

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени  
М.В.ЛОМОНОСОВА»

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА ОБЩЕЙ ФИЗИКИ

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

**«ОСОБЕННОСТИ МИКРОМАГНИТНОЙ СТРУКТУРЫ  
ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ NdFeB»**

Выполнил студент  
205м группы  
Гинзбург Борис Александрович

---

подпись студента

Научный руководитель  
д.ф.-м.н. проф. Поляков П.А.

---

подпись научного руководителя

Допущена к защите

Зав. кафедрой д.ф.-м.н. проф. Салецкий А.М.

---

подпись зав. кафедрой

Москва

2019

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ГЛАВА 1. ОБРАЗЦЫ, МЕТОДИКА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	9
1.1 ИССЛЕДУЕМЫЕ ОБРАЗЦЫ.....	9
1.2 УСТАНОВКА И МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЙ.....	10
1.3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МАГНИТНОЙ МИКРОСТРУКТУРЫ.....	12
1.3.1 ОБРАЗЕЦ №1 в намагниченном состоянии. МАГНИТНАЯ СТРУКТУРА НА ГРАНИ, ПЕРПЕНДИКУЛЯРНОЙ ОН.....	12
1.3.2 ОБРАЗЕЦ №1 в намагниченном состоянии. МИКРОМАГНИТНАЯ СТРУКТУРА НА ГРАНИ, ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ОН.....	15
1.3.3 ОБРАЗЕЦ №2 в трех состояниях с разной намагниченностью. МИКРОМАГНИТНАЯ СТРУКТУРА НА ГРАНИ, ПЕРПЕНДИКУЛЯРНОЙ ОН.....	18
1.3.4 ОБРАЗЕЦ №3 в трех состояниях с разной намагниченностью. МАГНИТНАЯ СТРУКТУРА НА ГРАНИ, ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ОН.....	22
1.4 ТОПОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ СКОЛА.....	24
1.5 МОДЕЛЬ НЕОДНОРОДНО-НАМАГНИЧЕННОГО СЛОЯ.....	26
ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МИКРОМАГНИТНЫХ СТРУКТУР.....	29
2.1 МОДЕЛЬ ОДНОРОДНО НАМАГНИЧЕННОГО ПАРАЛЛЕЛЕПИПЕДА.....	29
2.2 ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ДВУМЕРНЫХ КЛАСТЕРОВ.....	33
2.3 МОДЕЛЬ НЕОДНОРОДНОЙ ПЛАСТИНКИ.....	39
2.4 ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ТРЕХМЕРНЫХ КЛАСТЕРОВ.....	41
2.5 АНАЛИТИЧЕСКАЯ ФОРМУЛА ДЛЯ ЭНЕРГИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КУБИЧЕСКИХ МАГНИТОВ.....	41
2.6 СРАВНЕНИЕ СИЛЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КЛАСТЕРОВ С АНАЛИТИЧЕСКОЙ ФОРМУЛОЙ.....	44
ЗАКЛЮЧЕНИЕ. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ.....	47
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	49

## ВВЕДЕНИЕ

Открытые в 1982 году [1] спеченные постоянные магниты сплава NdFeB находят широкое применение в современной технике: в малогабаритных электродвигателях и генераторах, магнитных муфтах, манипуляторах, магнитных подвесках, источниках ондуляторного излучения и во многих других устройствах. Детальное знание и полное понимание магнитной микроструктуры материалов очень важно для развития высокопроизводительных постоянных магнитов и, в частности, достижения высокой коэрцитивности [2].

Создание сверхсильных постоянных магнитов – одна из важных задач в области магнетизма. Сверхсильные постоянные магниты приводят к более эффективным и компактным двигателям. Более легкие двигатели экономят ископаемое топливо при автоматической и воздушной транспортировке, поскольку двигатели повсеместны в этих системах. Кроме того, вскоре электродвигатели для гибридных автомобильных транспортных средств могут занять огромную долю на рынке [3].

Главным приоритетом для разработчиков материалов постоянных магнитов, является достижение высокой коэрцитивности и остаточной намагниченности. В NdFeB материалах, микроструктурные аспекты, такие как размер и морфология зерна, имеют сильное влияние на коэрцитивность и остаточную намагниченность. Причем коэрцитивность изменяется обратно пропорционально размеру зерен[4].

Спеченный магнит NdFeB в основном состоит из трех фаз. Основной фазой спеченного магнита NdFeB является  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}_1$ . Другими двумя фазами являются  $\text{Nd}_{1+c}\text{Fe}_4\text{B}_4$  и фаза “Nd-rich”(обогащённая неодимом). Увеличение объемного соотношения основной фазы является одним из важных факторов для улучшения остаточной намагниченности. Соотношение объема основной

фазы уменьшается за счет включения примесей, таких как кислород, азот и углерод, которые поступают при процессах изготовления магнитов [5].

Целью настоящей работы является изучение магнитной микроструктуры магнитов  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  методом магнитно-силовой микроскопии (МСМ).

МСМ позволяет наблюдать магнитные доменные структуры композитных магнитов с высоким пространственным разрешением и высокой поверхностной чувствительностью [6-8].

Технологии изготовления магнитов  $\text{NdFeB}$  за последнее десятилетие значительно продвинулись и позволяют создавать магниты с уникальными параметрами коэрцитивной силой и эффективным полем анизотропии, существенно превосходящим размагничивающее поле магнитов макроскопических объемов. Это позволяет конструировать магнитные системы с заданным распределением намагниченности, например, многополюсные магниты для генераторов и электродвигателей или сферический неоднородный магнит, способный создавать в сферическом зазоре в 1,5 мм магнитное постоянное поле с рекордной индукцией 5 Тл [9].

В рамках данной технологии удается сконструировать практически идеальные прямоугольные магниты с однородной намагниченностью. Такой магнит был изготовлен и любезно предоставлен нам для научных исследований фирмой "Валтар". Магнит в форме параллелепипеда, имеющий размеры 28x32x12 мм, намагничен однородно вдоль наименьшего ребра. С помощью датчиков Холла было проведено измерение индукции магнитного поля в окружающем пространстве магнита и установлено, что в пределах ошибок измерения магнитное поле соответствует полю однородно намагниченного прямоугольника при значении намагниченности  $4\pi M = 13,1 \pm 0,1 \text{ кЭ}$  [10]. Пространственное разрешение датчиков Холла

составляло величину порядка 1,5 мм. На таком масштабе не было обнаружено какой-либо неоднородности в распределении намагниченности по поверхности образца. Заметим, что, если распределение намагниченности было бы идеально однородным и в микроскопическом масштабе, то вблизи ребер и углов величина индукции магнитного поля принимала бы очень большое значение, формально математически стремилась бы к бесконечности [11]. Поэтому максимальное значение индукции на поверхности магнита ограничивается возникновением магнитной неоднородности [12], которая может иметь разную природу. Так, если эффективное поле анизотропии меньше или порядка поля намагниченности, то у поверхности магнита возникают разветвляющиеся магнитные домены [13]. При очень большом эффективном поле анизотропии или коэрцитивной силе по сравнению с величиной  $4\pi M$ , магнитная неоднородность будет порядка размера структуры распределения магнитных зерен в материале магнитного вещества.

В данной работе изучаются характерные масштабы магнитной неоднородности на поверхности прямоугольного постоянного массивного магнита и исследуются особенности этих микроскопических магнитных неоднородностей на различных участках поверхности магнита методом магнитно-силовой микроскопии.

Такие исследования относительно легко реализовать для тонких магнитных пленок, когда поперечные силы, действующие на кантилевер относительно невелики. Например, в работе [14], еще в 2004 г. для тонкой пленки NdFeB было показано, что внутри зерен наблюдается полосовая доменная структура (рис. 1).

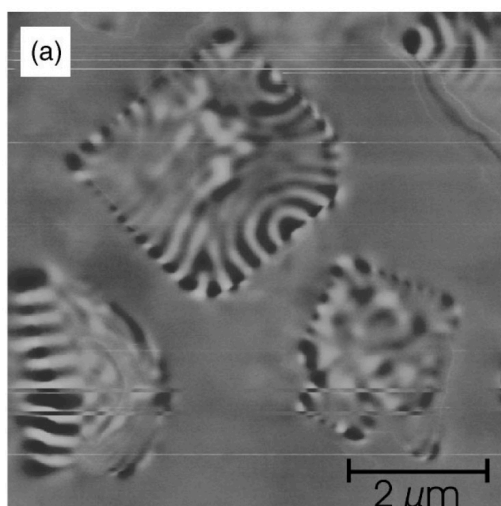


Рисунок 1 - Детализированная доменная структура зерна NdFeB[14].

В другой работе 2016 г. [15], посвященной магнитно-силовым снимкам магнито-твердых пленок NdFeB, представлено изображение (рис. 2) уже существенно отличающееся от снимка на рис. 1.

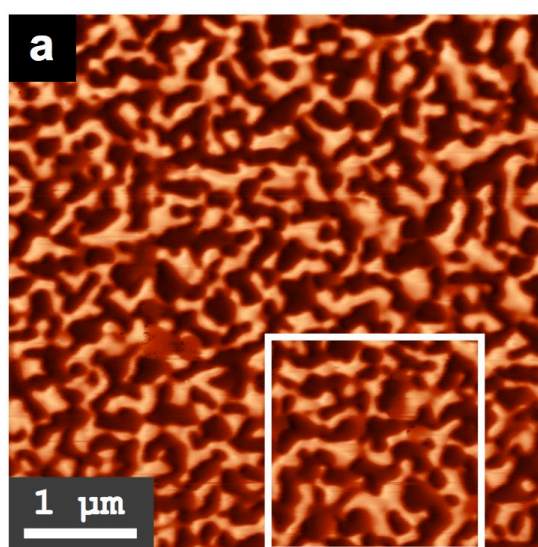


Рисунок 2 - MFM изображение пленки NdFeB.

В случае объемных магнитов, снимков с хорошим разрешением немного, так как технология измерения является довольно сложной [2].

Снимок, на рис.3, получен авторами для магнита с очень схожими с исследуемым нами образцом характеристиками. Однако отметим, что все известные нам исследования проводились для образцов в размагниченном

состоянии. Снимок сделан на плоскости, перпендикулярной оси намагничивания (ОН).

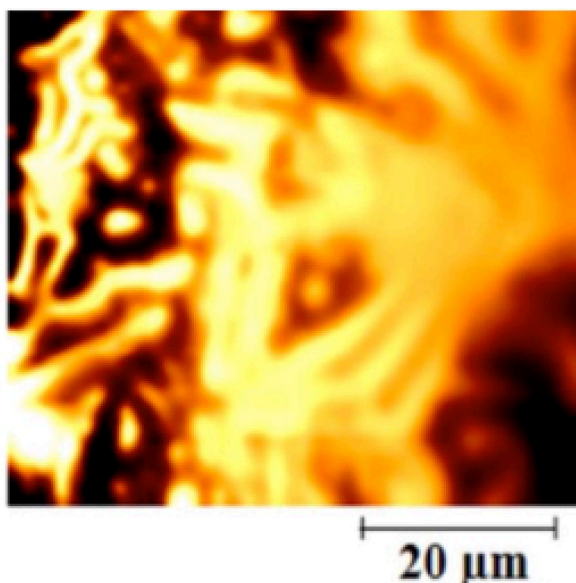


Рисунок 3 –МФМ-снимок NdFeB [2].

На рис. 4 изображен тот же снимок, только в 3D виде. Авторы работы[2] обращают внимание на магнитные шиповидные домены (spikes), направленные как вверх, так и вниз. Было заявлено, что, если это действительно домены такой формы, то они уменьшают энергию доменной стенки [16, 17, 18].

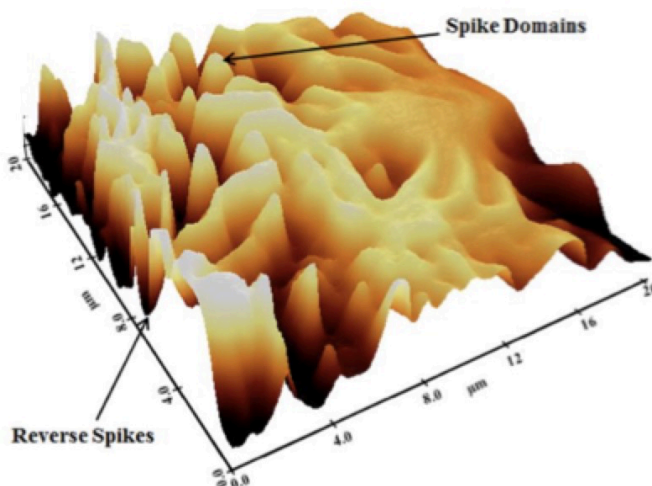


Рисунок 4 – 3D вид МФМ-снимка рисунка 3.

На рис. 5 показано МСМ-изображение фазовой картины для плоскости, параллельной ОН.

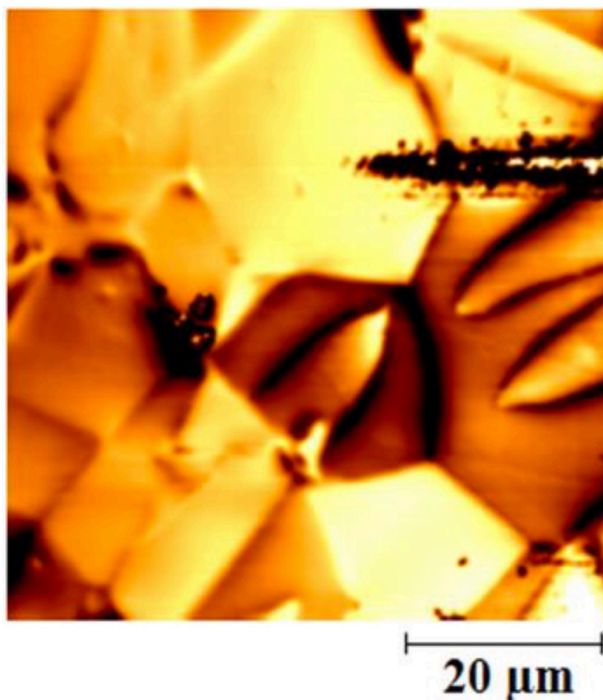


Рисунок 5 – МСМ-снимок магнита NdFeB на боковой поверхности[2].

В работе [19] утверждается, что магнитная структура на боковой поверхности магнита NdFeB состоит из нерегулярных областей размером в несколько сотен нанометров, которые отображаются как темными так и светлыми областями на МСМ-снимках. Однако размеры доменов значительно больше, чем размер зерна образца. Предыдущие исследования показали, что каждое зерно имеет многодоменную структуру [21, 22, 20].

Следует отметить, что в общем случае области взаимодействия могут быть обусловлены и обменными и магнитостатическими взаимодействиями между зернами [23-26].



