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

«УТВЕРЖДАЮ»
Врио проректора по научной работе ДВФУ
_____ С.Н. Гончарова
«23» _____ 2026 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования
«Дальневосточный федеральный университет»

Диссертация «Влияние конкуренции анизотропии формы и магнитокристаллической анизотропии на магнетизм одномерных ферромагнитных наноструктур на основе переходных 3d металлов» выполнена в Лаборатории пленочных технологий Департамента общей и экспериментальной физики Института наукоёмких технологий и передовых материалов (далее – ИТПМ) Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Дальневосточный федеральный университет» (далее – ДВФУ).

В период подготовки диссертации соискатель Собиров Мухаммад Илхомиддинович обучался в очной аспирантуре ДВФУ по специальности 03.06.01 – Физика и астрономия, профиль «Физика конденсированного состояния» (2021–2025 гг.). В 2025 г. Собиров М.И. окончил обучение в аспирантуре ДВФУ (диплом 102504 0015058 от 14.07.2025 г.).

Справка о сдаче кандидатских экзаменов выдана ДВФУ в 2026 г. (№ 164-01-16/167 от 10.07.2026 г.).

Научный руководитель – Самардак Александр Сергеевич, доктор физико-математических наук, доцент, главный научный сотрудник Лаборатории спин-орбитроники, профессор Департамента общей и экспериментальной физики ИТПМ ДВФУ.

Диссертация обсуждена на заседании Департамента общей и экспериментальной физики ИТПМ ДВФУ по рассмотрению доклада о диссертационном исследовании. На заседании присутствовало 32 сотрудника ДВФУ (в том числе доктора наук - 4 чел., кандидата наук - 16 чел): Крайнова Г.С., канд. физ.-мат. наук, профессор; Шурыгин А.В., канд. физ.-мат. наук, доцент; Самардак А.С., д-р физ.-мат. наук, профессор; Козлов А.Г., канд. физ.-мат. наук, доцент; Самардак А.Ю., канд. физ.-мат. наук, доцент; Терлецкий И.А., канд. физ.-мат. наук, доцент и др.

С оценкой диссертационной работы выступили рецензенты:

– Белоконь Валерий Иванович, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории суперкомпьютерных и квантовых вычислений Департамента теоретической физики и интеллектуальных технологий ИТПМ ДВФУ;

– Крайнова Галина Серовбовна, кандидат физико-математических наук, профессор Департамента общей и экспериментальной физики ИТПМ ДВФУ;

– Ильюшин Илья Геннадьевич, кандидат физико-математических наук, доцент Департамента теоретической физики и интеллектуальных технологий ИТПМ ДВФУ.

Также с отзывом по диссертационной работе выступил научный руководитель Самардак А. С.

Слушали: доклад соискателя Собирова М. И. по диссертационной работе на тему «Влияние конкуренции анизотропии формы и магнитокристаллической анизотропии на магнетизм одномерных ферромагнитных наноструктур на

основе переходных 3d металлов», представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

В дискуссии приняли участие сотрудники Департамента общей и экспериментальной физики Института наукоемких технологий и передовых материалов ДВФУ: Крайнова Г.С., кандидат физико-математических наук; Шурыгин А. В., кандидат физико-математических наук; Козлов А. Г., кандидат физико-математических наук.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Диссертационная работа Собирова Мухаммада Илхомиддиновича посвящена исследованию влиянии конкуренции анизотропии формы и магнитокристаллической анизотропии анизотропии на магнетизм одномерных ферромагнитных наноструктур на основе переходных 3d металлов.

Актуальность темы диссертации определяется необходимостью создания функциональных материалов со свойствами, недостижимыми в традиционных объёмных системах, что диктуется современным технологическим прогрессом. Нанотехнологии предоставляют возможность управлять магнитными характеристиками за счёт размерных эффектов, высокой удельной поверхности и точной структурной настройки, что ранее обеспечило прогресс в области высокоплотностной магнитной записи. Однако существующие магнитные накопители приблизились к физическим пределам по скорости и плотности хранения информации, что обуславливает необходимость поиска новых принципов записи. Перспективным направлением является трёхмерный наномагнетизм, исследующий нанопроволоки, наноспирали, нанотрубки и структуры сложной морфологии, магнитное поведение которых определяется сочетанием анизотропии формы, кристаллической структуры, механических напряжений и магнитостатических взаимодействий. Особый интерес представляют одномерные наноструктуры на основе ГПУ Co, в которых управляемая магнитокристаллическая анизотропия совместно с анизотропией

формы открывает возможности для точной настройки магнитных свойств и создания элементов памяти нового поколения.

