

**КАЗАНСКИЙ (ПРИВОЛЖСКИЙ) ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**А.В. Аганов, А.Л. Ларионов**

**К 75-ЛЕТИЮ ОТКРЫТИЯ МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА  
Страницы истории. Развитие радиоспектроскопии  
в Казанском университете**



**Завойский Евгений Константинович**

**КАЗАНЬ  
2020**

**УДК 539.1**  
**ББК 22.38.Г**  
**А23, Л25**

Печатается по рекомендации учебно-методической комиссии  
Института физики Казанского федерального университета

Рецензенты:

Доктор физико-математических наук, профессор **М.С. Тагиров**  
Кандидат физико-математических наук, доцент **А.В. Дуглав**

**А.В. Аганов, А.Л. Ларионов**

**А23, Л.25 К 75-летию открытия магнитного резонанса. Страницы истории. Развитие радиоспектроскопии в Казанском университете / А.В. Аганов, А.Л. Ларионов. – Изд. 2-е, доп. и перераб. – Казань: Изд-во Казан. Ун-та, 2020. – 234 с.**

**ISBN 978-5-00130-244-5**

Монография представляет собой краткий обзор этапов развития двух ветвей магнитного резонанса – электронного парамагнитного и ядерного магнитного резонансов, начиная с первых попыток наблюдения резонансного поглощения электромагнитных волн в парамагнетиках. Более подробно описано, как это направление исследований формировалось в Казанском университете, в СССР. Отмечены все наиболее значимые работы, посвященные созданию экспериментальной базы ЭПР и ЯМР в университете с момента изготовления первых спектрометров до сегодняшних разработок. Подведен краткий итог развития магнитно-резонансных методов исследования и их приложений в самых разнообразных областях знания до 2010 года, когда начались существенные преобразования в системе Высшей школы России и Академии наук. Отмечено, что они наложили глубокий отпечаток на развитие науки в России в целом и на развитие одного из важнейших ее направлений «Магнитный резонанс в материаловедении и в медикобиологических исследованиях» в частности. Приведены основные достижения коллективов университета, использующих эти методы в своих исследованиях в области физики, химии, биологии и медицины, в нефтегазовых технологиях, а также для решения задач в различных секторах экономики за последнее десятилетие. Отмечены современные тенденции развития методов магнитного резонанса в мире, место России, относительный вклад ее ведущих коллективов. В приложениях 1 и 2 приведен перечень докторских и кандидатских диссертаций, выполненных в Казанском университете в этой области, включая диссертации, выполнение или аттестация которых связаны с Казанским университетом. В приложении 3 приведен перечень мероприятий, проводимых в Казани, связанных с Казанской школой радиоспектроскопии.

**УДК 539.1**  
**ББК 22.38.Г**

**ISBN 978-5-00130-244-5**

**Аганов А.В., Ларионов А.Л., 2020**  
**Издательство Казанского университета, 2020**

## СОДЕРЖАНИЕ

|  |    |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ .....   | 5  |
| 1. МАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС НАЧАЛЬНОГО ПЕРИОДА<br>В СССР .....   | 12 |
| 1.1. Е.К. Завойский. Школа магнитной радиоспектроскопии<br>в Казанском университете .....  | 12 |
| 1.2. Начальный период развития магнитного резонанса<br>в СССР и Казанском университете .....   | 22 |
| 2. РАЗВИТИЕ МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА<br>В КАЗАНСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ .....   | 27 |
| 2.1. Развитие экспериментальной базы исследований .....  | 27 |
| 2.1.1. <i>Спектрометры ЭПР</i> .....   | 27 |
| 2.1.2. <i>ЯМР спектрометры и релаксометры</i> .....  | 30 |
| 2.2. Основные достижения школы «Резонансные свойства<br>конденсированных сред» Казанского университета<br>с середины 1960-х до 2005-2008 гг. ....  | 35 |
| 2.2.1. <i>Исследования ван-флековских парамагнетиков</i> .....   | 36 |
| 2.2.2. <i>Исследование природы наноразмерных свойств<br/>сверхпроводников методами магнитного резонанса</i> .....  | 43 |
| 2.2.3. <i>Развитие градиентного ЯМР в исследованиях<br/>структуры и динамики сложных молекулярных систем</i> .....   | 51 |
| 2.2.4. <i>Ядерный магнитный резонанс высокого разрешения<br/>в структурно-динамических исследованиях молекулярных<br/>систем</i> .....   | 64 |
| 2.3. Теоретические и экспериментальные исследования<br>в области магнитного резонанса и родственных явлений<br>по основным научным направлениям Института физики<br>Казанского университета современного периода ..... | 76 |
| 2.3.1. <i>Направление «Перспективные материалы – структура<br/>и свойства новых веществ и материалов, в том числе<br/>для квантовых технологий»</i> .....  | 76 |

|  |     |
|--|-----|
| 2.3.2. Направление «Исследования медико-биологических систем физическими методами» .....   | 89  |
| 2.3.3. Направление «Развитие приложений физики в различных секторах экономики (в нефтегазовом, нефтехимическом, химическом, фармацевтическом и др.)» ..  | 95  |
| 3. ПРИЛОЖЕНИЯ ЯМР В ХИМИИ .....  | 99  |
| 3.1. ЯМР в химических исследованиях .....  | 99  |
| 3.1.1. Спектроскопия ЯМР высокого разрешения в органической и элементарорганической химии .....  | 99  |
| 3.1.2. Методы ЯМР релаксации в неорганической химии .....  | 104 |
| 3.2. Магнитный резонанс в геологии .....   | 106 |
| 3.2.1 ЭПР и ЯМР в исследованиях структуры и свойств минералов.....   | 106 |
| 3.2.2. ЯКР и ЯГР в изучении минералов.....   | 107 |
| 4. МАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС СЕГОДНЯ .....  | 110 |
| Вместо Заключения .....  | 132 |
| Авторский указатель .....  | 134 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....  | 141 |
| Приложение 1. Диссертации на соискание учёной степени доктора наук, выполненные в Казанском государственном (федеральном) университете сотрудниками, докторантами и соискателями физического факультета (Института физики) в области радиоспектроскопии и её приложений .....  | 182 |
| Приложение 2. Диссертации на соискание учёной степени кандидата наук, выполненные в Казанском государственном (федеральном) университете аспирантами, сотрудниками и соискателями физического факультета (Института физики) в области радиоспектроскопии и её приложений ..... | 189 |
| Приложение 3. Наследие .....   | 222 |

## ВВЕДЕНИЕ

Теме открытия явления Электронного Парамагнитного Резонанса (ЭПР) в Казани, в Казанском университете Евгением Константиновичем Завойским, включая итоги развития магнитного резонанса за 25 лет, посвящён ряд изданий [1–5].

Серия публикаций появилась в канун празднования 100-летия со дня его рождения, например, [6–8].

В этих изданиях отражены некоторые новые детали этого открытия, взгляд современников на его роль в становлении физической науки в послевоенные годы в Казани и научная деятельность Е.К. Завойского после его отъезда в 1947 г. в Москву. Практически всю информацию проще найти в поисковых системах Интернет, поэтому ограничимся лишь ссылками на основные публикации.

За прошедшие 10 лет в жизни российского научно-образовательного сообщества произошло много перемен. В водоворот событий был вовлечен и наш университет. В 2010 г. Казанский университет приобрел статус Федерального университета с целевым финансированием по «Программе развития ФГАОУ ВПО «Казанский (Приволжский) федеральный университет» на 2010–2015 гг.». Успешное ее завершение позволило университету включиться на конкурсной основе в новую программу «Глобальной конкурентоспособности российских университетов на 2015–2020 гг.». Она известна как программа «Топ–100» за право вхождения в число 100 ведущих университетов мира. Появилась настоятельная потребность объединить все группы университета, работающие в области магнитного резонанса, в один «Международный центр магнитного резонанса КФУ» (<http://kpfu.ru/physics/struktura/mezhdunarodnyj-centr-magnitnogo-rezonansa>). По такому пути пошли и ведущие университеты, где методы магнитного резонанса стали активно развиваться со времени открытия ЭПР и ЯМР, появления первых публикаций, открывавших

широчайший простор применению названных методов в самых разнообразных областях науки и техники ([http://cmr.spbu.ru/wp-content/uploads/Booklets/MR\\_laboratories\\_in\\_Russia\\_2015-2016.pdf](http://cmr.spbu.ru/wp-content/uploads/Booklets/MR_laboratories_in_Russia_2015-2016.pdf)).

В преддверии 75-летия со времени открытия магнитного резонанса в виде электронного парамагнитного резонанса вполне естественным было вновь перечитать страницы истории открытия, детали которого описаны самими участниками работ и ближайшими коллегами Е.К. Завойского, С.А. Альтшулером и Б.М. Козыревым [9–10].



Основатели Казанской школы радиоспектроскопии  
С.А. Альтшулер, Е.К. Завойский, Б.М. Козырев

Действительно, путь к открытию магнитного резонанса был достаточно длинным и ему предшествовали крупные научные достижения:

1913 г. В.К. Аркадьев. Открытие и создание теории ферромагнитного резонанса – явления избирательного поглощения энергии переменного поля в ферромагнетиках. Обнаружение зависимости магнитных свойств ферромагнетиков от частоты внешнего электромагнитного поля сантиметрового диапазона.

1922 г. О. Штерн и В. Герлах провели успешные эксперименты по пространственному квантованию проекции магнитного момента атома в магнитном поле  $H_0$ .

1922 г. А. Эйнштейн, П. Эренфест опубликовали работу о квантовых переходах между магнитными подуровнями атома под влиянием равновесного излучения.

1923 г. Я.Г. Дорфман предсказал фотомагнитный эффект – резонансное поглощение электромагнитных волн парамагнетиками. Попытка Я.Г. Дорфмана перенести идею А. Эйнштейна и П. Эренфеста на квантовые переходы между зеемановскими уровнями атомов в твёрдых телах, подвергнутая критике Е.К. Завойского [5, с. 210].

1932 г. И. Валлер предложил и разработал квантовую теорию парамагнитной релаксации, обусловленной модуляцией спин-спинового взаимодействия колебаниями атомов (механизм Валлера).

1936 г. К.Я. Гортером с сотрудниками предпринята первая неудачная попытка наблюдения поглощения электромагнитных волн в парамагнетиках.

1937 г. Работа И.А. Раби по определению ядерных магнитных моментов в молекулярных пучках, удостоенная Нобелевской премии по физике за 1944 г.

1938 г. Х. Казимир и Ф.К. Дю Пре развили феноменологическую теорию парамагнитной релаксации и ввели понятие температуры спиновой системы.

1939 г. Р. Крониг и независимо в 1939–1940 гг. Д.Х. Ван Флек построили теорию спин-решёточной релаксации, обусловленной модуляцией кристаллического поля колебаниями решётки (механизм Кронига-Ван Флека).

1940 г. Л.У. Альварес и Ф. Блох измерили магнитный момент нейтрона.

1941 г. (май–июнь). Е.К. Завойский отмечал в журнале измерений нерегулярные наблюдения протонного магнитного резонанса

в водных растворах парамагнитных солей. Но публикаций не последовало. Главной причиной недостаточной воспроизводимости результатов наблюдений была неоднородность постоянного магнитного поля, создававшегося магнитом невысокого качества [1].

1942 г. К.Я. Гортер сделал очередную неудачную попытку наблюдения поглощения электромагнитных волн в парамагнетиках, хотя теория парамагнитной релаксации благодаря усилиям его и его сотрудников, а также других теоретиков была построена.

1944 г. (Докт. дисс. представлена 27 декабря 1944 г., защищена 30 января 1945 г.), (ЖЭТФ, 1945. – Т.15, С.344) – Е.К. Завойским сделано открытие парамагнитного резонанса, обусловленного магнитными моментами электронов (приоритет от 12.07.1944 – начало отсчета эпохи магнитного резонанса).

1945 г. Я.И. Френкелем дана первая теоретическая интерпретация ЭПР.

1946 гг. Э.М. Парселл и Ф. Блох открыли явление парамагнитного резонанса на атомных ядрах в конденсированной среде (ЯМР) (Phys.Rev. 1946), (Нобелевская премия по физике за 1952 г.). В некоторых изданиях приводится дата наблюдения ЯМР декабрь, 1945 г.



Э.М. Парселл



Ф. Блох



1946–1947 гг. Дж. Гриффитс, Е.К. Завойский – открытие ферромагнитного резонанса.

1947–1948 гг. Н. Бломбергенем, Р.В. Паундом и Э.М. Парселлом создана теория ЯМР релаксации.

1950 г. Х. Демельт, Х. Крюгер открыли ядерный квадрупольный резонанс (ЯКР), обусловленный переходами между квадрупольными энергетическими уровнями ядер в кристаллах в отсутствие внешнего магнитного поля.

1951 г. М. Детч. Определение величины тонкой структуры основного энергетического уровня позитрония.

1951 г. Р. Поулисом, К.Я. Гортером и др. открыто явление антиферромагнитного резонанса.

1952–1955 гг. С.А. Альтшулером (КГУ) (ДАН СССР, 1952. – Т.85. – С.1235) предсказано явление и построена теория Акустического Парамагнитного Резонанса (АПР) (приоритет от 12.06.1952 г.), которое впоследствии впервые было обнаружено В. Проктором и др. (США, 1956 г.)