# ГЛАВА 1. ОБРАЗЦЫ, МЕТОДИКА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

## 1.1 Исследуемые образцы

Исследуемый образец №1 – редкоземельный магнит состава  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}_1$  российского производства (фирма «Валтар»), изготовленный по технологии спекания. Образец имеет размеры 12x28x32 мм (основание 28x34 мм) с осью намагниченности, перпендикулярной основанию (рис. 6).

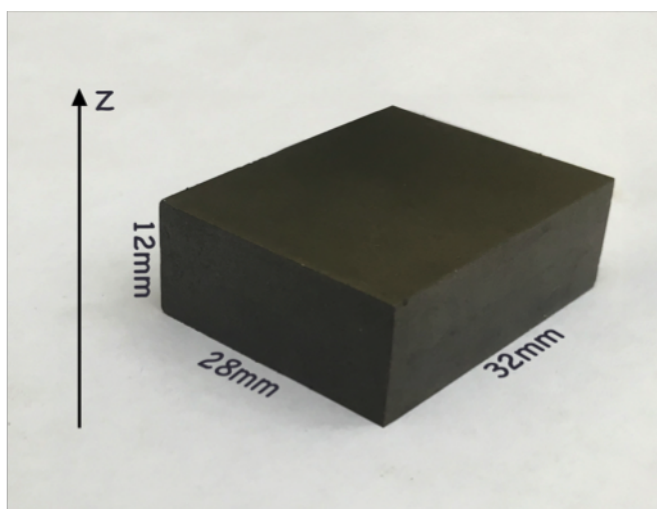


Рисунок 6 - Образец №1.

Исследуемый образец №2 – небольшой кусок, отрезанный от скола магнита (образец 1). Кусок «залит» в полимер таким образом, чтобы можно было сканировать грань, перпендикулярную оси намагничивания (рис. 7).

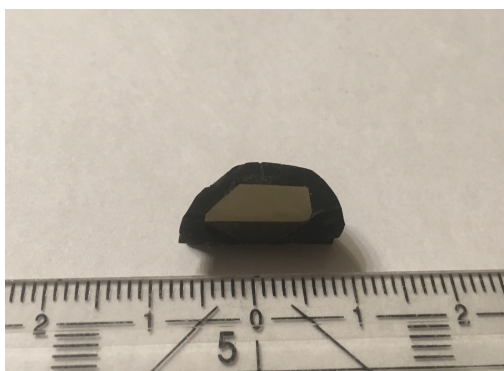


Рисунок 7 - Образец №2.

Исследуемый образец №3 – небольшой кусок, отрезанный от скола того же магнита. Кусок «залит» в полимер таким образом, чтобы можно было сканировать грань, параллельную оси намагничивания (рис. 8).



Рисунок 8 - Образец №3.

Перед исследованием сканируемая поверхность каждого образца была отполирована. Качественная полировка, во-первых, снимает коррозионный слой, во-вторых, делает магнит гладким в масштабе микрометров, что, в свою очередь, позволяет улучшить качество получаемых МСМ-снимков.

## 1.2 Установка и метод исследований

На рис. 9 приведено схематическое изображение установки для исследования распределения магнитных сил по поверхности образца.

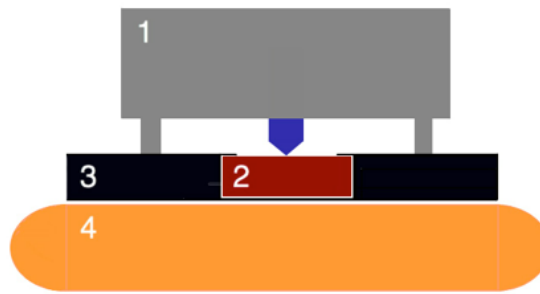


Рисунок 9 – Схема установки.

1. Измерительная головка атомно-силового микроскопа.
2. Образец.
3. Устройство крепления образца.
4. Виброизолирующее кольцо.

Постоянный магнит исследовался методом атомно-силовой микроскопии на приборе Scannig probe microscope Smena-A (платформа Solver) производства компании НТ-МДТ (г.Зеленоград). Подробное описание устройства и работы прибора содержится в работе [27]. Исследование проводилось методом МСМ в полуконтактной моде с использованием магнитных кантиверов MFM01 с частотами  $F=50-80\text{kHz}$ . Сканировались участки поверхности образцов размерами от  $7\times 7\text{мкм}$  до  $90\times 90\text{мкм}$ . Для изучения распределения силы по поверхности образцов, образцы сканировались от центра до самого края. Для исследования топологической структуры образца в наномасштабе сканирование производилось на гладких участках свежего скола образца размерами  $5\times 5\text{ мкм}$  и  $2,5\times 2,5\text{ мкм}$ . Обработка изображений производилась с использованием программного обеспечения Nova с помощью интерфейса программного модуля Image Analysis, либо с помощью пакетов Matlab и Anaconda Python.

Измерительная головка атомно-силового микроскопа содержит в своей конструкции магнитные материалы, вследствие чего притягивается к измеряемому сильному магниту, используемому в эксперименте. Для проведения опытов образец был закреплен при помощи специально спроектированных пластиковых проставок и крепежей.

Атомно-силовой микроскоп чувствителен к малейшим механическим и акустическим колебаниям. Для устранения помех от механических колебаний платформа с измерительной головкой АСМ и образцом была установлена на виброизолирующее кольцо.

### 1.3 Экспериментальные исследования магнитной микроструктуры

#### 1.3.1 Образец №1 в намагниченном состоянии. Магнитная структура на грани, перпендикулярной ОН

На рисунках 10а-10д приведены полученные МСМ-изображения поверхности магнита.

Эти снимки показывают распределение градиента магнитной силы по поверхности образца, которое можно интерпретировать как доменную структуру (далее такие картины будем называть «картина градиента сил магнитного взаимодействия» или «картина гсмвз»). Физический смысл фазы – первая производная от перпендикулярной составляющей силы, действующей на кантилевер, либо вторая производная от индукции магнитного поля у поверхности магнита. Чтобы убедиться, что магнитное покрытие зонда не перемагничивается случайным образом, одна и та же область образца сканируется с разной высотой сканирования, в разном масштабе и направлении движения зонда [28].

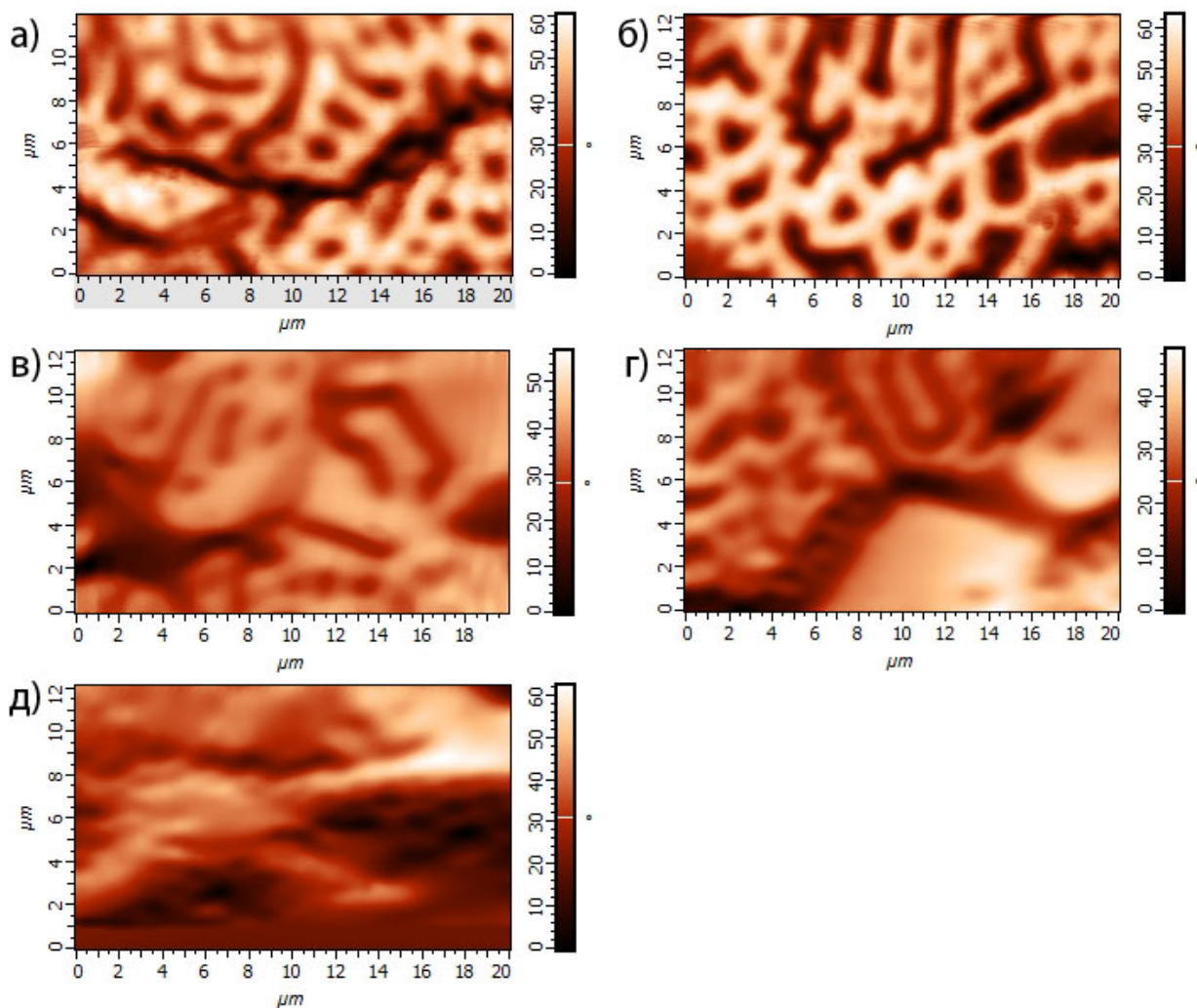


Рисунок 10 – МСМ-снимки магнитной картины образца №1. (а)-середина образца, (б)-на расстоянии 7мм от края, (в)-100мкм от края, (г)-40мкм от края, (д)-15 мкм от края.

Фазовая картина в центре образца приведена на рисунке 10а. На МСМ-снимке наблюдаются ярко выраженные неоднородности продольного и эллиптического вида. Наблюдается лабиринтная структура распределения доменов. Их ширина в среднем составляет 2-3мкм. Фазовая картина на расстоянии 5мм от ребра приведена на рис. 10б, по своей структуре данная фазовая картина не отличается от картины в центре образца. Фазовые картины на расстоянии 100, 40 и 15 мкм от края образца приведены на рис. 10в, 10г и 10д, соответственно. Т.к. снимок 10д получен на самом краю образца, то внизу мы можем наблюдать «отрыв» зонда от поверхности

образца и прекращение сканирования. Структура картины на краю образца отличается от картины в центре. Структура выглядит более однородной, вероятно, это связано с ухудшением разрешения микроскопа, так как поле магнита вблизи ребер сильно возрастает, что негативно отражается на качестве изображения. Становятся хуже различимы слабые неоднородности на фоне сильного поля. Тем не менее, размер структуры остается порядка 2,5 мкм.

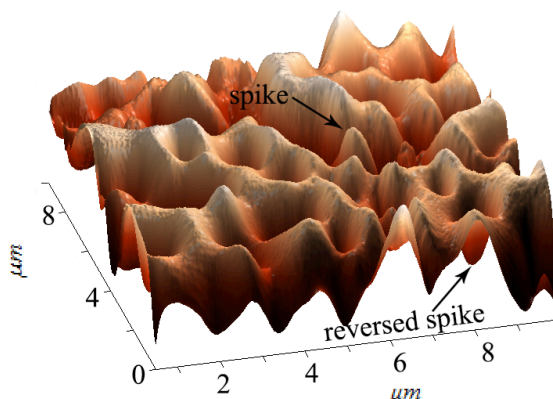


Рисунок 10 е) – Магнитная структура в 3D. Шиповидные домены.

Также на грани, перпендикулярной оси намагничивания, обнаружены шиповидные домены (рис 2 и 3) (Spike Domains) [2,29], обычно возникающие в области дефектов поверхности образца.

На рис. 11 показан снимок рельефа, и соответствующий ему снимок магнитной структуры. На фазовом снимке можно наблюдать магнитную структуру, которая состоит из характерной структуры для аналогичных образцов [2,15,19], но имеются области с полосовой доменной структурой. Полосовая структура характерна для плёнок. Так как наш магнит создаёт сильное поле от 0.5 до 1.5 Тл, подобных доменов просто не должно существовать. Однако мы их наблюдаем.

В нижнем правом углу МСМ-снимка наблюдается большая область (60мкм по оси x, 20мкм по оси y) с полосовой доменной структурой. Судя по топографическому снимку, данной области соответствует некоторое возвышение (более светлое пятно). Можно предположить, что это пятно есть расплющенное зерно. Это зерно является некоторой плёнкой на поверхности массивного магнита. И для тонкой плёнки наблюдается характерная полосовая доменная структура.

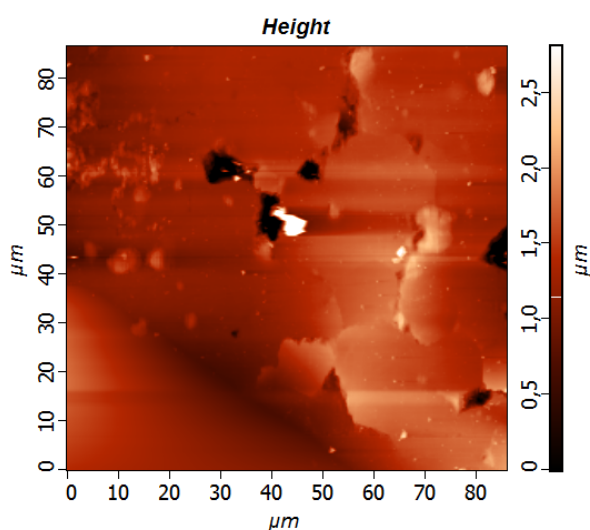


Рисунок 11а - Снимок.  
топологии поверхности.

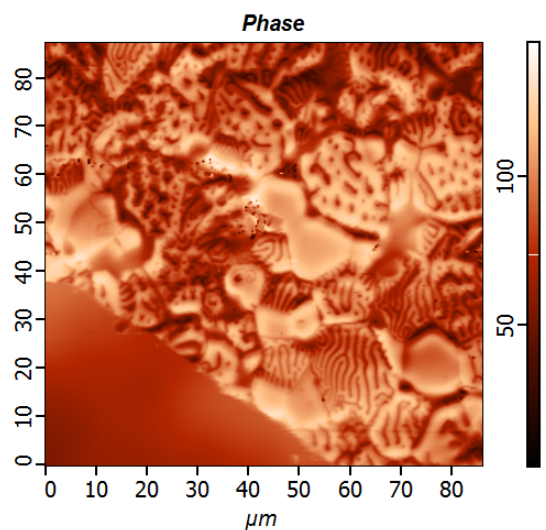


Рисунок 11б- Снимок гсмвз.

