

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ МЕТАЛЛОВ имени М.Н. Михеева  
Уральского отделения Российской академии наук

СОГЛАСОВАНО:

зам. директора института  
по научной работе  
доктор физ.-мат. наук

 М.А. Коротин

« 01 » сентября 2025 г.

УТВЕРЖДАЮ:

Директор института  
академик РАН



 Н.В. Мушников

« 02 » сентября 2025 г.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ПРОГРАММА-МИНИМУМ  
кандидатского экзамена по специальности  
**1.3.12 Физика магнитных явлений**  
по физико-математическим наукам

Специализация: **Физические свойства магнитоупорядоченных  
веществ**

Екатеринбург  
2025

## 1. Кристаллографическая и магнитная симметрия.

### Типы магнитных структур.

Некоторые сведения о свойствах симметрии магнитоупорядоченных кристаллов. Трансляционная симметрия и решетки Браве. Сингонии. Пространственные решетки. Индексы направлений и плоскостей. Экспериментальные методы исследования атомной структуры в объеме и на поверхности твердого тела (рентгеновские методы, электронная микроскопия, спектроскопия оже-электронов, сканирующая зондовая микроскопия и др.).

Общие свойства рентгеновских лучей. Рассеяние рентгеновских лучей аморфными телами. Определение парциальных структурных факторов по данным аномального рассеяния рентгеновских лучей. Определение парциальных парных корреляционных функций по данным аномального рассеяния рентгеновских лучей. Рентгеновская спектроскопия поглощения: физические основы метода рентгеноспектрального структурного анализа. Метод регуляризации в рентгеноспектральном структурном анализе. Решение системы интегральных уравнений для рентгеновского поглощения и дифракции. Модели структуры аморфных сплавов.

Характер магнитного упорядочения (атомная и магнитная структура) и теория симметрии. Магнитные структуры основных групп магнитных кристаллов: коллинеарные (ферро-, антиферро-, ферримагнетики), неколлинеарные и несоизмеримые (геликондальные спиральные, конические, зонтичные) структуры. Пьезомагнетики, спиновые стекла, миктомагнетики, суперпарамагнетики и др. Магнитные структуры аморфных магнетиков.

Наногетероструктуры, их разновидности и способы получения, Атомная и магнитная структуры металлических сверхрешеток. Намагниченность тонких магнитных пленок. Поверхностная магнитная анизотропия.

Исследование атомной и магнитной структуры с помощью эффекта Мессбауэра.

Влияние магнитного поля на магнитное состояние (кривые намагничивания) магнетиков со сложной магнитной структурой.

## Литература

1. **Бабанов Юрий Александрович**  
**Рентгеновские методы исследования атомной структуры аморфных тел: Метод. рекомендации для студентов ун-тов, изучающих курс \*Физика твердого тела\*: В 2-х ч./ ГК РФ по высш. обр. Удм.гос.ун-т. Высш.колл. наук о материалах и технологиях. - Ч.1: Метод аномального рассеяния рентгеновских лучей. - Ижевск: Изд-во Удм.ун-та, 1995. - 87 с.**
2. **Бабанов Юрий Александрович**  
**Рентгеновские методы исследования атомной структуры аморфных тел: Метод. рекомендации для студентов ун-тов, изучающих курс \*Физика твердого тела: В 2-х ч./ ГК РФ по высш. обр. Удм.гос.ун-т. Высш.колл. наук о материалах и технологиях. - Ч.2: Метод рентгеноспектрального структурного анализа. - Ижевск: Изд-во Удм.ун-та, 1995. - 127 с.**
3. **Баррет Чарльз С., Массальский Т.Б.**  
**Структура металлов: В 2-х т./ Пер.с англ.А.М.Бернштейна и С.В.Добаткина; Под ред.М.Л.Бернштейна.-Т.2.- М.: Металлургия, 1984.- с. 355 - 686. Structure of metals/C.S.Barret,T.B.Massalski,3d rev.ed(Oxford ets).**
4. **Блохин М.А.**  
**Физика рентгеновских лучей. - Изд.2-е, перераб. - М.: Гостехиздат, 1957 - 518 с.: ил.**
5. **Вонсовский Сергей Васильевич**  
**Магнетизм. Магнитные свойства диа-, пара-, ферро-, антиферро- и ферримагнетиков. - М.: Наука, 1971. - 1032 с. : черт. - Библиогр.: с.1020-1026.**
6. **Вудраф Д.и Делчар Т.**  
**Современные методы исследования поверхности/ Пер.с англ. Е.Ф.Шека; Под ред. В.И.Раховского. - М.: Мир, 1989. - 568 с.: ил. ISBN 5-03-001129-3**
7. **Гинье А.**  
**Рентгенография кристаллов: Теория и практика/ Пер. с франц. Е.Н.Беловой и др.; Под ред. Н.В.Белова. - М.: Физматгиз, 1961. - 604 с.:ил.**

