

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Мясников Никита Валерьевич

**Статические и динамические конфигурации намагниченности
в тонких магнитных плёнках с электрически модулируемым
взаимодействием Дзялошинского-Мория**

Специальность 1.3.12. Физика магнитных явлений

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2026

Диссертация подготовлена на кафедре физики колебаний физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

Научный руководитель

Пятаков Александр Павлович –
доктор физико-математических наук,
профессор РАН

Официальные оппоненты

Поляков Пётр Александрович –
доктор физико-математических наук,
профессор кафедры общей физики
физического факультета МГУ
имени М.В. Ломоносова

Логунов Михаил Владимирович –
доктор физико-математических наук,
профессор лаборатории исследования
свойств магнитных и оптических микро-
и наноструктур Института радиотехники
и электроники им. В.А. Котельникова
Российской академии наук

Свистов Леонид Евгеньевич –
доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник Института
физических проблем им. П.Л. Капицы
Российской академии наук

Защита диссертации состоится **«22» октября 2026 г. в 15 часов 20 минут** на заседании диссертационного совета МГУ.013.5 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 8, криогенный корпус, конференц-зал.

E-mail: perov@magn.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/4016>.

Автореферат разослан « » сентября 2026 г.

Учёный секретарь

диссертационного совета,

доктор физико-математических наук

Т. Б. Шапаева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Пространственно неоднородные магнитные структуры изучаются многие десятилетия: от доменных стенок и линий Блоха до скирмионов с различной киральностью. Наличие таких структур является следствием конкуренции различных взаимодействий: обменного, диполь-дипольного, взаимодействия магнитных моментов с кристаллической решёткой (магнитная анизотропия), взаимодействия Дзялошинского-Мория. На смену традиционным способам управления пространственно неоднородными магнитными структурами с помощью магнитного поля приходят новые подходы. Для этого могут использоваться локальный нагрев, оптическое излучение, спин-поляризованные токи и внешнее электрическое поле. Один из способов задавать свойства магнитных неоднородностей сводится к взаимодействию Дзялошинского-Мория – оно способно задавать киральность доменных стенок и скирмионов [1], а также изменять их размеры по толщине магнитной плёнки [2]. Взаимодействие Дзялошинского-Мория, связанное с нарушением центральной симметрии, в отдельных случаях способствует стабилизации магнитных структур, обладающих электрической поляризацией. Этот факт позволяет использовать внешнее электрическое поле для управления такими структурами как доменные стенки, линии Блоха, скирмионы. Также спиновые волны, обладающие ненулевым волновым вектором, претерпевают изменения во внешнем электрическом поле. Величина характерной энергии взаимодействия Дзялошинского-Мория также может зависеть от внешнего электрического поля [3]. Электрически модулируемое взаимодействие Дзялошинского-Мория интересно с фундаментальной точки зрения: на микроскопическом уровне оно обеспечивается антисимметричной поправкой к изотропному обменному взаимодействию. В практическом плане перестройка взаимодействия Дзялошинского-Мория представляет интерес для приложений в двух областях магнитной электроники: спинтронике и магнонике. В рамках спинтроники взаимодействие Дзялошинского-Мория интересно тем, что его величина и знак определяют свойства пространственной модуляции векторного поля намагниченности, поэтому у магнитных неоднородностей появляется дополнительная степень свободы – киральность. С этой точки зрения перестройка взаимодействия Дзялошинского-Мория электрическим полем является перспективным направлением, так как она позволяет изменять свойства взаимодействия локально без структурных изменений (т.е. без измене-

ния состава однофазных материалов и/или без изменения свойств подложки). В рамках магноники, в частности, рассматривается способность взаимодействия Дзялошинского-Мория изменять свойства спиновых волн, распространяющихся в противоположных направлениях, т.е. материалы могут обладать свойством невзаимности по отношению к направлению спиновой волны, что позволяет косвенным образом измерять параметры взаимодействия Дзялошинского-Мория [4].

Электрически модулируемое взаимодействие Дзялошинского-Мория примечательно ещё и тем, что оно может проявляться при комнатных температурах, в отличие от некоторых случаев, когда внутренне присущее материалу взаимодействие проявляется в определённом диапазоне невысоких по сравнению с комнатной температур. Так, в плёнках феррита граната при комнатной температуре наблюдались магнитоэлектрическое управление доменными стенками [5–8], электроиндуцированное зарождение цилиндрических магнитных доменов с 180° -стенкой [9; 10] и с 90° -стенкой [11], преломление доменных стенок в электрическом поле полоскового электрода [12], сдвиг фазы спиновой волны [13]. С теоретической точки зрения отмеченные явления как правило анализируются в статике на основе объёмных взаимодействий, имеющих место в микромагнитных неоднородностях (с этим связано другое название электрически модулируемого взаимодействия Дзялошинского-Мория – неоднородное магнитоэлектрическое взаимодействие). **Актуальность** работы связана с необходимостью прояснения особенностей электрически модулируемого взаимодействия Дзялошинского-Мория: вклад в граничное условие и поверхностные эффекты, связь со сложной магнитной анизотропией, влияние на спиновые волны.

Целью диссертационной работы является теоретическое исследование статике и динамики векторного поля намагниченности с учётом электрически модулируемого взаимодействия Дзялошинского-Мория. В работе решены следующие задачи:

1. Анализ следствий вклада, который даёт электрически модулируемое взаимодействие Дзялошинского-Мория в статическое граничное условие для намагниченности;
2. Моделирование структуры доменной стенки на основе параметров экспериментального образца плёнки феррита граната с кристаллографической ориентацией (210), обладающего сложной магнитной анизотропией;

3. Уточнение механизма взаимодействия доменной стенки с электрическим полем с учётом её скрученной структуры по толщине плёнки;
4. Теоретический анализ механизма «преломления» доменных стенок в электрическом поле полоскового электрода;
5. Изучение динамики доменной стенки под действием ступенчатого импульса пространственно однородного внешнего электрического поля;
6. Исследование влияния электрически модулируемого взаимодействия Дзялошинского-Мория на спиновые волны, проходящие через доменную стенку.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

1. Впервые рассмотрен вклад электрически модулируемого взаимодействия Дзялошинского-Мория в граничное условие для распределения намагниченности и предложена формула модифицированного граничного условия;
2. Впервые произведён численный расчёт распределения векторного поля намагниченности в доменных стенках плёнки феррита граната с кристаллографической ориентацией (210) с учётом сложной магнитной анизотропии и полей размагничивания;
3. Предложен новый механизм магнитного управления величиной и знаком взаимодействия скрученной доменной стенки с внешним электрическим полем, основанный на сдвиге горизонтальной линии Блоха;
4. Численно исследовано «преломление» доменной стенки в электрическом поле полоскового электрода;
5. Численно и аналитически исследовано поведение доменной стенки и возникновение спиновых волн в результате действия ступенчатого импульса пространственно однородного электрического поля;
6. Изучен фазовый сдвиг, вносимый электрически стабилизированной доменной стенкой в проходящую через неё спиновую волну.

Научная значимость состоит в расширении представлений об особенностях влияния внешнего электрического поля на векторное поле намагниченности. Продemonстрировано, что электрически модулируемое взаимодействие Дзялошинского-Мория влияет не только на микромагнитные структуры (например, доменные стенки), но и на пространственно однородную намагниченность. Также уточнён механизм сдвига доменной стенки во внешнем электрическом поле: на основе параметров экспериментального образца плёнки феррита граната показана связь скрученности доменной стенки с направлением её сдвига во внешнем электрическом поле. Кроме того, рассмотрены динамические процессы: возбуждение спиновых волн за счёт внешнего электрического поля и их прохождение через электрически контролируемую доменную стенку.

Практическая значимость работы обусловлена тем, что управление состоянием намагниченности с помощью внешнего электрического поля позволяет создавать новые устройства спинтроники и магноники, открывая новые перспективы в отношении компактности и энергоэффективности таких устройств. Замена принципа управления с помощью электрического тока на управление с помощью электрически модулируемого взаимодействия Дзялошинского-Мория позволяет использовать внешние электрические поля для управления намагниченностью без тепловых потерь. Принцип действия таких устройств основан на доменных стенках и/или на спиновых волнах, свойства которых меняются во внешнем электрическом поле.