### 1.3.2 Образец №1 в намагниченном состоянии.

#### Микромагнитная структура на грани, параллельной ОН

Изучение доменной структуры на поверхности, параллельной ОН, обеспечивает прямую информацию о магнитном выравнивании каждого отдельного зерна вдоль оси Z.

На рисунках 12-17 приведены снимки топологии поверхности и соответствующие им МСМ-снимки. Размер различных на снимках зерен

составляет от 3 до 15 мкм. Необходимо отметить, что на боковой поверхности поле гораздо слабее, чем на поверхности магнита, перпендикулярной ОН. Поэтому, если анизотропия намагничивания зерен действительно высока, то кантилевер может «не почувствовать» границу перехода между соседними магнитными зернами. При допущении, что магнитное вещество намагничено параллельно граням, мелкие зерна не могут быть обнаружены, так как магнитное поле (диполей в цепочке) будет очень слабым (например, поле около плоскости, состоящей из одинаково-направленных диполей, равно нулю, если плоскость бесконечна). Однако вблизи границы магнитных зерен, если имеется «зазор» между зернами, возникает неоднородность магнитного поля, и поэтому такую границу силовой микроскоп может задетектировать, что мы и наблюдаем.

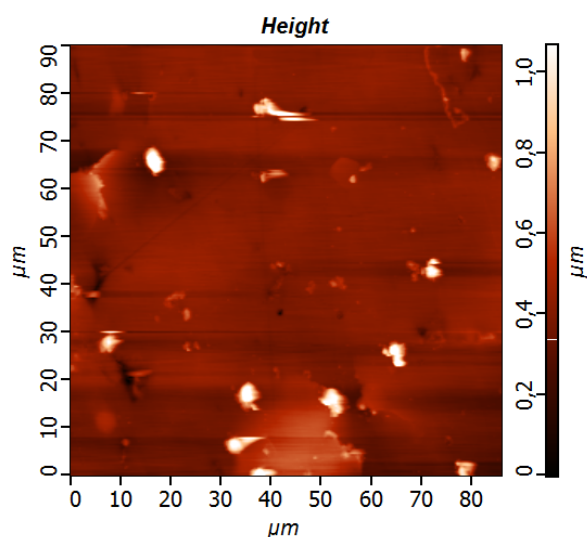


Рисунок 12 -Топология поверхности боковой грани образца 1, 80x80 мкм.

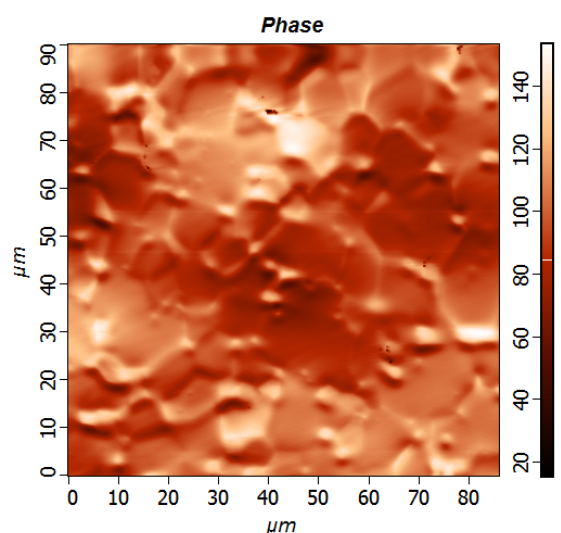


Рисунок 13 - Картина гсмвз боковой грани образца 1.



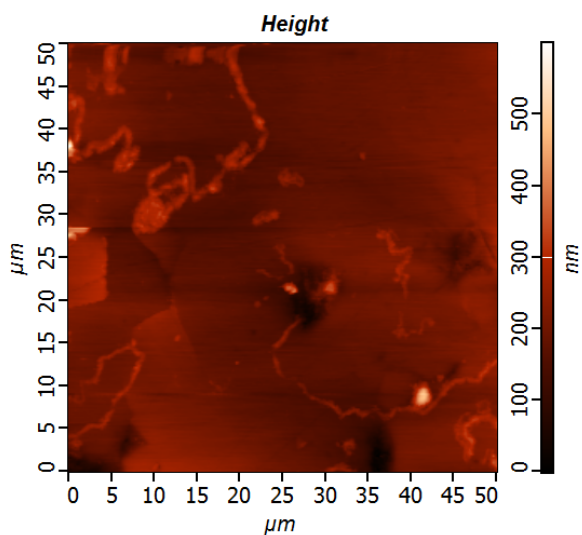


Рисунок 14 -Топология поверхности боковой грани образца 1, 50x50 мкм.

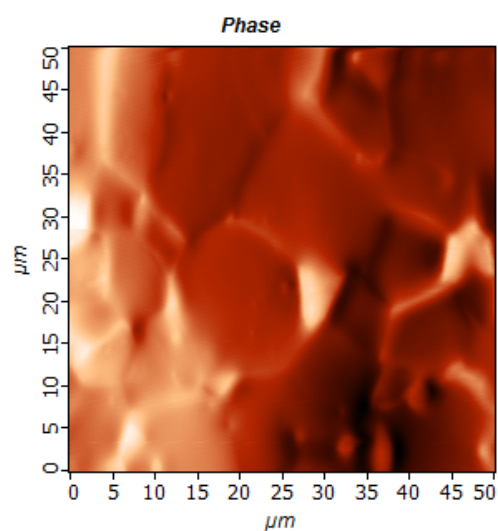


Рисунок 15- Картина гсмвз боковой грани образца 1.

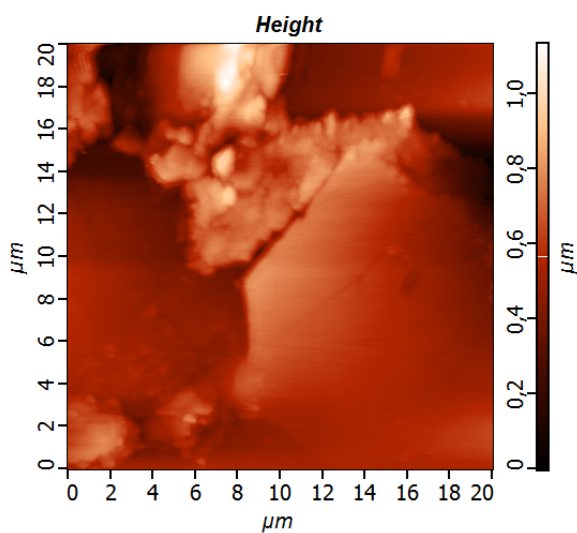


Рисунок 16 -Топология поверхности боковой грани образца 1, 20x20 мкм.

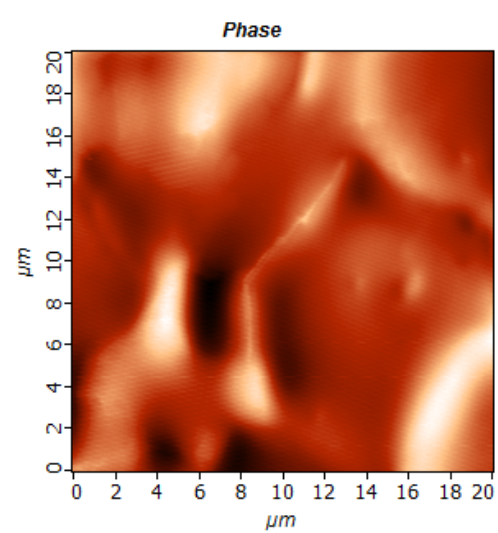


Рисунок 17- Картина гсмвз боковой грани образца 1.

В нижней правой области снимка на рис. 17 видно большое многоугольное зерно с четкими границами, которое при этом видно также на снимке рельефа.

Грань, параллельная оси намагничивания, была просканирована и на самом краю образца (рис. 18). На таких снимках можно наблюдать редкие размагниченные зерна, которые не наблюдаются вдали от края грани. Этот факт, в свою очередь, подтверждает, что остальные зерна намагничены.

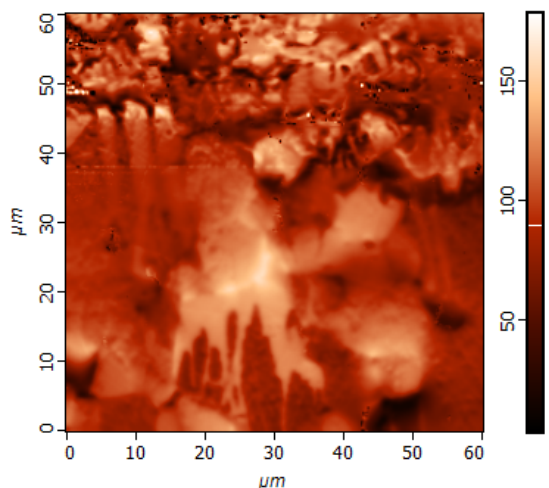


Рисунок 18 - Картина гсмвз на краю грани параллельной ОН, образец №1.

### 1.3.3 Образец №2 в трех состояниях с разной намагниченностью. Микромагнитная структура на грани, перпендикулярной ОН

В работе получены МСМ-снимки на термически размагниченных образцах, а также удалось получить МСМ-снимки для одних и тех же зон в частично намагниченных и намагниченных до насыщения образцах. А именно: образцы №2 и №3 были термически размагничены, просканированы, затем намагничены полем 1.6 Тл, просканированы, затем намагничены полем 4.7 Тл, просканированы в том же месте, что и после намагничивания полем 1.6Тл.

Снимки топологии поверхности и МСМ-снимки, сделанные на размагниченном образце, показаны на рис. 19 (а,б), соответственно.

Снимки топологии поверхности и МСМ-снимки, сделанные на частично намагниченном образце, показаны на рис. 19 (в, г), соответственно. Поле намагничивания 1.6 Тл.

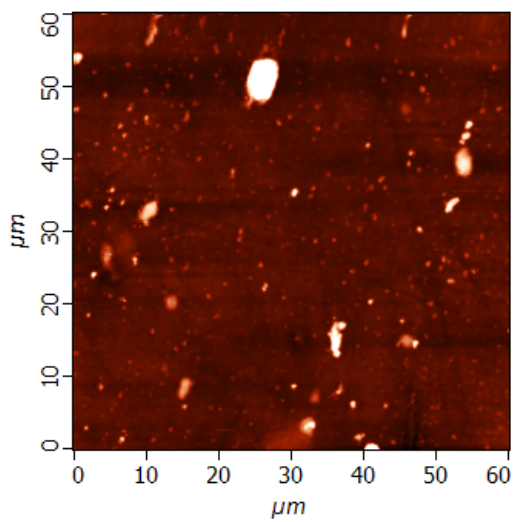
Снимки топологии поверхности и МСМ-снимки, сделанные на намагниченном до насыщения образце, показаны на рис. 19 (д, е), соответственно. Поле намагничивания 4.7 Тл.

Убедиться, что сканирования сделаны в одних и тех же местах можно, посмотрев на снимок топологии. Однако совпадение зон сканирования можно наблюдать и на снимках магнитных структур.

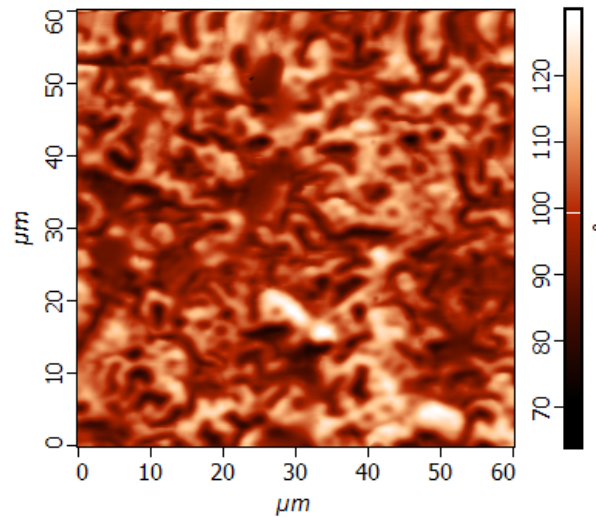
На рис. 19б магнитная картина схожа с магнитной картиной монокристалла  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  [30]. Границы зерен практически неразличимы.

На рис.19 (г, е) магнитные структуры одинаковы. При рассмотрении более подробно этих же снимков (рис. 20(а,б)) хорошо различимы границы зерен. Отдельные зерна, которые выглядят одноцветными, вероятно, намагничены. В других зернах видны другие типы доменных структур или сложные магнитные неоднородности. Вероятно, подобные зерна размагничены. Количество намагниченных зерен на рис. 19е больше в 1.3 раза, если считать по площади занимаемой поверхности.

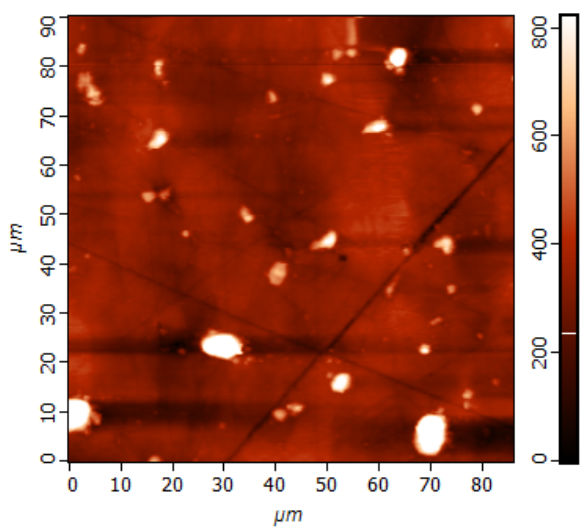
Также, после намагничивания полем 1.6Тл и 4.7Тл, оба раза были измерены намагниченности образцов №2 и №3. В пределах погрешности 3%, намагниченность образцов при домагничивании не изменилась. Можно сделать вывод, что в объеме магнита количество намагниченных зерен не изменилось. То есть структура из размагниченных и намагниченных зерен существует в тонком приповерхностном слое.