8. **Займан Джон М.**  
**Модели беспорядка: Теоретическая физика однородно неупорядоченных систем/ Пер. с англ. под ред. В.Л.Бонч-Бруевича .**  
- М.: Мир, 1982. - 591 с. : ил. - Библиогр.: в конце разделов; Имен. и предм. указ.: с.578-588 .
9. **Киттель Чарлз**  
**Введение в физику твердого тела/ Пер. с англ. А.А.Гусева. - Изд.2-е, перераб. - М.: Физматгиз, 1962. - 696 с.: ил.**
10. **Ковалев А.И., Щербединский Г.В.**  
**Современные методы исследования поверхности металлов и сплавов**  
- Москва : Металлургия, 1989. - 190,[1] с. : ил.; 20 см.; ISBN 5-229-00444-4
11. **Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.**  
**Теоретическая физика: Учеб. пособие для физ. спец. ун-тов. - Изд.2-е, перераб. и доп. - Т.8: Электродинамика сплошных сред. - М.: Наука, 1982. - 623 с.: ил.**
12. **Металлические стекла: Ионная структура, электронный перенос и кристаллизация/ Г.Бек, Дж.Блэк, П.Коут и др.; Под ред. Г.-Й.Гюнтеродта и Г.Бека; Пер. с англ. под ред. В.А. Алексеева и Е.Г.Максимова. - М.: Мир, 1983. - 376 с.: ил. - (Проблемы прикладной физики).**
13. **Металлические стекла: Атомная структура и динамика, электронная структура, магнитные свойства/ Г.Бек, Г.Гюнтеродт, Ф.Гаскелл и др.; Под ред. Г.Бека, Г.Гюнтеродта; Пер. с англ. под ред. В.А. Алексеева, Е.Г.Максимова. - М.: Мир, 1986. - 456 с. - (Проблемы прикладной физики).**
14. **Миронов, В. Л.**  
**Основы сканирующей зондовой микроскопии : учебное пособие для студентов старших курсов высших учебных заведений / М.: Техносфера, 2009. - 143 с. : цв. ил.; 22 см. - (Мир физики и техники).; ISBN 978-5-94836-236-6**
15. **Овчинников В.В.**  
**Мессбауэровские методы анализа атомной и магнитной структуры сплавов. - М.: Физматлит, 2002. - 256 с. ISBN 5-9221-0259-1**
16. **Пул Ч., Оуэнс Ф.**  
**Нанотехнологии/ Пер. с англ. под ред. Ю.И.Головина; Доп. В.В. Лучинина. - 2-е доп. изд. - М.: ТЕХНОСФЕРА, 2005. - 336 с.: ил. - (Мир материалов и технологий). ISBN 5-94836-021-0**

17. Рентгеноспектральный метод изучения структуры аморфных тел : EXAFS-спектроскопия / [Д. И. Кочубей, Ю. А. Бабанов, К. И. Замараев и др.]; Отв. ред. Г. М. Жидомиров;. - Новосибирск : Наука : Сиб. отд-ние, 1988. - 302,[3] с. : ил.; 21 см.; ISBN 5-02-029190-0
18. Симметрия и физические свойства антиферромагнетиков / Е.А.Туров, А.В.Колчанов, В.В.Меньшенин, И.Ф.Мирсаев, В.В.Николаев. - М.: Физматлит, 2001. - 560 с. ISBN 9221-0099-8
19. Синхротронное излучение. Свойства и применения/ Под ред. К.Кунца; Пер. с англ. под ред. С.П.Капицы и И.М.Гернова. - М.: Мир, 1981. - 526 с.
20. Тикадзуми С.  
Физика ферромагнетизма. Магнитные характеристики и практические применения/ Пер. с яп.А.И.Леонова; Под ред. Р.В.Писарева. - М.: Мир, 1987. - 420с.:ил.
21. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я.  
Методы решения некорректных задач: Учеб. пособие для вузов по спец."Прикладная математика". - Изд. 3-е, испр. - М.: "Наука", 1986. - 287 с.: ил.
22. Туров Е.А.  
Физические свойства магнитоупорядоченных кристаллов:Феноменологическая теория спиновых волн в ферромагнетиках,антиферромагнетиках и слабых ферромагнетиках / Под ред.С.В. Вонсовского; АН СССР. Ин-т физики металлов. - М.: Изд-во АН СССР, 1963. - 224 с.: черт.
23. Хёрд К М  
Многообразии видов магнитного упорядочения в твердых телах *УФН* 142 331–355 (1984)
24. Шаскольская М.П.  
Кристаллография: Учебник для вузов. - М.: Высш. школа, 1976. - 391 с.: ил.

