

Аспирант 3 года обучения Прокопьев Дмитрий Андреевич
Лаборатории перспективных магнитных материалов

Научный руководитель – д.ф.-м.н. Михалёв Константин Николаевич

Специальность 01.04.11 – физика магнитных явлений

Тема работы – Изучение магнитных наночастиц на основе 3d металлов методами резонансной спектроскопии

Задача текущего года

Исследование магнитных наночастиц Fe_3C , $\text{Fe}_x\text{Co}_{1-x}@\text{C}$, $\text{Fe}_x\text{Ni}_{1-x}@\text{C}$ в углеродной оболочке методами ядерного магнитного резонанса.

Результаты, полученные в текущем году

1. Спектры ЯМР ^{57}Fe , ^{59}Co , ^{61}Ni наночастиц (Fe_3C , $\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5}$; $\text{Fe}_{0.8}\text{Co}_{0.2}@\text{C}$, $\text{Fe}_{0.7}\text{Co}_{0.3}@\text{C}$; $\text{Fe}_{0.6}\text{Co}_{0.4}@\text{C}$; $\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5}@\text{C}$; $\text{Fe}_{0.4}\text{Co}_{0.6}@\text{C}$, $\text{Fe}_{0.25}\text{Ni}_{0.75}@\text{C}$, $\text{Fe}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}@\text{C}$, $\text{Fe}_{0.75}\text{Ni}_{0.25}@\text{C}$) были зарегистрированы в нулевом внешнем магнитном поле.
2. Отработана методика синтеза и аттестации наночастиц на основе бинарных сплавов. Повторяемость синтеза наночастиц в результате проверок является удовлетворительной с известной точностью.
3. С помощью методов ядерного магнитного резонанса удалось получить представление о фазовом составе наночастиц $\text{FeMe}@\text{C}$ ($\text{Me}=\text{Co},\text{Ni}$). По данным ЯМР ^{59}Co , ^{61}Ni установлено, что в отожженных наночастицах $\text{FeCo}@\text{C}$ и $\text{Fe}_{0.50}\text{Ni}_{0.50}@\text{C}$ карбиды практически не наблюдаются.

**Аспирант 3 года обучения Прокопьев Дмитрий Андреевич
Лаборатории перспективных магнитных материалов**

Апробация работы

Статьи

1. Investigation of magnetic nanoparticles FeCo by resonance spectroscopy [Текст] / D. A. Prokopyev, A. Yu. Germov, K. N. Mikhalev, B. Yu. Goloborodskii, M. A. Uimin, A. E. Yermakov, A. S. Konev, S. I. Novikov // AIP Conference Proceedings. — 2022. — V. 2466. — P. 60043—60048.

2. ^{61}Ni NMR study of nickel nanoparticles: Nanoscale effect and magnetic state [Текст] / K. Mikhalev, A. Germov, D. Prokopyev, M. Uimin, A. Yermakov, S. Novikov, A. Konev, V. Gaviko, A. Minin // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. — 2022. — V. 563. — P. 169837—169841.

Тезисы докладов на международных конференциях

1. Прокопьев Д.А., Гермов А.Ю., Михалёв К.Н., Уймин М.А., Новиков С.И., Гавико В.С., Минин А.С. « ^{57}Fe NMR IN IRON CARBIDE Fe_3C NANOPARTICLES». Сборник тезисов докладов X Международной молодежной научной конференции Физика. Технологии. Инновации ФТИ-2023. Екатеринбург, 2023.

**Аспирант 3 года обучения Прокопьев Дмитрий Андреевич
Лаборатории перспективных магнитных материалов**

Экзамены

Экзамен по философии

Отлично

Экзамен по иностранному языку

Отлично

Участие в грантах

Проект РФФ No. 21-72-00007 «Изучение наночастиц на основе бинарных сплавов FeMe (Me=Co,Ni,Cu) методами ЯМР и мёссбауэровской спектроскопии»

Руководитель – Гермов А.Ю., кандидат физико-математических наук

Степень участия – исполнитель

Проект РФФ No. 22-12-00220 «Электронная структура и магнитный порядок в слоистых халькогенидах переходных металлов»