С.А. Альтшулер

Две основные ветви магнитного резонанса – ЭПР и ЯМР развивались относительно независимо. В работах казанских ученых

начального периода были получены результаты, определившие основные направления развития ЭПР и его приложений в различных областях науки. Они в деталях описаны в [1] и монографиях С.А. Альтшулера и Б.М. Козырева [9, 10].

Ниже приведены ссылки на основные результаты раннего периода.

1944 г. С.А. Альтшулер, Е.К. Завойский, Б.М. Козырев. Предложен новый метод исследования парамагнитной абсорбции.

1945 г. Е.К. Завойский. Парамагнитная релаксация в жидких растворах при перпендикулярных полях.

1945 г. Е.К. Завойский. Магнитоспиновый резонанс в парамагнетиках.

1946 г. Е.К. Завойский. Магнитоспиновый резонанс в области дециметровых волн.

1946 г. Е.К. Завойский. Сообщение о ЭПР на высоких частотах и о перспективах приложения ЭПР.

1947 г. Б.М. Козырев, С.Г. Салихов. Первое наблюдение парамагнитного резонанса в свободных радикалах.

1947 г. Е.К. Завойский. Определение магнитных и механических моментов атомов в твердых телах.

1947 г. Е.К. Завойский. Измерение магнитной восприимчивости парамагнетиков на дециметровых волнах.

1947 г. С.А. Альтшулер, Е.К. Завойский, Б.М. Козырев. К теории парамагнитной релаксации в перпендикулярных полях.

Первые зарубежные публикации, по сути, посвящены созданию техники эксперимента:

1947 г. Р. Кэммероу, Д. Холидей, Г. Мур. ЭПР в микроволновом диапазоне (метод проходящей волны).

1948 г. К. Уитнер, Р. Уэйднер, Дж. Хсианг, П. Вейсс. Микроволновый спектроскоп, работающий по принципу T-моста с использованием двойного моста.

1950 г. Т. Ингланд, Е. Шнайдер. Первое применение супергетеродинного метода наблюдения парамагнитного резонанса.

1953 г. Б. Блини\* и К. Стивенс. Первые исследования спектров парамагнитного резонанса в области водородных и гелиевых температур.

Отечественные разработки приборной базы, с помощью которой были выполнены экспериментальные исследования, представлены в следующих работах:

1954 г. Н.Н. Непримеров. Наблюдение вращения плоскости поляризации микроволн в парамагнетиках.

1956 г. А.А. Маненков, А.М. Прохоров\*\*. Микроволновый спектрометр с низкочастотной модуляцией магнитного поля (метод отражённой волны).

1959 г. А.Г. Семенов и Н.Н. Бубнов. Магнитный спектрометр с двойной (высокочастотной и низкочастотной) модуляцией.

1959 г. В.И. Аввакумов, Н.С. Гарифьянов. Б.М. Козырев, П.Г. Тишков. Создание конструкции резонатора, позволяющей производить измерения при повышенных и пониженных температурах.

Полную информацию по разработкам техники эксперимента раннего периода можно найти в монографиях:

К.Я. Гортер. «Парамагнитная релаксация». ИЛ. М. 1949.

В. Горди, В. Смит, Р. Трамбаруло. «Радиоспектроскопия». Гостехиздат. М. 1955.

В. Стрендберг. «Радиоспектроскопия». ИЛ. М. 1956.

---

\* В 1992 г. Б. Блини, один из крупнейших специалистов мира в области ЭПР, был избран почетным профессором Казанского университета.

\*\* Ч.Н. Таунс, Н.Г. Басов и А.М. Прохоров удостоены Нобелевской премии по физике 1964 г. «За фундаментальные работы в области квантовой электроники, которые привели к созданию генераторов и усилителей, основанных на принципах мазеров – лазеров». Следует отметить, что и сегодня методы магнитного резонанса активно используются при разработке материалов на основе квантовых технологий.

# 1. МАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС НАЧАЛЬНОГО ПЕРИОДА В СССР

## 1.1. Е.К. Завойский. Школа магнитной радиоспектроскопии в Казанском университете

Публикациями 1947 г. завершился казанский период работы Е.К. Завойского в области магнитного резонанса. Он получил приглашение И.В. Курчатова на работу в Москву по новой, на то время закрытой, тематике в области ядерной физики, ядерной энергетики в Лабораторию №2. (Лаборатория измерительных приборов АН СССР – ЛИПАН), преобразованную в последующем в Институт атомной энергии АН СССР – ныне Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»\*. По словам проф. Н.М. Сергеева (МГУ, лаб. ЯМР), «... он фактически как бы исчез из науки» [11, стр.9]. Это является наиболее вероятной причиной того, что открытие ЭПР не было отмечено Нобелевской премией: по условиям Нобелевского комитета премия автору открытия присуждается лишь в том случае, если он и далее активно развивает метод и жив на момент номинации\*\*. В 1957 г. Е.К. Завойский был награжден Ленинской премией «За открытие и изучение электронного парамагнитного резонанса». В 1964 году Е.К. Завойский был избран действительным членом Академии наук СССР.

Важно другое – сегодня во всем мире открытие магнитного резонанса связывают с Казанью, с именем Е.К. Завойского. Это становится понятным из данного им самим определения: *«Парамагнитный резонанс представляет собой совокупность явлений, связанных с квантовыми*

---

\* В 1949 году Е.К. Завойскому и др. была присуждена Сталинская премия за работу по созданию атомной бомбы.

\*\* Е.К. Завойский – единственный из сотрудников Института атомной энергии, которого И.В. Курчатов выдвигал на Нобелевскую премию за открытие ЭПР [12].

переходами, происходящими между энергетическими уровнями макроскопических систем под влиянием переменного магнитного поля резонансной частоты. В этом определении мы говорим о совокупности явлений, ибо наряду с резонансным парамагнитным поглощением наблюдается резонансная парамагнитная дисперсия, резонансное парамагнитное вращение и т.п. Кроме того, здесь подчёркнуто, что явления наблюдаются в макросистемах, где имеют место спин-спиновые, спин-решеточные и тому подобные взаимодействия, что отличает парамагнитный резонанс от резонансных опытов Раби с молекулярными пучками, Альвареса и Блоха – с пучками нейтронов и т.п.» ([9], стр. 19–20). Здесь нет ни слова о природе спина (следовательно, и магнитного момента) – электронный он или ядерный. Собственно, это подчеркнуто в названии первых статей Е.К. Завойского «Магнитоспиновый резонанс в парамагнетиках». Парамагнитный резонанс рассматривается как часть учения о магнетизме. Это и объясняет название Казанской школы радиоспектроскопии в более широком понимании: «Резонансные свойства конденсированных сред».

Поиски магнитного резонанса в Казани совершенно справедливо связывают с именами С.А. Альтшулера и Б.М. Козырева – молодыми коллегами Е.К. Завойского, разработавшего в 1930-х годах высокочувствительный метод измерения поглощения энергии высокочастотного (ВЧ) магнитного поля, основанный на изменении параметров генератора ВЧ, названного Е.К. Завойским методом сеточного тока\*. Фактической датой начала работ можно считать 1934 г., когда решением Наркомпроса РСФСР при единственной на то время физической кафедре физико-математического факультета Казанского университета по инициативе и прямом участии Е.К. Завойского была создана УКВ лаборатория (исследованиям радиоволн УКВ диапазона в предвоенные

---

\* Автотокный генератор, в основе которого лежит метод сеточного тока, предложенный и впервые примененный Е.К. Завойским, в послевоенные годы успешно использовался исследователями для наблюдения ЯМР на протонах воды в несложных по составу системах.

годы придавали большое значение). Ее первыми сотрудниками были вчерашние аспиранты физики-теоретики С.А. Альтшулер, А.В. Несмелов и химик Б.М. Козырев.

Первая задача, сформулированная Е.К. Завойским, С.А. Альтшулером и Б.М. Козыревым в области магнитной радиоспектроскопии ещё в 1940 году, заключалась в обнаружении резонансного магнитного поглощения на протонах.

И основной вопрос, на который предстояло дать ответ: достаточно ли эффективны релаксационные механизмы магнитных моментов ядер для обеспечения оттока энергии в тепловой резервуар. Никаких экспериментальных оценок времён ядерной магнитной релаксации в то время не было.

Грубые теоретические оценки свидетельствовали о чрезвычайно малоэффективной релаксации и не давали практически никаких надежд на наблюдение ожидаемого эффекта. Тесное сотрудничество блестящего экспериментатора Е.К. Завойского и его молодых коллег: С.А. Альтшулера – специалиста в области ядерной физики (он защитил кандидатскую диссертацию по ядерной физике под руководством И.Е. Тамма\* в 1936 г.) и Б.М. Козырева – специалиста в области физической химии оказалось весьма успешным. В мае–июне 1941 года Е.К. Завойский совместно с С.А. Альтшулером и Б.М. Козыревым неоднократно наблюдали протонный магнитный резонанс. Однако добиться надежной воспроизводимости результатов им не удалось. Как было выяснено впоследствии, причиной этого была неоднородность магнитного поля, создаваемого магнитом невысокого качества. Поэтому в работе [С.А. Альтшулер, Е.К. Завойский, Б.М. Козырев. ЖЭТФ. 1944. Т.14. с.407.] авторы ограничились упоминанием о том, что они поставили перед собой цель – обнаружить резонансное поглощение энергии осциллирующего магнитного поля атомными ядрами в постоянном поперечном магнитном поле гораздо более чувствительным

---

\* П.А. Черенков, И.М. Франк и И.Е. Тамм удостоены Нобелевской премии по физике 1958 г. «За открытие и интерпретацию эффекта Вавилова–Черенкова».

методом, чем калориметрический метод К.Я. Гортера. Но началась война... Работы по обнаружению резонансного поглощения электромагнитного излучения в парамагнетиках возобновились лишь в 1943 г. По рекомендации члена-корр. АН СССР Я.И. Френкеля, в годы войны (1941–1945) работавшего в Казанском университете\* (с марта 1943 г. заведовал кафедрой теоретической и экспериментальной физики, временно слившихся кафедр общей, экспериментальной и теоретической физики), и одновременно сотрудника Ленинградского физико-технического института АН СССР, Е.К. Завойский продолжил исследования парамагнитного поглощения, обязанного энергетическим переходам между электронными уровнями энергии неразбавленных парамагнитных солей марганца, хрома и меди, приведшие его к открытию электронного парамагнитного резонанса (ЭПР).

23 июня 1970 года Комитет по делам изобретений и открытий при Совете Министров СССР внёс в Государственный реестр СССР открытие Е.К. Завойского «Явление электронного парамагнитного резонанса» за № 85 с приоритетом от 12 июля 1944 года.

По рекомендации Я.И. Френкеля в 1945 году был организован Казанский филиал Академии наук СССР, в состав которого входил Казанский физико-технический институт (КФТИ, КазНЦ АН СССР, впоследствии КФТИ им. Е.К. Завойского КазНЦ РАН)\*\*, где Е.К. Завойский до 1947 года работал заведующим отделом радиоспектроскопии.

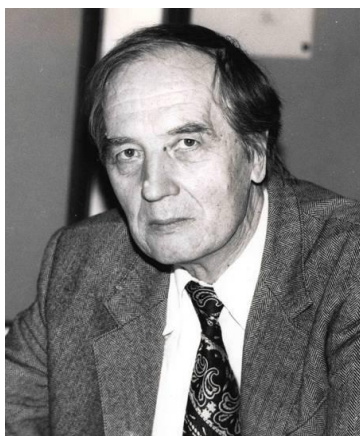
В Казанском университете становление школы магнитной радиоспектроскопии проходило под руководством С.А. Альтшулера

---

\* В годы войны физическое отделение АН СССР было эвакуировано в Казань, жизнь и работа его сотрудников проходила в Казанском университете, что благотворно отразилось на развитии физики в университете [13].

\*\* Все академические институты Казани входили в структуру КФ АН СССР (КФАН СССР), преобразованного в 1990 г. в КазНЦ АН СССР, переименованный в 1992 г. в КазНЦ РАН. С 2019 г. академические институты Казани вошли в состав Федерального исследовательского центра КазНЦ РАН (ФИЦ КазНЦ РАН) как обособленные подразделения с прежними названиями. Здесь и далее приводятся названия учреждений и подразделений описываемого периода, зачастую сокращенно. В данном случае используется аббревиатура КФТИ.

(после его кончины это направление возглавил Б.И. Кочелаев), а в КФТИ – Б.М. Козырева.



Б.И. Кочелаев

Новая страница истории ЭПР, магнитного резонанса в Казани начинается с публикаций:

- С.А. Альтшулер, Е.К. Завойский, Б.М. Козырев. К теории парамагнитной релаксации в перпендикулярных полях. Письма в ЖЭТФ. 1947. Т.17. №12. С.1122–1123. (Форма линии парамагнитного поглощения).
- Б.М. Козырев, С.Г. Салихов. Парамагнитная релаксация в пентафенилциклопентадиениле. Докл. АН СССР. 1947. Т.58. №6. С.1023–1025 (Первое наблюдение ЭПР в свободном радикале).
- С.А. Альтшулер, Б.М. Козырев, С.Г. Салихов. Влияние ядерного спина на резонансное парамагнитное поглощение в растворах солей марганца и меди. Докл. АН СССР. 1950. Т.71. №5. С.855–857 (Открытие влияния ядерного спина парамагнитного атома на структуру линии ЭПР).
- С.А. Альтшулер, В.Я. Куренев, С.Г. Салихов. Парамагнитное резонансное поглощение в кристаллических порошках некоторых соединений редкоземельных элементов. Докл. АН СССР. 1950. Т.70. №2. С.201–204.