## **2. Структурные и магнитные фазовые переходы в магнетиках.**

Структурные переходы в металлах, сплавах и соединениях. Влияние магнитного поля на структурные фазовые переходы (мартенситное превращение). Магнитное уравнение Клайперона-Клаузиуса. Характер

зависимости температуры структурного фазового перехода первого рода от напряженности магнитного поля и гидростатического давления.

Классификация и описание магнитных фаз. Общие понятия о магнитной симметрии. Классификация и общие свойства магнитных фазовых переходов. Теория Ландау магнитных фазовых переходов. Свободная энергия и магнитная симметрия. Поликритические (мультикритические) точки. Спин - ориентационные фазовые переходы. Фазовые переходы в гелимагнитную фазу. Температурные и концентрационные магнитные фазовые переходы в сплавах со смешанным обменным взаимодействием.

### Литература

1. **Белов К.П.**  
**Магнитные превращения.** - М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1959.  
- 260с.: ил.
2. **Вонсовский Сергей Васильевич**  
**Магнетизм. Магнитные свойства диа-,пара-,ферро-, антиферро- и ферримагнетиков.** - М.: Наука, 1971. - 1032 с. : черт. - Библиогр.: с.1020-1026.
3. **Закалка стали в магнитном поле / М.А.Кривоглаз, В.Д.Садовский, Л.В.Смирнов, Е.А.Фокина; Отв.ред.К.Б. Власов; АН СССР. УНЦ. Ин-т физики металлов.** - М.: Наука, 1977. - 120 с.: ил.
4. **Кринчик Георгий Сергеевич**  
**Физика магнитных явлений: Учеб. пособие для физ. спец. вузов.**  
- М.: Изд-во Моск.ун-та, 1985. - 335 с.
5. **Нокс Р.С.,Голд А.**  
**Симметрия в твердом теле/Пер.с англ.Под ред.В.Л.Бонч-Бруевича.-** М.: Наука, 1970. - 424 с.: ил.
6. **Ориентационные переходы в редкоземельных магнетиках/ К.П.Белов,А.К.Звездин,А.М.Кадомцева,Р.З.Левитин.-** М.: Наука, 1979. - 317 с.: ил. - Библиогр.: с.304 - 317.
7. **Стенли Г.**  
**Фазовые переходы и критические явления/ Пер.с англ.А.И.Мицека и Т.С.Шубиной; Под ред. С.В.Вонсовского.** - М.: Мир, 1973. - 473 с. : ил. - Библиогр.: с.390-401.

Пер.изд.: Introduction to phase transitions and critical phenomena / Н. Eugene Stanley (Oxford, 1971)

**8. Хёрд К М**

**Многообразие видов магнитного упорядочения в твердых телах УФН 142 331–355 (1984)**

**9. Эллиот Дж.,Добер П.**

**Симметрия в физике: В 2-х т./ Пер.с англ. под ред.И.С. Желудева и Д.А.Славнова. - Т.1:Основные принципы и простые приложения. - М.: Мир, 1983. - 364 с.: ил. - Библиогр.в конце глав.**

**10.Эллиот Дж.,Добер П.**

**Симметрия в физике: В 2-х т./Пер. с англ. под ред. И.С.Желудева и Д.А.Славнова.-Т.2: Дальнейшие приложения.- М.: Мир, 1983. - 410 с.: ил. - Библиогр.: с.110-112.**

