические возможности шаблонного синтеза.

2. **Новизна в понимании физических механизмов.** Впервые с использованием метода FORC-диаграмм количественно показано, что в массивах поликристаллических Co-нанопроволок диаметром ~40 нм эффективное поле магнитостатического взаимодействия достигает ~2500 Э, что превышает аналогичный параметр для Fe-нанопроволок (2042 Э), несмотря на меньшую намагниченность насыщения Co. Этот парадоксальный эффект детально объяснён с помощью микромагнитного моделирования как следствие возникновения сложной многодоменной структуры, обусловленной конкуренцией анизотропии формы и одноосной магнитокристаллической анизотропии с преимущественной ориентацией *c*-осей ГПУ-фазы в поперечном направлении.

3. **Новизна в управлении анизотропией.** Впервые синтезированы градиентные нанопроволоки Co–CoW с плавным переходом от кристаллической ГПУ-фазы чистого Co к аморфному сплаву Co₇₈W₂₂. Показано, что продольный градиент состава индуцирует внутренние механические напряжения и изменение кристаллической структуры, что приводит к переориентации оси лёгкого намагничивания из продольного в поперечное направление. Этот результат открывает новые возможности для управления магнитными свойствами без изменения геометрии наноструктур.

4. **Новизна в исследовании сложных систем.** Впервые синтезированы и всесторонне охарактеризованы двухсегментные нанопроволоки Co/Ni и Ni/Co типа «медуза». Установлено, что взаимное расположение сегментов определяет направление эффективной анизотропии: в Co-сегментах с диаметром ~300 нм доминирует магнитокристаллическая анизотропия, ориентирующая лёгкую ось перпендикулярно оси структуры, тогда как в Co-сегментах с диаметром ~100 нм определяющей становится анизотропия формы. Это позволило продемонстрировать гибридные петли гистерезиса с аномально высоким полем насыщения (до 14 кЭ) и управляемое снижение магнитостатических взаимодействий в массиве.

5. **Микромагнитное моделирование.** Созданы адекватные экспериментальным данным микромагнитные модели, которые впервые раскрыли детальные механизмы переключения в структурах «медуза», включая зарождение и слияние вихрей в «головах» с образованием конфигурации «штопор», а также динамику поперечных и вихревых доменных стенок в «ногах». В расчётном режиме продемонстрирована возможность движения доменных стенок под действием спин-поляризованного тока со скоростями 570–950 м/с, что подтверждает перспективность таких структур для памяти на «беговых дорожках».

Научное и практическое значение

Полученные результаты имеют существенное значение как для фундаментальной науки, так и для практических приложений.

Фундаментальное значение. Работа вносит значительный вклад в понимание роли геометрической модуляции и кристаллической текстуры в формировании доменной структуры и магнитостатических взаимодействий в одномерных наносистемах. Результаты углубляют теорию микромагнетизма применительно к объектам со сложной пространственной кривизной и конкурирующими видами анизотропии.

Прикладная значимость. Предложенные нанопроволоки типа «медуза» и их сегментированные вариации являются прямыми кандидатами для создания ячеек памяти на «беговых дорожках», где «головы» могут служить эффективными генераторами доменных стенок, а «ноги» – дорожками для их перемещения. Кроме того, показана принципиальная возможность использования таких структур в биомедицине (таргетная доставка, магнитная гипертермия) благодаря сочетанию высокой магнитной чувствительности и возможности функционализации поверхности.

Методическая ценность. Разработанные подходы к синтезу двухслойных матриц, а также комплексные методы анализа (FORC + микромагнитное моделирование) могут быть внедрены в учебные курсы ДВФУ по физике конденсированного состояния и наноматериалам, а также использованы в лабораторных практикумах для магистрантов и аспирантов.

Личный вклад, ответственность и работоспособность автора

За время работы над диссертацией М.И. Собиров проявил себя как сложившийся, высококвалифицированный и глубоко мотивированный исследователь, способный самостоятельно ставить и решать сложные научные задачи.