Руководитель – Оглобличев В.В., кандидат физико-математических наук

Степень участия – исполнитель

Выступления на конференциях

Сделано докладов

стендовых – 1

Аспирант 3 года обучения Прокопьев Дмитрий Андреевич
Лаборатории перспективных магнитных материалов

Таблица показателей

Показатель	Баллы	Кол-во	Сумма
публикации в изданиях ВАК (вышедшие из печати)	20	2	40
публикации в изданиях ВАК (принятые в печать)	5	1	5
свидетельство о программах для ЭВМ, зарегистрированных в установленном порядке	20	0	0
патент	20	0	0
соавторство в монографии	5	0	0
оформленное ноу-хау	5	0	0
публикации в других изданиях (не тезисы)	2	4	8
тезисы доклада на международной конференции	5	11	55
тезисы доклада на российской конференции	3	4	12
участие в конференции с устным докладом	2	1	2
участие в конференции со стендовым докладом	1	6	6
сданный на «отлично» кандидатский экзамен	20	2	40
сданный на «хорошо» кандидатский экзамен	15	0	0
сданный на «удовлетворительно» кандидатский экзамен	10	0	0
участие в грантах в качестве: исполнителя	5	2	10
участие в грантах в качестве: руководителя	10	0	0
Общая сумма			178