Цель диссертационной работы

Целью работы является установление физических закономерностей конкуренции анизотропии формы и магнитокристаллической анизотропии в одномерных ферромагнитных наноструктурах на основе переходных *3d*-металлов путём систематического варьирования их морфологии (цилиндрические проволоки, структуры с геометрической модуляцией), состава (Fe, Co, Ni, сплавы Co–W) и кристаллической текстуры, а также выявление условий, при которых происходит смена доминирующего типа анизотропии и переориентация оси лёгкого намагничивания относительно длинной оси наноструктур.

Личное участие автора в получении результатов, изложенных в диссертации

Личный вклад автора заключается в:

экспериментальном получении пористых матриц оксида алюминия, используемых в качестве шаблонов для синтеза наноструктур, в том числе двухслойных пористых матриц для получения нанопроволок типа «медуза»;

электрохимическом осаждении нанопроволок Fe, Co, Ni, градиентных нанопроволок Co-CoW, нанопроволок Ni и Co/Ni типа «медуза»;

пробоподготовке двухслойных пористых матриц и нанопроволок с разной морфологией, исследовании структуры, элементного состава с помощью методов растровой электронной микроскопии и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии;

исследовании магнитных свойств полученных наноструктур с использованием методов вибрационной магнитометрии и FORC-диаграмм;

микромагнитном моделировании двухсегментных нанопроволок Co/Ni типа «медуза»;

обработке и анализе экспериментальных данных и результатов микромагнитного моделирования, обобщении и оценке полученных результатов.

Исследование методами атомно-силовой и магнито-силовой микроскопии проводилось совместно с Рогачевым Кириллом Алексеевичем. Моделирование доменной структуры нанопроволок проводились совместно с Самардаком Алексеем Юрьевичем. Рентгеноструктурный анализ образцов производился совместно с Лембиковым Алексеем Олеговичем. Оценка эффективного поля магнитной анизотропии проводилась совместно с Комогорцевым Сергеем Викторовичем. Совместно с научным руководителем был проведен анализ экспериментальных данных, теоретические расчеты и обсуждение полученных результатов. Материалы к публикациям подготавливались совместно с научным руководителем и обозначенными выше коллегами.

Достоверность полученных результатов подтверждается воспроизводимостью экспериментальных данных, их сходимостью с результатами микромагнитного моделирования и теоретическими оценками. Выводы работы опираются на корректно обработанные данные, систематизированные в таблицах и иллюстрированные рисунками. Материалы данной работы опубликованы в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международных базах данных Scopus и Web of Science.

Научная новизна результатов исследования:

1. Впервые количественно установлено с использованием метода FORC-диаграмм, что в массивах поликристаллических Co нанопроволок диаметром ~40 нм с текстурированной ГПУ-фазой эффективное поле магнитостатического взаимодействия H_u достигает ~2500 Э, что превышает соответствующее значение для Fe нанопроволок (2042 Э), несмотря на меньшую намагниченность насыщения Co. Микромагнитное моделирование показало, что это аномальное усиление взаимодействий обусловлено нетривиальной многодоменной структурой, возникающей из-за конкуренции анизотропии формы и одноосной магнитокристаллической анизотропии с преимущественной ориентацией с-осей в поперечном направлении. На примере Fe нанопроволок с неравномерным распределением длин (разброс ±0,8 мкм) продемонстрировано, что такая морфологическая неоднородность приводит к снижению ближних

межпроволочных взаимодействий за счёт перераспределения магнитных полюсов на более удалённые структуры - эффект, количественно описанный в рамках модифицированной теории среднего поля.

2. Впервые синтезированы градиентные нанопроволоки Co–CoW с контролируемым переходом от кристаллического ГПУ-Co до аморфного сплава $Co_{78}W_{22}$. Установлено, что продольный градиент состава индуцирует внутренние механические напряжения и изменение кристаллической структуры, что приводит к переориентации оси лёгкого намагничивания из продольного (для однородных Co и CoW) в поперечное направление, при этом эффективное поле анизотропии снижается с 1560 Э (Co) до 540 Э. В распределении полей анизотропии (AFD) выявлены два максимума, соответствующие кристаллической и аморфной фазам, что подтверждает возможность управления магнитной анизотропией через состав без изменения геометрии.