Личный вклад. Автор лично провёл все этапы синтеза: от подготовки и электрохимической полировки алюминия до реализации многоступенчатого анодирования и электроосаждения сложных структур (нанопроволок Fe, Co, Ni, градиентных Co–CoW, структур типа «медуза» и двухсегментных Co/Ni). Самостоятельно освоил и применил методы РЭМ, ЭДРС, РСА, вибрационной магнитометрии и FORC-диаграмм, а также провёл микромагнитное моделирование в среде MuMax³ с последующей обработкой и визуализацией данных.

Самостоятельность и инициативность. Собиров М.И. продемонстрировал не только высокую исполнительскую дисциплину, но и способность к генерации оригинальных идей. Например, им лично предложена и реализована методика получения двухслойных матриц с контролируемым соотношением диаметров пор, что потребовало нетривиального подхода к управлению режимами анодирования. Также им предложена интерпретация необычного поведения полей взаимодействия в массивах Co-нанопроволок на основе данных FORC и моделирования.

Академическая активность. Результаты работы были представлены на 10 международных и всероссийских конференциях, включая SISM-2026, EASTMAG-2025, IcAUMS-2025, ISAMMA-2024, SISM-2023 и другие. Основное содержание диссертации опубликовано в 4 статьях в рецензируемых журналах, индексируемых в Scopus и Web of Science (включая Q1: *Small*, *Materials Today Nano*, Q3: *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*). Кроме того, по теме диссертации опубликовано 10 тезисов докладов. Публикационная активность свидетельствует о высоком уровне работы и её признании в научном сообществе.

Дисциплина и организованность. Работа выполнена в полном объёме и в установленные сроки. Все этапы исследования логически связаны, результаты непротиворечивы и подтверждены как экспериментально, так и расчётно.

Рекомендации по дальнейшей работе

В качестве перспективных направлений для продолжения исследований можно рекомендовать:

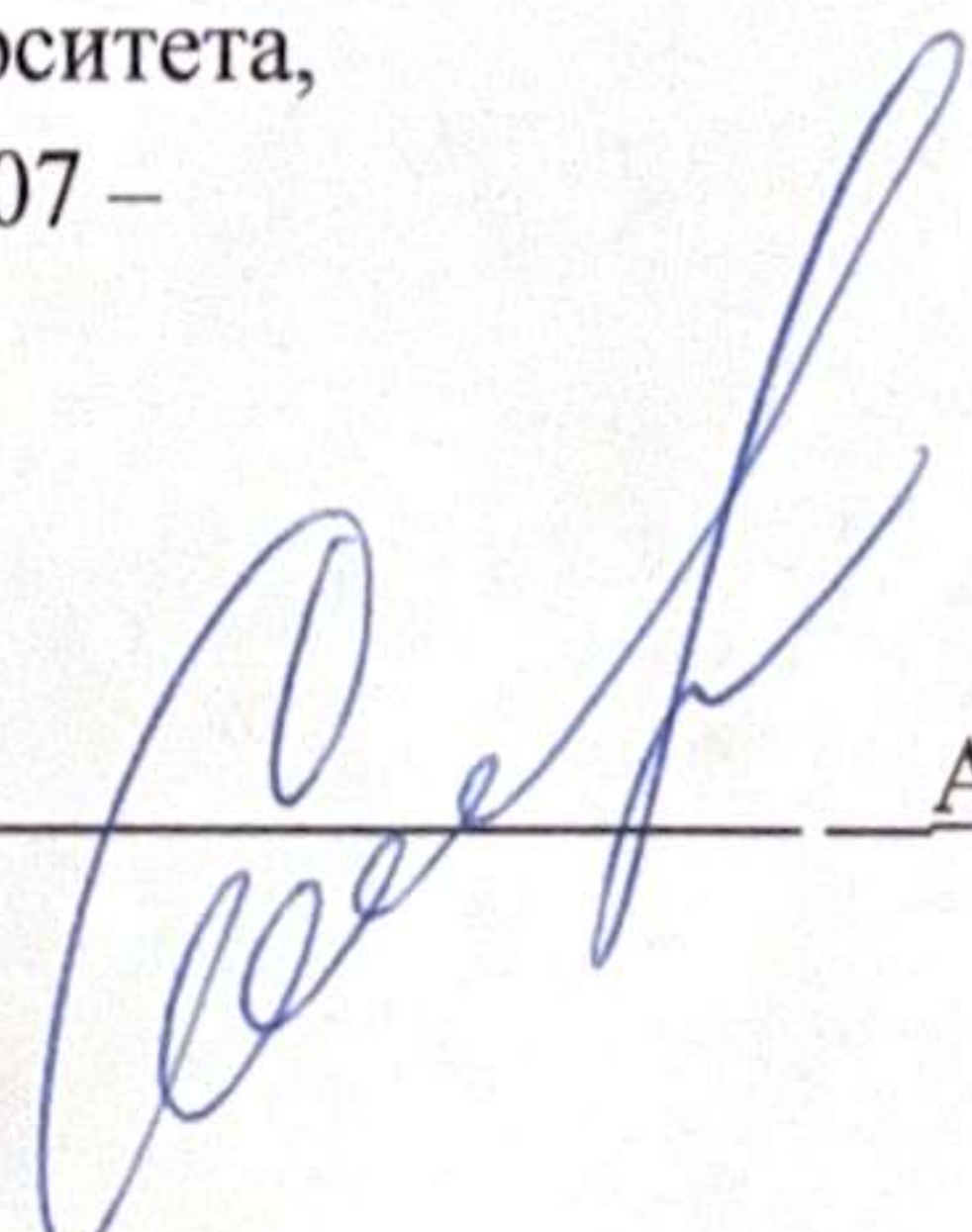
1. Экспериментальное изучение динамики движения доменных стенок в нанопроволоках типа «медуза» в реальном времени с использованием методов магнитооптики или *in-situ* Лоренц-микроскопии для прямой верификации скоростей, предсказанных моделированием.
2. Исследование транспортных свойств (магнитосопротивления) как отдельных нанопроволок, так и их массивов для оценки возможности их интеграции в реальные спинтронные устройства.
3. Расширение спектра материалов, например, использование сплавов с сильной перпендикулярной анизотропией (Co/Pt, FePt) для создания ещё более стабильных и масштабируемых запоминающих элементов.
4. Проведение биомедицинских тестов на культурах клеток для оценки потенциала нанопроволок типа «медуза» в качестве агентов для гипертермии и адресной доставки.