Результаты исследования наночастиц Fe₃C

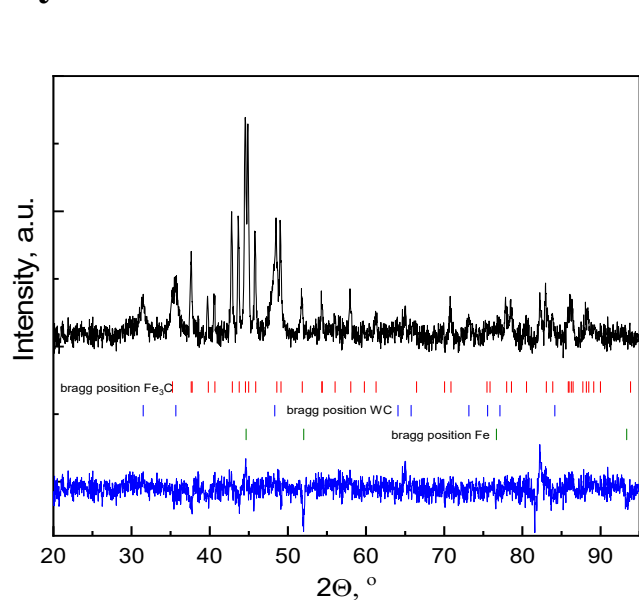


Рис. 1. Результаты рентгеновской дифракции

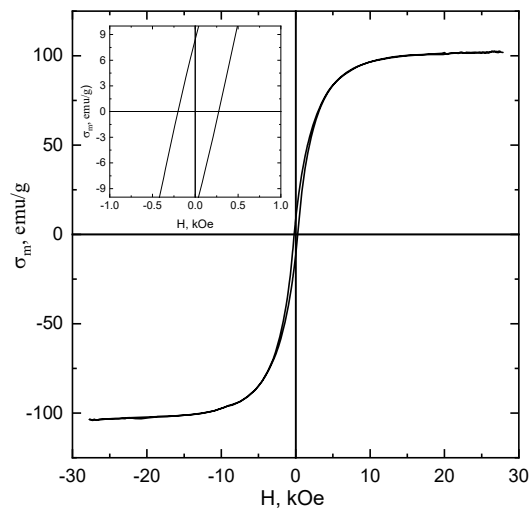


Рис.2. Результаты измерения намагниченности

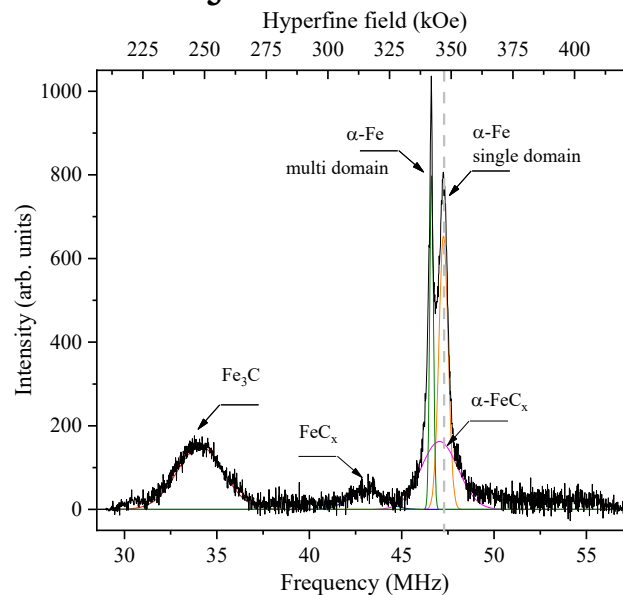


Рис. 3. Спектр ЯМР ⁵⁷Fe в наночастицах Fe@C в локальном поле при T=4.2 K [3]