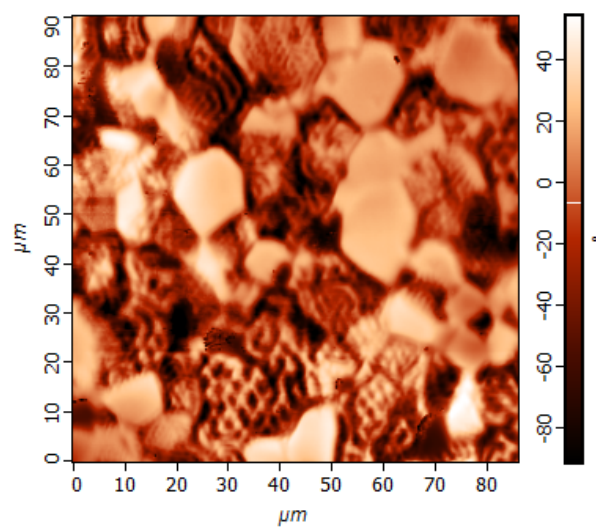
а)



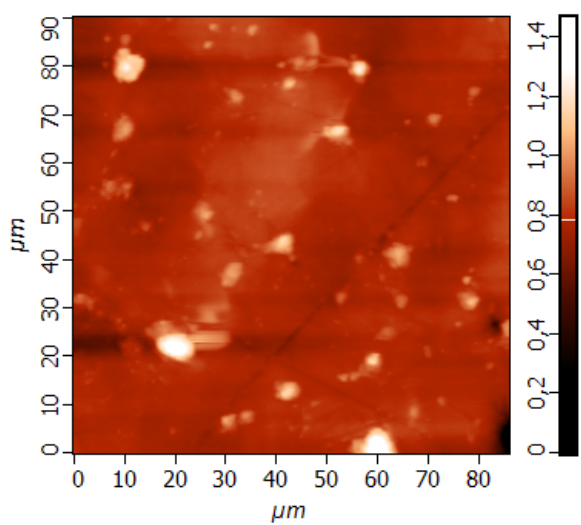
б)



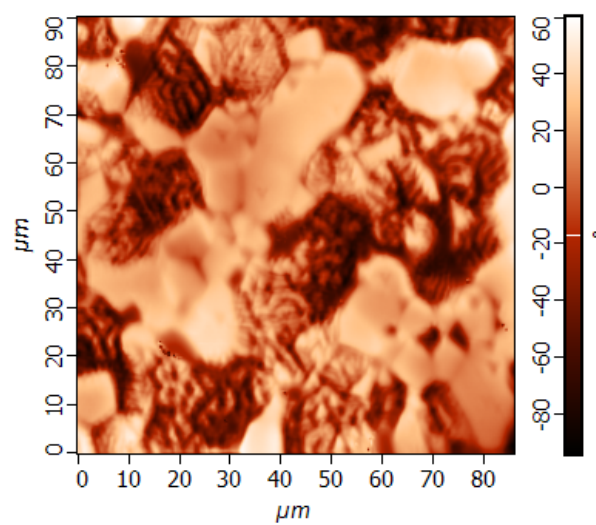
в)



г)



д)



е)

Рисунок 19 - МСМ снимки на образце №2 с различным полем намагничивания.

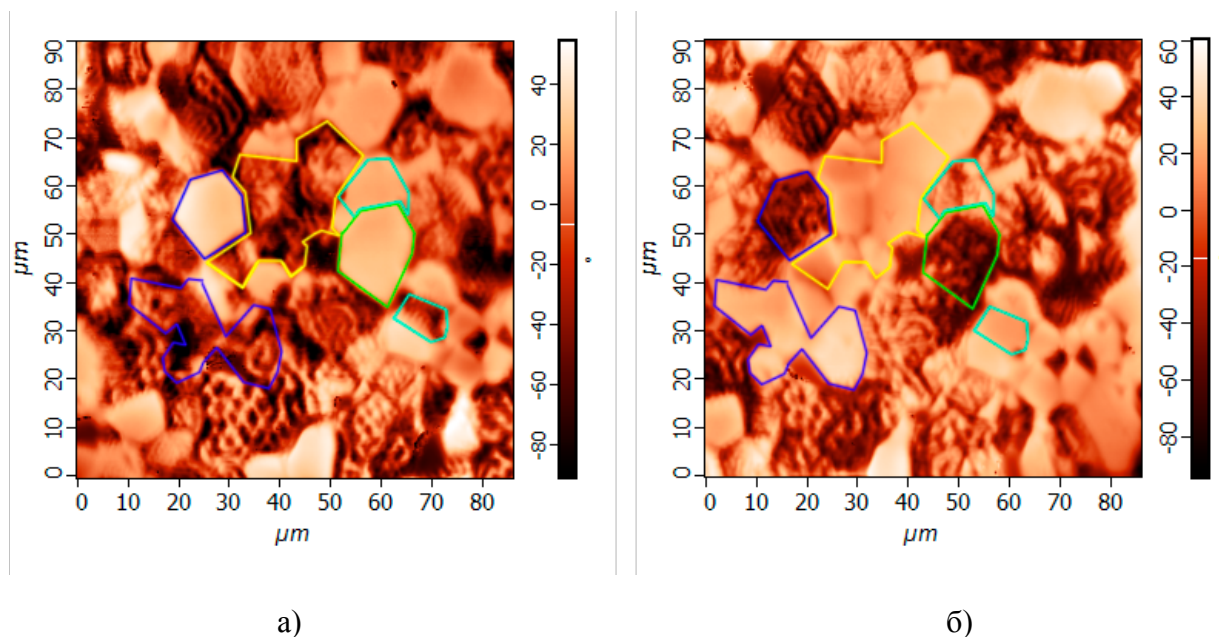


Рисунок 20 - MFM снимки на образце №2 в одном и том же месте. а) поле намагничивания образца: 1.6 Тл. б) поле намагничивания образца 4.7 Тл.

На основании вышеприведенных исследований следует, что при воздействии более сильного поля, число намагниченных зерен на поверхности возрастает. Однако, поверхностная микроструктура не является однородно намагниченной, а имеет сложную квазиполосовую доменную структуру, внутри которой, в отдельных зернах, наблюдается лабиринтная и другие типы микроструктур. То есть достаточно большое количество поверхностных зерен находится в размагниченном состоянии. Следует также отметить, что при домагничивании структура намагниченных зерен меняется нетривиально; некоторые зерна, которые в слабом поле были намагничены, при большем поле оказываются размагничены. Отдельные зерна при домагничивании инвертируют свою намагниченность.

### 1.3.4 Образец №3 в трех состояниях с разной намагниченностью. Магнитная структура на грани, параллельной ОН

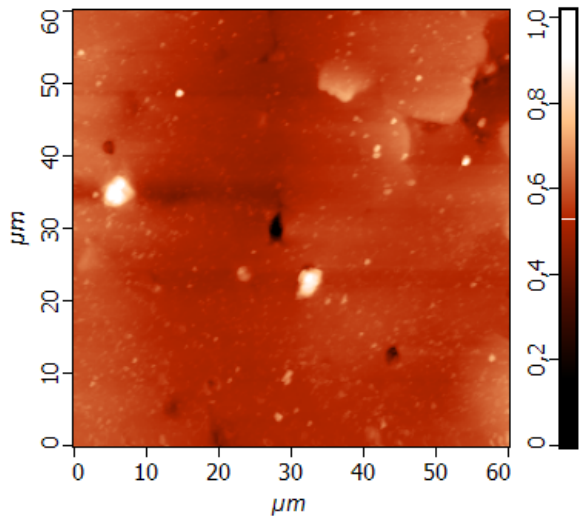
Снимки топологии поверхности и МСМ-снимки, сделанные на размагниченном образце, показаны на рис. 21(а, б), соответственно.

Снимки топологии поверхности и МСМ-снимки, сделанные на частично намагниченном образце, показаны на рис. 21 (в, г), соответственно. Поле намагничивания 1.6 Тл.

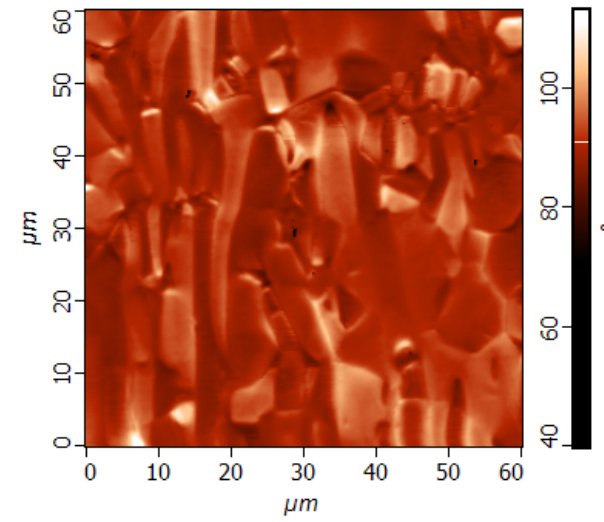
Снимки топологии поверхности и МСМ-снимки, сделанные на намагниченном до насыщения образце, показаны на рис. 21 (д, е), соответственно. Поле намагничивания 4.7 Тл.

Убедиться в том, что сканирования сделаны в одних и тех же местах можно, посмотрев на снимок топологии. Однако совпадение зон сканирования можно наблюдать и на снимках магнитных структур.

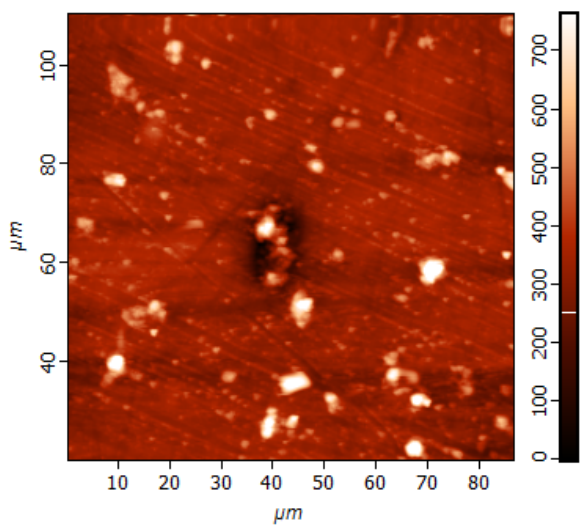
На рис. 21б отчетливо видны сквозные домены, которые проходят через несколько зерен одновременно. Домены выглядят как узкие (~5 мкм) но длинные (~ 10-40 мкм) полосы. ОН направлена вдоль вертикального края рисунка. Это значит, что в размагниченном образце мы наблюдаем домены, вытянутые вдоль ОН.



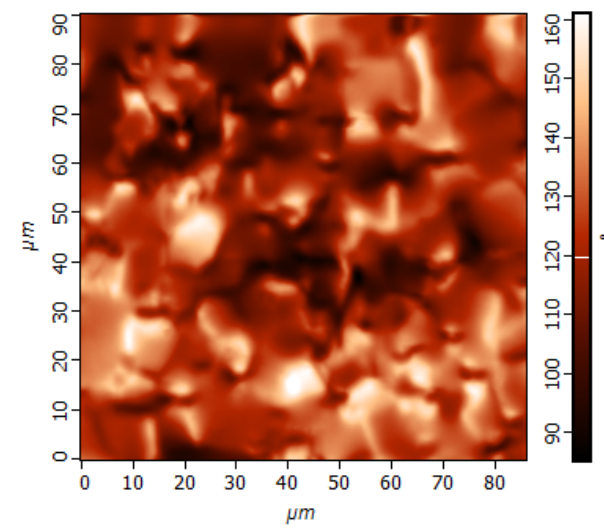
а)



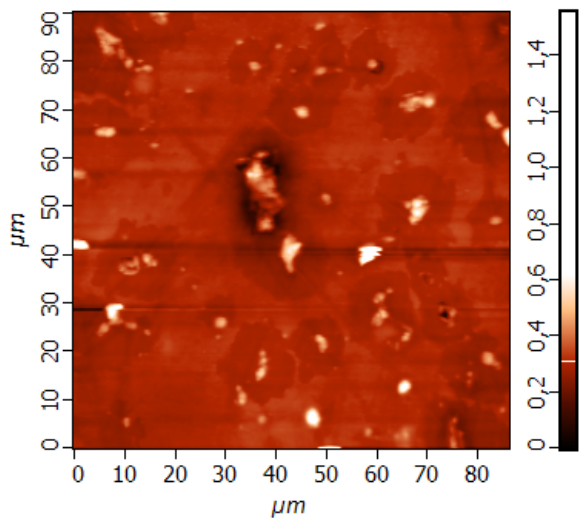
б)



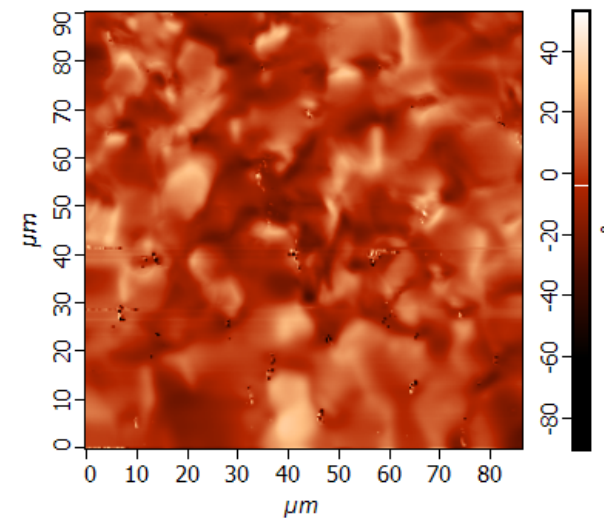
в)



г)



д)



е)

Рисунок 21 - MFM снимки на образце №3 с различным полем намагничивания.

Рассмотрим рис. 21 (г, е). Если не обращать внимания на разную контрастность снимков, то видно, что доменная картина не изменилась. Хорошо просматриваются одни и те же границы зерен в одних и тех же зонах. Следует отметить, что все снимки, представленные на рис. 19 – 21, были получены одним и тем же кантилевером. Однако образец №3 в том же самом месте был позднее просканирован новым кантилевером MFM\_LM. Результат показан на рис. 22.

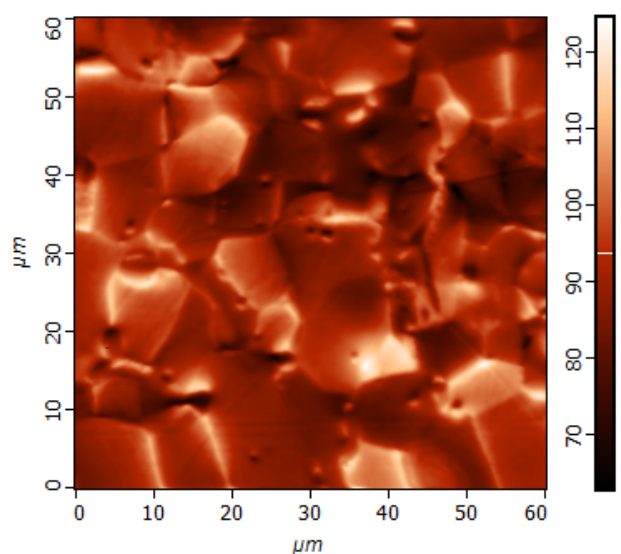


Рисунок 22 - Картина гсмвз на грани параллельной оси намагничивания, образец №3.

Рис. 22, размером 60x60 мкм соответствует области [0:60]x[0:60]мкм на рис. 21е. Разрешение данного снимка существенно выше по сравнению с предыдущим.