3. Разработан оригинальный метод синтеза двухслойных пористых матриц оксида алюминия с соотношением диаметров пор в слоях от 1:5 до 1:3 (при напряжениях анодирования 150/50–70 В), позволивший впервые получить массивы Ni нанопроволок нетривиальной геометрии типа «медуза» (диаметр «голов» ~270 нм, «ног» 50–100 нм). Методом FORC-диаграмм выявлено наличие двух магнитных подсистем с различной анизотропией формы: «головы» характеризуются низкой коэрцитивностью и сильными межструктурными взаимодействиями (H_u до 2380–3200 Э), а «ноги» - более высокой коэрцитивностью и слабыми взаимодействиями (H_u ~360–1100 Э). Микромагнитное моделирование раскрыло механизмы переключения, включая зарождение и слияние вихрей в «головах» с образованием конфигурации типа «штопор», а также движение поперечных и вихревых доменных стенок в «ногах».

4. Впервые синтезированы двухсегментные нанопроволоки Co/Ni и Ni/Co типа «медуза» с однородным заполнением сегментов заданными материалами. Установлено, что в сегментах Co, находящихся в «головах» (диаметр ~300 нм), доминирует магнитокристаллическая анизотропия,

ориентирующая лёгкую ось перпендикулярно длинной оси наноструктуры, тогда как в Co «ногах» (диаметр ~100 нм) определяющей становится анизотропия формы. Это приводит к возникновению гибридных петель гистерезиса с аномально высоким полем насыщения вдоль оси (до 14 кЭ для Co/Ni против 3,5 кЭ для чисто Ni-структур) и к снижению магнитостатических взаимодействий в массиве (H_u = 634–734 Э против 1090 Э для Ni) за счёт замыкания магнитного потока внутри объёма Co-сегментов.

Практическая значимость исследования

1. Разработанный метод синтеза двухслойных пористых матриц оксида алюминия с регулируемым соотношением диаметров пор в слоях (от 1:5 до 1:3) расширяет технологические возможности получения одномерных наноструктур с нетривиальной геометрией. Предложенный подход может быть использован для создания шаблонов с разветвлённой поровой структурой, применимых не только в магнитных материалах, но и в мембранных технологиях, фильтрации, фотонике и сенсорике.

2. Результаты исследования массивов нанопроволок с геометрической модуляцией («медуза») демонстрируют принципиальную возможность управления двухстадийным перемагничиванием за счёт изменения соотношения диаметров «голов» и «ног», что может быть использовано для создания мультибитных ячеек хранения информации, где разные сегменты соответствуют различным логическим состояниям. Микромагнитное моделирование показало, что при пропускании спин-поляризованного тока (в расчётном режиме) возможна генерация и перемещение доменных стенок вдоль «ног» со скоростями 570–950 м/с, что открывает перспективы для разработки элементов памяти на движущихся доменных стенках при условии дальнейшей оптимизации (снижении требуемых плотностей тока и учёте тепловых эффектов).

3. Возможность контролировать направление эффективной анизотропии за счёт выбора материала сегментов (Co или Ni) и их геометрии позволяет проектировать наноструктуры с заданными магнитными характеристиками. Это может найти применение в создании логических

элементов спинтроники, где требуется различная ориентация лёгких осей в разных частях одного нанообъекта (например, для реализации функциональных вентилей или устройств с магнитным взаимодействием между сегментами).

4. Новые типы нанопроволок («медуза», сегментированные Co/Ni, градиентные Co–CoW) обладают потенциалом для применения в биомедицине. Их особая морфология (наличие «голов» и «ног») может быть использована для адресной доставки лекарств и фиксации в тканях, а возможность переключения сегментов в разных полях - для управления нагревом при магнитной гипертермии с повышенной локальностью. Однако для практической реализации требуются дополнительные исследования биосовместимости и модификации поверхности.

5. Полученные экспериментальные данные и микромагнитные модели могут быть использованы в учебных курсах по физике конденсированного состояния, наноматериалам и спинтронике (например, при изучении методов FORC-диаграмм, основ микромагнитного моделирования, влияния анизотропии на магнитные свойства). Разработанные методики синтеза и анализа могут служить основой для лабораторных практикумов в магистратуре и аспирантуре.

Основные результаты по теме диссертации изложены в научных статьях, трудах международных конференций, а также докладывались на научных конференциях и семинарах. По теме диссертации соискателем лично или в соавторстве опубликовано 4 статьи в рецензируемых научных изданиях Scopus и Web of Science, которые в достаточной степени отражают положения, выносимые на защиту. Авторский вклад соискателя в коллективных работах составляет 80 %.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации, в рецензируемых научных изданиях, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации:

1. Sobirov M. I., Rogachev K. A., Bazrov M. A., Namsaraev Zh. Zh., Sapovskii I. M., Rakhmatullaev T. R., Ilin N. V., Lembikov A. O., Pisarev S. M., Ognev A. V., Samardak A.S., Samardak A.Yu. Magnetic duality and composition engineered magnetoresistance in bisegmented Co–Ni jellyfish nanowires via anisotropy engineering // Materials Today Nano. – 2026. – Vol. 35. – P. 100939. – DOI: 10.1016/j.mtnano.2026.100939. – Q1 Scopus/WoS.