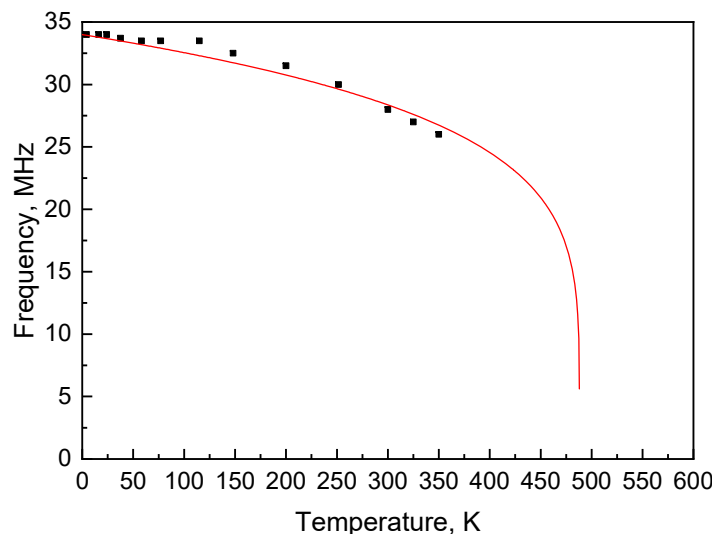


Рис. 4. Температурная зависимость Ларморовской частоты в Fe₃C

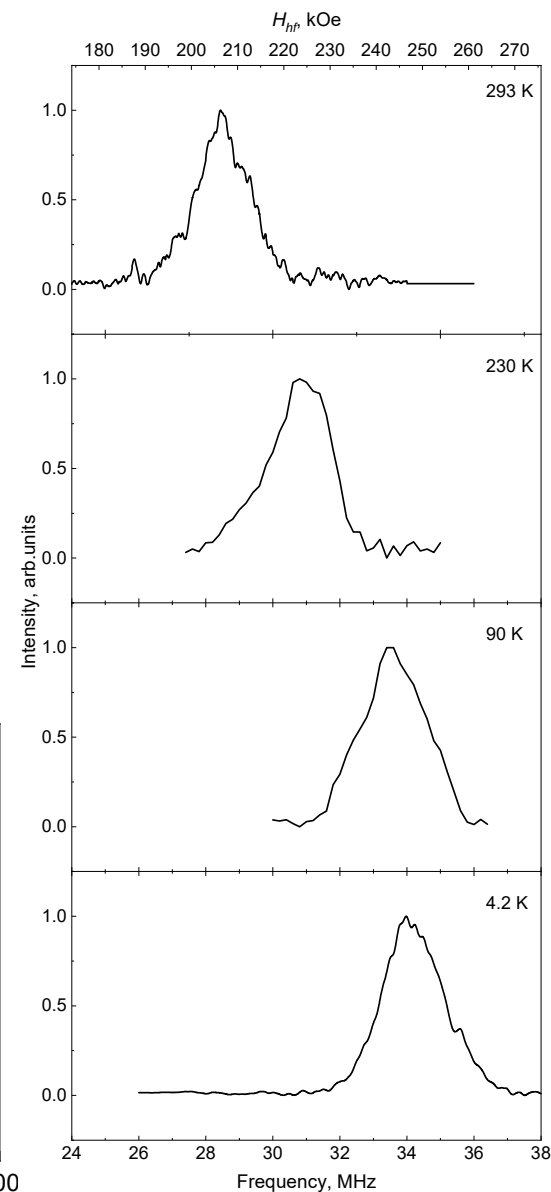


Рис. 5. Спектры ЯМР ⁵⁷Fe в наночастицах Fe₃C в локальном поле

Результаты исследования наночастиц $\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x@C$