#### 1.4 Топология поверхности скола

Любой скол имеет участок с естественной гладкой поверхностью. На образце №1 было произведено исследование микроструктуры поверхности на сколе. На рисунках 23-25 изображена топология поверхности скола. Одновременно наблюдаются два различных типа структуры, первая - в верхней левой области рисунка, и вторая - нижней правой.



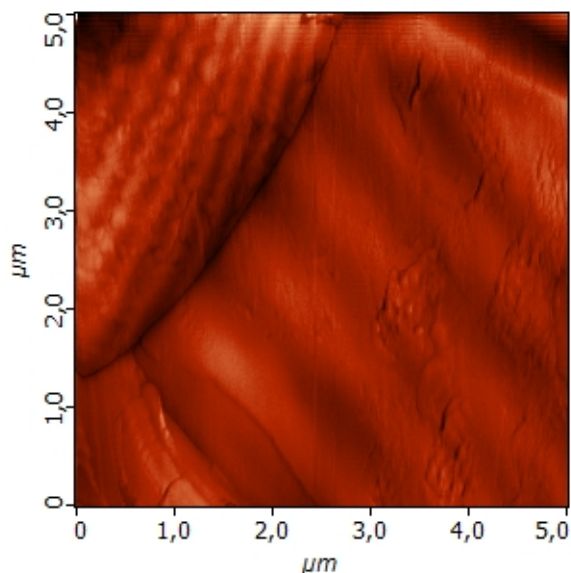


Рисунок 23 – Снимок структуры поверхности образца №1.

Первая структура (рис. 24) скола магнита NdFeB представляет собой периодическую последовательность вытянутых переплетённых нитей с характерным периодом  $\sim 100-200$  нм. Вторая структура (рис. 25) из наслоённых лепестков причудливой формы практически не имеет периодичности в масштабе  $2,5 \times 2,5$  мкм.

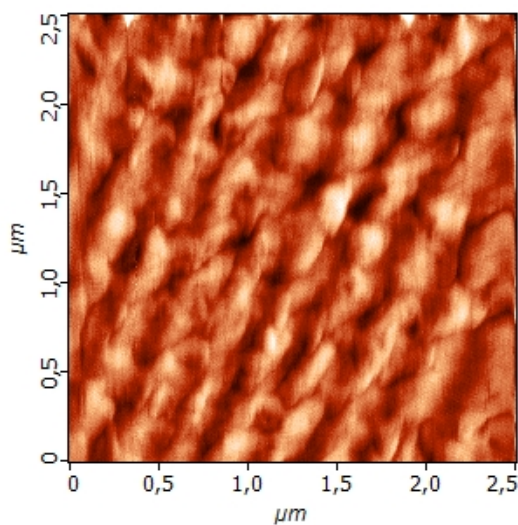


Рисунок 24 – Структура №1.

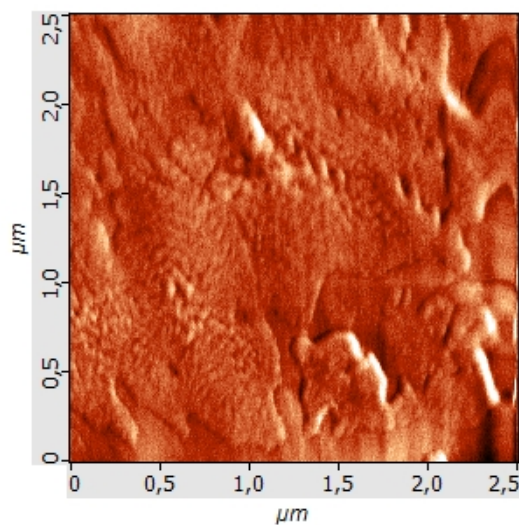


Рисунок 25 – Структура №2.

## 1.5 Модель неоднородно-намагниченного слоя

В части 1.3 были показаны обнаруженные на поверхности МСМ-снимках магнитные неоднородности в поверхностном слое. Исследовалось влияние этого слоя на силу притяжения магнита к ферромагнетику. Теоретические исследования (см часть 2.2) показали, что поверхностный слой зерен на грани, перпендикулярной ОН, даёт существенный вклад в пондеромоторную силу взаимодействия магнита со своим «изображением», например, в стальной пластинке. Для экспериментальной проверки влияния неоднородности намагниченности верхнего слоя на пондеромоторную силу притяжения был проведен следующий эксперимент.

Брали неодимовый магнит правильной формы (5x5x6 мм). Из достаточно тонкой пластинки вырезали два одинаковых по форме кусочка и в одной из пластинок делали отверстия так, чтобы площадь пластинки, занимаемая отверстиями, была сравнима с оставшейся площадью пластинки (рис. 26). В нашем случае толщина пластинок – 220 мкм.

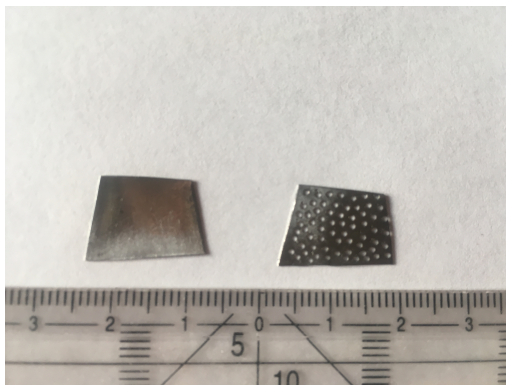


Рисунок 26 - Пластины для моделирования искусственного неоднородно-намагниченного слоя.

Далее располагаем магнит и пластинки, как на схеме (рис. 27). Получается «сэндвич», слои которого расположены в следующем порядке:

- 1) магнит
- 2) стальная пластинка №2, моделирующая однородно/неоднородно

намагниченный слой

3) стальная пластина, к которой примагничивается пластина №2.

Толщина пластин №2 и №3 одинакова.

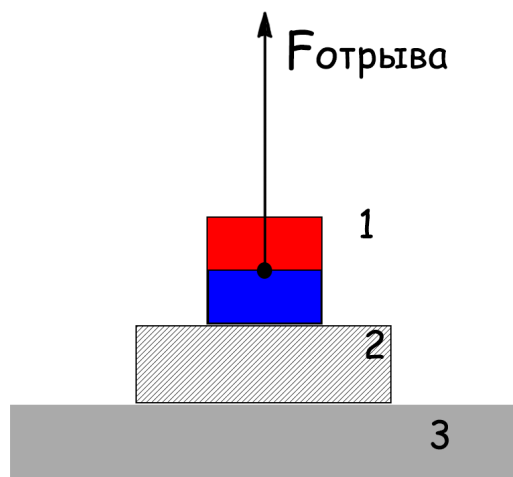


Рисунок 27 - Схема эксперимента «магнитной адгезии».

Далее, измеряем силу (силу магнитной адгезии), которую необходимо приложить, чтобы оторвать магнит от подложки. Если пластина №2 сплошная, без отверстий, то грамм-сила, необходимая для отрыва магнита составила  $220 \pm 5$  гр. Для пластины с неоднородностями (отверстиями), грамм-сила составила  $270 \pm 6$  гр.

В нашем случае диаметр отверстий в пластинке №2 - 0.6мм, На площадь 5x5 мм приходится 9 отверстий.

Был также проведен эксперимент по измерению зависимости силы магнитной адгезии от расстояния. Для этого между пластинами 2 и 3 помещали прослойку из листов бумаги. Плотность бумаги составляет  $80 \text{ г/м}^2$ . 6 слоев бумаги имеют толщину  $\sim 500$  мкм.

Кол-во листов бумаги	Сила магнитной адгезии для неоднородной пластины, гр	Сила магнитной адгезии для однородной пластины, гр
0	265	220
3	180	165
4	157	150
5	151	146

Таблица 1 – Зависимость силы «магнитной адгезии» от расстояния до «изображения».

В результате данного эксперимента подтверждается предположение о том, что эффект увеличения силы притяжения из-за неоднородностей должен пропадать с увеличением расстояния между пластинами №2 и №3. Следует отметить, что сила отрыва резко уменьшается, если угол между  $\vec{F}_{\text{отрыва}}$  и плоскостью пластин не равен 90 градусов. Из-за этого, погрешность результатов эксперимента в табл. 1 может быть существенной. Однако видно, что вклад неоднородностей уменьшается.

## ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МИКРОМАГНИТНЫХ СТРУКТУР

### 2.1 Модель однородно намагниченного параллелепипеда

Для начала рассмотрим простейшую модель. В рамках модели магнит состоит из одинаковых шарообразных зерен. Каждое зерно является магнитным диполем и все диполи ориентированы в одну сторону, для достижения максимальной намагниченности. Возьмем радиус  $r$  зерна равным 1 мкм, и упорядочим зерна в виде объемно-центрированной решетки (рис. 28). Период решетки  $a$  выберем таким образом, чтобы зерна касались друг друга.

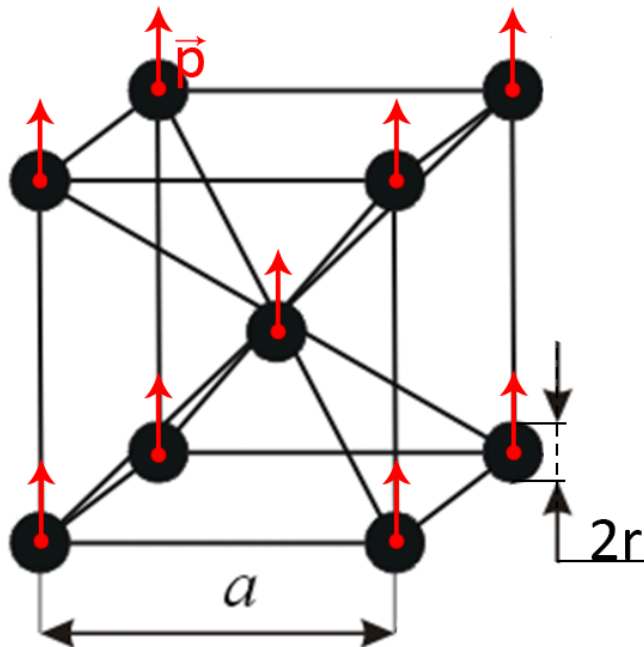


Рисунок 28 - Модель кристалла.

Магнитный момент каждого зерна определен таким, чтобы намагниченность всего кристалла-магнита равнялась намагниченности такого же по размеру и объему однородного магнита.

$$a = r * \frac{4}{\sqrt{3}} = 2,3 \text{ мкм}, \quad (1)$$

$$P = \frac{MV}{N}, \quad (2)$$

где N-количество шаров в кристалле,  $4\pi M=1,31$  кЭ [10].

Из таких диполей была составлена модель кубического магнита-кристалла (рис. 29). Длина стороны куба равна девяти периодам решетки, то есть магнит состоит из 10x10x10 слоев зерен в каждом направлении.

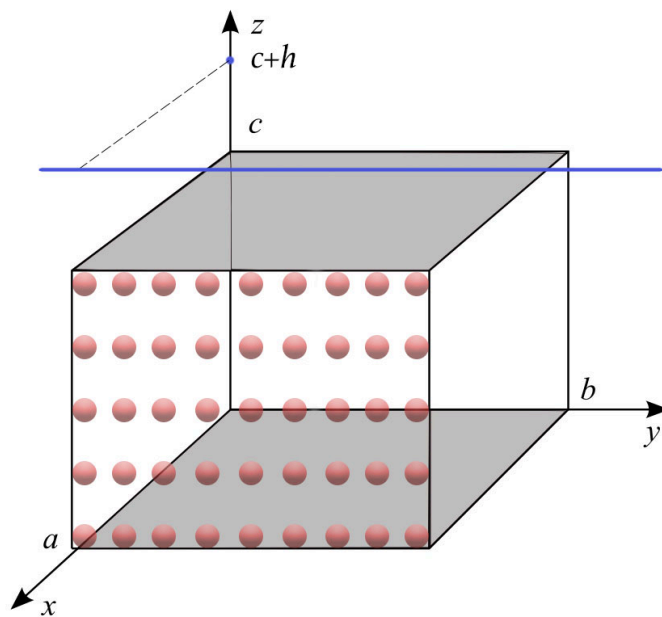


Рисунок 29 - Модель магнита.

Поле магнитного диполя  $\vec{p}$  в статике:

$$\vec{H}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi} \left( \frac{3(\vec{p}, \vec{r})}{r^5} - \frac{\vec{p}}{r^3} \right). \quad (3)$$

Тогда поле от кристалла из диполей:

$$\vec{H}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi} \sum_i \frac{3(\vec{p}, (\vec{r} - \vec{r}_i))}{(\vec{r} - \vec{r}_i)^5} - \frac{\vec{p}}{(\vec{r} - \vec{r}_i)^3}, \quad (4)$$

где  $\vec{r}_i$  - радиус вектор из начала координат в центр зерна-диполя.

Тогда  $H_z$  от кристалла в нашем случае:

$$\begin{aligned} H_z(\vec{r}) = & \\ = & \frac{1}{4\pi} \sum_{i=0}^9 \sum_{j=0}^9 \sum_{k=0}^9 \frac{3(p_x * (r_x - i * a) + p_y * (r_y - j * a) + p_z * (r_z - i * a))}{((r_x - i * a)^2 + (r_y - j * a)^2 + (r_z - k * a)^2)^{5/2}} \\ & - \frac{p_z}{((r_x - i * a)^2 + (r_y - j * a)^2 + (r_z - k * a)^2)^{3/2}} \\ + & \frac{1}{4\pi} \sum_{i=0}^8 \sum_{j=0}^8 \sum_{k=0}^8 \frac{3(p_x * (r_x - i * a - \frac{a}{2}) + p_y * (r_y - j * a - \frac{a}{2}) + p_z * (r_z - i * a - \frac{a}{2}))}{((r_x - i * a - \frac{a}{2})^2 + (r_y - j * a - \frac{a}{2})^2 + (r_z - k * a - \frac{a}{2})^2)^{5/2}} \\ & - \frac{p_z}{((r_x - i * a - \frac{a}{2})^2 + (r_y - j * a - \frac{a}{2})^2 + (r_z - k * a - \frac{a}{2})^2)^{3/2}}, \quad (5) \end{aligned}$$

где  $a$  – параметр решетки. Первая сумма – расчетное значени поля, создаваемого зернами, расположенными в угла объемо-центрированной решетки Браве. Вторая сумма – подсчет поля от зерен, расположенных в центре решетки Браве.

Поле однородной намагниченной модели точно описывает наш магнит, если бы его измеряли с помощью датчика Холла[10,11,12]. Сравним  $H_z$  от нашей модели с  $H_z$  от однородно намагниченной модели [11,12]. Для этого были построены графики  $H_z$  вдоль прямой, отмеченной синим цветом на рис. 29. Прямая проведена “над” магнитом на расстоянии  $h$ , параллельно оси  $y$ ,

через середину магнита по оси  $x$ . Графики построены для  $h=20r$ ,  $h=10r$  и  $h=r$ , и показаны на рис. 30, 31 и 32, соответственно. Зеленым цветом показан график для однородно намагниченной модели. Красным цветом построен график для кристалла.