Положения, выносимые на защиту:

1. Модифицированное статическое граничное условие для намагниченности за счёт дополнительного вклада, обусловленного электрически модулируемым взаимодействием Дзялошинского-Мория, определяет возможность влияния внешнего электрического поля на пространственно-однородное распределение намагниченности;
2. Структура скрученной доменной стенки в образце плёнки феррита граната с кристаллографической ориентацией (210) содержит горизонтальную линию Блоха, положение которой определяет интегральную реакцию доменной стенки на внешнее электрическое поле;
3. Явление «преломления» доменной стенки в области полоскового электрода объясняется электрически модулируемым взаимодействием

Дзялошинского-Моря, приводящим к изменению её длины в области расположения электрода;

4. Реакция доменной стенки на ступенчатый импульс пространственно однородного электрического поля выражается в её движении, динамическом изменении её ширины и возбуждении спиновых волн;
5. Спиновые волны, прошедшие через доменную стенку Блоха и волны, прошедшие через электрически контролируемую доменную стенку Нееля, имеют фазовый сдвиг друг относительно друга, равный π .

Соответствие паспорту специальности. Диссертация соответствует паспорту специальности 1.3.12 Физика магнитных явлений (физико-математические науки), п.6:

6. Моделирование свойств и физических явлений в материалах с различными видами магнитного упорядочения, а также в композитных структурах на их основе.

Апробация результатов. Результаты, изложенные в диссертационной работе, были представлены на конференциях:

1. XXXI Международная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных по фундаментальным наукам «Ломоносов—2024», Москва, 2024;
2. XXXV Всероссийская Школа-семинар «Волновые явления: физика и применения» имени профессора А.П. Сухорукова («Волны-2024»), Краснови́дово, 2024;
3. XXV Международная конференция «Новое в магнетизме и магнитных материалах», Москва, 2024;
4. XXXVI Всероссийская Школа-семинар «Волновые явления: физика и применения» имени профессора А.П. Сухорукова (Волны-2025), Краснови́дово, 2025;
5. IX Euro-Asian Symposium «Trends in Magnetism», Южно-Сахалинск, 2025.

Кроме того, основные результаты, представленные в диссертации, обсуждались на научных семинарах кафедры физики колебаний физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Публикации. Основные результаты изложены в 5 статьях в рецензируемых научных журналах, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности и отрасли наук.

Достоверность полученных результатов сводится к обоснованности исходных положений, согласию между аналитическими и численными расчётами, использованию хорошо известных и проверенных численных методов, качественному соответствию экспериментальным данным. Численная схема расчётов была успешно проверена на известных задачах из области микромагнитных вычислений.

Личный вклад автора. Все оригинальные результаты получены автором, большая часть из них – на основе разработанных автором программ. Автором разработан и проверен код на языке Python, позволяющий проводить микромагнитное моделирование на графических процессорах с учётом произвольных по своей структуре эффективных магнитных полей. Обсуждение результатов и подготовка публикаций осуществлялась вместе с соавторами.

Структура и объём диссертации. Диссертация содержит введение, 3 главы, основные результаты, заключение, список сокращений и условных обозначений, список литературы. Объём составляет 132 страницы, включающих 48 рисунков в тексте и 7 в приложении, 4 таблицы и 80 формул. Библиография содержит 130 наименований (5 из них отражают публикации диссертанта).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цель и задачи исследования, отмечена научная новизна диссертационной работы, выделена научная и практическая значимость, изложены положения, выносимые на защиту, а также приводятся сведения об апробации результатов, личном вкладе автора и структуре диссертации.

В первой главе кратко приведены сведения о явлениях и устройствах спинтроники, свойствах и преимуществах спиновых волн как переносчиков информации, приведены основные сведения о взаимодействии Дзялошинского Мория (ВДМ) с акцентом на литературные источники, свидетельствующие о существовании электрически модулируемого взаимодействия Дзялошинского Мория (ЭМВДМ), дано описание разнообразных исследований в области доменных стенок (ДС) и ВДМ. Отдельно отмечены экспериментальные иссле-

дования эффектов, обусловленных ЭМВДМ, в плёнках ферритов гранатов, среди которых: электроиндуцированный сдвиг ДС во внешнем электрическом поле, преломление ДС в электрическом поле полоскового электрода, сдвиг фазы спиновой волны. Также описан основанный на уравнении Ландау-Лифшица-Гильберта подход к моделированию динамики и статики намагниченности. Сформулированы задачи для дальнейших теоретических исследований.

Во второй главе приведены результаты теоретического исследования статики векторного поля намагниченности с учётом ЭМВДМ. **В разделе 2.1 второй главы** на основе вариационного исчисления и численного микромагнитного моделирования рассмотрено статическое граничное условие для векторного поля намагниченности, обусловленное ЭМВДМ. Объёмная плотность свободной энергии ЭМВДМ имеет вид

$$f_{me} = -D_i(\vec{E}) ((\nabla \cdot \vec{m})m_i - (\vec{m} \cdot \nabla)m_i), \quad (1)$$

где $\vec{m}$ – векторное поле намагниченности, $\vec{E}$ – напряжённость электрического

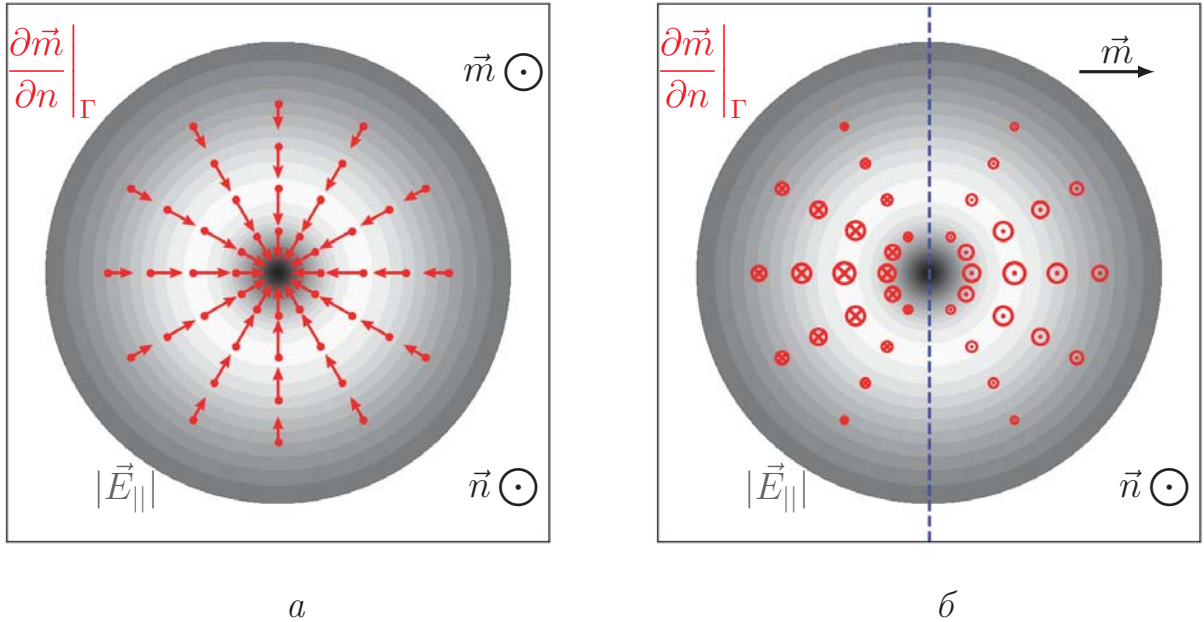


Рисунок 1: Иллюстрация влияния электрического поля положительного точечного заряда на намагниченность за счёт граничного условия в случае $\vec{m} \uparrow \uparrow \vec{n}$ (а) и в $\vec{m} \perp \vec{n}$ (б). Заливкой показан модуль плоскостной компоненты электрического поля $\vec{E}_{||}$. На рисунке а (б) красными стрелками (маркерами) отмечена единственная ненулевая – плоскостная (нормальная), т.е. $\perp \vec{n}$ (коллинеарная с $\vec{n}$) – компонента производной $\partial \vec{m} / \partial n$ в соответствии с (2), длина стрелки (размер маркера) указывает величину производной [А5].