Заключение

Диссертационная работа М. И. Собирова является законченным, самостоятельным и высококачественным научным исследованием, выполненным на передовом мировом уровне. Она содержит новые научные результаты, имеющие большое теоретическое и практическое значение, а также обладает несомненной методической ценностью. Работа полностью соответствует требованиям, предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертациям по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния», а её автор, Собиров Мухаммад Илхомиддинович, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук.

Научный руководитель

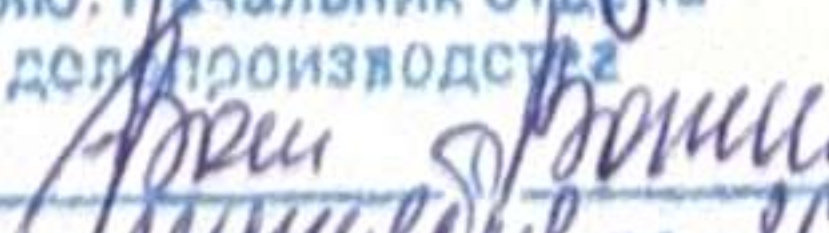
Г.н.с. Лаборатории спин-орбитроники
Департамента общей и экспериментальной физики
Института наукоемких технологий
и передовых материалов (Школы)
Дальневосточного федерального университета,
д.ф.-м.н. (научная специальность 01.04.07 –
физика конденсированного состояния),
доцент



А.С. Самардак

«10» сентября 2026 г.

690922, г. Владивосток,
остров Русский, поселок Аякс д.10
кампус ДВФУ, Лабораторный корпус,
каб. 445
email: samardak.as@dvfu.ru
тел.: +79024899292

Подпись 
удостоверяю. Начальник отдела
кадрового делопроизводства
ДВФУ
" 11 "  20 26 г.