При большом  $h = 20$  мкм, графики совпадают (рис. 30).

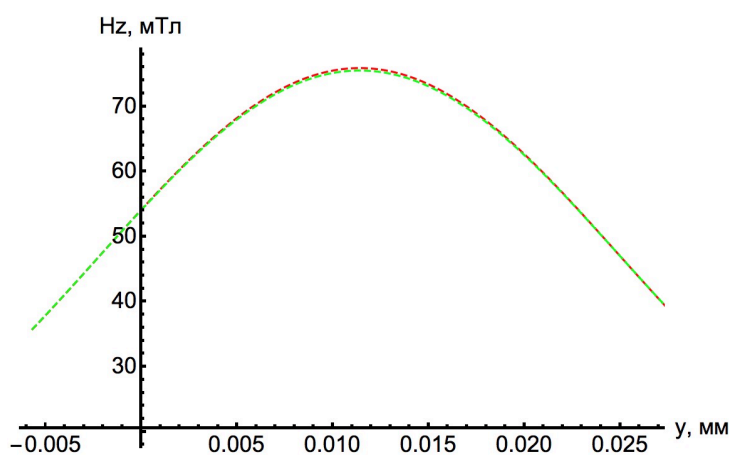


Рисунок 30 - Сравнение моделей при  $h=20$  мкм.

При уменьшении  $h$  появляются небольшие осцилляции поля от кристалла вдоль оси  $y$ . Рис. 31 -  $h = 10$  мкм.

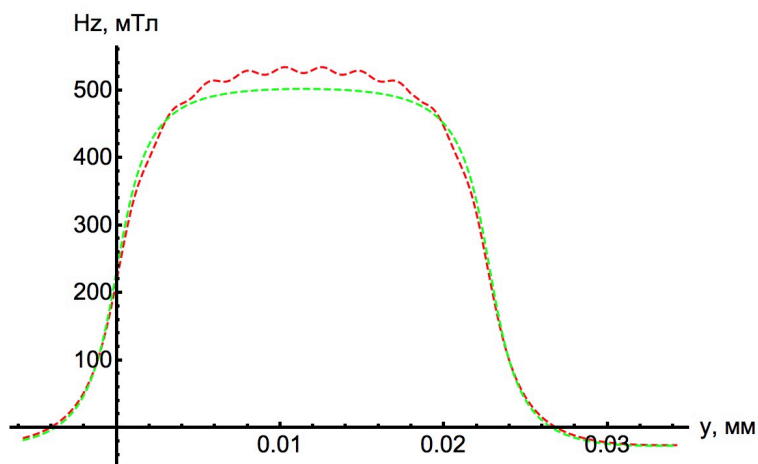


Рисунок 31 - Сравнение моделей при  $h=10$  мкм.



При  $h = 1$  мкм, поле от кристалла осциллирует (рис. 32). Но среднее поле кристалла совпадает с полем однородной модели.

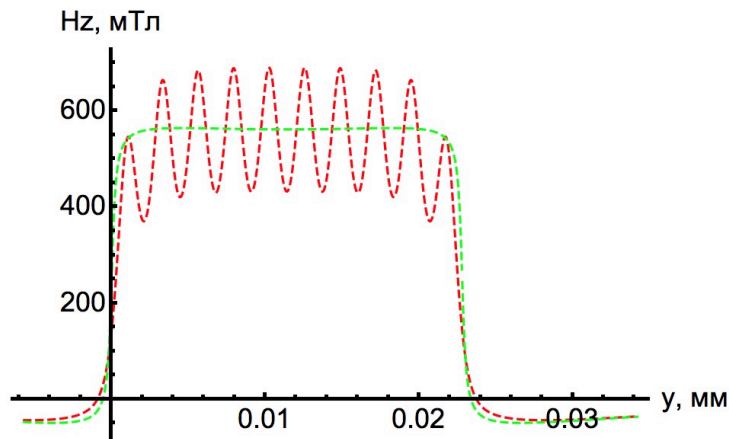


Рисунок 32 - Сравнение моделей при  $h=1$  мкм.

На основании вышепредставленных результатов можно сделать вывод о том, что обе модели применимы уже при  $h > 10$  радиусов разбиения.

Второй вывод — в любом реальном образце должны наблюдаться неоднородности поля при параметре  $h$  достаточно маленьком. Неоднородности могут быть связаны например с неоднородностью распределения магнитного вещества, либо с неоднородностью намагниченности.

Третий вывод — основной вклад в поле на палых расстояниях даёт именно ближайший магнитный слой [32].

## 2.2 Численная модель двумерных кластеров

Рассмотрим поле магнитного диполя 1 на рис. 33. Дипольный момент диполя сонаправлен с осью  $Z$ . Как известно, силовые линии выходят из северного полюса диполя, и по замкнутым линиям возвращаются в южный полюс. Область координат  $Z > 0$  разбита на три подобласти: левая (в которой находится диполь 2), центральная (в которой находится диполь 3) и правая (в

которой находится диполь 4). В центральной области проекция поля диполя 1 на ось  $Z$  положительна, а в левой и правой областях – отрицательна.

Рассмотрим диполь 3 в поле диполя 1. Проекция поля диполя 1 сонаправлена с осью  $Z$ , диполь 3 тоже сонаправлен с осью  $Z$ . Значит, проекция на ось  $Z$  силы  $F_{13}$ , действующей на диполь 3 со стороны диполя 1, отрицательна. Т.е.  $F_{z13}$  направлена к плоскости  $xy$ . С диполями 2 и 4 дело обстоит наоборот. В левой и правой областях пространства проекция поля, создаваемого диполем 1, противоположно направлена с осью  $Z$ . Значит  $F_{z12}$  и  $F_{z14}$  направлены от плоскости  $xy$ .

Таким образом, в области пространства  $Z > 0$ , относительно диполя 1, для любого диполя, сонаправленного с диполем 1, есть некоторый угол, внутри которого диполь притягивается к плоскости  $xy$ , вне угла – отталкивается от  $xy$ . Этот угол на рис. 33 обозначен красным цветом. Если же вместо диполей 2, 3 и 4 была бы бесконечная равномерно намагниченная плоскость (проходящая через центры диполей, параллельно плоскости  $xy$ ), то сила притяжения диполя 1 к данной плоскости была бы равна нулю, так как сила отталкивания от намагниченной плоскости в области вне угла полностью компенсирует силу притяжения внутри угла.

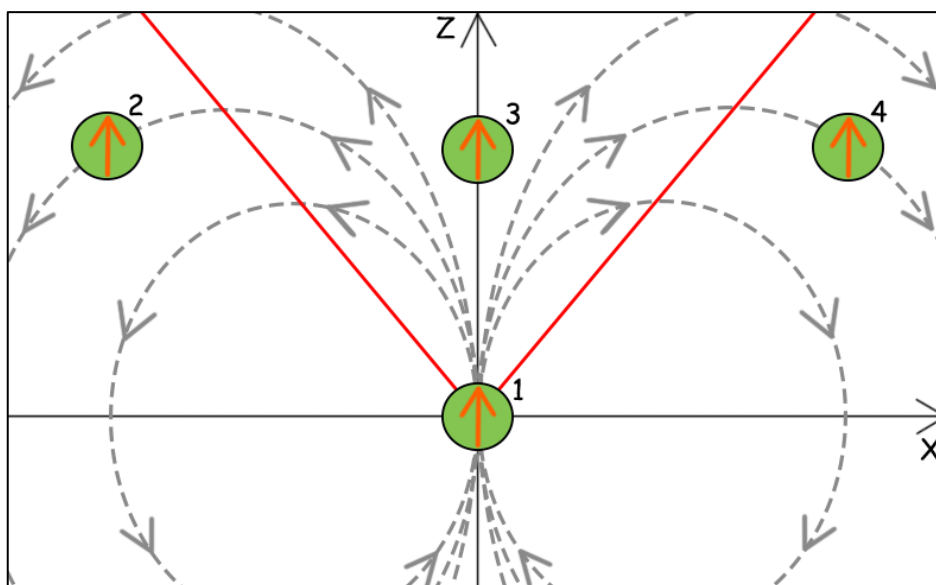


Рисунок 33 - Диполи 2,3 и 4 в поле диполя 1.

Рассмотрим теперь одинаково намагниченные квадратные кластеры диполей, равномерно распределенные в квадратной области, рис. 34. Размер рис. 34 - 63x63 пикселя. Каждый черный пиксель представляет собой магнитный диполь, намагниченный перпендикулярно плоскости рисунка. Значит, на рис. 34 - 25 кластеров, каждый из которых состоит из 36ти диполей. Итого 900 диполей.

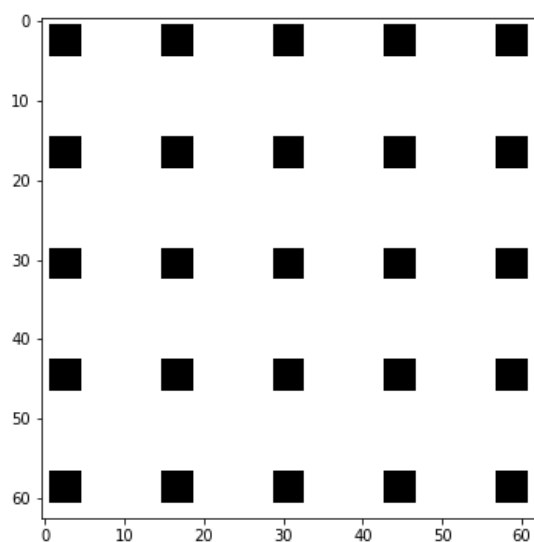


Рисунок 34 - Кластеры диполей.

Допустим, что над этим слоем диполей расположен еще один такой же слой диполей, намагниченных в ту же сторону, рис. 35.

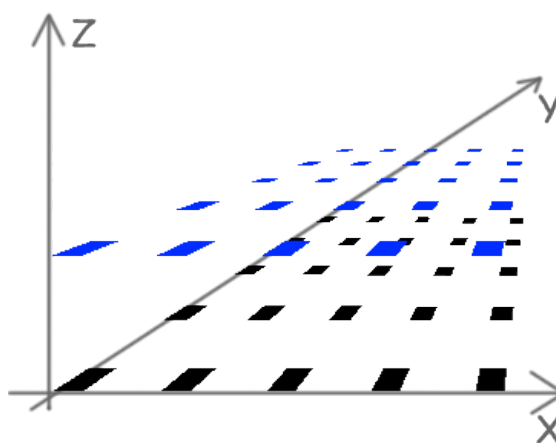


Рисунок 35 - Две плоскости кластеров диполей.

Зададим следующие параметры системы: ширина одного пикселя изображения = 100мкм, дипольный момент одного диполя равен дипольному моменту параллелепипеда с основанием 100x100 мкм, высотой 225 мкм и намагниченностью 0.8Тл, расстояние между слоями: 40мкм. Теперь, для такого случая, посчитаем силу притяжения одной плоскости диполей, к другой в зависимости от расстояния между кластерами. Силу будем считать как сумму сил взаимодействий каждого диполя одной плоскости с каждым диполем второй плоскости. Для уменьшения времени вычисления, оставим в верхней плоскости только один, центральный кластер, а величину силы взаимодействия будем умножать на количество кластеров нижнего слоя.

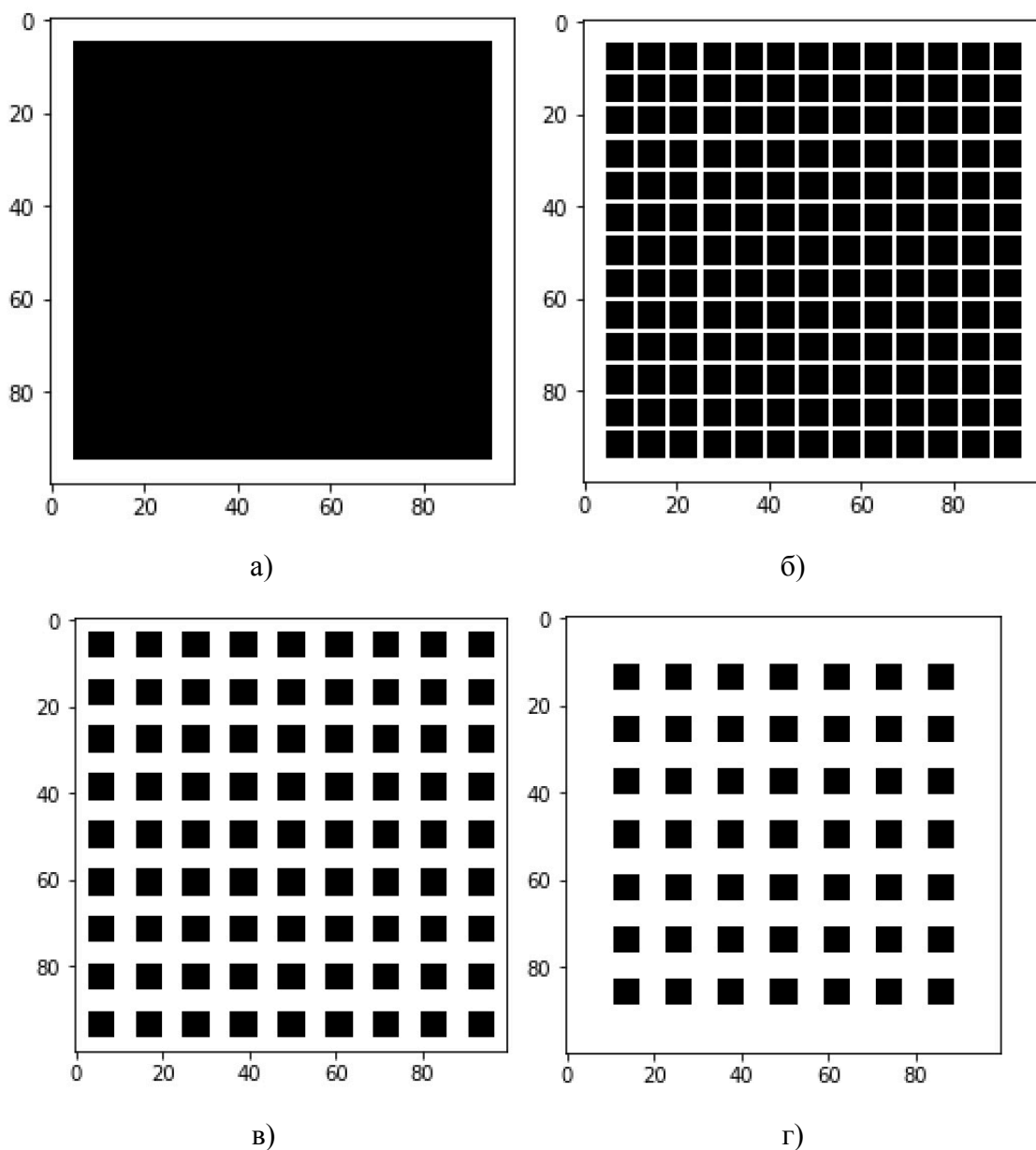


Рисунок 36 - Уменьшение намагниченности нижнего слоя кластеров диполей.