### **3. Обменное взаимодействие в магнетиках.**

Приближение молекулярного поля в описании ферромагнетиков. Модель Вейсса. Модель Стонера. Учет ближнего порядка. Модель Изинга. Теория обменного взаимодействия. Определение обменного интеграла. Обменные взаимодействия в твердых телах. Прямое обменное взаимодействие в системах с локализованными и делокализованными электронами. Косвенные обменные взаимодействия в магнетиках. Модель Андерсона-Краммерса. Модель Зинера. Приближение Рудермана-Киттеля-Касуйя-Иосиды. Модель Хаббарда в пределах слабого и сильного кулоновского отталкивания. Спин-волновые возбуждения. Спиновые флуктуации. Эффект Кондо в магнитных системах. Температура Кондо. Спиновая динамика и электронные свойства Кондо-систем. Основное состояние решеток Кондо.

#### Литература

**1. Вонсовский Сергей Васильевич**

**Магнетизм. Магнитные свойства диа-,пара-,ферро-, антиферро- и ферримагнетиков. - М.: Наука, 1971. - 1032 с. : черт. - Библиогр.: с.1020-1026.**

2. **Ирхин В.Ю., Ирхин Ю.П.**  
**Электронная структура, физические свойства и корреляционные эффекты в d-и f-металлах и их соединениях/ РАН. УрО. Ин-т физики металлов.** - Екатеринбург: УрО РАН, 2004. - 472 с. ISBN 5-7691-1493-2
3. **Изюмов Ю.А., Кацнельсон М.И., Скрыбин Ю.Н.**  
**Магнетизм коллективизированных электронов.** - М.: Физматлит, 1994. - 368 с. ISBN 5-02-014623-4
4. **Изюмов Юрий Александрович, Скрыбин Юрий Николаевич**  
**Базовые модели в квантовой теории магнетизма.** - Екатеринбург: УрО РАН, 2002. - 260 с. ISBN 5-7691-1286-7

#### **4. Упругие и магнитоупругие свойства магнетиков.**

Энергия магнитной кристаллической анизотропии (МКА). Феноменологическое выражение для энергии МКА. Экспериментальное определение констант МКА и их зависимость от температуры и состава. Анизотропный обмен. Спин-орбитальное взаимодействие как источник МКА. Наведенная (ориентационная) и обменная анизотропия.

Спонтанная магнитострикция. Связь магнитострикции с электронной структурой в переходных металлах. Индуцированная магнитным полем магнитострикция. Упругие напряжения и магнитострикция. Магнитострикция парапроцессам и ее зависимость от намагниченности и магнитного поля.

Влияние магнитного упорядочения на упругие свойства ферро- и антиферромагнетиков. Упругие модули магнетиков. DE-эффект.

#### Литература

1. **Акулов Н.С.**  
**Ферромагнетизм.** - М.-Л.: Гостехиздат, 1939. - 188с.
2. **Белов, Константин Петрович.**  
**Упругие, тепловые и электрические явления в ферромагнетиках - 2-е изд., доп.** - М.: Гостехиздат, 1957. - 279 с. : черт.; 21 см. - (Физико-математическая б-ка инженера).
3. **Вонсовский Сергей Васильевич**  
**Магнетизм. Магнитные свойства диа-, пара-, ферро-, антиферро- и**

**ферримагнетиков. - М.: Наука, 1971. - 1032 с. : черт. - Библиогр.: с.1020-1026.**

4. **Вонсовский Сергей Васильевич, Шур Яков Савельевич**  
**Ферромагнетизм. - М.-Л.: Гостехиздат, 1948. - 816 с.: ил., черт.**
5. **Ивановский В. И., Черникова Л.А.**  
**Физика магнитных явлений : Семинары. [Учеб. пособие для физ. спец. ун-тов] / Под ред. Е. И. Кондорского. - Москва : Изд-во МГУ, 1981. - 288 с. : ил.**
6. **Мишин Д.Д.**  
**Магнитные материалы: Учеб. пособие для физ. спец. вузов. - М.: Высшая школа, 1981. - 335 с.: ил.**

### **5. Динамические свойства магнетиков.**

Понятие о магнитном резонансе. Магнитный (электронный) резонанс в веществах, не обладающих атомным магнитным порядком. Циклотронный резонанс. Электронный магнитный резонанс. Теорема Крамерса, эффект Яна-Теллера, особенности спектров ионов группы железа и редкоземельных ионов. Магнитоакустический парамагнитный резонанс.