– С.А. Альтшулер, В.Я. Куренев, С.Г. Салихов. Парамагнитное резонансное поглощение в металлах. Докл. АН СССР. 1952. Т.84. №4. С.677–679.

Далее последовали работы с участием Н.Н. Непримерова, Р.Ш. Нигматуллина\*, Р.М. Валишева, В.И. Аввакумова, Н.С. Гарифьянова, П.Г. Тишкова (1953–1959 г.г.), К.А. Валиева,\*\* М.М. Зарипова, Г.Я. Глебашева, Л.Я. Шекуна\*\*\*, Ш.Ш. Башкирова, Б.И. Кочелаева (1960) и др.



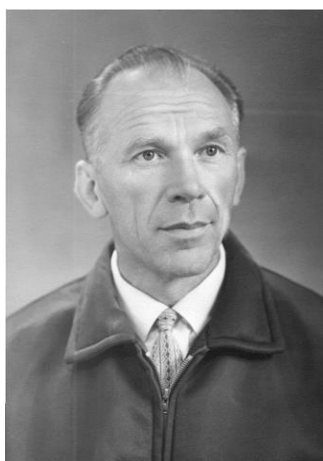
Р.Ш. Нигматуллин

---

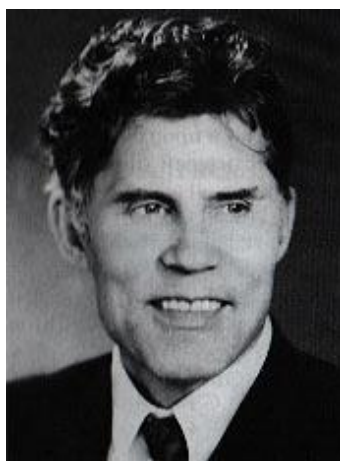
\* Нигматуллин Рашид Шакирович (1923–1991). Крупный отечественный физик, доктор физико-математических наук, профессор. Внес фундаментальный вклад в создание новой области науки – молекулярной электроники и основал известную в стране и за ее пределами научную школу. Организатор науки и государственный деятель – Председатель Верховного Совета ТАССР (1971–1979), ректор Казанского авиационного института (ныне КНИТУ-КАИ), участник Великой Отечественной войны.

\*\* Валиев Камил Ахметович (1931–2010), выдающийся физик и организатор науки, создатель отечественной микроэлектроники, академик АН СССР и РАН, директор и руководитель Физико-технологического института РАН, лауреат Ленинской премии и Премии Правительства Российской Федерации. После защиты кандидатской диссертации создал кафедру теоретической физики в Казанском педагогическом институте (ныне кафедра вычислительной физики КФУ).

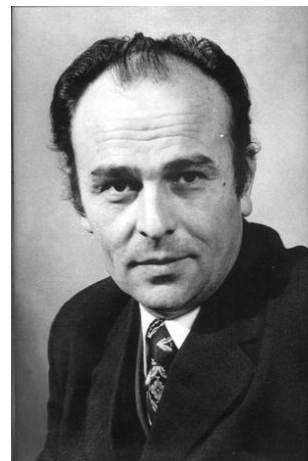
\*\*\* Л.Я. Шекун (1931–1967) – специалист по теории спектров ЭПР редкоземельных ионов в кристаллах, преждевременно скончался в расцвете научной деятельности.



Н.Н. Непримеров



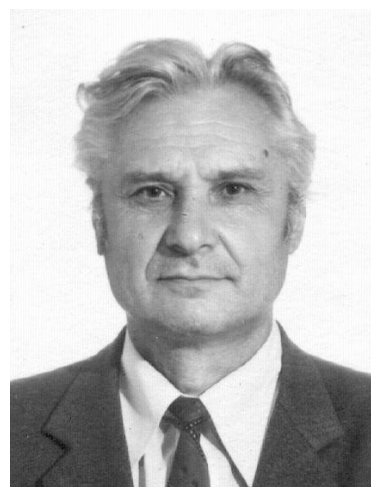
К.А. Валиев



М.М. Зарипов



Л.Я. Шекун



Ш.Ш. Башкиров

История развития магнитного резонанса в КФТИ – отдельная тема, которая достаточно полно освещена в изданиях КФТИ (см., например, [4]). Отметим лишь, что за небольшим исключением сотрудники КФТИ являются выпускниками Казанского университета и активно сотрудничают друг с другом. После Б.М. Козырева работы в области магнитного резонанса в КФТИ возглавляли М.М. Зарипов\*, директор КФТИ (1972–1988) и по совместительству профессор кафедры

---

\* М.М. Зарипов – Лауреат Государственной премии СССР в области науки и техники 1988 г. (в составе коллектива авторов) за цикл работ «Открытие явления импульсной ориентированной кристаллизации твёрдых тел (лазерный отжиг)». Возглавлял кафедру радиоспектроскопии и квантовой электроники в период 1963–1971 гг. до перехода в КФТИ КФ АН СССР.

радиоспектроскопии и квантовой электроники Казанского университета, и сменивший его на посту директора К.М. Салихов\* (1988–2014 гг.), по совместительству заведующий созданной им в Казанском университете кафедрой химической физики (1989–2014 гг.).



К.М. Салихов

Особое влияние на развитие приложений магнитного резонанса в химии оказал Б.А. Арбузов, одним из первых в СССР оценивший огромные возможности для развития науки, которые таят в себе физические методы исследования, и активно внедрявший их как в Казанском университете, так и в ИОФХ КФ АН СССР\*\*.

---

\* К.М. Салихов – Лауреат Ленинской премии 1986 г. (в составе коллектива авторов за работы по магнитно–спиновым эффектам).

\*\* Ныне – Институт органической и физической химии им. А.Е. Арбузова – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук»» (ИОФХ).

По инициативе Б.А. Арбузова в 1957 г. на химическом факультете Казанского университета была создана Проблемная лаборатория изучения структуры органических соединений, формирование научных групп в которой (в том числе спектроскопии ЯМР высокого разрешения) было поручено Ю.Ю. Самитову, на момент создания доценту кафедры экспериментальной и теоретической физики физико-математического факультета, затем профессору кафедры квантовой электроники и радиоспектроскопии (1969–1984) физического факультета университета, и уже в последние годы жизни – профессору кафедры органической химии химического факультета.

В начале 1960-х лаборатория радиоспектроскопии была создана Б.А. Арбузовым в ИОФХ КФ АН СССР (ныне ИОФХ им. А.Е. Арбузова КазНЦ РАН). Создание коллектива было возложено также на Ю.Ю. Самитова\*.

В последующем ее возглавлял А.В. Ильясов. В настоящее время руководителем является Ш.К. Латыпов [11]. Основные результаты в области приложения ЯМР высокого разрешения к химии, полученные в совместных с университетом исследованиях, будут отмечены ниже. Вопросы развития ЭПР в ИОФХ описаны в монографии [14].

---

\* В последующем воспитанниками Ю.Ю. Самитова были созданы лаборатории ЯМР в КХТИ (ныне КНИТУ-КХТИ), в Институте Химпромавтоматика, КГВИ (ныне КГВА), в ПО Нижнекамскнефтехим (г. Нижнекамск) и других организациях. Однако в годы перестройки они были расформированы.



Б.А. Арбузов



Ю.Ю. Самитов

Вторая ветвь – ядерный магнитный резонанс. основополагающие работы, заложившие основы дальнейшего развития ЯМР, приведены в серии монографий раннего периода [15–17].

В двух последних изданиях приведены ссылки и на работы отечественных авторов.

Ниже приведены лишь ключевые публикации в области ЯМР:

1949–1950 гг. В. Найт, В. Дикинсон, В. Проктор, Х. Гутовский и др. сообщили об обнаружении химических сдвигов магнитных ядер.

1951 г. В. Проктор, Х. Гутовский и Д. МакКолл, Э. Эндрю, Ч. Сликтер и др. наблюдали мультиплеты в спектрах ЯМР, обусловленные косвенным спин-спиновым взаимодействием.

1950 г. Э.Л. Хан разработал метод спинового эха.

1953 г. Х. Гутовский, Д. МакКолл и Ч. Сликтер впервые наблюдали исчезновение спин-спиновых мультиплетов в спектрах ЯМР при изменении температуры, обусловленное протонным обменом. Это явление получило название химический обмен, позиционный обмен. Первые наблюдения химического обмена в спектрах ЭПР датированы 1961 г.

## 1.2. Начальный период развития магнитного резонанса в СССР и Казанском университете

Естественно, в СССР в начальный период ЭПР развивался под влиянием и с участием казанских ученых. Вслед за Казанью возникли научные группы в Москве, Ленинграде:

1948 г. Физический Институт АН СССР (ФИАН). И.Г. Шапошников. Защита докторской диссертации в ФИАНе. (В 1944–1948 гг. он работал доцентом в Казанском университете). В последующем И.Г. Шапошников возглавил работы в области радиоспектроскопии в Пермском государственном университете (с 1948 г. – заведующий кафедрой теоретической физики).

1956 г. А.А. Маненков, А.М. Прохоров. ЭПР спектрометр с модуляцией магнитного поля, работающий по методу отраженной волны. А.А. Маненков (выпускник Казанского университета 1952 г., с 1953 г. сотрудник ФИАН, с 1983 г. сотрудник Института общей физики АН СССР, лауреат Государственной премии СССР 1976 г.). В последующем он тесно сотрудничал с группой ЭПР-спектроскопии Казанского университета в области изучения материалов для квантовой электроники – наиболее важной области применения ЭПР в физическом материаловедении и того времени, и поныне. Подтверждение тому – то обстоятельство, что долгое время А.А. Маненков, А.М. Прохоров, Н.Г. Басов использовали метод ЭПР в работах по созданию материалов для первых лазеров.

1954–1957 г. Грузия. Тбилиси. Т.И. Санадзе, Г.Р. Хуцишвили, Л.Л. Буишвили, М.Д. Звиададзе и др. Механизмы динамической поляризации ядер в твёрдых телах. Теория ядерной спиновой диффузии (Г.Р. Хуцишвили). Феноменологические теории релаксационных и резонансных явлений в ядерной подсистеме парамагнетиков (Г.Р. Хуцишвили). Солид-эффект.

1957 г. Г.В. Скороцкий. В 1953–1964 гг. – зав. каф. теоретической физики Уральского политехнического института. С 1964 г. – зав. каф. квантовой электроники МФТИ. Под его руководством были разработаны прецизионные магнетометры. Развил теорию явлений магнитного резонанса, методы его наблюдения и т.д. В 1959 г. предсказал возможность наблюдения так называемого спонтанного резонанса, экспериментально наблюдавшегося позднее Е.Б. Александровым, а затем Э.Л. Ханом (США). Организатор всесоюзных школ по магнитному резонансу, по голографии и когерентной оптике.

1957 г. Л.А. Блюменфельд, А.Е. Калмансон, ИХФ АН СССР. Л.А. Блюменфельд – создатель крупнейшей в стране биофизической школы, зав. лабораторией физики биополимеров ИХФ АН СССР. В 1959 г. основал кафедру биофизики физического факультета МГУ. Был Председателем Совета по радиоспектроскопии при АН СССР. Создал направление ЭПР в полимерах.

1957 г. А.К. Чирков, Р.О. Матевосян. ЭПР в свободных радикалах. УПИ. В 1966 г. ими в Институте Химии УФ АН СССР (с 1971 г. – Уральский Научный центр) была создана лаборатория физических и физико-химических методов исследования органических соединений.

1958 г. В.В. Воеводский, Ю.Н. Молин, Ю.Н. Цветков, Н.Н. Бубнов, СО РАН, Институт химической кинетики и горения. В.В. Воеводский в последующем один из крупнейших в стране специалистов в области химической физики. Один из отечественных первопроходцев применения метода радиоспектроскопии в исследованиях структуры, свойств и химических превращений свободных радикалов в разнообразных химических процессах.

1959 г. А.Г. Семенов, Н.Н. Бубнов. ЭПР в микроволновом диапазоне с двойной модуляцией магнитного поля. ИНЭОС АН СССР. Бубнов стал руководителем группы (1965–1992 гг.) и лаборатории (1992–2004 гг.) ЭПР спектроскопии. Им создано направление «ЭПР

в органической и элементоорганической химии для исследования строения и реакционной способности радикалов».

### **Этапы развития ЯМР:**

1947 г. К.В. Владимирский впервые в СССР наблюдал сигналы ЯМР (ДАН СССР, 58, 1625), ФИАН (Физический институт АН СССР). Таким образом, следом за Казанским университетом центр радиоспектроскопии сформировался в ФИАНе.

1950–1955 гг. Московский государственный университет. С.Д. Гвоздовер и А.А. Магазанник опубликовали первую статью по ЯМР (ЖЭТФ, 1950). В МГУ создается направление радиоспектроскопии – ЯМР.

1950–1957 г. Начало работ в области ЯМР в Казанском университете. Первая статья Ю.Ю. Самитова по протонной релаксации (ЖЭТФ, 1952). И создание им группы спектроскопии ЯМР высокого разрешения после возвращения из Вьетнама, куда он был направлен на работу после защиты кандидатской диссертации и где он познакомился с П.М. Бородиным.

1952–1955 гг. Создание школы радиоспектроскопии в Ленинградском университете. Ф.И. Скрипов впервые в СССР получил сигнал ЯМР в магнитном поле Земли. П.М. Бородин создает первый в СССР ЯМР спектрометр высокого разрешения на ядрах фтора-19.