2. Sobirov M.I., Rakhmatullaev T.R., Sapovskii I.M., Ilin N.V., Tarasov E.V., Lembikov A.O., Pisarev S.M., Rogachev K.A., Samardak A.S., Ognev A.V., Komogortsev S.V., Tkachenko I.A., Samardak A.Yu. Tuning magnetic anisotropy from uniaxial to easy plane via composition gradient in electrodeposited Co–CoW nanowires // Journal of Superconductivity and Novel Magnetism. – 2026. – Vol. 39. – P. 34. – DOI: 10.1007/s10948-025-07102-7. – Q3 Scopus/WoS.

3. Sobirov M.I., Samardak A.Yu., Satsuk S.A., Rogachev K.A., Ognev N.A., Leyko G.A., Lembikov A.O., Pisarev S.M., Komogortsev S.V., Ognev A.V., Samardak A.S. Effect of nonuniform morphology and crystalline structure on the effective magnetic anisotropy in Fe, Co, and Ni nanowire arrays // Journal of Superconductivity and Novel Magnetism. – 2025. – Vol. 38. – P. 41. – DOI: 10.1007/s10948-024-068908. – Q3 Scopus/WoS.

4. Samardak A.Yu., Sobirov M.I., Rogachev K.A., Shishelov A.F., Lembikov A.O., Ognev N.A., Leyko G.A., Ognev A.V., Samardak A.S. Fabrication and magnetic behavior of jellyfish like Ni nanowires synthesized using bilayered nanoporous anodic alumina templates // Small. – 2024. – Vol. 20, No. 36. – P. e2401270. – DOI: 10.1002/smll.202401270. – Q1 Scopus/WoS.

Опубликованные работы в полной мере отражают содержание диссертации. Основные результаты диссертационного исследования были представлены автором лично на российских и международных школах, конференциях и симпозиумах:

1. M. I. Sobirov, A. Yu. Samardak, T. R. Rakhmatullaev, I. M. Sapovskii, K. A. Rogachev, D. A. Zhukov, A. S. Samardak. Magnetization reversal and response

in bisegmented Co/Ni jellyfish nanowires, стендовый доклад, международный симпозиум SISM 2026 (Samarkand International Symposium on Magnetism), Самарканд, Республика Узбекистан, 17–23 августа, 2026.

2. M. I. Sobirov, I. M. Sapovskii, T. R. Rakhmatullaev, K. A. Rogachev, N. V. Ilin, A. Yu. Samardak, A.S. Samardak. Fundamental Magnetic Behavior and Segment-Dependent Reversal Processes in Compositionally Segmented Co/Ni/Co Nanowires, стендовый доклад, международная конференция ISAMMA 2026 (The 6th International Symposium On Advanced Magnetic Materials And Applications), Пусан, Республика Корея, 28 июня – 2 июля, 2026.

3. M. I. Sobirov, A. Yu. Samardak, T. R. Rakhmatullaev, I. M. Sapovskii, K. A. Rogachev, N. A. Ognev, D. A. Zhukov, A. V. Ognev, A. S. Samardak. Synthesis and magnetic properties of segmented Co/Ni jellyfish nanowires, устный доклад, международная конференция EASTMAG 2025 (IX Евро-азиатский симпозиум «Тренды в магнетизме»), г. Южно-Сахалинск, Россия, 13– 17 сентября, 2025.

4. M. I. Sobirov, I. M. Sapovskii, T. R. Rakhmatullaev, K. A. Rogachev, N. V. Ilin, A. Yu. Samardak. Comparative study of influence of shape and crystalline structure on magnetic properties and domain structure of Fe, Co and Ni nanowire arrays, устный доклад, международная конференция IcAUMS 2025 (The 7th International Conference of Asian Union of Magnetics Societies), Наха, Япония, 21–24 апреля, 2025.

5. М. И. Собиров, А. Ю. Самардак, Н. А. Огнев, Г. А. Лейко, А. В. Огнев, А. С. Самардак. Магнитные свойства нанопроволок Ni, Fe, Co, синтезированных с использованием пористых матриц Al2O3, устный доклад, международная конференция HMMM 2024 (Новое в магнетизме и магнитных материалах), г.Москва (онлайн), Россия, 1–6 июля, 2024.