поля, параметр $D_i(\vec{E}) = \gamma_{me}\chi_e E_i$ задаёт величину и знак энергии ЭМВДМ и зависит от константы ЭМВДМ γ_{me} и диэлектрической восприимчивости χ_e (по повторяющимся индексам ведётся суммирование). Показано, что плотность энергии (1) приводит к тому, что модифицированное статическое граничное условие для границы Γ имеет следующий вид:

$$\left(2A \frac{\partial \vec{m}}{\partial n} + \gamma_{me}\chi_e \left[\vec{m} \times \left[\vec{E} \times \vec{n} \right] \right] \right) \Big|_{\Gamma} = 0, \quad (2)$$

где A есть константа обменного взаимодействия, $\vec{n}$ – внешняя нормаль к границе Γ . Выражение (2) содержит два

слагаемых, первое из которых задаётся обменным взаимодействием, а второе – электрически модулируемым ВДМ. Модифицированное граничное условие показывает, что внешнее электрическое поле посредством ЭМВДМ способствует наклону намагниченности на границе Γ (см. рисунок 1). Для плоской границы, когда она задана направленным

вдоль вертикальной оси Oz вектором нормали $\vec{n} = \vec{e}_z$, рассмотрены два случая расположения намагниченности:

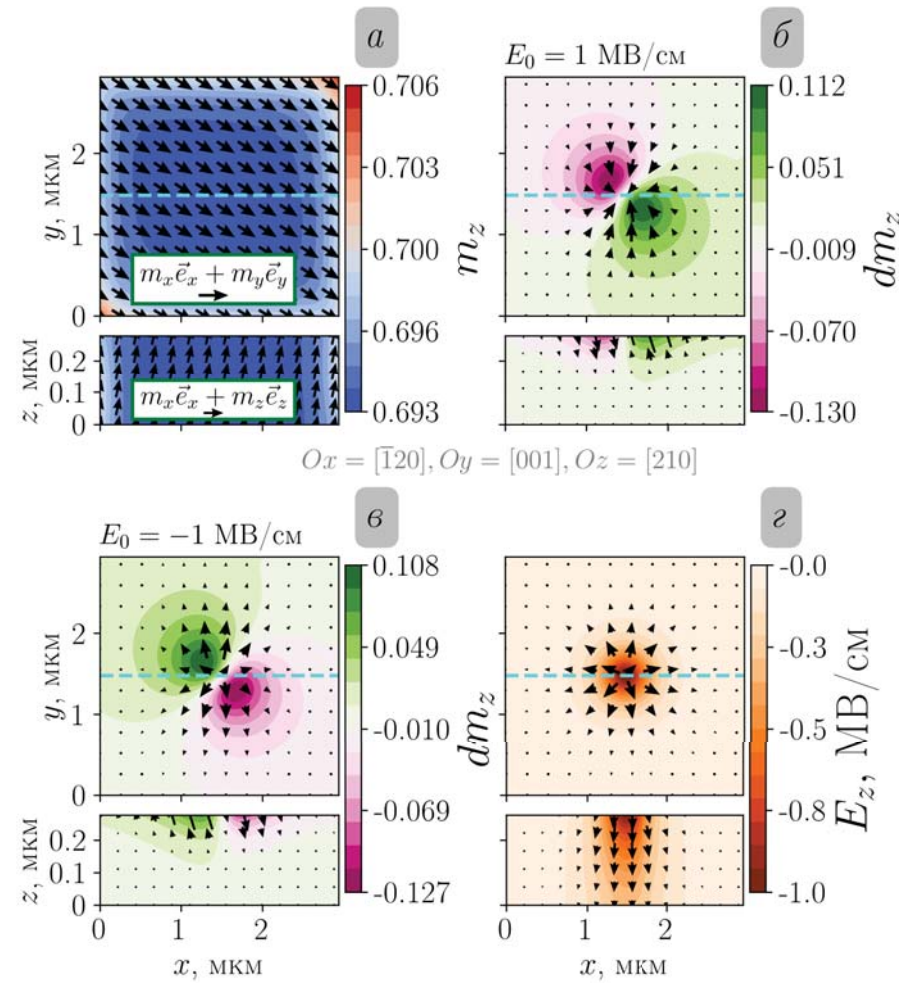


Рисунок 2: Влияние граничного условия на намагниченность: *a* – начальная однородная намагниченность, *б, в* – векторная разность $d\vec{m}$ между возмущённым и начальным полями намагниченности при напряжённости электрического поля 1 МВ/см и -1 МВ/см, *г* – электрическое поле положительного точечного заряда [A5].

$\vec{m} \uparrow \uparrow \vec{n}$ (намагниченность коллинеарна с нормалью) и $\vec{m} \perp \vec{n}$ (намагничен-

ность перпендикулярна нормали, т.е. лежит в плоскости границы Γ). Аналитический анализ граничного условия (2) показывает, что в первом случае электрическое поле положительного точечного заряда приводит к радиально симметричному отклонению намагниченности от направления $\vec{n}$. Относительная величина и направление $\partial\vec{m}/\partial n$ показана на рисунке 1а красными стрелками. Компонента электрического поля $\vec{E}_{||}$, лежащая в плоскости границы Γ , отражена с помощью радиально симметричной заливки. Во втором случае ($\vec{m} \perp \vec{n}$) намагниченность антисимметричным образом выходит из плоскости, это отображено на рисунке 1б красными маркерами, показывающими величину и направление $\partial\vec{m}/\partial n$.

Численная минимизация энергии ферромагнитного параллелепипеда

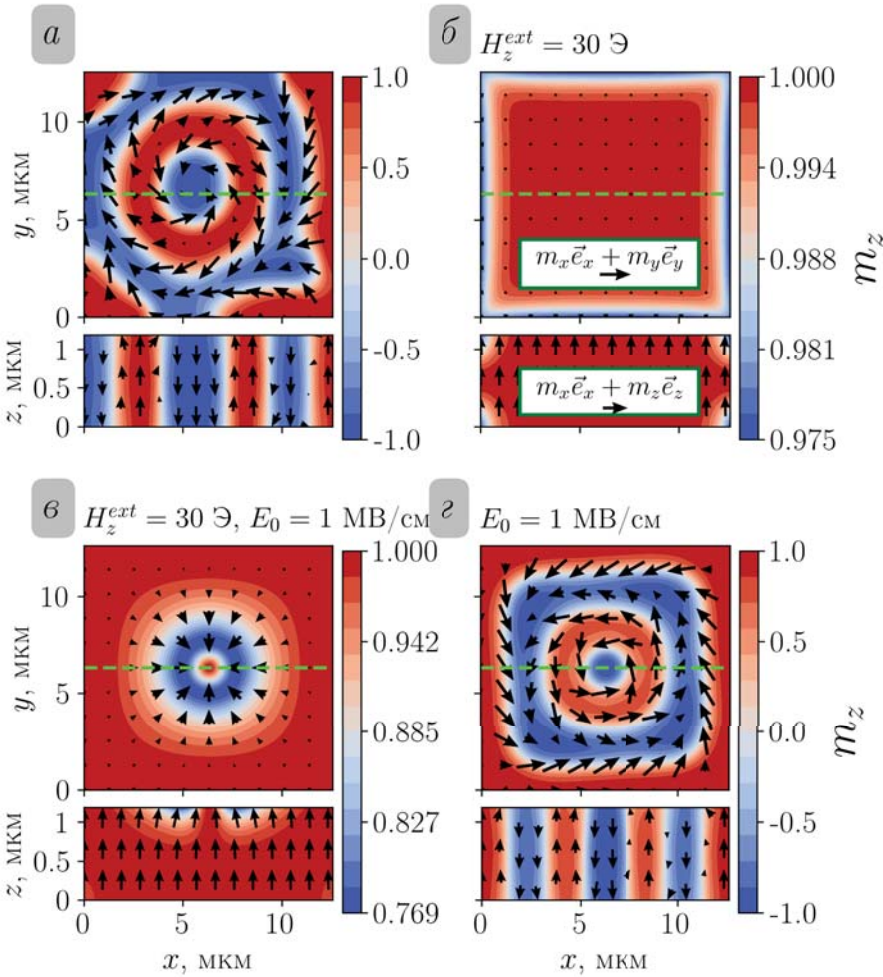


Рисунок 3: Зарождение доменов электрическим полем: а – спонтанная доменная структура; б – монодоменное состояние ($H_z^{ext} = 30 \text{ Э}$); в – влияние электрического поля $E_0 = 1 \text{ МВ/см}$ на изначально однородную намагниченность; г – возникающая при выключении магнитного поля доменная структура [A5].

с размерами $2.94 \times 2.94 \times 0.28 \text{ мкм}$, характеризующегося параметрами активно исследуемого экспериментального образца плёнки феррита граната, показывает, что внешнее электрическое поле точечного заряда (1 МВ/см) приводит к возмущению намагниченности на границе. На рисунке 2 приведён результат микромагнитного моделирования, проведённого с учётом граничного условия (2). Изначально однородная намагниченность (см. рисунок 2а, положение намагниченности определяется

сложной магнитной анизотропией) возмущается под действием электрического поля, но возмущение dm_z не превышает 10% от намагниченности насыщения, поэтому на рисунке 2б,в приведена векторная разность $d\vec{m}$ конечного (возмущённого) и начального состояний при характерных напряжённостях электрического поля 1 МВ/см и -1 МВ/см. Рисунок 2г показывает структуру электрического поля. Из рисунка 2 следует, что намагниченность возмущается на границе, где электрическое поле наиболее сильное, и что возмущение проникает в глубину на 100 нм. Смена знака внешнего электрического поля приводит к изменению знака разности $d\vec{m}$. Также на основе микромагнитного моделирования равновесных состояний намагниченности в параллелепипеде $12.6 \times 12.6 \times 1.2$ мкм с пониженной магнитной анизотропией было показано, что граничное условие (2) приводит к зарождению доменов. На рисунке 3а отображено состояние намагниченности, соответствующее спонтанной доменной структуре. Магнитное поле $H_z^{ext} = 30$ Э насыщает рассматриваемую систему (см. рисунок 3б). Воздействие электрического поля (1 МВ/см) точечного заряда приводит к радиально симметричному скосу намагниченности в области наиболее выраженного электрического поля – скос показан на рисунке 3в. Выключение магнитного поля H_z^{ext} способствует зарождению доменной структуры и, в частности, появлению домена в области приложения электрического поля (см. рисунок 3г). Таким образом, было показано, что ЭМВДМ, описываемое выражением (1), даёт вклад в граничное условие (2), что предполагает влияние внешнего электрического поля не только на микромагнитные неоднородности, но и на пространственно однородную намагниченность. Приведённые выше результаты изложены в публикации [А5]. Свойства созданного автором программного пакета для микромагнитных вычислений были доложены на конференции EASTMAG-2025 [14].