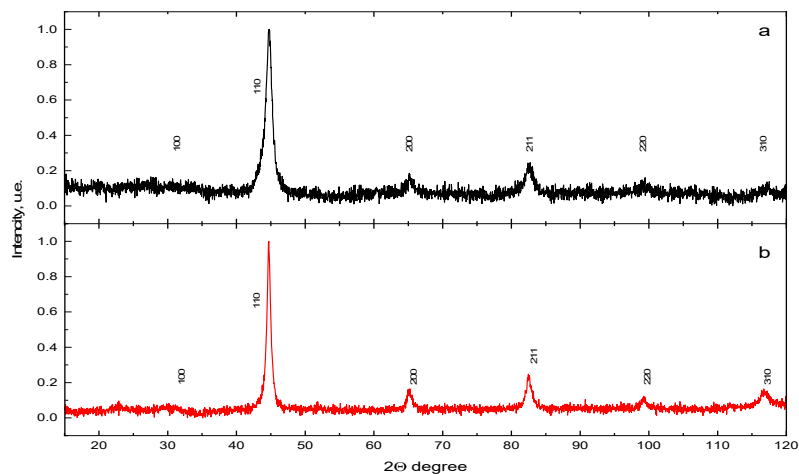


Рис. 1. Результаты рентгеновской дифракции наночастиц $\text{Fe}_{0.66}\text{Co}_{0.34}@C$ в а) в исходном состоянии и б) после отжига при $T = 810$ К.

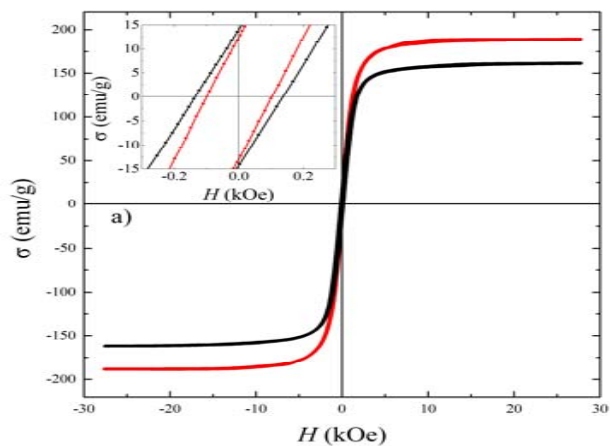


Рис.2. Петли гистерезиса $\text{Fe}_{0.66}\text{Co}_{0.34}@C$ образца в исходном виде (черный) и после отжига при $T = 810$ К в течение 4 часов (красный).

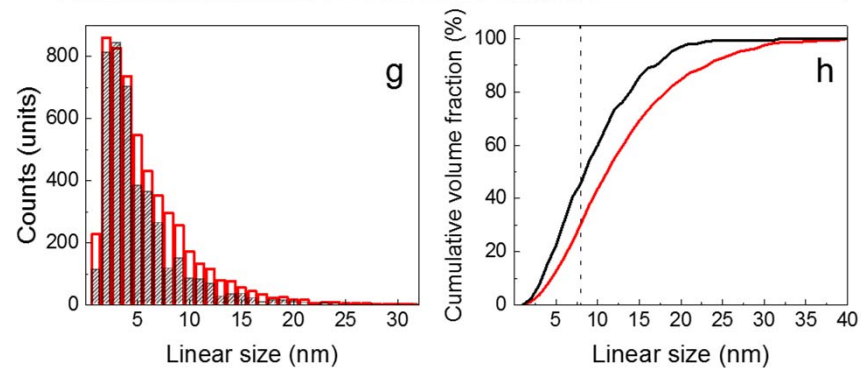
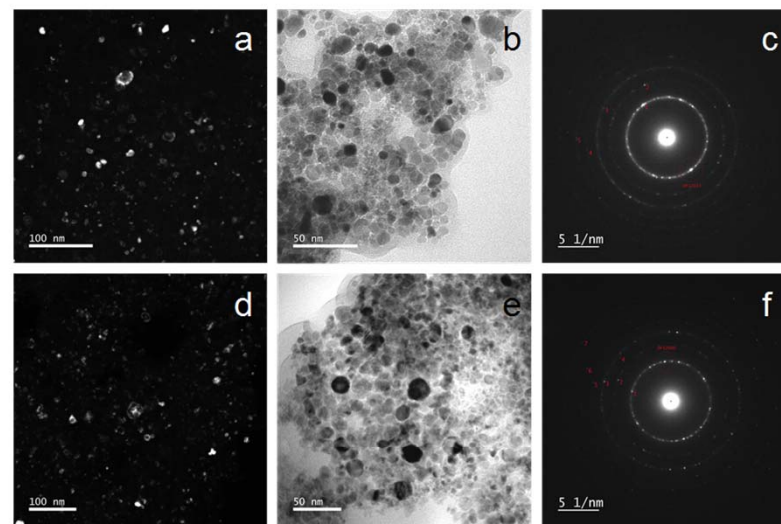