Динамическая магнитная проницаемость. Основные виды электромагнитных потерь. Магнитная вязкость и последствие.

Магнитоакустический резонанс. Динамические модули упругости.

Спин-волновой резонанс. Эффективная масса и резонанс доменных границ. Спектр спин-волновых резонансов в тонких пленках. Магнитостатические волны в тонких пленках.

Магнито-упорядоченные вещества в переменных магнитных полях. Ферромагнитный резонанс (ФМР). Уравнения Ландау-Лифшица. Тензор магнитной восприимчивости. Влияние доменной структуры, формы образца и магнитной анизотропии на спектр ФМР. Ферримагнитный резонанс. Нелинейные явления и процессы релаксации. Ширина резонансной линии. Антиферромагнитный резонанс (АФМР). Уравнения движения намагниченностей подрешеток.

## Литература

1. Ахиезер А. И., Барьяхтар В. Г., Пелетминский С. В.  
**Спиновые волны.** - М.: Наука, 1967. - 368 с.: ил. - Библиогр.: с.364-368.
2. Вонсовский Сергей Васильевич  
**Магнетизм. Магнитные свойства диа-, пара-, ферро-, антиферро- и ферримагнетиков.** - М.: Наука, 1971. - 1032 с. : черт. - Библиогр.: с.1020-1026.
3. Саланский Наум Моисеевич, Ерухимов М. Ш.  
**Физические свойства и применение магнитных пленок/ Отв. ред. Р. В. Телеснин.** - Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1975. - 222 с.: ил. - Библиогр.: с.200-220.
4. Суху Роналд  
**Магнитные тонкие пленки/ Пер. с англ.; Под ред. Р. В. Телеснина.** - М.: Мир, 1967. - 422 с.: ил. - Библиогр.: с.330-336 и с.418.

### **6. Кинетические свойства магнетиков.**

Электропроводность. Особенности температурной зависимости электросопротивления ферро- и антиферромагнетиков. Рассеяние на спиновых волнах, рассеяние на флуктуациях спиновой плотности. Спин-зависящее рассеяние и эффект Кондо.

Гальваномагнитные свойства ферромагнетиков. Изменение электросопротивления в магнитном поле. Нормальный эффект Холла. Роль спин орбитального рассеяния и аномальный эффект Холла в ферромагнитных металлах и сплавах. Гальваномагнитные свойства магнетиков со сложной магнитной структурой.

Оптические свойства ферромагнетиков. Магнетооптические эффекты Керра и Фарадея. Корреляция между частотными и статическими эффектами.

Электросопротивление металлических сверхрешеток, обладающих магнитным порядком. Эффект гигантского магнитосопротивления, его физическая природа. Спиновый клапан. Магниторезистивные сенсоры.

Манганиты с колоссальным магнитосопротивлением. Структура и свойства.

## Литература

1. **Абдурахманов А.А.**  
**Кинетические эффекты в ферромагнитных металлах/ Северо-Кавказск. науч. центр высш. школы.- Ростов-на-Дону: Изд-во Ростовск. ун-та, 1978. - 304 с.: ил.**
2. **Белов, Константин Петрович.**  
**Упругие, тепловые и электрические явления в ферромагнетиках - 2-е изд., доп. - Москва : Гостехиздат, 1957. - 279 с. : черт.; 21 см. - (Физико-математическая б-ка инженера).**
3. **Вонсовский Сергей Васильевич**  
**Магнетизм. Магнитные свойства диа-,пара-,ферро-, антиферро- и ферримагнетиков. - М.: Наука, 1971. - 1032 с. : черт. - Библиогр.: с.1020-1026.**
4. **Ирхин В.Ю.,Ирхин Ю.П.**  
**Электронная структура,физические свойства и корреляционные эффекты в d-и f-металлах и их соединениях/ РАН.УрО.Ин-т физики металлов. - Екатеринбург: УрО РАН, 2004. - 472 с. ISBN 5-7691-1493-2**
5. **Пул Ч., Оуэнс Ф.**  
**Нанотехнологии/ Пер.с англ. под ред. Ю.И.Головина; Доп. В.В. Лучинина.- 2-е доп. изд.- М.: ТЕХНОСФЕРА, 2005. - 336 с.: ил. - (Мир материалов и технологий). ISBN 5-94836-021-0**