1954 г. Б.М. Козырев и А.И. Ривкинд (Казань, КФТИ, КазНЦ АН СССР) опубликовали работу по протонной магнитной релаксации.

1958 г. Н. Бломберген, П.П. Сорокин. ЯМР  $^{133}\text{Cs}$ . (N. Bloembergen, P.P. Sorokin. Nuclear magnetic resonance in the cesium halides // Phys.Rev. – 1958. – V.110, №4. – P.865–875).

Результаты исследований методом ЭПР начального периода приведены в [9, 10], ссылки на работы по ЯМР, выполненные в СССР – в монографиях [16, 17]. В деталях этот период развития радиоспектроскопии в СССР описан А.В. Кессенихом – представителем первой волны



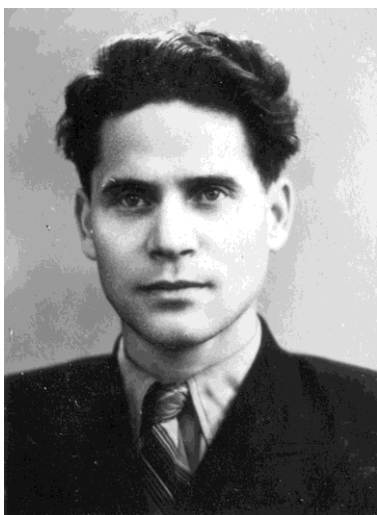
специалистов ЯМР (из группы С.Д. Гвоздовера) и главным историографом магнитного резонанса в нашей стране. Достаточно оснований для того, чтобы считать, что все названные группы приступили к освоению новой области радиоспектроскопии ЯМР независимо и практически в одно время – в начале 1950-х гг. [18, 19]\*.

Поэтому отметим лишь наиболее значимые результаты, достигнутые в Казанском университете первым поколением учеников Е.К. Завойского и С.А. Альтшулера – основателей школы радиоспектроскопии Казанского университета, предопределившим развитие радиоспектроскопии и ее различных приложений в Казанском университете:

- Развитие классической теории ЭПР в кристаллах (М.М. Зарипов).
  - Развитие теории парамагнитной релаксации (формула Орбаха–Аминова) (конец 1960-х – начало 1970-х гг.).
  - основополагающие работы по исследованию сверхрассеяния света в парамагнетиках, явления фононной лавины (Б.И. Кочелаев и др., конец 1960-х – начало 1970-х гг.).
  - Создание основ теории ЭПР в сверхпроводниках (Б.И. Кочелаев и др., конец 1970-х – 1980-е гг.).
- Созданы новые направления в СССР (1959–1960 гг.):
- Ю.Ю. Самитов – один из основоположников спектроскопии ЯМР  $^1\text{H}$  высокого разрешения в химии.
  - Р.А. Даутов стоял у истоков развития метода «спинового эха» в стране.
  - А.И. Маклаков создал в университете направление исследований – ЯМР релаксация в полимерах.

---

\* Развитие магнитного резонанса (в основном ЯМР) начального периода в СССР, с личными воспоминаниями, подробно описаны А.В. Кессенихом в [19а,б].



Р.А. Даутов



А.И. Маклаков

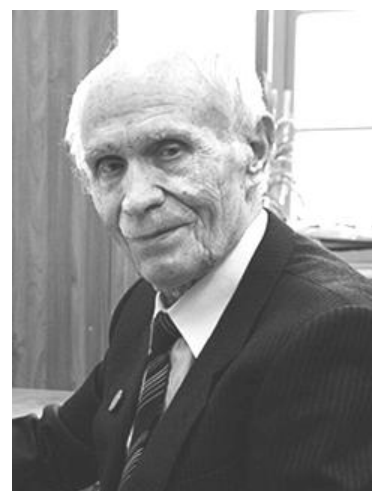
- А.А. Попелем разработан новый физико-химический метод (магнитно-релаксационный) анализа и исследования неорганических веществ.
- В.М. Винокуров совместно с М.М. Зариповым внедрил ЭПР в практику изучения минералов.
- И.Н. Пеньков внедрил методы ядерного квадрупольного резонанса в исследования особенностей химизма и структуры минералов.



А.А. Попель



В.М. Винокуров



И.Н. Пеньков

## 2. РАЗВИТИЕ МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА В КАЗАНСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

### 2.1. Развитие экспериментальной базы исследований

В течение длительного времени экспериментальные работы в университете проводились на оригинальных спектрометрах, созданных в лабораториях Казанского университета. Ниже приведены основные вехи достижений КФУ в развитии приборостроения, которые в известной степени оказали влияние на развитие магнитного резонанса в Казани и в целом в стране.

#### 2.1.1. Спектрометры ЭПР

За небольшим исключением ЭПР спектрометры были разработаны и изготовлены в лаборатории магнитной радиоспектроскопии (МРС) (ныне имени ее основателя С.А. Альтшулера) физического факультета. В конце 50-х в лаборатории имелся, по крайней мере, один самодельный спектрометр X-диапазона (длина волны 3.2 см), который в 1963 г. был модернизирован для проведения измерений при температуре жидкого гелия.

1960 г. Созданы первые электромагниты собственной конструкции и изготовления (Ю.Е. Польский, А.Л. Бильдюкевич и др.). Позже, когда потребности лаборатории МРС были удовлетворены, более десятка магнитов были изготовлены и поставлены в лаборатории академических институтов и отраслевых НИИ.

1960–1961 гг. Лаборатория ПЛИСОС химического факультета. ЭПР спектрометры метрового и 3-х см диапазонов (Ю.Ю. Самитов, А.В. Аганов, фактически сотрудник и студент физического факультета, соответственно). Но в последующем ЭПР тематика в лаборатории не развивалась.

1962 г. Установлен и введен в эксплуатацию гелиевый ожижитель ГС-2 (Б.Д. Пец, П.М. Голобурдов, Ф.С. Имамутдинов, Е.И. Кириллов и др.). Также был смонтирован и приведен в действие рефрижератор гелия-3, изготовленный по специальному заказу в Харьковском физико-техническом институте АН СССР. Начаты исследования ЯМР при температурах ниже 1 К (В.Д. Корепанов, А.И. Черницын, А.Д. Швец, Е.И. Кириллов, В.М. Самсонов).

В.Г. Степановым был разработан спектрометр ЭПР 8-мм диапазона, позволявший проводить исследования при температуре жидкого гелия. Оригинальная конструкция криостата и резонатора позволяли проводить смену образцов при 4 К, что позволяло за одну гелиевую заливку исследовать несколько кристаллов. Большая работа по экспериментальным спектроскопическим исследованиям кристаллов и минералов на 8-мм спектрометре была проведена Р.Ю. Абдулсабировым.

С появлением в лаборатории МРС жидкого гелия начаты исследования кристаллов с примесью редкоземельных ионов методом ЭПР.

1966 г. Начали изготавливать установки для измерения времен спин-решеточной релаксации методом импульсного насыщения. Вначале на частотах 9,5 ГГц (И.Н. Куркин, А.Н. Катышев) и 36,0 ГГц (А.А. Антипин\*), а позднее – на 3 ГГц (А.А. Антипин), 15 ГГц (Ю.К. Чиркин) и 24 ГГц (К.П. Чернов).

1969 г. Начаты исследования методом электронного спинового эха (И.Н. Куркин).

1970 г. Создан ЭПР спектрометр-релаксометр, работающий в 5 см диапазоне (Б.В. Соловьев). Под руководством Б.Г. Тарасова начаты исследования полимеров.

---

\* А.А. Антипин, талантливый экспериментатор, руководитель группы, преждевременно скончался в 1989 г. после тяжелой болезни, не успев завершить докторскую диссертацию.

1970-е гг. По инициативе С.А. Альтшулера был создан уникальный комплекс научно-измерительных установок, позволявший проводить исследования неравновесных свойств парамагнитных ионных кристаллов традиционными и вновь разработанными методами ЭПР при помощи электромагнитных, радиочастотных, оптических, звуковых, импульсных магнитных и тепловых полей (А.Х. Хасанов, Р.М. Валишев, А.В. Дуглав, Ф.С. Имамутдинов, Ю.Г. Назаров).

1971 г. В.И. Шленкиным изготовлена установка электронного спинового эха с высокими техническими характеристиками.

1975–1985 гг. А.А. Антипиным в содружестве с сотрудниками ГОИ разработан и апробирован лазерный ЭПР спектрометр.

Этот спектрометр был успешно применен для исследования активированных редкоземельными ионами кристаллов и стекол. Лабораторный образец спектрометра был взят за основу для изготовления опытной серии лазерных ЭПР-спектрометров. Под руководством А.А. Антипина разработан и изготовлен оригинальный спектрометр электронного спинового эха на частоту 36 ГГц (ЛПД в качестве источника СВЧ импульсов), который на момент создания не имел аналогов в мире.

1980-е гг. А.А. Антипиным была предложена и совместно с сотрудниками лаборатории МРС реализована методика тепловых импульсов, позволяющая регистрировать ЭПР на возбужденных штарковских подуровнях (А.А. Антипин, Р.М. Рахматуллин, Ю.К. Розенцвайг).

С 1965 г. наряду с классической ЭПР-спектроскопией, развивался метод двойного электронно-ядерного резонанса (ДЭЯР, Ю.Е. Польский). Был собран спектрометр ДЭЯР, на котором впервые наблюдался ДЭЯР на локализованных парамагнитных центрах  $\text{CaF}_2:\text{V}^{3+}$  (Ю.Е. Польский, Ю.Ф. Митрофанов, М.Л. Фалин). Приоритетным результатом является обнаружение явления тройного электронно-ядерного резонанса на ионах ванадия в кристаллах флюорита. При создании экспериментальной техники был сконструирован

оригинальный спиральный резонатор, описанный позднее в классических учебниках по технике ЭПР.

Под специальные эксперименты (исследование спиновой кинетики и спектров ЭПР при низких температурах, эксперименты по наблюдению фононной лавины и др.) были модифицированы следующие промышленные спектрометры:

1964 г. – спектрометр X,K,Q диапазона фирмы Jeol (Япония),

1966 г. – спектрометр X диапазона фирмы Thomson (Франция),

1971 г. – спектрометры X-диапазона РЭ – 1301 (СССР),

1984 г. – спектрометр X диапазона ESP300 фирмы Bruker (Германия),

1986 г. – спектрометр-релаксометр X-диапазона ИРЭС-1003 (СССР),

2007 г. – спектрометр X, W диапазона Elexsys-680 фирмы Bruker (Германия),

2017 г. – спектрометр X диапазона Лабрадор, Екатеринбург (Россия).

### ***2.1.2. ЯМР спектрометры и релаксометры***

1958 г. Создан опытный образец импульсного спектрометра ядерного магнитного резонанса для измерения времен протонной релаксации (ЯМР релаксометр). Впервые в Советском Союзе наблюдалось ядерное «спиновое эхо» (В.Д. Корепанов, Р.А. Даутов, В.М. Фадеев). На его основе в 1960-61 гг. был разработан серийный прибор для измерения времен релаксации протонов методом «спинового эха» (В.Д. Корепанов, А.И. Черницын). Релаксометры этой конструкции поступили в НИИ и заводские лаборатории, где они применялись для изучения физических и химических свойств водородосодержащих веществ, для контроля технологических процессов.

1959–1960 гг. Ю.Ю. Самитовым с сотрудниками создан один из первых в СССР ЯМР  $^1\text{H}$  спектрометров высокого разрешения

(ЯМР КГУ–1). Одновременно и независимо созданы подобные спектрометры в ИХФ (В.Ф. Быстров и др.) и в КФТИ КазНЦ АН СССР (Ю.Я. Шамонин и др.). Публикации датированы 1961 г.

1959–1962 гг. Разработан один первых в СССР спектрометров ЯМР  $^1\text{H}$  широких линий (Ю.Ю. Самитов, А.В. Аганов). (В те же годы создан спектрометр ЯМР широких линий А.С. Лундиным и Г.М. Михайловым (Красноярск), публикация 1960 г).

1963 г. А.И. Маклаков, Г.Г. Пименов и др. Создан первый в СССР протонный релаксометр для исследования полимеров.

1962–1964 гг. На кафедре аналитической химии А.В. Захаров и Ю.И. Сальников изготовили по типовым радиосхемам два ЯМР релаксометра на протонах для своих научных и учебных целей. (Один из них до сих пор используется в спецпрактикуме студентов кафедры неорганической химии).

1964–1966 гг. Ю.Ю. Самитов, Т.В. Зыкова. Модификация спектрометра ЯМР-КГУ-1 для определения химических сдвигов ядра фосфора-31, создание спектрометра для прямого наблюдения резонанса на ядрах фосфор-31 (ЯМР-КГУ-2, публикация датирована 1967 г. Прибор был создан по заказу ИОФХ КНЦ РАН). На юбилейной конференции КФТИ КФ АН СССР 1966 г. сообщалось о создании сотрудниками КФТИ спектрометра для прямого наблюдения резонанса фосфора-31 (С.Г. Салихов, Ю.А. Петров, Э.И. Логинова) на базе постоянного магнита, разработанного Ю.Ю. Самитовым.

1964–1966 гг. Создан специализированный спектрометр ЯМР  $^1\text{H}$  высокого разрешения для измерения жидких образцов при рекордно низких для того времени температурах (123 К) (ЯМР КГУ-3, А.В. Аганов и др., ПТЭ, 1967).