Однако основная задача данного моделирования – получить зависимость силы взаимодействия плоскостей диполей при фиксированном размере изображения, в зависимости от доли намагниченности. То есть от отношения  $\frac{l^2}{(l+d)^2}$ , где  $l$  – ширина кластера,  $d$  – расстояние между кластерами. На рис. 36 (а, г) показано постепенное уменьшение намагниченности нижнего

слоя кластеров. А именно: изначально все изображение было заполнено кластерами 6x6 пикселей, с нулевым расстоянием между кластерами. Далее, генерируется следующее изображение - с расстоянием между кластерами в 1 пиксель. Так, увеличивая это расстояние каждый раз на 1 пиксель, генерируем изображения до тех пор, пока не останется всего 1 кластер (центральный). Далее, для каждого изображения высчитывается доля намагниченности поверхности и сила взаимодействия с верхним слоем. Для силы считается только одна компонента, направленная вдоль оси Z.

Зависимость силы взаимодействия плоскостей от доли намагниченности плоскостей показана на рис. 37. Из графика очевидно, что наибольшая сила взаимодействия получается при намагниченности 40-60% площади поверхности.

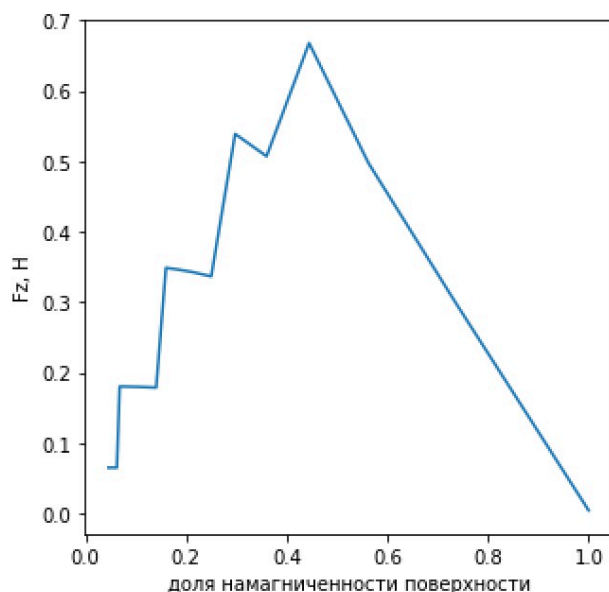


Рисунок 37 - Зависимость проекции силы взаимодействия плоскостей от доли намагниченности поверхностей.

### 2.3 Модель неоднородной пластинки

Теперь, когда есть такой инструмент, как кластерная модель, интересно оценить рассмотренную в части 1.5 разницу сил взаимодействий неоднородно-намагниченной пластинки и однородно намагниченной.

Неоднородно намагниченную пластинку можно рассматривать как однородно намагниченную пластину с вставками на месте дыр-неоднородностей. Вставки есть дополнительные противоположно намагниченные элементы той же формы, что и отверстия. На рис. 38 сверху схематично изображена вертикально намагниченная пластинка с неоднородностями в виде пустот (размагниченных областей). На рисунке снизу изображена система с такой же намагниченностью, однако она состоит из одной большой полностью намагниченной пластины и трех неоднородностей, противоположно намагниченных. Если рассматривать силы притяжения таких пластин к своему изображению, то такие силы будут одинаковы.

Сила притяжения к своему изображению пластины с неоднородностями равна силе притяжения однородной пластины к самой себе плюс сила притяжения дополнительных вставок к самим себе. Иначе говоря, разница в силе взаимодействий двух систем на рис. 38 со своими изображениями равна силе взаимодействия дополнительных вставок со своими изображениями.

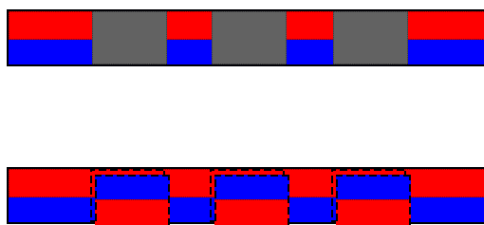


Рисунок 38 - Неоднородно намагниченные пластинки.

В части 1.5 на площадь основания намагничивающего магнита приходилось 9 отверстий неоднородной пластинки. Диаметр отверстий равен 0.6мм, среднее расстояние между отверстиями - порядка 1 мм. Для оценки силы взаимодействия неоднородностей, смоделируем отверстия в виде квадратных кластеров, шириной 600мкм и с расстоянием между кластерами – 1мм (см. рис. 39). Поместим кластеры на половину толщины неоднородностей, то есть в центр отверстий. Тогда расстояние между взаимодействующими слоями кластеров будет равно толщине пластины, то есть 225мкм.

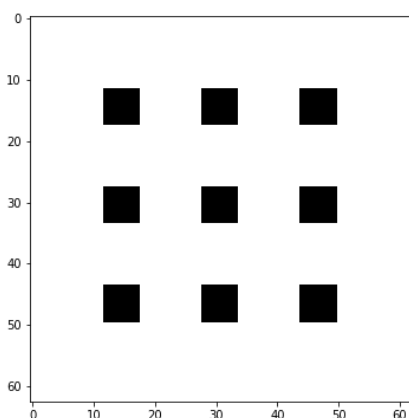


Рисунок 39 - Кластерная модель неоднородностей.

Для такой конфигурации численные расчеты показывают грамм-силу 6.4 гр. В эксперименте же, разница грамм-силы взаимодействий получилась порядка 40 гр.

Такая большая разница в моделировании и эксперименте может быть связана с тем, что надо кластеризовать не только в плоскости, но и в объеме. Если кластеризовать в объеме, то появятся диполи, расстояние от которых до собственных изображений гораздо меньше, а так как сила магнитного взаимодействия обратно пропорциональна расстоянию, то это играет существенную роль.



Кластеризация в объеме будет показана в следующей части, но, забегая вперед, можно сказать что при трехмерной кластеризации моделируемая сила взаимодействия неоднородностей увеличивается.

## 2.4 Численная модель трехмерных кластеров

Трехмерная кластеризация или кластеризация в объеме не сильно отличается от двумерной. В случае двумерной кластеризации, двумерный кластер помещался на половину высоты образца. В случае трехмерной кластеризации: берется двумерный кластер, выбирается число  $N$  - степень кластеризации по оси  $Z$  (по сути количество слоев), уменьшается дипольный момент каждого диполя в  $N$  раз, по сравнению с двумерным случаем. Далее моделируем  $N$  двумерных кластеров на высотах

$$\frac{H}{2N} * (1 + 2 * n), \quad (6)$$

где  $n$  - номер слоя двумерного кластера,  $H$  – толщина пластины. Таким образом, трехмерный кластер – это  $N$ -слойный двумерный кластер.

В зависимости от параметра  $N$ , грамм-сила взаимодействия трёхмерных кластеров получается от 6гр до 70гр.

## 2.5 Аналитическая формула для энергии взаимодействия кубических магнитов

В работе [33] получено выражение для поля, создаваемого однородно намагниченным кубом. Воспользуемся этой формулой чтобы посчитать энергию одного однородно намагниченного куба в поле второго, такого же по характеристикам, куба. Кубы намагничены вдоль оси  $z$  и расположены один над другим со сдвигом на расстояние  $d$  (рис. 40).

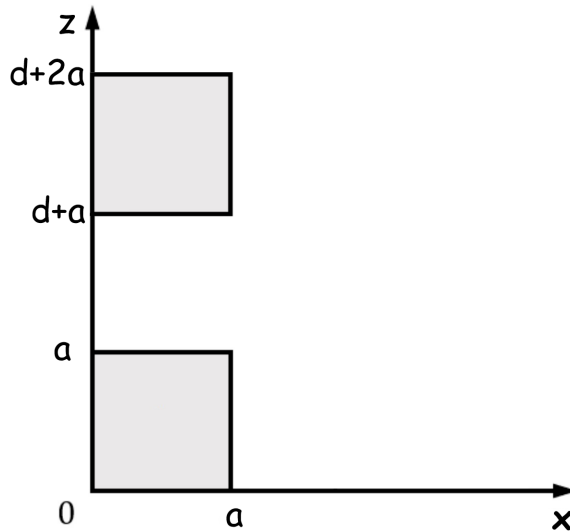


Рисунок 40 - Расположение кубов.

Энергия диполя во внешнем магнитном поле определяется выражением

$$W = -(\vec{p}_m * \vec{B}), \quad (7)$$

дипольный момент элемента куба равен

$$d\vec{p}_m = \vec{M}dV. \quad (8)$$

Энергия элемента куба, с учетом того, что намагниченность  $\vec{M}$  направлена вдоль оси z, равна

$$dW = -(\vec{M} \cdot \vec{B}) = -M B_z. \quad (9)$$

Тогда, для вычисления полной энергии одного куба в поле второго, необходимо вычислить интеграл по объему

$$W = - \int B_z dp_{mz} = -|\vec{M}| \int_V B_z dV = -|\vec{M}| \iiint_V B_z dx dy dz, \quad (10)$$

где  $B_z$  - проекция индукции магнитного поля, создаваемого вторым кубом в объеме первого, где  $V$  – объем куба.

Тогда,

$$B_z = |\vec{M}| \cdot \operatorname{arctg} \left( \frac{uv}{\omega \sqrt{u^2 + v^2 + \omega^2}} \right) \Big|_{u=-x}^{u=a-x} \Big|_{v=-y}^{v=a-y} \Big|_{\omega=-z}^{\omega=a-z}; \quad (11)$$

$$W = -|\vec{M}| \int_0^a dx \int_0^a dy \int_{d+a}^{d+2a} dz B_z, \quad (12)$$

где  $d$  – расстояние между кубами.

Полученный интеграл можно свести к общему, а с помощью общего, путем многочисленных замен, рассчитать исходный:

$$\begin{aligned} I(u, v, w) &= \int du \int dv \int d\omega \operatorname{arctg} \left( \frac{uv}{\omega \sqrt{u^2 + v^2 + \omega^2}} \right) = \\ &= \int dv \int d\omega \left[ u \cdot \operatorname{arctg} \left( \frac{uv}{\omega \sqrt{u^2 + v^2 + \omega^2}} \right) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{\omega}{2} \cdot \ln \left( \frac{\sqrt{u^2 + v^2 + \omega^2} + v}{\sqrt{u^2 + v^2 + \omega^2} - v} \right) \right] = \\ &= \int d\omega \left[ -\omega \sqrt{u^2 + v^2 + \omega^2} + uv \cdot \operatorname{arctg} \left( \frac{uv}{\omega \sqrt{u^2 + v^2 + \omega^2}} \right) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{u\omega}{2} \cdot \ln \left( \frac{\sqrt{u^2 + v^2 + \omega^2} + u}{\sqrt{u^2 + v^2 + \omega^2} - u} \right) + \frac{v\omega}{2} \cdot \ln \left( \frac{\sqrt{u^2 + v^2 + \omega^2} + v}{\sqrt{u^2 + v^2 + \omega^2} - v} \right) \right] = \\ &= \frac{(u^2 + v^2 - 2\omega^2)\sqrt{u^2 + v^2 + \omega^2}}{6} + \\ &\quad + uv|\omega| \arcsin \left( \frac{uv}{\sqrt{\omega^2(u^2 + v^2 + \omega^2) + u^2v^2}} \right) + \\ &\quad + \frac{1}{4} u(\omega^2 - v^2) \ln \left( \frac{\sqrt{u^2 + v^2 + \omega^2} + u}{\sqrt{u^2 + v^2 + \omega^2} - u} \right) + \\ &\quad + \frac{1}{4} v(\omega^2 - u^2) \ln \left( \frac{\sqrt{u^2 + v^2 + \omega^2} + v}{\sqrt{u^2 + v^2 + \omega^2} - v} \right). \end{aligned} \quad (13)$$

С учетом подстановок, окончательное выражение для энергии:

$$\begin{aligned}
 W(d) = & -\bar{M}^2(4I(d, 0,0) - 4I(d, a, 0) - \\
 & -4I(d, 0, a) + 4I(d, a, a) - \\
 & -8I(d + a, 0,0) + 8I(d + a, a, 0) + \\
 & +8I(d + a, 0, a) - 8I(d + a, a, a) + \\
 & +4I(d + 2a, 0,0) - 4I(d + 2a, a, 0) - \\
 & -4I(d + 2a, 0, a) + 4I(d + 2a, a, a)).
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

Зависимость силы взаимодействия первого куба со вторым была посчитана при помощи пакета Mathematica:

$$F_z(d) = -\frac{\partial}{\partial d} W(d).
 \tag{15}$$

## 2.6 Сравнение силы взаимодействия кластеров с аналитической формулой.

Для сравнения силы взаимодействия кубов, вычисленной методом кластерного разбиения, с силой, вычисленной по аналитической формуле, были смоделированы кубы шириной 500мкм, и намагниченностью 0.5 Тл. Для удобства сравнения, на графиках взаимодействия кубов дополнительно построена зависимость силы взаимодействия двух диполей. Дипольный момент каждого диполя равен дипольному моменту куба. Геометрически каждый диполь помещен в центр куба. Зависимость взаимодействия диполей на каждом из графиков одинаковая, что удобно для сравнения.

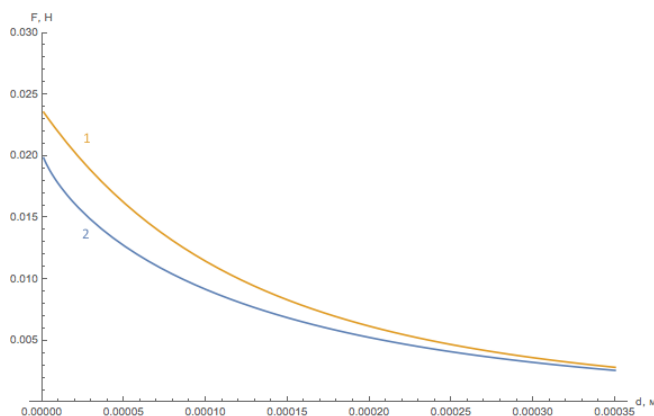


Рисунок 41 - Зависимость силы взаимодействия от расстояния диполей (1) и однородно намагниченных кубов(2).

На рис. 41 и 42 представлены кривые для сравнения зависимостей сил взаимодействия от расстояния  $d$  - для кластерной модели и одиночных диполей. Обозначение «кластер  $5 \times 5 \times 10$ » показывает что смоделирован кластер из 10ти слоев с основанием 5 на 5 диполей.