Рис. 3. Временные изображения $\text{Fe}_{0.66}\text{Co}_{0.34}@C$ наночастицы в исходном состоянии (а), (б); кольцевая дифракционная картина (в) и $\text{Fe}_{0.66}\text{Co}_{0.34}@C$ наночастицы (d, e, f), отожженные при $T = 810$ К. Распределение количества частиц (g) и объемной доли (h) в полученном виде (черный цвет) и отожженный (красный цвет) $\text{Fe}_{0.66}\text{Co}_{0.34}@C$ наночастицы в зависимости от размера частиц.

Спектры ЯМР ^{57}Fe , ^{59}Co в наночастицах $\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x@C$

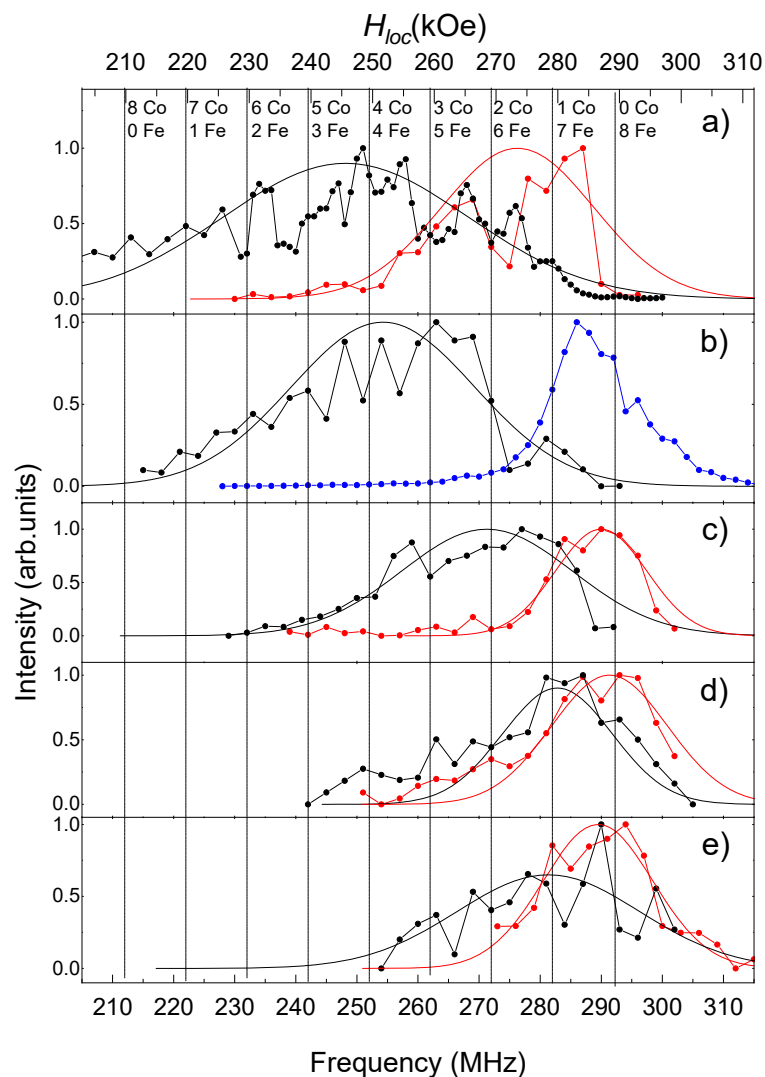


Рис. 1. Спектры ЯМР ^{59}Co в локальном поле при комнатной температуре а) $\text{Fe}_{0.43}\text{Co}_{0.57}@C$; б) $\text{Fe}_{0.55}\text{Co}_{0.44}@C$ (для сравнения приведен спектр (синий цвет) отожженных наночастиц $\text{Fe}_{0.50}\text{Co}_{0.50}$ [4]); в) $\text{Fe}_{0.66}\text{Co}_{0.34}@C$; г) $\text{Fe}_{0.76}\text{Co}_{0.24}@C$; д) $\text{Fe}_{0.83}\text{Co}_{0.17}@C$. Исходные образцы обозначены черным цветом, отожженные – красным.

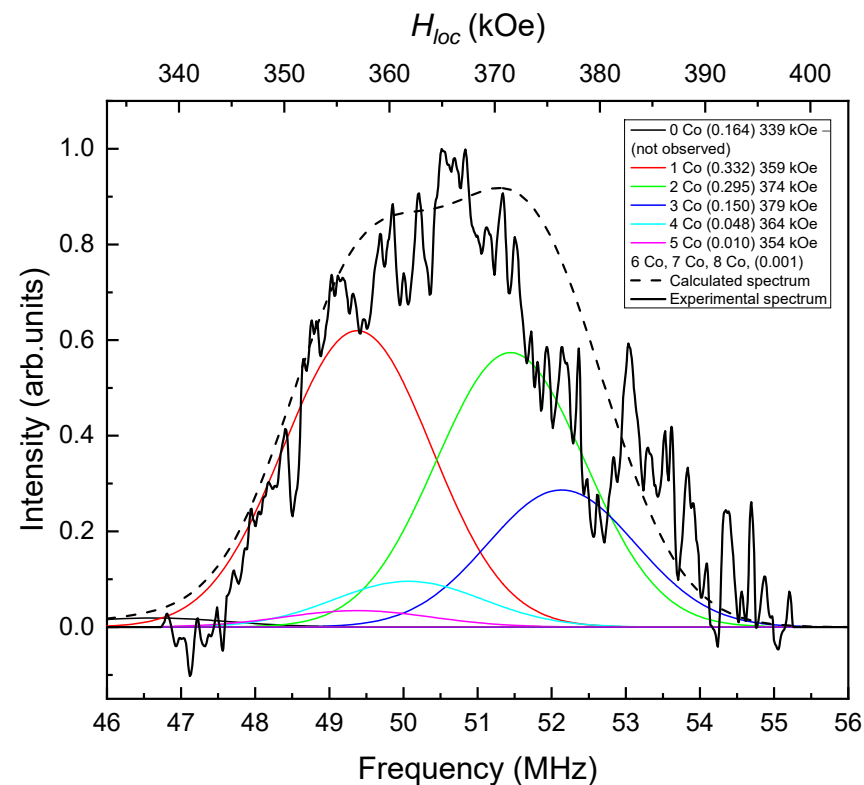


Рис. 2. Спектры ЯМР ^{57}Fe неотожженных наночастиц $\text{Fe}_{0.83}\text{Co}_{0.17}@C$, полученные в нулевом магнитном поле при $T = 77\text{ K}$. Значения наведённых полей для модели макро образца $\text{Fe}_{0.8}\text{Co}_{0.2}^*$

*J S Blázquez et al J. Phys.: Condens. Matter 15 7843 (2003). DOI 10.1088/0953-8984/15/46/003