В разделе 2.2 второй главы представлены результаты теоретического исследования структуры скрученной ДС в экспериментально исследуемом образце плёнки феррита граната №87Д-19 с кристаллографической ориентацией (210). В ходе минимизации энергии ДС с помощью пакета для микромагнитных вычислений MuMax3 [15] были обнаружены два решения: скрученная ДС, обладающая горизонтальной блоховской линией (ГБЛ), и ДС без скрученности. Полученные решения приведены на рисунке 4 и были доложены автором на конференции Волны-2025 [16]. Вычисленные зависимости полной энергии двух ДС от угла их поворота β в плоскости плёнки приведены на рисунке 5. Отсюда видно, что ДС с ГБЛ оказывается энергетически

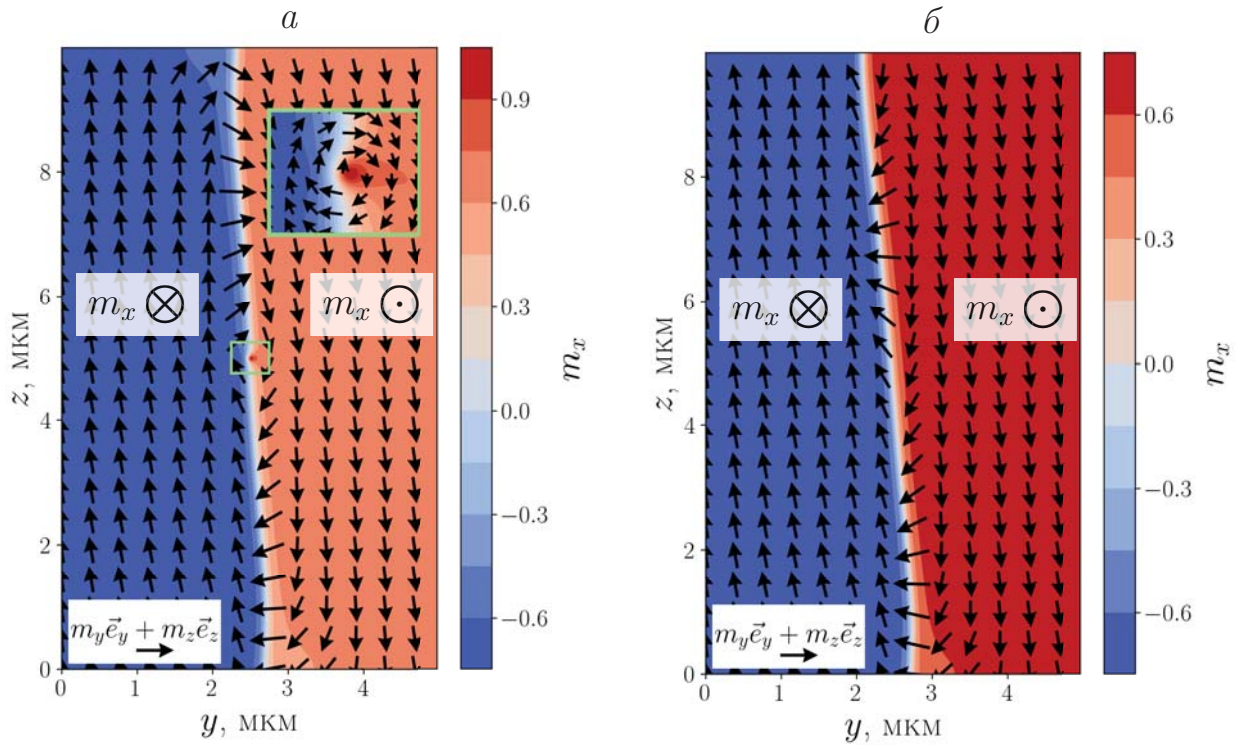


Рисунок 4: Структура ДС в образце №87Д-19 пленки феррита граната с кристаллографической ориентацией 210: *a* – ДС с ГБЛ, прямоугольником выделена область, содержащая ГБЛ (цветовая схема соответствует компоненте намагниченности m_x); *б* – ДС без ГБЛ.

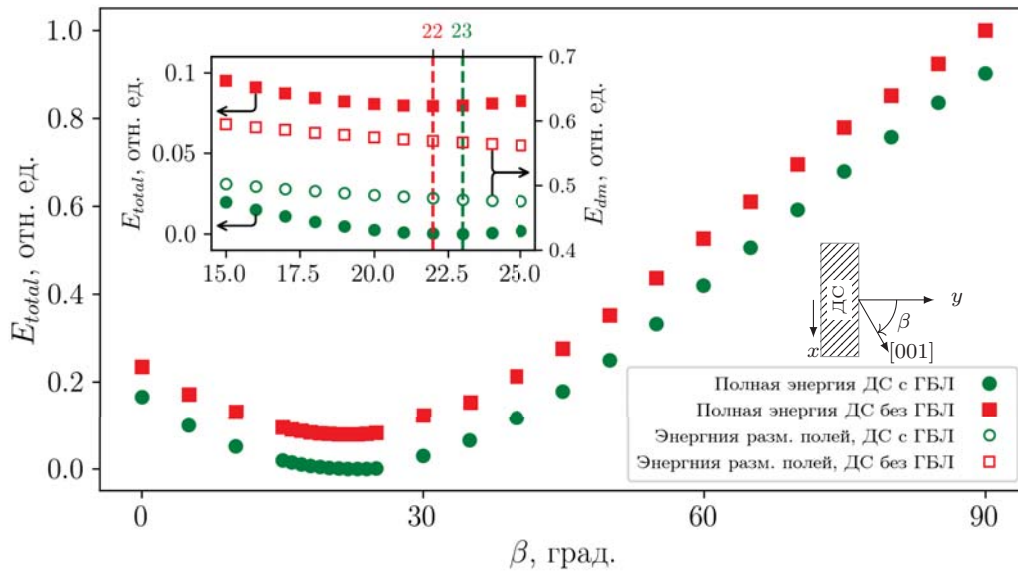


Рисунок 5: Зависимость энергии среза ДС от поворота в кристалле. Полые кружки и квадраты обозначают энергию размагничивающих полей для скрученной ДС (зелёным цветом) и для ДС без скрученности (красным цветом). На вставке значения слева соответствуют полной энергии, значения справа – только энергии полей размагничивания.