Из сопоставления рис. 41 и рис. 42 видно, что кластерная модель дает правильную качественную оценку взаимодействия систем. Однако количественно сила взаимодействия существенно меняется – в зависимости от способа кластеризации, особенно на близких расстояниях. В частности, для тел кубической формы, в данной работе разработан аналитический метод, позволяющий оценивать применимость разработанного метода численного моделирования, то есть находить расстояния, на которых численное моделирование дает правильный результат.

Таким образом, сила взаимодействия при близких расстояниях будет существенно определяться микроструктурой поверхностного слоя (рис. 20), а также, зависит от шероховатостей соприкасаемых поверхностей.

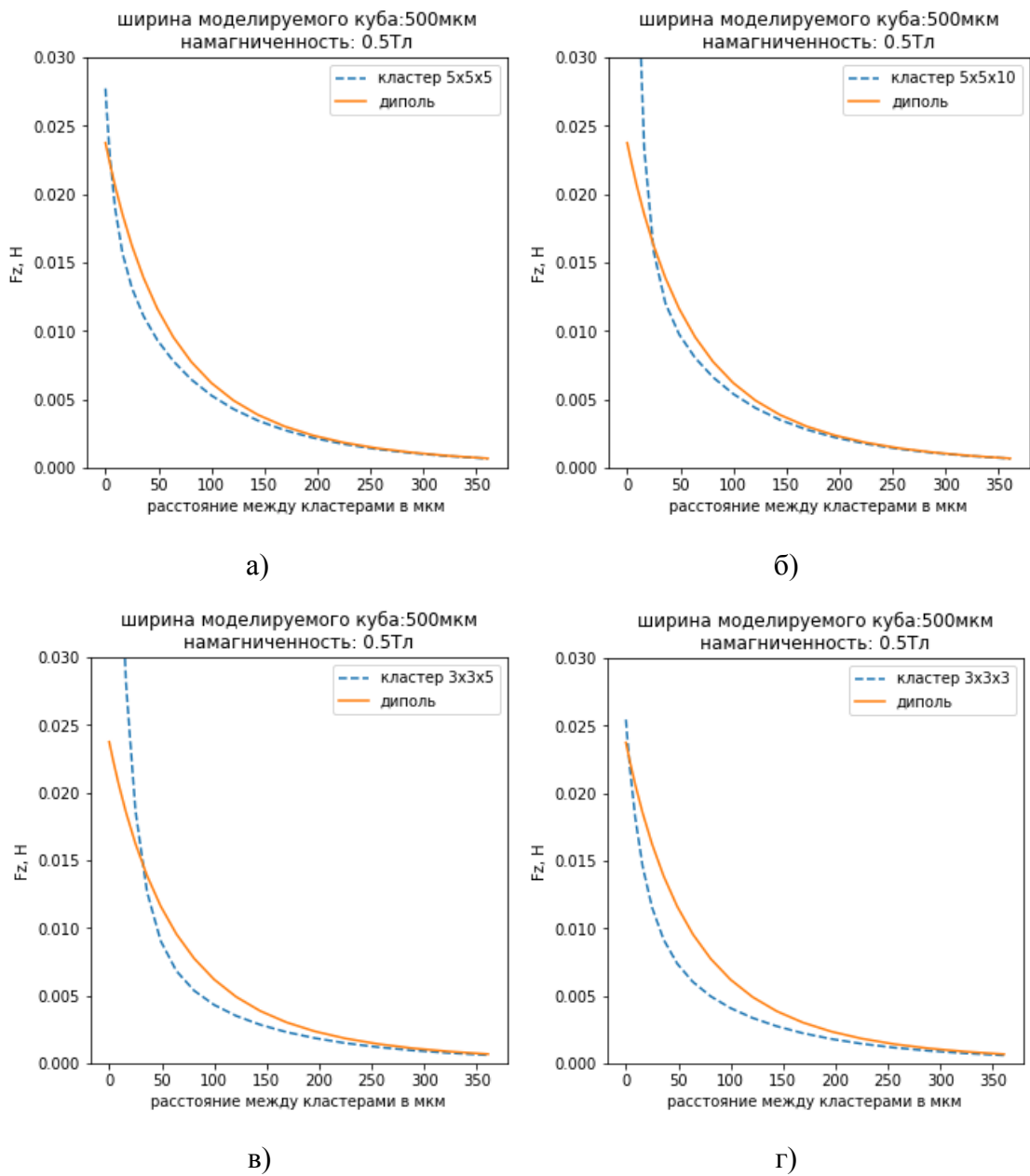


Рисунок 42 - Сравнение силы взаимодействия кластерных моделей с различным разбиением силой взаимодействия диполей.

Данное сравнение показывает неоспоримое преимущество аналитического расчета перед численным. Тем не менее, оно подтверждает эффект «магнитной адгезии», рассмотренной в части 2.3.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В заключении приведем основные результаты и выводы, сделанные в данной работе:

1. Впервые методом атомно-силовой микроскопии получены магнитно-силовые снимки микромагнитной структуры на поверхности массивного сильнонамагниченного постоянного магнита  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  в намагниченном состоянии.

2. Обнаружено, что на поверхности массивного магнита  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  имеются разнообразные микромагнитные и доменные структуры, как в отдельных зернах, так и в нескольких зернах одновременно.

3. Экспериментально доказано что обнаруженные микромагнитные структуры существуют в приповерхностном слое, толщиной в 2-3 зерна.

4. Теоретически предсказано и экспериментально проверено, что неполная намагниченность поверхностного слоя может существенно увеличивать магнитную пондеромоторную силу на малых расстояниях (порядка размера зерна).

5. Получена аналитическая формула для силы притяжения двух однородно намагниченных тел кубической формы в континуальном приближении, которая позволяет вычислить силу притяжения при сколь угодно малых расстояниях между телами, в отличие от методов численного моделирования.

По результатам данной работы опубликованы статьи, в журналах индексируемых Scopus:

1. Магнитное упорядочение сильно намагниченных массивных магнитов Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B., Гинзбург Б.А., Каминская Т.П., Поляков П.А., Попов В.В., Русакова Н.Е. в журнале Известия Российской академии наук. Серия физическая, 2018, том 82, № 8, с. 48-50,

2. Микроскопическая структура магнитного поля на поверхности постоянного магнита., Гинзбург Б.А., Каминская Т.П., Поляков П.А., Попов В.В. в журнале Известия Российской академии наук. Серия физическая, 2018, том 82, № 2, с. 226-23;

сделаны доклады на международных конференциях:

3. Low-Temperature Hysteretic Properties of Pr-Нo-Fe-B, 27-th International Conference on Metallurgy and Materials., Lukin A., Burkhanov G., Koshkid'ko Yu, Skotnicova K., Dormidontov N., Cegan T., Mikhailova A., Kaminskaya T., Ginzburg B. в сборнике Metal2018, Abstracts, May 23-25, ISBN 978-80-87294-83-3, место издания TangerLtd Brno, Czech Republik, EU, Ostrava, тезисы, с. 160-160,

4. Анализ доменной микроструктуры на поверхности массивного спеченного постоянного магнита на основе интерметаллического соединения Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B., Гинзбург Б.А., Каминская Т.П., Поляков П.А., Попов В.В. в сборнике XXI Международная конференция по постоянным магнитам. г.Суздаль, ,18-22 сентября 2017 г, место издания г.Москва, тезисы, с. 44-45.

## БЛАГОДАРНОСТЬ

Автор выражает благодарность н.с. кафедры общей физики Каминской Т.П. и с.н.с. кафедры общей физики Попову В.В. за помощь при проведении эксперимента.



## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1] M. Sagawa, S. Fujimura, N. Togawa, H. Yamamoto, Y. Matsuura, // J. Appl. Phys. 55 (1984) 2083 should be a 1982 document.
- [2] Muhsein Yazid, Dr. Glynn J. Atkinson, Sarah H. Olsen, MFM Study of a Sintered NdFeB Magnet: Analyzing Domain Structure and Measuring Defect Size in 3-D View // IEEE Transactions on Magnetics, June 2016.
- [3] Bader SD. Opportunities in Nanomagnetism // Rev Mod Phys 2006;78:1.
- [4] 17 - S. Bance, B. Seebacher, T. Schrefl, L. Exl, M. Winklhofer, G. Hrkač, et al., "Grain-size dependent demagnetizing factors in permanent magnets," // Journal of Applied Physics, vol. 116, p. 233903, 2014.
- [5] Yutaka Matsuura, Recent development of Nd-Fe-B sintered magnets and their applications // Journal of Magnetism and Magnetic Materials 303 (2006) 344–347
- [6] Grutter P, Mamin HJ, Rugar D. In: Wiesendanger R, Güntherodt H- J, editors. Scanning tunneling microscopy II. // Berlin: Springer Verlag; 1992. p. 151.
- [7] de Lozanne A. Microsc Res Tech 2006;69:550.
- [8] Szmaja W. In: Hawkes PW, editor. Advances in imaging and electron physics, vol. 141. Amsterdam: Elsevier; 2006. p. 175.
- [9] F. Bloch. Record-breaking magnet has five-tesla field. // Cern courier. Mar 22, 2002.
- [10] Кабанов О. А., Герасименко Т. Н., Поляков П. А. Магнитное поле реального постоянного магнита в форме прямоугольного параллелепипеда // Сборник трудов 21-й международной конференции "Электромагнитное поле и материалы" (15-17 ноября 2013 г., Фирсановка, Московская обл.). — Изд-во МЭИ Москва, 2013. — С. 324–331.
- [11] R. Engel-Herbert and T. Hesjedal. Calculation of the magnetic stray field of a uniaxial magnetic domain. J. Appl Phys. 97, 074504 (2005).

- [12] D. V. Vagin, T. N. Gerasimenko, P. A. Polyakov. Exact analytical expression for magnetic field induction of rectangular shape sample// Moscow University Physics Bulletin. Volume 63, Issue 6, December 2008. Pages 422-424.
- [13] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. // М.: Физматлит, 2001
- [14] Volker Neu,\* Steffen Melcher, Ullrich Hannemann, Sebastian Fähler, and Ludwig Schultz, Growth, microstructure, and magnetic properties of highly textured and highly coercive NdFeB films //PHYSICAL REVIEW B 70, 144418 (2004)
- [15] Georgeta Ciuta, Frédéric Dumas-Bouchiat, Nora M. Dempsey, and Olivier Fruchart, Some Aspects of Magnetic Force Microscopy of Hard Magnetic Films // IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 52, NO. 9, SEPTEMBER 2016.
- [16] L. Folks and R. C. Woodward, "The use of MFM for investigating domain structures in modern permanent magnet materials," Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 190, pp. 28-41, // 1998.
- [17] M. A. Al-Khafaji, W. M. Rainforth, M. R. J. Gibbs, J. E. L. Bishop, and H. A. Davies, "The effect of tip type and scan height on magnetic domain images obtained by MFM," Magnetics, IEEE Transactions on, vol. 32, pp. 4138-4140,
- [18] D. Płusa, J. J. Wysłocki, B. Wysłocki, and R. Pfranger, "Domain-wall energy in sintered Nd<sub>15</sub>Fe<sub>77</sub>B<sub>8</sub> permanent magnet," Applied Physics A, vol. 40, pp. 167-170, 1986/07/01 1986.
- [19] Witold Szmaja, Magnetic force microscopy investigation of the domain structure of nanocomposite Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B//Acta Materialia 59 (2011) 531–536
- [20] W. Szmaja, J. Grobelny, M. Cichomski, and K. Makita, "Application of MFM for studying Nd–Fe–B magnets," Vacuum, vol. 74, pp. 297-300, 5/24/ 2004.
- [21] K. Ono, T. Araki, M. Yano, N. Miyamoto, T. Shoji, A. Kato, et al., "Element-Specific Magnetic Domain Imaging of (Nd, Dy)-Fe-B Sintered Magnets Using Scanning Transmission X-Ray Microscopy," Magnetics, IEEE Transactions on, vol. 47, pp. 2672-2675, 2011.

- [22] J. D. Livingston, "Magnetic domains in sintered Fe–Nd–B magnets," *Journal of Applied Physics*, vol. 57, pp. 4137-4139, 1985.
- [23] Woodcock TG, Khlopkov K, Walther A, Dempsey NM, Givord D, Schultz L, et al. *Scripta Mater* 2009;60:826.
- [24] Hubert A, Schafer R. *Magnetic domains: the analysis of magnetic microstructures*. Berlin: Springer Verlag; 1998. p. 329, 409, 555.
- [25] Н.В. Андреева, А.В. Филимонов, А.И. Рудской и др. Исследование наноструктурированных магнитотвердых материалов системы Nd–Ho–Fe–Co–B методами атомно-силовой и магнитно-силовой микроскопии. // *Физика твердого тела*, 2016, том 58, вып. 9.
- [26] В.Л. Миронов "Основы сканирующей зондовой микроскопии". Учебное пособие для студентов старших курсов высших учебных заведений". 2004г. 114 с.
- [27] Описание прибора СМЕНА, платформа СОЛБЕР [Электронный ресурс]//ИТ-МДТ URL: <http://www.ntmdt-si.ru/manuals/group/smena>. (Дата обращения: 29.09.2016).
- [28] M. A. Al-Khafaji, W. M. Rainforth, M. R. J. Gibbs, H. A. Davies, and J. E. L. Bishop, "The effect of phase constitution on the magnetic structure of nanophase NdFeB alloys observed by magnetic force microscopy,"// *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 188, pp. 109-118, 1998.
- [29] Микроскопическая структура магнитного поля на поверхности постоянного магнита., Гинзбург Б.А., Каминская Т.П., Поляков П.А., Попов В.В. в журнале *Известия Российской академии наук. Серия физическая*, 2018, том 82, № 2, с. 226-23.
- [30] Lukin A., Burkhanov G., Koshkid'ko Yu and others. Low-Temperature Hysteretic Properties of Pr-Ho-Fe-B, 27-th International Conference on Metallurgy and Materials в сборнике *Metal2018, Abstracts*, May 23-25, ISBN 978-80-87294-83-3
- [31] Микроскопическая структура магнитного поля на поверхности

постоянного магнита., Гинзбург Б.А., Каминская Т.П., Поляков П.А., Попов В.В. в журнале Известия Российской академии наук. Серия физическая, 2018, том 82, № 2, с. 226-23.

[32] Магнитное упорядочение сильно намагниченных массивных магнитов Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B., Гинзбург Б.А., Каминская Т.П., Поляков П.А., Попов В.В., Русакова Н.Е. в журнале Известия Российской академии наук. Серия физическая, 2018, том 82, № 8, с. 48-50

[33] Вагин Д.В., Герасименко Т.Н., Поляков П.А. Точное аналитическое выражение для индукции магнитного поля образца прямоугольной формы // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика. Астрономия. 2008. No 6. С. 53–55.

Гинзбург Б.А.

---

подпись студента

д.ф.-м.н. проф. Поляков П.А.

---

подпись научного руководителя