В эти же годы под руководством Ю.Ю. Самитова был создан спектрометр ЯМР  $^1\text{H}$  (КГУ–4) по заказу предприятия (п/я) г. Бийска.

1965 г. Автодинный спектрометр ЯМР низкого разрешения (ЯМР широких линий) (2–35 МГц) для измерений при криотемпературах (М.А. Теплов).



М.А. Теплов

В середине 1960-х годов на кафедре неорганической химии химфака (В.Н. Капустин, В.В. Ведерников, В. Буторин, А.И. Хаяров (ПЛИСОС Химфака), К.С. Сайкин (каф. радиоэлектроники физфака)) создан многоядерный релаксометр на частотах 5 и 15 МГц, с накопителем сигналов.

1974 г. ЯМР спектрометр с импульсным градиентом магнитного поля (ИГМП) (В.Д. Скирда, А.И. Маклаков, Г.Г. Пименов, А.Г. Стежко).

1978 г. Автодинный спектрометр ЯМР (50–320 МГц) – М.А. Теплов, М.С. Тагиров, А.А. Кудряшов.

1978 г. Спектрометр ЯМР в условиях гидростатического давления до 10 кбар, 4,2 К – М.С. Тагиров (всего 11 спектрометров разного назначения).

1980 г. Были начаты эксперименты при сверхнизких температурах. При содействии академика П.Л. Капицы и заведующего лабораторией ОИЯИ Б.С. Неганова, при помощи специалистов завода «Гелиймаш» Р.Г. Амамчана и С.Н. Болдырева группе М.А. Теплова удалось установить в 1980 г. в лаборатории МРС рефрижератор растворения изотопов гелия. Три года в общей сложности понадобилось М.А. Теплову с учениками (А.Г. Володин и М.С. Тагиров, а чуть позже



В.В. Налетов), чтобы довести эту сложную технику до рабочего состояния и приспособить для ЯМР-исследований. На установке было получено много важных результатов по стационарному и импульсному ЯМР до температуры 50 мК.

В 2000-е годы на базе электромагнита ЯМР спектрометра высокого разрешения Tesla BS 467A изготовлен многоядерный и многочастотный (5, 10, 15 и 25 МГц) импульсный релаксометр с ЭВМ-обработкой ЯМР сигналов и их накоплением (А.И. Мухтаров, кафедра неорганической химии ХИ им А.М. Бутлерова).

С появлением сверхпроводящих магнитов (на рубеже 1980-х гг.) наступила эра промышленных приборов нового поколения. Создание сверхпроводящих магнитов в лабораторных условиях было невозможно. По этой причине дальнейшие разработки ЯМР спектрометров были направлены на модификацию промышленных приборов для проведения специальных экспериментов и создание специализированных спектрометров для физических экспериментов, не останавливаются они и в настоящее время.

2002 г. В группе М.С. Тагирова (В.В. Налетов и Д.И. Абубакиров) создали мостовую схему спектрометра ЯМР для частотного диапазона 18–700 МГц для исследования ван-флековских парамагнетиков в сильных магнитных полях.

2011 г. А.В. Егоровым создана установка «Цифровой ЯМР спектрометр с частотной протяжкой». В отличие от стандартных приборов такой спектрометр позволяет исследовать вещества с большой величиной нерезонансного поглощения (ВТСП, магнитоупорядоченные системы и др.).

2013 г. В группе М.С. Тагирова (Е.М. Алакшин, Ю.М. Буньков, А.В. Клочков, В.В. Кузьмин, Т.Р. Сафин и др.) была создана установка для наблюдения стационарного и импульсного ЯМР на частотах 500–600 МГц при гелиевых температурах. На установке был получен ряд интересных результатов по бозе-эйнштейновской конденсации в твердотельных антиферромагнетиках.

2013 г. Объединенной группой сотрудников кафедр КЭ и МРС и КФМС Института Физики (М.С. Тагиров, И.Р. Мухамедшин, А.В. Егоров, Г.В. Мамин, А.В. Клочков, Е.М. Алакшин, Т.Р. Сафин, К.Р. Сафиуллин, Л.А. Баталова, В.Д. Скирда, О.И. Гнездилов, Н.М. Азанчеев, Р.В. Архипов, А.В. Савинков, Б.И. Гизатуллин, А.А. Иванов, Т.Р. Шипунов, М.М. Дорогиницкий, Т.М. Салихов, А.С. Александров) по заказу нефтедобывающей промышленности были разработаны и созданы узкоспециализированные спектрометры ЯМР  $^1\text{H}$ , позволяющие определять: мощность и положение нефтяных и водных коллекторов (пористость), тип насыщающего флюида и некоторые его характеристики:

– скважинный прибор ядерного магнитного каротажа ЯМК1Д (частота резонанса – 420 кГц, удаленность зоны исследования – 190 мм, диапазон измеряемой пористости 4–100%)

– мобильная установка для исследования керна ЯМР-Керн-8,1 (частота резонанса – 8,1 МГц, диапазон измеряемой пористости 0,1–100%, измерение диффузии).

2014 г. Группой сотрудников (В.Д. Скирда – руководитель работ, А.С. Александров, Р.В. Архипов, А.А. Иванов, О.И. Гнездилов, М.Р. Гафуров) создан импульсный ЯМР спектрометр для измерения спектров ЯМР и релаксационных характеристик ядер  $^1\text{H}$  в магнитном поле 100 Гс (400–500 кГц) с возможностью импульсной накачки ЭПР переходов на частотах 1–250 МГц.

2016 г. Объединенной группой сотрудников кафедр КЭ и МРС и КФМС Института Физики (М.С. Тагиров, А.В. Егоров, Г.В. Мамин, А.В. Клочков, Е.М. Алакшин, Т.Р. Сафин, К.Р. Сафиуллин, М.Ю. Захаров, В.Д. Скирда, О.И. Гнездилов, Н.М. Азанчеев, Р.В. Архипов, А.В. Савинков, Б.И. Гизатуллин, А.А. Иванов, Т.В. Шипунов, М.М. Дорогиницкий, А.С. Александров) были проведены значительные усовершенствования разработанной аппаратуры (осуществлена одновременная регистрация диэлектрических и ЯМР-характеристик флюида, что позволяет с большей достоверностью определять тип флюида). В результате были созданы:

– скважинный прибор ядерного магнитного каротажа ЯМК1Т (частота резонанса – 700 кГц, удаленность зоны исследования – 190 мм, диапазон измеряемой пористости 2–100%);

– комплексный скважинный прибор ядерного магнитного каротажа КМРК (частоты резонанса – 460 и 700 кГц, удаленность зон исследования – 210 мм и 190 мм, диапазон измеряемой пористости 2–100%, модуль измерения диэлектрических характеристик);

– мобильная установка для исследования керна ЯМР-Керн-6,5 (частота резонанса – 6,5 МГц, диапазон измеряемой пористости 0,1–100%).

2018 г. Группой М.С. Тагирова (Г.А. Долгоруков, В.В. Кузьмин, А.В. Богайчук, Е.М. Алакшин, К.Р. Сафиуллин, А.В. Клочков) была создана установка для исследования импульсного ЯМР адсорбированного, жидкого и газообразного  $^3\text{He}$  на частотах 3–150 МГц.

2018 г. В группе М.С. Тагирова (В.В. Кузьмин, А.В. Богайчук, А.В. Клочков, К.Р. Сафиуллин, Е.М. Алакшин, И.К. Некрасов) были созданы: импульсный мультядерный ЯМР спектрометр (температуры 1,5–4,2 К, магнитные поля до 0,85 Тл, частотной диапазон 3–150 МГц), адаптированный для исследования  $^3\text{He}$ ; уникальный цифровой многофункциональный импульсный ЯМР-спектрометр для работы в магнитных полях 0–9 Тл, на частотах 5–500 МГц в температурном диапазоне 1,65–300 К.

## **2.2. Основные достижения школы «Резонансные свойства конденсированных сред» Казанского университета с середины 1960-х до 2005–2008 гг.**

Работы в области магнитного резонанса проводились в тесном сотрудничестве представителей разных подразделений университета и других учреждений города по самым различным направлениям. Эти исследования отражены в коллективной монографии [8]. Также в совместных исследованиях принимали участие зарубежные партнеры.

В канун 100-летия Е.К. Завойского и несколько позже они были обобщены в циклах работ, подводящих итог исследованиям его последователей. Они были удостоены Государственных премий Республики Татарстан в области науки и техники\*.

### **2.2.1. Исследования ван-флековских парамагнетиков**

2006 г. «Исследования ван-флековских парамагнетиков»:  
С.А. Альтшулер (посмертно), М.А. Теплов (посмертно),  
М.М. Зарипов, Б.З. Малкин, Л.К. Аминов, М.С. Тагиров,  
Д.А. Таюрский, А.В. Егоров.



Слева направо: А.В. Егоров, Д.А. Таюрский, М.С. Тагиров,  
М.Ш. Шаймиев, М.М. Зарипов, Л.К. Аминов, Б.З. Малкин

---

\* Эти работы охватывают почти 40-летний период большого коллектива исследователей. Поэтому здесь приведены выдержки из рефератов этих циклов работ, но без цитирования. Более детальную информацию можно извлечь из оригинальных статей авторов, которые достаточно просто найти в базе данных Scopus и Web of Science. Во многих случаях вклад коллег, принимавших участие в этом цикле работ, можно определить из перечня диссертаций, представленных в Приложениях 1 и 2.

Ван-флековскими парамагнетиками принято называть вещества, которые в основном электронном состоянии не обладают магнитным моментом, но парамагнитная восприимчивость которых намного превосходит диамагнитную. Если диамагнетизм – проявление квадратичной по внешнему магнитному полю энергии системы, то ван-флековский парамагнетизм – проявление линейных по полю членов во втором порядке теории возмущений. Разнообразие спектров нулевого порядка предопределяет громадный диапазон возможных величин ван-флековского парамагнетизма. Ярким примером ван-флековских парамагнетиков являются кристаллы, содержащие ионы редких земель на незаполненных 4f-оболочках –  $\text{Pr}^{3+}$ ,  $\text{Eu}^{3+}$ ,  $\text{Tb}^{3+}$ ,  $\text{Ho}^{3+}$ ,  $\text{Tm}^{3+}$ . Основной мультиплет этих ионов  $^{2S+1}L_J$  часто расщепляется кристаллическим полем так, что нижними уровнями оказываются синглет или немагнитный дублет, а возбужденные уровни отделены от основного интервалами порядка  $10\div 400\text{ см}^{-1}$ . Изотопы  $^{141}\text{Pr}$ ,  $^{159}\text{Tb}$ ,  $^{165}\text{Ho}$ ,  $^{169}\text{Tm}$  имеют 100%-ную распространенность и ненулевой ядерный спин, поэтому соединения этих элементов обладают не только электронным магнетизмом, но и ядерным. Парамагнитные («химические») сдвиги линий ядерного магнитного резонанса (ЯМР) в таких системах, как правило, сильно анизотропны и достигают громадных величин вплоть до сотен. Это приводит к интересным особенностям магнитного резонанса ядер редкоземельных (РЗ) ионов, позволяющим классифицировать его как явление, промежуточное между обычными ЯМР и ЭПР.

Впервые на указанные особенности обратил внимание С.А. Альтшулер, по предложению которого М.М. Зариповым были выполнены расчеты характеристик ЯМР ван-флековских систем. ЯМР РЗ ионов в синглетном основном состоянии впервые был обнаружен в 1967 году М.А. Тепловым.

С.А. Альтшулер указал также на перспективность использования ван-флековских парамагнетиков для получения сверхнизких температур. Реализация этого предложения Андресом и Бухером

на интерметаллических соединениях редких земель привлекло дополнительное внимание физиков к этому классу веществ.

Характерная для РЗ ионов картина штарковского расщепления основного мультиплета в кристаллическом электрическом поле – совокупность тесно расположенных уровней с интервалами порядка 14–140 К – приводит и к ряду других особенностей редкоземельных соединений, в частности структурным неустойчивостям в области низких температур. Неустойчивости эти проявляются в виде кооперативных эффектов Яна–Теллера, в виде гигантской магнитострикции ряда кристаллов, аномалии упругих констант (Б.З. Малкин), наконец, в форме своеобразных полевых и температурных зависимостей ширины линии ЭПР примесных ионов. Естественно, спектры ЯМР и релаксационные характеристики редкоземельных ван-флековских парамагнетиков несут отпечаток всей богатой физики рассматриваемых материалов, и корректная интерпретация результатов исследований методом ЯМР приобретает, таким образом, широкий физический интерес.

Гамильтониан ван-флековского иона включает взаимодействие с кристаллическим электрическим полем, электронное зеемановское взаимодействие, сверхтонкое взаимодействие и ядерное зеемановское взаимодействие. Если спин ядра больше  $1/2$ , то требуется также учесть ядерное квадрупольное взаимодействие. При низких температурах и слабых магнитных полях можно воспользоваться вторым порядком теории возмущений для вычисления поправок к энергии основного состояния. В результате получается эффективный ядерный гамильтониан, параметры которого (компоненты эффективного гиромагнитного отношения) как правило сильно анизотропны, а эффективные моменты могут намного превышать моменты свободных ядер. Последнее обстоятельство и явилось основанием для использования ван-флековских парамагнетиков для магнитного охлаждения. Например, для этилсульфата тулия (аксиальная симметрия) компоненты эффективного гиромагнитного отношения ядер  $^{169}\text{Tm}$  отличаются

более чем в 50 раз: 0,48 кГц/Э и 26 кГц/Э (продольная и поперечная составляющая). Экспериментальное измерение параметров эффективного спинового гамильтониана позволяет получать информацию о параметрах гамильтониана взаимодействия с кристаллическим электрическим полем, что совершенно невозможно в случае обычного ЯМР.