Список статей

1. [NMR study of magnetic nanoparticles Ni@C](#) [Текст] / K N Mikhalev, A Yu Germov, D A Prokopyev, M A Uimin, A Ye Yermakov, A S Konev, V S Gaviko, S I Novikov // Journal of Physics: Conference Series. — 2019. — V. 1389. — P. 12137—12142.
2. [NMR Study of Phase Composition of Carbon Encapsulated Ni@C Nanoparticles](#) [Текст] / D. A. Prokopyev, A. Yu. Germov, K. N. Mikhalev, M. A. Uimin, A. E. Yermakov, A. S. Konev // AIP Conference Proceedings. — 2019. — V. 2174. — P. 20155—20158.
3. [NMR study of phase composition of carbon encapsulated Fe@C nanoparticles](#) [Текст] / D. A. Prokopyev2, A. Yu. Germov, K. N. Mikhalev, B. Yu. Goloborodskii, M. A. Uimin, A. E. Yermakov, A. S. Konev, S. I. Novikov // AIP Conference Proceedings. — 2020. — V. 2313. — P. 60023—60027.
4. [Quantitative phase analysis of magnetic Fe@C nanoparticles](#) [Текст] / A. Yu. Germov1, D. A. Prokopyev1, K. N. Mikhalev, B. Yu. Goloborodskiy, M. A. Uimin, A. E. Yermakov, A. S. Konev, A. S. Minin, S. I. Novikov, V. S. Gaviko1, A. M. Murzakaev0 // Materials Today Communications. — 2021. — V. 27. — P. 102382—102390.
5. [Investigation of magnetic nanoparticles FeCo by resonance spectroscopy](#) [Текст] / D. A. Prokopyev1, A. Yu. Germov1, K. N. Mikhalev, B. Yu. Goloborodskii, M. A. Uimin, A. E. Yermakov, A. S. Konev, S. I. Novikov // AIP Conference Proceedings. — 2022. — V. 2466. — P. 60043—60048.
6. [61Ni NMR study of nickel nanoparticles: Nanoscale effect and magnetic state](#) [Текст] / K.Mikhalev1, A.Germov1, D.Prokopyev, M.Uimin, A.Yermakov, S.Novikov, A.Konev, V.Gaviko, A.Minin // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. — 2022. — V. 563. — P. 169837—169841.