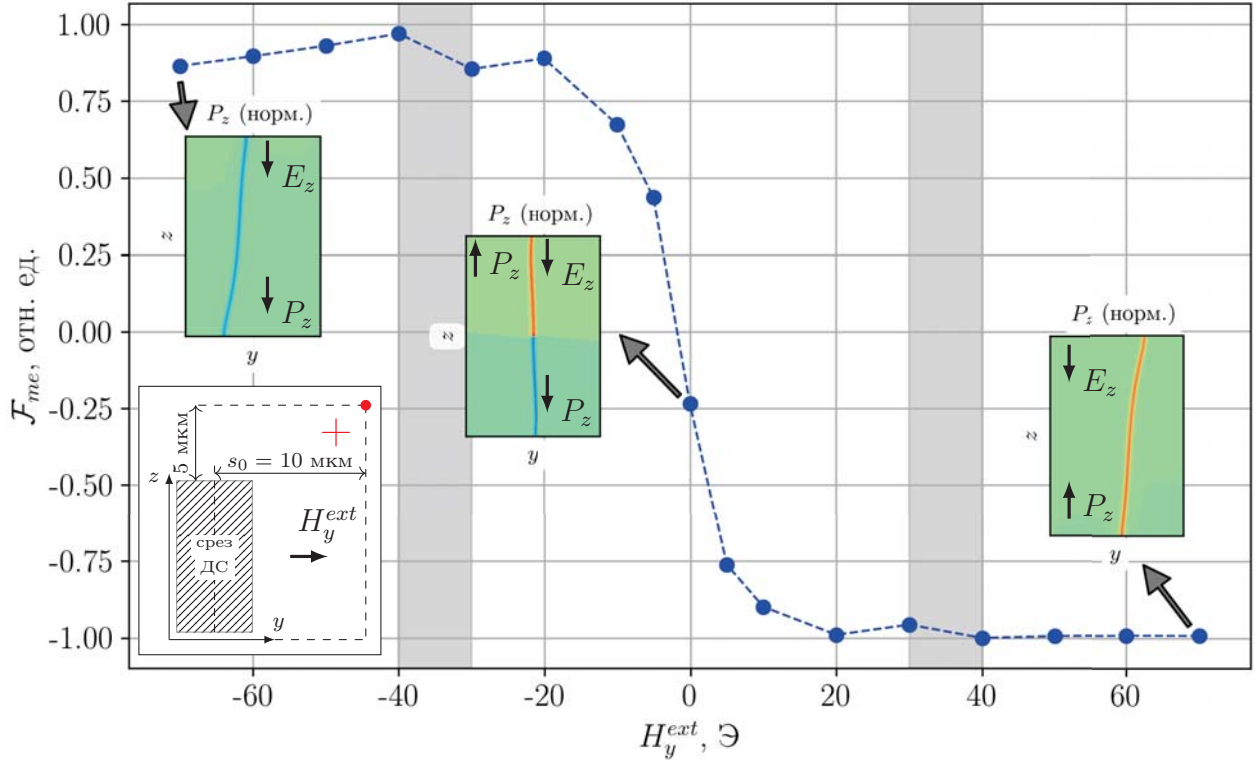


Рисунок 6: Зависимость обобщённой силы $\mathcal{F}_{me}$, действующей на ДС со стороны точечного электрического заряда, от магнитного поля H_y^{ext} , приложенного в плоскости плёнки перпендикулярно ДС. На вставках показана электрическая поляризация ДС в терминах компоненты P_z . Серым цветом выделены области между значениями магнитного поля -30 Э и -40 Э, 30 и 40 Э, в которых ГБЛ исчезает из структуры ДС. В левом нижнем углу приведена геометрия задачи.

выгодной структурой, что связано с сонаправленностью намагниченности и полей размагничивания вблизи поверхностей плёнки: энергия размагничивающих полей отмечена на вставке рисунка 5 полыми маркерами. ЭМВДМ в соответствии с (1) приводит к появлению у ДС, изображённой на рисунке 4а, электрической поляризации. Она, подобно намагниченности, по своему направлению разбивается на два участка: электрическая поляризация выше ГБЛ имеет примерно одинаковое направление в каждой точке ДС, ниже ГБЛ ситуация аналогична, но направление поляризации инвертировано. В диссертации показано, что сдвиг ГБЛ внешним магнитным полем H_y^{ext} по толщине плёнки приводит к изменению интегрального взаимодействия ДС с внешним источником электрического поля. Рисунок 6 показывает зависимость обобщённой силы $\mathcal{F}_{me}$ (по аналогии с работой Тиля [17]) взаимодействия ДС и точечного заряда от приложенного к ДС магнитного поля. Установлено, что

обобщённая сила $\mathcal{F}_{me}$ меняет свой знак при сдвиге ГБЛ. Такой механизм качественно соответствует экспериментально наблюдаемой картине сдвига ДС в электрическом поле при различных магнитных полях в плоскости плёнки феррита граната $(\text{BiLu})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$ [8]. Вставки на рисунке 6 показывают компоненту P_z электрической поляризации ДС.

В разделе 2.3 второй главы отражены результаты исследования «преломления» ДС в электрическом поле полоскового электрода. Электрическое поле было рассчитано с помощью метода граничных элементов, реализованного в библиотеке VEM-pp [18]. Показано, что ДС изменяет своё положение вблизи электрода за счёт взаимодействия электрического поля $\vec{E}$ и поляризации $\vec{P}$, индуцированной разворотом намагниченности внутри ДС (см. рисунок 7а,б). Сонаправленность компонент E_z и P_z способствует увеличению длины ДС в области расположения электрода, что приводит к энергетической выгодности «преломления». На рисунке 7в «преломлению» соответствует переход ДС от одной зелёной штриховой линии к другой. Сформулированные выше выводы опубликованы в работах [A1, A2]. Штриховые линии обозначают положение ДС, белая пунктирная линия обозначает область вне электрода, где наблюдается искривление ДС. На вставке показан магнитооптический снимок нескольких ДС, испытывающих «преломление» [A1].

В третьей главе рассмотрены динамические конфигурации векторного поля намагниченности с учётом ЭМВДМ. **В разделе 3.1 третьей главы** приведены результаты аналитических и численных расчётов динамики ДС Блоха и ДС Нееля после подачи ступенчатого импульса пространственно однородного электрического поля. В диссертации показано, что в момент подачи импульса пространственно однородное электрическое поле E_z сообщает по отношению к ДС Блоха скорость $v_{E_z} = 2\gamma D_z m_x / M_s$ ($D_z = \gamma_{me} \chi_e E_z$). Здесь γ есть гиромагнитное отношение, M_s – намагниченность насыщения, m_x – компонента единичного вектора намагниченности. При этом угол θ , задающий намагниченность в ДС, в приближении малого затухания Гильберта удовлетворяет уравнению переноса:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = v_{E_z} \frac{\partial \theta}{\partial y}. \quad (3)$$

Установлено, что скорость v_{E_z} прямо пропорциональна компоненте намагниченности m_x , и потому электрическое поле E_z смещает ДС Блоха как целое. ДС Нееля на электрическое поле E_z не реагирует. Аналогичным образом про-

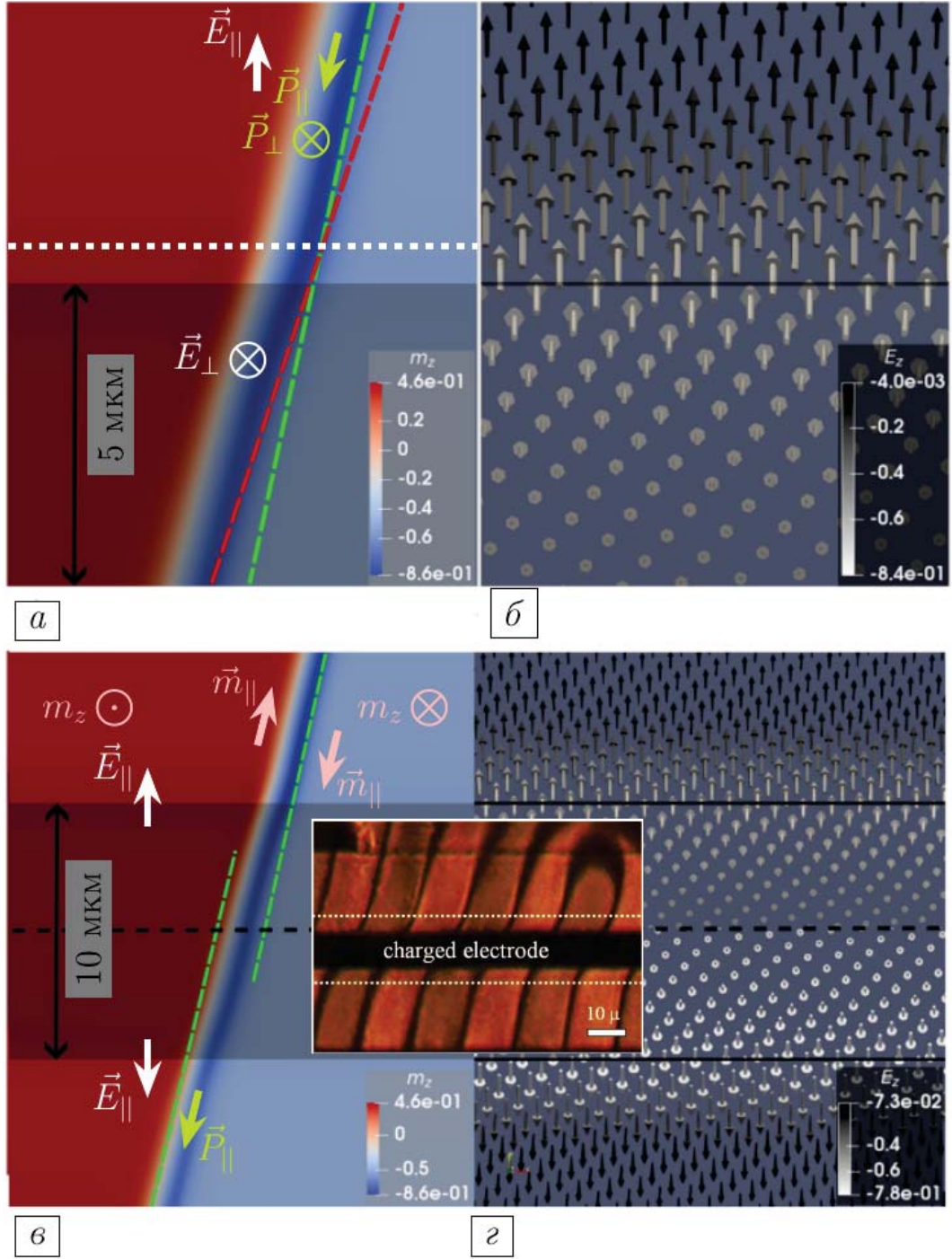


Рисунок 7: Результат численного моделирования «преломления» ДС. *a*, *б*: ДС и электрическое поле (показано стрелками) вблизи границы электрода (показан затемнённым прямоугольником), *в*, *г*: под электродом и вокруг него [A1].