Основным состоянием ван-флековского иона может являться и немагнитный дублет, что реализуется в случае кубической симметрии. Впервые такой резонанс был обнаружен на ядрах  $^{165}\text{Ho}$  и  $^{169}\text{Tm}$  в диэлектрических кристаллах со структурой эльпасолита. В кристалле  $\text{Rb}_2\text{NaHoF}_6$  был обнаружен структурный фазовый переход.

При повышенных температурах в кристаллах устанавливается режим быстрых скачков между состояниями 4f-оболочки, и ядро испытывает кратковременные воздействия других сверхтонких полей, создаваемых термически возбужденными электронами. Теперь вместо одной частоты прецессии ядерного спина появляется спектр частот. При достаточно быстрой смене электронных состояний мы по-прежнему будем наблюдать одну линию, однако эта линия испытает дополнительный сдвиг.

Температурно-зависимый сдвиг резонансной линии неразрывно связан с временами ядерной магнитной релаксации и шириной линии. Если при низких температурах ширина линии определяется, в основном, коллективным взаимодействием, то с повышением температуры возрастает роль внутриатомной электронно-ядерной связи. Флуктуирующее сверхтонкое магнитное поле на ядре обычно имеет составляющие, перпендикулярные внешнему магнитному полю. В спектре Фурье этих составляющих присутствуют компоненты резонансных частот, которые индуцируют переходы между ядерными уровнями энергии, т.е. ядерную релаксацию. Существует глубокая аналогия между рассматриваемой здесь ситуацией и явлением ЯМР в жидкостях. Форма гамильтониана флуктуирующего сверхтонкого взаимодействия

свидетельствует о наличии своеобразной «скалярной релаксации второго рода».

Теоретический анализ релаксации ядер редкоземельных ионов проводился на основе неадиабатической теории Редфилда и Блоха-Вангснесса. При произвольной ориентации внешнего магнитного поля относительно осей кристалла эффективное поле на ядрах редкоземельных ионов меняется как по величине, так и по направлению. Тем самым применение адиабатической теории исключается. Рассматриваемая нами ситуация напоминает «скалярную релаксацию второго рода» в жидкостях, однако специфика поведения электронного момента редкоземельного иона в кристаллическом электрическом и внешнем магнитном полях требует определенной модификации теории применительно к анизотропным системам. Экспериментальные результаты убедительно свидетельствуют в пользу справедливости предложенной Л.К. Аминовым теоретической модели и открывают возможность извлечь из экспериментов значение времени корреляции – единственного подгоночного параметра теории Редфилда. Получаемые таким образом времена корреляции зависят от ориентации внешнего магнитного поля. Из этого можно заключить, что время жизни ван-флековского иона в возбужденном состоянии определяется главным образом межчастичными взаимодействиями типа диполь-дипольного, квадруполь-квадрупольного или через поле фононов.

Сверхтонкое поле на ядрах редкоземельных ионов модулируется не только вследствие реальных переходов между электронными состояниями, обусловленных, например, диполь-дипольными или электрон-колебательными взаимодействиями ионов.

Колебания решетки, возмущая кристаллический потенциал, приводят тем самым к малому изменению намагниченности в каждом из электронных состояний, в том числе и основном синглетном состоянии. Вследствие этого становятся возможными прямые релаксационные переходы между ядерными подуровнями с излучением или поглощением одного фонона соответствующей частоты. Рассматриваемый механизм очень слабый, однако он может оказаться



единственным при сверхнизких температурах. Вероятность релаксационного перехода сильно зависит от магнитного поля ( $\sim H^4$ ). Исследования релаксации  $^{169}\text{Tm}$  в этилсульфате тулия при сверхнизких температурах подтвердили наличие такой зависимости. Кроме того, удалось измерить коэффициент спиновой диффузии ядер тулия в этом ван-флековском парамагнетике.

В ван-флековском диэлектрическом кристалле  $\text{LiTmF}_4$  была впервые обнаружена гигантская магнитострикция. Вынужденная магнитострикция парамагнитных кристаллов пропорциональна намагниченности и напряженности внешнего магнитного поля. В нормальных парамагнетиках с магнитным основным состоянием (эффективный спин  $1/2$ ) магнитный момент пропорционален  $\text{th}(g\beta H/2kT)$ , поэтому квадратичный по магнитному полю в слабых полях рост магнитострикции сменяется линейным в условиях насыщения. В ван-флековских парамагнетиках наведенный внешним полем магнитный момент пропорционален  $\beta H/\Delta$ , где  $\Delta$  – энергия возбужденных состояний в кристаллическом поле. В концентрированных редкоземельных нормальных парамагнетиках при гелиевых температурах в полях напряженностью несколько десятков килоэрстед магнитострикция достигает огромной величины порядка  $10^{-4}$ . Можно ожидать, что при достаточной близости возбужденного штарковского подуровня к синглетному основному состоянию магнитострикция в ван-флековском парамагнетике может иметь в сравнимых полях тот же порядок величины, что и в нормальном парамагнетике. Действительно, измеренная в кристалле  $\text{LiTmF}_4$  магнитострикция составила  $-1,1 \cdot 10^{-3}$  в магнитном поле  $3 T$ .

Полученные данные как качественно, так и количественно согласуются с результатами теоретического анализа, выполненного в рамках представлений об одночастичном механизме магнитострикции.

Тепловое сопротивление на границе твердое тело – жидкий гелий-3 является одним из наиболее интересных явлений в физике сверхнизких температур. В 1981 году Лауреат Нобелевской премии проф. О.У. Ричардсон с сотрудниками, изучая релаксацию

$^3\text{He}$ , адсорбированного на частицах фторуглеродного полимера, убедились в наличии связи ядерных спинов фтора и гелия-3. С помощью ван-флековских парамагнетиков, обладающих сильной анизотропией магнитных свойств, можно исследовать резонансное взаимодействие ядерных спинов на границе  $^3\text{He}$  – твердое тело. Такого рода кросс-релаксация между ядерными спинами  $^{169}\text{Tm}$  в этилсульфате тулия и спинами жидкого гелия-3 была впервые обнаружена А.В. Егоровым и др. Время продольной ядерной магнитной релаксации гелия-3 существенно уменьшалось, если эффективное гироманнитное отношение ядер  $^{169}\text{Tm}$  становилось равным гироманнитному отношению ядер гелия-3 (3,243 кГц/Э). Для этого достаточно направить внешнее поле под углом  $7,05^\circ$  к кристаллографической оси  $c$  кристалла. В дальнейшем исследовалась релаксация гелия-3 в контакте с ориентированными порошками ван-флековских парамагнетиков.

Многие высокотемпературные сверхпроводники включают в себя ван-флековские ионы. Исследование этих соединений методом магнитного резонанса ядер ван-флековских ионов позволяет получать информацию, недоступную для «обычного» ЯМР. Первым высокотемпературным сверхпроводником, в котором был обнаружен «усиленный» ЯМР  $^{141}\text{Pr}$ , является электронный сверхпроводник  $\text{Pr}_{1.85}\text{Ce}_{0.15}\text{CuO}_{4-y}$ . Затем ЯМР  $^{169}\text{Tm}$  использовался для изучения высокотемпературного сверхпроводника  $\text{TmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.92}$ . Измеренные параметры спинового гамильтониана позволили уточнить параметры гамильтониана кристаллического электрического поля в этих соединениях. Было установлено, что эффективные гироманнитные отношения сильно зависят от локального кислородного окружения, и, следовательно, могут быть использованы для изучения структурного и фазового расслоения ВТСП.

В магнитных полях свыше  $5 T$ , когда зеемановская энергия ван-флековского иона становится сравнимой с расстояниями между энергетическими уровнями штарковской структуры, теория возмущений, обычно используемая при вычислениях магнитных характеристик ван-флековского иона, становится неприменимой и возникает задача

об исследовании влияния внешнего магнитного поля на состояния ван-флековского парамагнитного иона. Сильные магнитные поля должны изменять как энергетические интервалы между уровнями шариковой структуры, так и вид соответствующих волновых функций. Последнее может привести к качественно новым эффектам, так как сильное перемешивание волновых функций в пределах основного мультиплета изменяет правила отбора для резонансных переходов. Теория электронно-ядерной системы в диэлектрических ван-флековских парамагнетиках была создана Д.А. Таюрским. Экспериментальные результаты М.С. Тагирова с сотрудниками исследования ЯМР в ван-флековских парамагнетиках в сильных магнитных полях и при низких температурах согласуются с теорией.

Системы с высокой поляризацией ядерных спинов являются объектами интенсивных исследований, как в физике элементарных частиц, так и в физике твердого тела. По сравнению с методом «грубой силы» (сильные магнитные поля и сверхнизкие температуры) методы динамической поляризации ядер (ДПЯ) более информативны. Один из методов ДПЯ – так называемый «солид-эффект» – основан на переносе поляризации от примесных парамагнитных центров к ядерной спиновой системе. М.С. Тагиров и Д.А. Таюрский предложили модификацию этого метода с использованием диэлектрических ван-флековских парамагнетиков, в которых ван-флековские ионы расположены в узлах регулярной кристаллической решетки и действуют как парамагнитные центры при передаче поляризации ядрам.

### ***2.2.2. Исследование природы наноразмерных свойств сверхпроводников методами магнитного резонанса***

2007 г. «Исследование природы наноразмерных свойств сверхпроводников методами магнитного резонанса»: И.А. Гарифуллин (КФТИ), Н.Н. Гарифьянов (КФТИ), А.В. Дуглав (КФУ), М.В. Еремин

(КФУ), Б.И. Кочелаев (КФУ), Л.Р. Тагиров (КФУ), Г.Б. Тейтельбаум (КФТИ), Э.Г. Харахашьян (КФТИ) (посмертно).



Слева направо: Л.Р. Тагиров, М.В. Еремин, И.А. Гарифуллин, Г.Б. Тейтельбаум, М.Ш. Шаймиев, Б.И. Кочелаев, Н.Н. Гарифьянов, А.В. Дуглав

Сверхпроводящие материалы являются основой высоких технологий и энергетики ближайшего будущего. Их удивительные качества всегда интересовали физиков, причем особый интерес связан с их локальными свойствами. Анализ локальных свойств сопряжен с использованием «точечных» методов, особое место среди которых занимает магнитный резонанс. Однако долгие годы применение этого мощного метода к исследованию сверхпроводящего состояния считалось невозможным. Дело в том, что в этом состоянии электроны связаны в пары с нулевым спином (магнитным моментом), а наличие спина является необходимым условием наблюдения парамагнитного

резонанса. Кроме того, сверхпроводники первого рода полностью выталкивают из себя внешнее магнитное поле, что делает невозможным резонанс и на магнитных ионах, специально внедренных в качестве зонда. Сверхпроводники же второго рода «впускают» в себя магнитное поле в виде вихревой решетки Абрикосова, которое распределяется настолько неоднородно, что спины, находящиеся в различных местах образца, резонируют на разных частотах. Это должно «размазать» наблюдаемый суммарный сигнал, делая его ненаблюдаемым. Однако в условиях, когда распределение магнитного поля является периодическим, появляется возможность «собрать» сигналы от спинов, находящихся в экстремальных точках этого распределения. В 1972 г. Э.Г. Харахашьяну с сотрудниками как раз и удалось осуществить подобный эксперимент и впервые применить метод ЭПР для исследования сверхпроводимости.

Вслед за первым наблюдением резонанса в сверхпроводниках казанская группа развернула широкомасштабные исследования различных типов сверхпроводников второго рода в жесткой временной конкуренции с несколькими группами из Лос-Анджелеса, Сан-Диего, Западного Берлина, Женевы, Иерусалима и Сан-Пауло. Тем не менее, благодаря плодотворному сотрудничеству с Институтом физических проблем АН СССР им. П.Л. Капицы Б.И. Кочелаеву, Э.Г. Харахашьяну и И.А. Гарифуллину удалось поставить и выполнить ключевые эксперименты, получившие международное признание. А именно, впервые было исследовано явление «электронного узкого горла» (ЭУГ) в сверхпроводящей фазе и построена его теория (Б.И. Кочелаев, Л.Р. Тагиров). Суть явления состоит в том, что при совпадении резонансных частот внедренных локализованных моментов (например, гадолиния) и электронов проводимости, их взаимная связь оказывается сильнее, чем взаимодействие каждого из них с решеткой (термостатом). Локализованные моменты и электроны сначала объединяются в одну систему (возникают связанные колебания намагниченностей обеих подсистем), затем объединенная система

релаксирует к решетке посредством спин-решеточной релаксации электронов проводимости (напомним, что при температурах жидкого гелия спин-решеточной релаксацией локализованных спинов можно пренебречь). Таким образом, электронное узкое горло позволяет увидеть то, что напрямую наблюдать невозможно.