6. M. I. Sobirov, A. Yu. Samardak, K. A. Rogachev, N.A. Ognev, G.A. Leiko, A.S. Samardak, A.V. Ognev. Synthesis and magnetic properties of Ni, Fe, Co nanowires, produced by electrochemical deposition method, стендовый доклад, международная конференция ISAMMA 2024 (The 5th International Symposium On

Advanced Magnetic Materials And Applications), Донгхой, Вьетнам, 4-7 августа, 2024.

7. А. Ю. Самардак, М. И. Собиров, К. А. Рогачев, А. Ф. Шишелов, Н. А. Огнев, Г. А. Лейко, А. С. Самардак, А. В. Огнев. Магнитные свойства нанопроволок Co типа «медуза», стендовый доклад, молодежная школа по физике конденсированного состояния (Школа ФКС-2024), Гатчина, Ленинградская область 11–15 марта, 2024.

8. A.Yu. Samardak, M.I. Sobirov, N.A. Ognev, G.A. Leiko, A.S. Samardak, A.V. Ognev. Shape-driven magnetic properties of jellyfish-like Ni nanowires, стендовый доклад, международный сипозиум SISM 2023 (Samarkand International Symposium on Magnetism), Самарканд, Республика Узбекистан 2-6 июля, 2023.

9. M.I. Sobirov, A.Yu. Samardak, S.A. Azon, Potapova S.R, Karibov M. B, A.S. Samardak, A.V. Ognev. Magnetic properties of Ni nanowires synthesized using templates with different pore order, стендовый доклад, международная конференция EASTMAG 2022 (VIII Евро-азиатский симпозиум «Тренды в магнетизме»), Казань, Россия, 22–26 августа, 2022.

10. M.I. Sobirov, A.Yu. Samardak, S.A. Azon, A.S. Samardak, A.V. Ognev. Synthesis and magnetic properties of electrodeposited Ni nanowires with a high aspect ratio, стендовый доклад, международная научная школа-конференция ASCO-NANOMAT 2022 (Sixth Asian School-Conference on Physics and Technology of Nanostructured Materials), г. Владивосток, Россия, 25–29 апреля, 2022.

Соответствие содержания диссертации научной специальности

Диссертационная работа «Влияние конкуренции анизотропии формы и магнитокристаллической анизотропии на магнетизм одномерных ферромагнитных наноструктур на основе переходных 3d металлов» Собирова Мухаммада Илхомиддиновича является законченным научным исследованием по актуальной проблеме физики конденсированного состояния, имеет теоретическую и практическую значимость и соответствует паспорту научной

специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки).

Диссертационная работа на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук соответствует требованиям, установленным пунктами 9–14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842 «О порядке присуждения ученых степеней» (в действующей редакции от 16.10.2024 года). Текст диссертации представляет собой самостоятельную научно-квалификационную работу, не содержит заимствованного материала без ссылки на автора и (или) источник заимствования. Содержание диссертации соответствует специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния и удовлетворяет требованиям следующих пунктов паспорта специальности:

1. Теоретическое и экспериментальное изучение физической природы и свойств неорганических и органических соединений как в кристаллическом (моно- и поликристаллы), так и в аморфном состоянии, в том числе композитов и гетероструктур, в зависимости от их химического, изотопного состава, температуры и давления.

2. Теоретическое и экспериментальное исследование физических свойств упорядоченных и неупорядоченных неорганических и органических систем, включая классические и квантовые жидкости, стекла различной природы, дисперсные и квантовые системы, системы пониженной размерности.

Диссертация «Влияние конкуренции анизотропии формы и магнитокристаллической анизотропии на магнетизм одномерных ферромагнитных наноструктур на основе переходных 3d металлов» Собирова Мухаммада Илхомиддиновича рекомендуется к защите на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Заключение принято на заседании Департамента общей и экспериментальной физики Института наукоемких технологий и передовых материалов ДВФУ.

Присутствовало на заседании 32 чел.

Результаты голосования: «ЗА» – 32 чел., «ПРОТИВ» – 0 чел., «ВОЗДЕРЖАЛОСЬ» – 0 чел., протокол № 1 от 21.09.2026г.

Председательствующий на заседании:
Директор Департамента общей и
экспериментальной физики Института
наукоемких технологий и передовых
материалов ДВФУ _____ А.В. Регузова

21.09.2026

ВЕРНО: Подпись А.В. Регузовой удостоверяю.
НАЧАЛЬНИК ОТДЕЛА
КАДРОВОГО ДЕЛОПРОИЗВОДСТВА
22.09.2026г.