странственно однородное электрическое поле E_x сообщает по отношению к ДС Блоха и ДС Нееля скорость $v_{E_x} = 2\gamma D_x m_z / M_s$ ($D_x = \gamma_{me} \chi_e E_x$). При этом для угла θ справедливо уравнение переноса:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -v_{E_x} \frac{\partial \theta}{\partial y}, \quad (4)$$

откуда следует, что скорость v_{E_x} прямо пропорциональна компоненте намагниченности m_z и что ДС Блоха и ДС Нееля не сдвигаются электрическим полем как целое. Вместо этого они динамически изменяют свою ширину. Рисунок 8 показывает состояние ДС Блоха спустя время $t = 1.17$ нс после приложения импульса электрического поля $E_z = 1.5$ МВ/см. В соответствии с уравнением (3) ДС Блоха движется вправо. Рисунок 9 показывает, что ДС Блоха после подачи поля E_x не сдвигается как целое (в соответствии с урав-

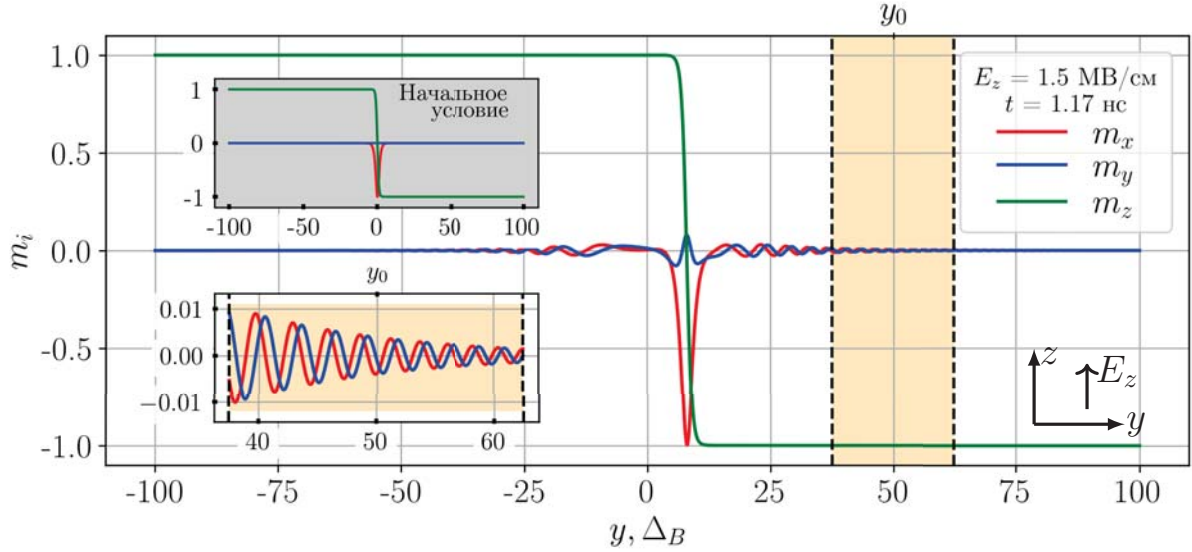


Рисунок 8: Результат численного моделирования – ДС Блоха через $t = 1.17$ нс после подачи ступенчатого импульса пространственно однородного электрического поля $E_z = 1.5$ МВ/см [A4].

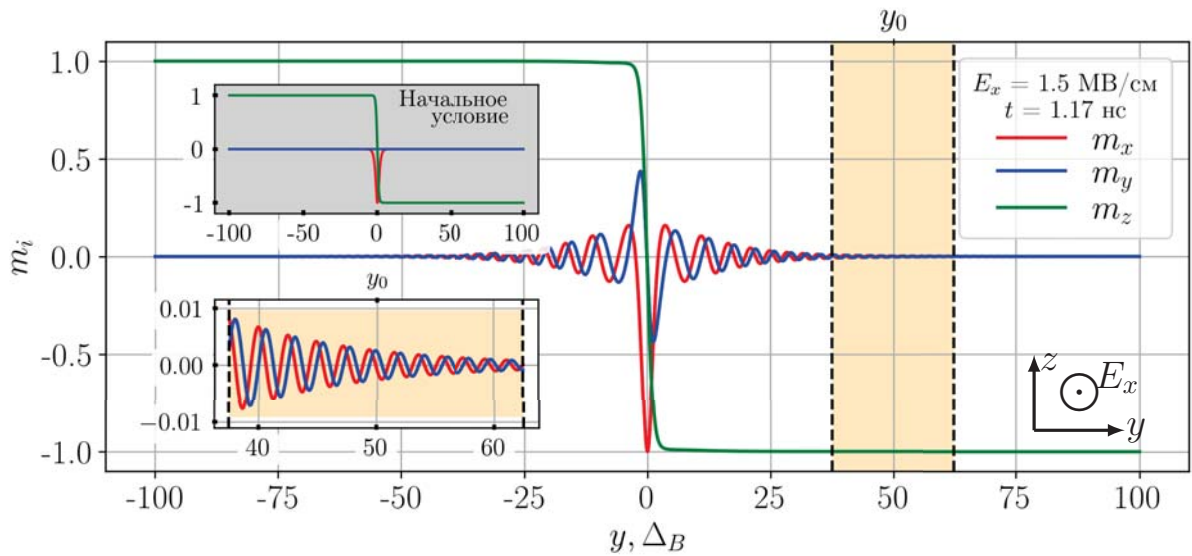


Рисунок 9: Результат численного моделирования – ДС Блоха через $t = 1.17$ нс после подачи ступенчатого импульса пространственно однородного электрического поля $E_x = 1.5$ МВ/см [A4].

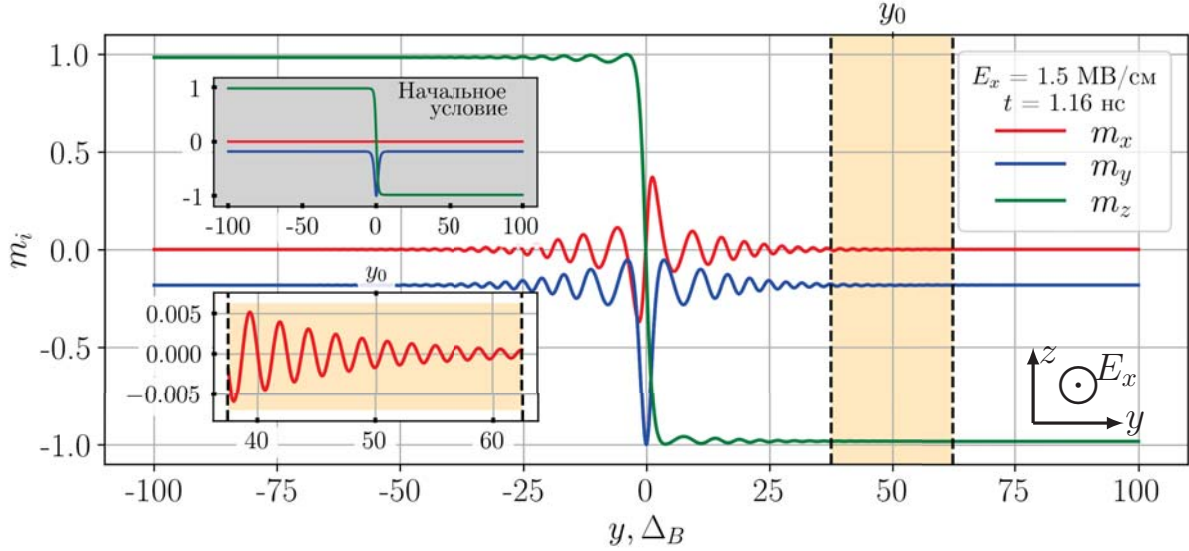


Рисунок 10: Результат численного моделирования – ДС Нееля через $t = 1.16$ нс после подачи ступенчатого импульса пространственно однородного электрического поля $E_x = 1.5$ МВ/см [A4].