При исследовании ЭПР на ионах эрбия в сверхпроводящем лантане было обнаружено резкое сужение резонансной линии сразу ниже температуры сверхпроводящего перехода (И.А. Гарифуллин, Б.И. Кочелаев, Э.Г. Харахашьян), что противоречило сложившимся к тому времени из ядерного магнитного резонанса представлениям, что резонансная линия должна уширяться. Это, казалось бы, частное явление послужило толчком к исследованию двухчастичных спин-спиновых взаимодействий в сверхпроводящей фазе и фактическому экспериментальному доказательству возникновения нового, супердальнодействующего обменного взаимодействия в сверхпроводящей фазе (Б.И. Кочелаев, Л.Р. Тагиров). Физическую причину возникновения этого нового взаимодействия можно пояснить следующим образом: куперовская пара в сверхпроводнике – это когерентное образование (квазичастица), жёсткое на размерах порядка длины когерентности сверхпроводника, достигающей сотен межатомных расстояний. Если к одной стороне этого жесткого объекта приложить возмущение, например, с помощью локализованного магнитного момента, то оно «отзовется» на противоположной стороне, отдалённой на расстояние длины когерентности. Таким образом, возмущение передается через куперовские пары от одного локализованного момента к другому, и устанавливается взаимодействие между двумя спинами, отстоящими друг от друга на сотни и тысячи ангстрем. Теория ЭПР взаимодействующих локализованных моментов, развитая в Казани, сумела объяснить и сужение линии, и характерное изменение ее формы при сверхпроводящем переходе (Б.И. Кочелаев, Л.Р. Тагиров).

Сразу после осознания факта модификации обменного взаимодействия в сверхпроводящей фазе казанской группой были успешно

выполнены эксперименты по наблюдению магнитного упорядочения локализованных моментов в сверхпроводниках (И.А. Гарифуллин, Э.Г. Харахашьян, Б.И. Кочелаев). Интрига задачи заключалась в следующем: с середины 50-х годов, после работы нобелевского лауреата В.Л. Гинзбурга, утвердилось мнение, что ферромагнетизм и сверхпроводимость несовместимы. Действительно, сверхпроводимость — это объединение электронов с противоположным направлением спинов попарно в куперовские пары. В то же время, ферромагнетизм — это выстраивание локализованных моментов и подмагниченных ими спинов электронов проводимости параллельно друг другу с достижением максимального магнитного момента. Как правило, ферромагнитно упорядоченное вещество не становится сверхпроводящим ни при каких температурах, а возникновение ферромагнетизма в сверхпроводнике тут же разрушает сверхпроводимость, то есть эти два дальних порядка антагонистичны. Наблюдение группой Харахашьяна магнитного упорядочения с сохранением сверхпроводимости было указанием неколлинеарного магнитного порядка и, как далее выяснилось, предвестником исследований во всем мире широкого класса сверхпроводящих тройных и четверных магнитных соединений, результатом которых стало общее понимание того, что магнитный и сверхпроводящий порядок могут сосуществовать, если произойдет их взаимная подстройка.

Дальнейшая разработка метода привела к тому, что сразу после открытия высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) магнитный резонанс был использован для исследования их весьма необычных свойств. В частности, серьезным препятствием на пути применения этих материалов является тот факт, что, несмотря на высокие значения температур перехода в сверхпроводящее состояние, величины токов, которые они могут переносить без электросопротивления, не очень велики. Большой вклад в установление причин такого поведения внесли представленные в настоящем цикле первые результаты по наблюдению ЭПР в высокотемпературных оксидах, в которых была обнаружена природная гетерогенность этих материалов

(И.А. Гарифуллин, Н.Н. Гарифьянов, Б.И. Кочелаев, Г.Б. Тейтельбаум). Дело в том, что отличительной чертой таких сильнокоррелированных электронных систем, как сверхпроводящие металлоксиды, является их тенденция к фазовому расслоению, приводящая к сосуществованию магнитных и сверхпроводящих фаз (см. детально ниже). Это сосуществование происходит на микроскопических масштабах и может иметь динамический характер. Сверхпроводимость при этом носит своеобразный перколяционный характер, а распределения намагниченности и плотности заряда существенно неоднородны на очень малых масштабах. Оставались открытыми такие вопросы, как параметры этих распределений, режимы, в которых они существуют, а также их связь с природой сверхпроводимости этих соединений.

Для понимания свойств подобных систем особую важность имеют родственные ЭПР локальные методы исследования, такие как ЯМР (ядерный магнитный резонанс) и ЯКР (ядерный квадрупольный резонанс). Они позволяют получать «точечную» информацию о сосуществующих на наноразмерах фазах, прежде всего, о величине внутреннего магнитного поля и зарядовой плотности в различных узлах структуры, о частотах зарядовых и спиновых флуктуаций. В настоящем цикле работ представлены экспериментальные и теоретические результаты, полученные участниками коллектива в разные годы и отражающие последовательный прогресс в решении этих проблем (А.В. Дуглав, М.В. Еремин).

В процессе исследования высокотемпературных сверхпроводников оказалось, что их уникальные сверхпроводящие параметры удивительным образом «привязаны» к их столь же нестандартным физическим свойствам в нормальной фазе. Сама же нормальная фаза вещества, находящегося на стыке металлических, изоляторных, магнитных и структурных переходов, является вызовом современному пониманию физики твердого тела. Дело в том, что сильные электронные корреляции, характерные для ВТСП материалов, делают неприменимыми традиционные зонные схемы описания изоляторов



и металлов. Интенсивное развитие физики подобных материалов связано как с выявлением новых экспериментальных фактов, проливающих свет на их природу, так и с построением новых теоретических моделей, способных адекватно их описывать.

Одним из неожиданных и новых по сравнению с классическими сверхпроводниками эффектов является полное подавление сверхпроводящего перехода при замещении немагнитными ионами цинка (Zn) ионов меди, входящих в структуру большинства известных ВТСП соединений. С помощью ЭПР удалось доказать, что механизмом подавления сверхпроводимости ионами Zn является разрушение сверхпроводящих пар локальными магнитными моментами, образованными за счет сильных электронных корреляций в окрестности ионов цинка (Г.Б. Тейтельбаум). Эти данные стимулировали пересмотр результатов прежних исследований по магнитному резонансу в металлоксидных системах – натрий-вольфрамовых бронзах ( $\text{Na}_x\text{WO}_3$ ), которые имеют схожие с ВТСП материалами свойства нормальной фазы. Целенаправленный поиск позволил установить наличие в образцах бронзы  $\text{Na}_x\text{WO}_3$  сверхпроводящего состава низкочастотных спиновых флуктуаций антиферромагнитного характера, которые являются характерным атрибутом высокотемпературных оксидных сверхпроводников. Дальнейшие эксперименты со стехиометрией состава материала позволили достичь высоких температур сверхпроводящего перехода, сопоставимых с таковыми в ВТСП материалах. Тем самым была продемонстрирована важная роль антиферромагнитных флуктуаций в явлении ВТСП и более широко выявлены общие физические свойства различных классов соединений, обнаруживающих высокотемпературную сверхпроводимость (Н.Н. Гарифьянов, И.А. Гарифуллин).

Экспериментальные данные послужили толчком к развитию физических моделей для описания как нормальных, так и сверхпроводящих свойств ВТСП материалов. Была предложена теоретическая модель сильно-коррелированной синглетной зоны проводимости в купратах, позволившая: а) рассчитать закон дисперсии квазичастиц в зоне

проводимости; б) объяснить зависимость энергии сверхпроводящей щели от волнового вектора, в) дать возможный вариант объяснения нестабильности нормальной фазы. Рассчитанные перенормировки параметра суперобменного взаимодействия меди из-за поляронных эффектов позволили корректно интерпретировать данные по ЯМР релаксации в ВТСП материалах (М.В. Еремин).

Другой отличительной чертой таких сильнокоррелированных электронных систем, как сверхпроводящие металлоксиды, является их тенденция к фазовому расслоению, приводящая к сосуществованию магнитных, диэлектрических и сверхпроводящих фаз. Сверхпроводимость при этом носит своеобразный мезоскопический характер, а распределения намагниченности и плотности заряда существенно неоднородны. Исследования фазового расслоения в металлоксидах привели к ряду весьма интересных результатов (Б.И. Кочелаев, Г.Б. Тейтельбаум). Часть из них относится к свойствам металлоксидов при малой плотности носителей:

- разработана теоретическая картина эволюции магнитных и кинетических свойств сверхпроводящих купратов при их допировании носителями, основанная на возможном появлении топологических спиновых возбуждений типа скирмионов;
- построена модель электронного фазового расслоения слабо допированных купратов на наноразмерные металлические и диэлектрические области на основе сильно анизотропного взаимодействия трех-спиновых поляронов через поле фононов. На основе этой теории интерпретирована температурная зависимость интенсивности сигналов ЭПР и его другие характеристики от металлических и диэлектрических областей в эксперименте группы нобелевского лауреата проф. К.А. Мюллера.

Участниками коллектива (Б.И. Кочелаев, Г.Б. Тейтельбаум, М.В. Еремин, А.В. Дуглав) выполнен развернутый анализ микроскопического фазового расслоения в высокотемпературных сверхпроводниках в широком диапазоне плотности носителей, позволивший:

- с помощью метода ЯКР установить амплитуды неоднородных распределений дырочной и спиновой плотности страйп-фазы лантан-стронциевых металлоксидов, возникающей при концентрации носителей вблизи  $1/8$ , и понять особенности появления объемной сверхпроводимости при переходе страйп-структуры из статического в динамический режим;
- на основе характера подавления сигнала ЯМР при переходе системы в полосовую антиферромагнитную фазу найти распределение частот магнитных флуктуаций;
- с помощью ЭПР и ЯМР в сильном магнитном поле выявить свойства динамического фазового расслоения в сверхпроводящем состоянии  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ ;
- на основе изучения низкотемпературных особенностей ядерной магнитной релаксации обнаружить первые свидетельства страйпового характера зарядовых флуктуаций в стехиометрическом соединении  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$ ;
- с помощью данных по ядерной спиновой релаксации установить, что начинающееся при температурах значительно выше критической псевдощелевое поведение сверхпроводящих металлоксидов связано с происходящим на микромасштабах динамическим фазовым расслоением на металлические и магнитные области.

### ***2.2.3. Развитие градиентного ЯМР в исследованиях структуры и динамики сложных молекулярных систем***

2008 г. «Развитие градиентного ЯМР в исследованиях структуры и динамики сложных молекулярных систем»: А.И. Маклаков, В.Д. Скирда, Г.Г. Пименов, Н.Ф. Фаткуллин, Н.К. Двояшкин, В.А. Севрюгин (МарГУ, Йошкар-Ола), Г.И. Васильев, А.В. Филиппов.



Слева направо: Н.Ф. Фаткуллин, А.И. Маклаков, В.Д. Скирда,  
М.Ш. Шаймиев, Г.Г. Пименов, Г.И. Васильев, Н.К. Двояшкин,  
В.А. Севрюгин

Ядерный магнитный резонанс (ЯМР) относится к наиболее эффективным и динамично развивающимся методам исследования. Достигнутый прогресс в чувствительности, спектральном разрешении, а также в использовании сложных многоимпульсных методик позволил расширить возможности метода в исследованиях молекул со сложной структурой и динамикой. Разработка методик, основанных на применении градиента магнитного поля, еще в большей степени расширила возможности метода. Если вначале ядерный магнитный резонанс ассоциировался как метод, в котором требовалось создавать максимально однородное магнитное поле, то в последние годы все активнее разрабатываются методики, в которых применяются контролируемые градиенты магнитного поля. При этом, если введение градиента магнитного поля в ЯМР ВР только расширяет возможности метода, то идея пространственного разрешения в МР-томографии полностью базируется на фазо-частотной детерминированности сигнала от координат спинов в пространственно неоднородном магнитном поле.

Связь частоты сигнала ЯМР с координатами спинов (молекул) в пространстве неоднородного магнитного поля в случае их хаотического перемещения приводит к необратимой дисперсии фаз, что может быть зафиксировано по простому изменению амплитуды сигнала ЯМР в методике спинового эхо. Этот эффект был замечен намного раньше публикации Лаутенбуром (1971 г.) принципов МР-томографии и активно использовался для исследования процессов самодиффузии. Замечательное свойство этой методики ЯМР состоит в том, что она позволяет получать непосредственную информацию о перемещениях молекул в пространстве, так как регистрируемая дисперсия фаз в поле линейного градиента напрямую связана с дисперсией смещений молекул.

Таким образом, ЯМР с градиентом магнитного поля – градиентный ЯМР – представляет собой весьма важное направление в развитии ядерного магнитного резонанса в целом.

В измерениях самодиффузии, также как в МР-томографии, пространственное разрешение задается величиной градиента магнитного поля. Вначале в исследованиях самодиффузии использовался постоянный во времени градиент, на который накладывались ограничения со стороны больших значений. В 1965 г. Стейскалом и Таннером была предложена модификация, открывшая принципиальную возможность использования существенно больших по амплитуде значений градиента магнитного поля в импульсном режиме. С появлением этой методики естественно появились надежды на очень быстрый и существенный прорыв. Однако в реальности все оказалось не так просто. Создание качественной аппаратуры ЯМР с мощным импульсным градиентом магнитного поля до сих пор остается сложной задачей. Действительно, требования к техническим характеристикам прибора складываются из типичных для ЯМР-спектрометров (релаксометров) и ряда дополнительных требований, связанных с применением блоков импульсного градиента. К главным из них относится требование к идентичности импульсов градиента ( $g$ ), которое ужесточается с ростом значения  $g$ . Это связано с тем, что в экспериментах по исследованию

трансляционной подвижности молекул требуется обеспечивать не относительную стабильность амплитуды градиента магнитного поля, а абсолютную (!). Существует и ряд сопутствующих проблем: необходимость исключения механических колебаний датчика; ужесточение требований к системе термостатирования; проблема остаточных градиентов, связанных с намагничиванием материала магнита и полями рассеивания и др.