Список тезисов

1. K.N.Mikhalev. NMR study of magnetic nanoparticles Ni@C [Текст] / K.N.Mikhalev, A.Yu.Germov, D.A.Prokopyev, M.A.Uimin, A.Ye.Yermakov, A.S.Konev, S.I.Novikov // VII Euro-Asian Symp. «Trends in MAGnetism» (EASTMAG-2019), Ekaterinburg, 8-13 сентября, 2019: .- 144 с.
2. D.A.Prokopyev. NMR study of carbon encapsulated Ni@C nanoparticles [Текст] / D.A.Prokopyev, A.Yu.Germov, K.N.Mikhalev, M.A.Uimin, A.Ye.Yermakov, S.I.Novikov, A.S.Konev, V.S.Gaviko // XXI International Youth Scientific School «Actual Problems of Magnetic Resonance and its Application», Kazan, 23-28 сентября, 2019: Тез.докл.-Kazan:Org.com.- 191 с.
3. A.Germov. NMR Study of Size effects in Ferromagnetic Nanoparticles [Текст] / A.Germov, D.Prokopyev, K.Mikhalev // The International Conference “Modern development of magnetic resonance”, Kazan, 1-5 ноября, 2021: Тез.не изд.- 0 с.
4. A.Yu.Germov. Analysis of hyperfine fields of magnetic nanoparticles based on binary FeNi alloys [Текст] / A.Yu.Germov, B.Yu.Goloborodskiy, A.S.Konev, D.A.Prokopyev, I.A.Kurmachev, E.V.Suvorkova, A.S.Minin, M.A.Uimin // XVI International Conference Mossbauer Spectroscopy and its Applications (ICMSA-2022), Ekaterinburg, 4-9 сентября, 2022: Тез.докл.-Ekaterinburg:Изд-во ИФМ УрО РАН.- 36 с.
5. A.Yu.Germov. ^{59}Co NMR and ^{57}Fe Mossbauer studies of carbon encapsulated magnetic nanoparticles based on binary FeCo alloys [Текст] / A.Yu.Germov, B.Yu.Goloborodskiy, A.S.Konev, D.A.Prokopyev, I.A.Kurmachev, E.V.Suvorkova // VIII Euro-Asian Symposium Trends in MAGnetism (EASTMAG-2022), Kazan, 22-26 августа, 2022: Тез.докл.-Kazan:Zavoisky Physical-Technical Institute FRC Kazan SC RAS.- 265 с.
6. А.Ю.Гермов. Аттестация ультрадисперсных ферромагнитных наночастиц методами ЯМР и ЯГР [Текст] / А.Ю.Гермов, Д.А.Прокопьев, А.С.Конов, Б.Ю.Голобородский, И.А.Курмачёв // Всероссийская конференция «Химия твердого тела и функциональные материалы – 2022» и XIV Симпозиум «Термодинамика и материаловедение», Екатеринбург, 10-13 октября, 2022: Матер.конф.-Екатеринбург:ИХТТ УрО РАН.Изд-во «ДжиЛайм» ООО .- 78 с.
7. Д.А.Прокопьев. Исследование магнитных наночастиц $\text{Fe}_{0.6}\text{Co}_{0.4}\text{@C}$ методом ЯМР [Текст] / Д.А.Прокопьев, А.Ю.Гермов, А.С.Конов, Б.Ю.Голобородский, И.А.Курмачёв, Е.В.Суворова // IX Международная молодежная научная конференция «Физика. Технологии. Инновации» (ФТИ-2022), Екатеринбург, 16-20 мая, 2022: Тез.докл.-Екатеринбург:УРФУ.- 797 с.
8. А.Ю.Гермов. Применение ядерно-резонансных методов для изучения структурных и магнитных свойств наночастиц [Текст] / А.Ю.Гермов, Д.А.Прокопьев, А.С.Конов, Б.Ю.Голобородский, И.А.Курмачев, Е.В.Суворова // XXII Всероссийская школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС-22) памяти М.И. Куркина, Екатеринбург, 24 ноября – 1 декабря, 2022: Тезисы докладов, г. Екатеринбург, ИФМ УрО РАН.- 173 с.
9. Д.А.Прокопьев. Исследование магнитных наночастиц $\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5}$ методами резонансной спектроскопии [Текст] / Д.А.Прокопьев, А.Ю.Гермов, К.Н.Михалев, Б.Ю.Голобородский, М.А.Уймин, А.Е.Ермаков, А.С.Конов // VIII Международная молодежная научная конференция «Физика. Технологии. Инновации» (ФТИ-2021) \tnull, Екатеринбург, 17-21 мая, 2021: Тез.докл.-Екатеринбург:УРФУ.- 876 с.
10. А.Ю.Гермов. Определение монодоменного состояния и фазовый анализ ферромагнитных наночастиц по данным ЯМР [Текст] / А.Ю.Гермов, Д.А.Прокопьев, К.Н.Михалев, Б.Ю.Голобородский, А.С.Конов // XXI Всероссийская школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС-21)\tnull, Екатеринбург, 18-25 марта, 2021: Тез.докл.-Екатеринбург:ИФМ УрО РАН.- 63 с.
11. К.Н.Михалев. Изучение магнитного состояния и размерных эффектов в наночастицах на основе 3d-металлов методами ЯМР [Текст] / К.Н.Михалев, А.Ю.Гермов, Д.А.Прокопьев, М.А.Уймин, А.Е.Ермаков, А.С.Конов, В.С.Гавико // XXXVIII Межд. зимняя школа физиков-теоретиков «Коуровка-XXXVIII» \tnull, Верхняя Сысерть, 23-29 февраля, 2020: Тез.докл.-Екатеринбург:ИФМ УрО РАН.- 68 с.
12. Д.А.Прокопьев. Исследование фазового состава наночастиц в углеродной оболочке Fe@C методом ЯМР [Текст] / Д.А.Прокопьев, А.Ю.Гермов, К.Н.Михалев, М.А.Уймин, А.Е.Ермаков, А.С.Конов // VII Международная молодежная научная конференция Физика. Технологии. Инновации (ФТИ-2020), Екатеринбург, 18-22 мая, 2020: Тез.докл.-Екатеринбург:УРФУ.- 821 с.
13. Д.А.Прокопьев. Исследование фазового состава наночастиц в углеродной оболочке Ni@C методом ЯМР [Текст] / Д.А.Прокопьев, А.Ю.Гермов, К.Н.Михалев, М.А.Уймин, А.Е.Ермаков // VI Международная молодежная научная конференция «Физика. Технологии. Инновации» (ФТИ-2019), Екатеринбург, 20-24 мая, 2019: Тез.докл.-Екатеринбург:ФГАОУ ВО УрФУ.- 768 с.

Спасибо за внимание!