нением (4)). ДС Нееля точно также реагирует на электрическое поле E_x – см. рисунок 10.

На основе численного микромагнитного моделирования продемонстрировано, что наряду с движением ДС Блоха в поле E_z и динамическим изменением ширины ДС Блоха и ДС Нееля в поле E_x происходит возбуждение спиновых волн. Профили спиновых волн в пространстве показаны на нижних вставках рисунков 8-10. Приведённые выше уравнения (3), (4) и выводы о движении/изменении ширины ДС были опубликованы в работе [A4] и доложены на конференциях Ломоносов-2024 и Волны-2024 [19; 20]. С помощью преобразования Гильберта рассчитаны мгновенные частоты и волновые числа прецессии. В диссертации на основе аналитических выкладок показано, что с ростом амплитуды у возбуждаемых спиновых волн уменьшаются мгновенная частота прецессии и волновое число.

В разделе 3.2 третьей главы отражены результаты исследования прохождения спиновых волн через ДС. В работе были рассмотрены две ДС: ДС Блоха и ДС Нееля, стабилизированная внешним электрическим полем точечного заряда. С помощью численного микромагнитного моделирования показано, что спиновые волны, прошедшие через ДС Блоха, и волны, прошедшие через электрически контролируемую ДС Нееля, имеют фазовый сдвиг друг относительно друга, равный π . Рисунок 11a показывает временную развёртку компоненты намагниченности m_x^B спиновой волны, прошедшей через

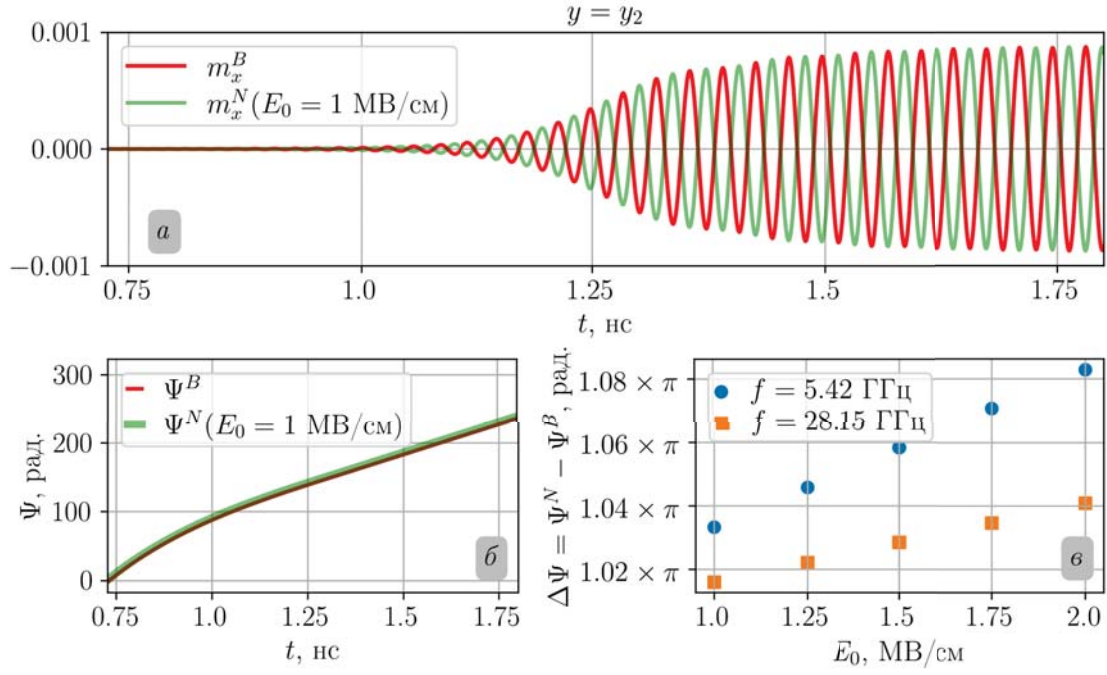


Рисунок 11: Сравнение фаз спиновых волн, прошедших через ДС Блоха (m_x^B) и ДС Нееля (m_x^N), во времени. *a* – временная развёртка прецессии для компонент m_x^B и m_x^N ; *б* – зависимость фаз Ψ^B от Ψ^N ; *в* – зависимость разности фаз $\Delta\Psi = \Psi^N - \Psi^B$ от модуля напряжённости электрического поля E_0 [А3].

ДС Блоха, и компоненты m_x^N волны, прошедшей через электрически контролируемую ДС Нееля, в точке наблюдения $y = y_2$ на расстоянии от центра ДС 3 мкм. Две волны находятся в противофазе – это отражено на рисунке 11в, где дана зависимость разности фаз $\Delta\Psi = \Psi^N - \Psi^B$ от величины электрического поля, воздействующего на ДС Нееля. Ровно такой же вывод был сделан для пространственных профилей намагниченностей двух волн. Результаты были опубликованы в работе [А3] и доложены на конференции НМММ-2024 [21].

В конце диссертационной работы приводятся основные результаты, заключение, список сокращений и условных обозначений, а также список литературы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы состоят в следующем:

1. Проведены аналитические и численные расчёты, показывающие, что электрически модулируемое ВДМ даёт вклад в граничное условие для статистики намагниченности, которое приводит к влиянию внешнего электрического поля на пространственно однородную намагниченность, а не только на микромагнитные структуры (например, ДС). Внешнее электрическое поле 1 МВ/см посредством граничного условия способно изменять нормальную к поверхности плёнки компоненту намагниченности на 10% и служить причиной зарождения магнитных доменов;
2. Проведено численное моделирование скрученных ДС в образце плёнки феррита граната с кристаллографической ориентацией (210). Из полученных данных следует, что ДС имеет скрученную структуру и разделяется на два участка с различным разворотом намагниченности, разделённых горизонтальной линией Блоха. Перестройка скрученной ДС внешним магнитным полем, направленным в плоскости образца перпендикулярно ДС, состоит в смещении линии Блоха к одной из поверхностей плёнки и приводит к смене характера интегрального взаимодействия ДС с внешним электрическим полем – притяжение ДС к источнику электрического поля сменяется отталкиванием и наоборот;
3. Исследовано влияние электрического поля полоскового электрода на ДС. Микромагнитное моделирование показывает, что электрическое поле приводит к увеличению длины ДС («преломлению») в области под электродом за счёт взаимосвязи внешнего электрического поля и электрической поляризации ДС;
4. Рассмотрена динамическая реакция ДС на внешнее однородное электрическое поле за счёт электрически модулируемого ВДМ. Из полученных результатов следует, что электрическое поле приводит к динамике ДС Блоха и ДС Нееля путём сообщения каждому участку ДС определённой скорости: электрическое поле E_z приводит к сдвигу ДС Блоха и не воздействует на ДС Нееля, электрическое поле E_x приводит к динамическому изменению ширины ДС Блоха и Нееля. Кроме того, возмущение ДС приводит к возбуждению обменных спиновых волн;

5. Проведено исследование взаимодействия спиновых волн с ДС Блоха и электрически контролируемой ДС Нееля. Микромагнитное моделирование показывает, что спиновые волны, прошедшие через ДС Блоха и волны, прошедшие через электрически контролируемую ДС Нееля, оказываются в противофазе при напряжённостях электрического поля 1-2 МВ/см.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности и отрасли наук:

- A1. **Myasnikov N.**, Podkletnova A., Nikolaeva E., Pyatakov A. *The iron garnet stripe domain structure “refraction” effect at the electrode location* // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2024. – Vol. 595. – P. 171497. (Импакт-фактор 3.0 (JIF). Объём: 0.5 п.л. Вклад автора: 0.7. EDN: DKNLJS);
- A2. Каминский А.С., Карпачева А.А., Косых Т.Б., **Мясников Н.В.**, Николаева Е.П., Николаев А.В., Пятаков А.П., Сергеев А.С. *Новые горизонты микромагнетизма: электрическое управление топологическими магнитными структурами* // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика. Астрономия. – 2024. – Т. 79. – № 6. – С. 2460502. (Импакт-фактор 0.651 (JIF). Объём: 1.5 п.л. Вклад автора: 0.2. EDN: WWLMXU)
Kaminskiy A.S., Karpacheva A.A., Kosykh T.B., **Myasnikov N.V.**, Nikolaeva E.P., Nikolaev A.V., Pyatakov A.P., Sergeev A.S. *New horizons of micromagnetism: electric field control of topological magnetic structures* // Moscow University Physics Bulletin. – 2024. – Vol. 79. – №. 6. – P. 740-752. (Импакт-фактор 0.509 (JIF). Объём: 1.5 п.л. Вклад автора: 0.2. EDN: QHHFXA);
- A3. **Myasnikov N.V.**, Pyatakov A.P. *Simulation of Phase Shift of Spin Waves Passing through an Electrically Controlled Domain Wall* // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2025. – Vol. 88. – №. S1. – P. S53-S58. (Импакт-фактор 0.803 (JIF). Объём: 0.7 п.л. Вклад автора: 0.7. EDN: CUZVXY);
- A4. **Мясников Н.В.**, Пятаков А.П. *Моделирование возбуждения спиновых волн воздействием электрического поля на доменную стенку в магнит-*

ных плёнках с неоднородным магнитоэлектрическим взаимодействием // Известия РАН. Серия физическая. – 2025. – Т. 89. – № 1. – С. 136-144. (Импакт-фактор 0.910 (JIF). Объём: 1.0 п.л. Вклад автора: 0.7. EDN: CYYQDG)

Myasnikov N.V., Pyatakov A.P. *Simulation of the Excitation of Spin Waves by the Effect of an Electric Field on Domain Walls in Magnetic Films with Inhomogeneous Magnetoelectric Interaction* // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2025. – Vol. 89. – №. 1. – P. 138-146. (Импакт-фактор 0.803 (JIF). Объём: 1.0 п.л. Вклад автора: 0.7. EDN: HASYWH);

А5. **Мясников Н.В.**, Пятаков А.П. *Вклад неоднородного магнитоэлектрического взаимодействия в статическое граничное условие для намагниченности* // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика. Астрономия. – 2026. – Т. 81. – № 2. – С. 2620503. (Импакт-фактор 0.651 (JIF). Объём: 0.9 п.л. Вклад автора: 0.7. EDN: VPMHXW)

Myasnikov N.V., Pyatakov A.P. *Contribution of Inhomogeneous Magnetoelectric Interaction to the Static Boundary Condition for Magnetization* // Moscow University Physics Bulletin. – 2026. – Vol. 81. – №. 2. – P. 333-342. (Импакт-фактор 0.509 (JIF). Объём: 0.9 п.л. Вклад автора: 0.7. EDN: EMFYQD).

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Camley R. E., Livesey K. L. Consequences of the Dzyaloshinskii-Moriya interaction // Surface Science Reports. — 2023. — Vol. 78, no. 3. — P. 100605.
2. Mulkers J., Hals K. M. D., Leliaert J., Milošević M. V., Van Waeyenberge B., Everschor-Sitte K. Effect of boundary-induced chirality on magnetic textures in thin films // Physical Review B. — 2018. — Vol. 98, no. 6. — P. 064429.

3. Srivastava T., Schott M., Juge R., Křižáková V., Belmeguenai M., Rousigné Y., Bernand-Mantel A., Ranno L., Pizzini S., Chérif S.-M., Stashkevich A., Auffret S., Boulle O., Gaudin G., Chshiev M., Baraduc C., Béa H. Large-Voltage Tuning of Dzyaloshinskii–Moriya Interactions: A Route toward Dynamic Control of Skyrmion Chirality // *Nano Letters*. — 2018. — Vol. 18, issue 8, no. 8. — P. 4871–4877.
4. Lucassen J., Schippers C. F., Verheijen M. A., Fritsch P., Geluk E. J., Barcones B., Duine R. A., Wurmehl S., Swagten H. J. M., Koopmans B., Lavrijsen R. Extraction of Dzyaloshinskii-Moriya interaction from propagating spin waves // *Physical Review B*. — 2020. — Vol. 101, issue 6, no. 6. — P. 064432.
5. Логгинов А. С., Мешков Г. А., Николаев А. В., Пятаков А. П. Магнитоэлектрическое управление доменными границами в пленке феррита-граната // *Письма в ЖЭТФ*. — 2007. — Т. 86, вып. 2. — С. 124–127.
6. Logginov A., Meshkov G., Nikolaev A., Nikolaeva E., Pyatakov A., Zvezdin A. K. Electric Field Driven Magnetic Domain Wall Motion in Iron Garnet Films // *Solid State Phenomena*. — 2009. — Vol. 152/153. — P. 143–146.
7. Pyatakov A. P., Zvezdin A. K. Magnetoelectric and multiferroic media // *Physics-Uspekhi*. — 2012. — Vol. 55, no. 6. — P. 557–581.
8. Pyatakov A. P., Sergeev A. S., Nikolaeva E. P., Kosykh T. B., Nikolaev A. V., Zvezdin K. A., Zvezdin A. K. Micromagnetism and topologic defects in magnetoelectric media // *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*. — 2015. — Vol. 185, no. 10. — P. 1077–1088.
9. Куликова Д. П., Пятаков А. П., Николаева Е. П., Сергеев А. С., Косых Т. Б., Пятакова З. А., Николаев А. В., Звездин А. К. Зарождение цилиндрических магнитных доменов в пленках ферритов гранатов с помощью электрического зонда // *Письма в ЖЭТФ*. — 2016. — Т. 104, вып. 3. — С. 196–200.
10. Kulikova D. P., Gareev T. T., Nikolaeva E. P., Kosykh T. B., Nikolaev A. V., Pyatakova Z. A., Zvezdin A. K., Pyatakov A. P. The Mechanisms of Electric Field-Induced Magnetic Bubble Domain Blowing // *physica status solidi (RRL) - Rapid Research Letters*. — 2018. — Vol. 12, no. 6. — P. 1800066.

11. Antipin K. S., Gareev T. T., Myasnikov N. V., Nikolaeva E. P., Pyatakov A. P. Bipolar electric field-induced nucleation of magnetic domains with 90 domain walls // Journal of Applied Physics. — 2021. — Vol. 129, issue 2, no. 2. — P. 24103.
12. Подклетнова А. А., Колюшенков М. А., Мясников Н. В., Николаева Е. П. and Каминский А. С., Николаев А. В., Пятаков А. П. Эффект «преломления» магнитных доменных границ на электрических неоднородностях // Письма в ЖЭТФ. — 2023. — Т. 118, № 4. — С. 259—262.
13. Zhang X., Liu T., Flatté M. E., Tang H. X. Electric-Field Coupling to Spin Waves in a Centrosymmetric Ferrite // Physical Review Letters. — 2014. — Vol. 113, no. 3. — P. 037202.
14. Myasnikov N. V., Pyatakov A. P. Micromagnetic simulations based on Python libraries: classical finite difference and neural network approaches // IX Euro-Asian Symposium "Trends in MAGnetism" (EASTMAG-2025): Abstracts. — Yuzhno-Sakhalinsk : Editorial, publishing center, Sakhalin State University, 2025. — P. 467.
15. Vansteenkiste A., Leliaert J., Dvornik M., Helsen M., Garcia-Sanchez F., Van Waeyenberge B. The design and verification of MuMax3 // AIP Advances. — 2014. — Vol. 4, no. 10.
16. Мясников Н. В., Пятаков А. П. Численное моделирование электрической поляризации скрученной доменной стенки в магнитных плёнках с неоднородным магнитоэлектрическим взаимодействием // Сборник трудов XXXVI Всероссийской школы-семинара «Волновые явления: физика и применения» имени профессора А. П. Сухорукова («Волны-2025»). — Москва : Физический факультет МГУ, 2025. — С. 144—146.
17. Thiele A. The Theory of Cylindrical Magnetic Domains // Bell System Technical Journal. — 1969. — Vol. 48, no. 10. — P. 3287–3335.
18. Betcke T., Scroggs M. Bempp-cl: A fast Python based just-in-time compiling boundary element library. // Journal of Open Source Software. — 2021. — Vol. 6, issue 59, no. 59. — P. 2879.
19. Мясников Н. В. Моделирование динамики воздействия электрического поля на доменную стенку в плёнках с неоднородным магнитоэлектрическим взаимодействием // XXXI Международная конференция студентов,

аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам «Ломоносов—2024». Секция «Физика». — Москва : Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, 2024. — С. 725—727.

20. Мясников Н. В., Пятаков А. П. Моделирование возбуждения спиновых волн воздействием электрического поля на доменную стенку в магнитных плёнках с неоднородным магнитоэлектрическим взаимодействием // Сборник трудов XXXV Всероссийской школы-семинара «Волновые явления: физика и применения» имени профессора А. П. Сухорукова («Волны-2024»). — Москва : Издательство Московского университета, 2024. — С. 303—304.
21. Мясников Н. В., Пятаков А. П. Моделирование сдвига фазы спиновых волн при прохождении через электрически управляемую доменную стенку // Новое в магнетизме и магнитных материалах. Сборник докладов XXV международной конференции. — Москва : Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московский технологический университет (МИРЭА), 2024. — С. 11—56.