В 1973 г. на кафедре молекулярной физики КГУ по инициативе А.И. Маклакова были начаты работы по созданию аппаратуры ЯМР с импульсным градиентом магнитного поля. В начале 1974 года был получен первый результат по значению градиента магнитного поля – 1 Тл/м. (В.Д. Скирда и др. См. раздел 2.1). Однако уже через полтора года этот результат удалось улучшить более чем на порядок – 15 Тл/м. По мере того, как коллективу удавалось увеличить разрешающую способность метода, становились доступными для исследования все более сложные молекулярные системы. В 1980 году был достигнут абсолютный рекорд для того времени: 30 Тл/м. В это время лучшая из зарубежных установок в Лейпциге характеризовалась градиентом 10 Тл/м. К 1994 году группе Казанского университета (В.Д. Скирда, В.И. Сундуков, Д.Ш. Идиятуллин, В.А. Севрюгин и др.) удалось преодолеть планку в 100 Тл/м, а через 2 года – 200 Тл/м. При этом импульсная мощность, обеспечиваемая блоком градиента, составляла более 160 кВт. Для специальных исследований (изучение полугокальной трансляционной подвижности полимерных цепей с молекулярными массами более  $10^6$  а.е.м.) была разработана градиентная катушка с уменьшенным рабочим объемом (диаметр ампулы 3 мм), в которой при той же мощности тока удалось получить значение 560 Тл/м.

Уместно заметить, что в публикации 2001 г. (P. Galvosas, et. al. //J. Magn. Res V.151, Is.2, 2001, P. 260–268) под ультравысоким градиентом магнитного поля понимается значение 35 Тл/м, что в несколько раз меньше результата казанской группы. Это свидетельствует о том, что аппаратура градиентного ЯМР в Казани действительно имеет

уникальные характеристики. Их достижение потребовало решения целого комплекса технических и методических проблем, включая разработку специальных алгоритмов обработки первичных экспериментальных данных, схемотехнических и конструктивных решений. Разработки в КГУ отличаются также малой величиной ( $10^{-5}$ – $10^{-6}$ ) нестабильности  $g$ , что обеспечило возможность накопления слабых сигналов и, тем самым, регистрацию диффузионных затуханий в большом динамическом диапазоне амплитуд сигнала. Для определения параметров градиента были предложены способы абсолютной калибровки величины  $g$ , защищенные несколькими патентами РФ. Таким образом, коллективом сотрудников и аспирантов КГУ (В.Д. Скирда, А.Г. Стежко, Г.Г. Пименов, Д.Ш. Идиятуллин, В.А. Севрюгин, В.И. Сундуков, Н.В. Каширин) еще в 90-е годы прошлого века был успешно решен комплекс проблем, связанных с созданием больших ( $>100$  Тл/м) импульсных градиентов магнитного поля. Это позволило группе Казанского университета выйти в мировые лидеры в области градиентного ЯМР.

С момента успешного создания аппаратуры градиентного ЯМР коллективом кафедры молекулярной физики КГУ были начаты интенсивные исследования механизмов поступательной подвижности в различных полимерных системах, а затем и в других сложных молекулярных объектах. Уникальность характеристик аппаратуры, которая находилась в режиме практически постоянного совершенствования, во многом обеспечила возможность получения не менее уникальных результатов исследования. К ним можно отнести:

- экспериментальное установление универсальных концентрационных и молекулярно-массовых зависимостей коэффициентов самодиффузии в расплавах и растворах гибкоцепных линейных полимеров (В.Д. Скирда, А.И. Маклаков, В.А. Севрюгин, Г.И. Васильев), а затем нахождение аналогичных закономерностей отдельно для белков (И.В. Несмелова) и дендримеров (А.И. Сагидуллин). Полученные результаты имеют не только фундаментальное значение, свидетельствующее о возможности описать динамические

свойства полимерной цепи некоей универсальной функцией. С практической точки зрения такое знание дает возможность прогнозировать количественные характеристики трансляционной подвижности макромолекул в растворах во всей концентрационной области в тех случаях, когда прямые измерения (например, для высокомолекулярных полимеров при больших концентрациях) могут оказаться невозможными.

- получение первых экспериментальных данных (В.Д. Скирда, А.И. Маклаков, М.М. Дорогиницкий, И.Р. Гафуров) о подвижности элементов полимерных цепей на масштабах, сравнимых с размером макромолекул, а также в трехмерных сетках (гелях). Причем, последний результат предопределил дальнейшие возможности градиентного ЯМР в изучении процессов гелеобразования в сложных молекулярных системах. Впервые проведены детальные исследования процессов гелеобразования в системах «желатин – вода», «агароза – вода» и «триацетат целлюлозы – бензиловый спирт» (И.Р. Гафуров, В.Д. Скирда, А.И. Маклаков и др. // *Polymer Science U.S.S.R.* – 1988. – V.30, Iss. 7. – P. 1644–1645; *Polymer Science U.S.S.R.* – 1989. – V.31. – P. 292–300). По результатам этих работ были сделаны выводы о механизмах гелеобразования, свойствах так называемых золь- и гель фракций. Были установлены наиболее специфические признаки в поведении трансляционной подвижности молекул растворителя и полимера, свойственные гель-образующим молекулярным системам. Впоследствии накопленный опыт и методология были применены (И.Ю. Асланян, В.Д. Скирда, А.Р. Хохлов и др. // *Macromolecular Chemistry and Physics.* – 1999 – V. 200(9), – P. 2152–2159) к исследованию еще более сложной молекулярной системы: гидрогель полиметакриловой кислоты в условиях коллапса, вызванного наличием третьего компонента – линейного полиэтиленгликоля (ПЭГ). Именно результаты этих работ позволили в сотрудничестве с ООО «Кварт» (2012–2014 гг.) достаточно быстро и эффективно решить проблему создания качественных водонабухающих пакеров отечественного



производства. Надо заметить, что уровень исследований гелеобразующих систем, достигнутый коллективом университета более чем тридцать лет назад, остается до сих пор непревзойденным.

- детальное исследование формы диффузионного затухания в расплавах и растворах полимеров в большом динамическом диапазоне амплитуды сигнала и обнаружение ее зависимости от времени диффузии. На базе этих, а также ряда других экспериментальных данных, в том числе и по исследованию бинарных смесей гомополимеров, была сформулирована (В.Д. Скирда) концепция, согласно которой трансляционная подвижность макромолекул осуществляется кооперативно случайными надмолекулярными кластерами, образующимися за счет межцепочечных зацеплений. Надо сказать, что экспериментальные результаты по исследованию зависимости формы диффузионного затухания в полимерных расплавах от времени диффузии, полученные коллективом еще в 80-х г., до сих пор не повторены ни в одной лаборатории, хотя косвенное подтверждение их достоверности все же получено. Дело в том, что в тот период, когда велись эти исследования, в полимерной науке фактически безраздельно доминировала модель так называемого рептационного механизма самодиффузии макромолекул, предложенная нобелевским лауреатом П. Де Женем. Указанные результаты коллектива в рамки этой модели не вписывались и фактически были первыми важными экспериментальными свидетельствами ограниченности этого модельного подхода. Только спустя десятилетия в мире накопилось достаточно экспериментального материала для понимания этого факта. В настоящее время в работах Фаткуллина и Швейцера, основанных на формализме метода проекционных операторов Цванцига-Мори, разрабатывается новый подход, предполагающий существенную роль дальнедействующих межмолекулярных корреляций. В 2006 г. было теоретически показано, что осуществление рептационного механизма в подвижности полимерной цепи маловероятно с общих термодинамических

позиций (N.Fatkullin, R.Kimmich // *Macromol. Symp.* 2006, 237, 69–72).

- показано (Г.Г. Пименов, В.А. Севрюгин и др.), что в области разбавленных полимерных растворов, концентрационные зависимости коэффициентов самодиффузии макромолекул описываются экспоненциальными зависимостями от концентрации полимера. Дано объяснение этого результата.
- впервые методом градиентного ЯМР проведены (А.И. Маклаков, Н.К. Двояшкин, В.Д. Скирда, Р.Р. Валиуллин, А.В. Урядов) исследования систем с фазовыми превращениями как в объеме, так и введенных в пористую и нанопористую среды. Установлены специфические для таких систем закономерности в поведении парциальных коэффициентов самодиффузии и населенностей компонент системы. Установлено, что градиентный ЯМР позволяет более точно определить границу фазового перехода, так как он чувствителен к фазовому состоянию системы на масштабах, сравнимых со среднеквадратичным смещением молекул за время диффузии.

К значительным результатам следует отнести методические разработки. Прежде всего, они касаются разработки основ применения градиентного ЯМР к многофазным молекулярным системам и к системам с обменом. Следует отметить, что авторская группа фактически первая (еще в 1987 г.) обратила внимание на необходимость совместного анализа релаксационных данных и данных по самодиффузии при исследовании многофазных систем. Значительно позже (2002 г.) эта идея получила развитие в работах группы М. Хурлиманна, в которых на основе разработанной методики двумерного Лаплас-преобразования было предложено данные по коэффициентам самодиффузии и временам релаксации представлять в виде двумерных карт.

Особое значение имеют разработки в области исследования межфазного обмена. Классический подход, предложенный еще Пфайфером и Каргером, основан на методологии, в которой априори предполагается, что функции распределения времен жизни в фазах

экспоненциальные. Авторами цикла работ впервые рассмотрен общий случай, в котором никаких ограничений на функцию распределения времен жизни в фазах не накладывалось. Наиболее интересные результаты предложенного подхода проявились в условиях промежуточного обмена. Так, оказалось, что даже для двухфазной системы («фазы» « $a$ » и « $b$ ») форма диффузионного затухания описывается непрерывным спектром коэффициентов самодиффузии. Главный и наиболее оптимистичный результат состоит в том, что крайние значения этого спектра всегда вполне однозначно определены значениями истинных коэффициентов самодиффузии  $D_{sa}$  и  $D_{sb}$  в обменивающихся фазах, а населенности  $p_a$  и  $p_b$  этих компонент есть убывающие функции времени диффузии  $t_d$ , из анализа которых может быть непосредственно определен вид функции распределения времен жизни в фазах. В описании цикла работ этот подход продемонстрирован на примере изучения протонного обмена в водных растворах сахаридов.

Значимость учета особенностей ядерной магнитной релаксации в градиентном ЯМР особенно высока при тестировании молекулярной системы на межфазный обмен. Предложено (В.Д. Скирда, В.А. Севрюгин, Г.Г. Пименов) несколько специализированных импульсных последовательностей, позволяющих решить эту проблему.

Изучение самодиффузии молекул в неоднородных средах, несомненно, является важнейшим из возможных приложений градиентного ЯМР. Коллективом (А.И. Маклаков, Н.К. Двояшкин, А.М. Хакимов, В.Д. Скирда, Г.Г. Пименов, Р.Р. Валиуллин, и др.) проведено значительное количество исследований в этой области, охватывающих как задачи изучения характеристик самой пористой среды, так и задачи определения состояния и динамики молекул в пористом пространстве. Сложность исследования самодиффузии в пористых средах, прежде всего, задается неопределенностью в самой структуре пористой среды. Для разных режимов исследования (коротковременной, промежуточный, длинновременной), как правило, разрабатываются отдельные независимые подходы и методики с целью получения информации о пористой среде. Авторским коллективом

(В.Д. Скирда, Р.Р. Валиуллин, А.И. Маклаков и др.) был разработан универсальный подход. В частности, для разделения эффектов ограничений и проницаемости было найдено выражение, позволяющее получить информацию о размерах ограничений (характеристике пористой среды) по полному анализу всей зависимости коэффициентов самодиффузии от времени диффузии, включающей все три основных режима. Предложенный подход универсален в своей применимости: он позволяет получать корректные данные о размерах ограничений (размер пор, клеток и т.д.) даже в тех случаях, когда молекулярная система только частично находится в пористой среде.

Авторскому коллективу (А.И. Маклаков, В.Д. Скирда, Н.К. Двояшкин, Р.Р. Валиуллин) фактически принадлежит приоритет в обнаружении, а затем в детальном исследовании процессов обмена газ-жидкость в пористых средах с высокоразвитой поверхностью. В частности, подобные эффекты обнаруживаются при исследованиях (Н.К. Двояшкин, А.И. Маклаков) нефтей в кернах и в модельных пористых средах. На примере системы гексан - каолинит впервые была сделана попытка (А.В. Урядов, В.Д. Скирда, А.И. Маклаков) экспериментально установить вид функции распределения времен жизни в фазе жидкости. Было показано, что вид этой функции очень чувствителен к величине взаимодействия жидкости с поверхностью, которая при неполном насыщении пористой среды жидкостью определяет характер ее распределения по пористому пространству.

На примере изучения процессов самодиффузии в бинарных пористых системах (цеолиты, пористое стекло “Vycor” и др.) впервые был обнаружен (В.Д. Скирда, Р.Р. Валиуллин, П.В. Картунов) эффект псевдо-ограниченной диффузии, который был подтвержден компьютерным моделированием.

Показаны возможности использования пористых сред в качестве условия тестирования свойств молекулярной системы. Так, в одном из случаев в пористую среду были введены макромолекулы разных молекулярных масс и исследовалась молекулярно-массовая зависимость коэффициентов самодиффузии полимера в объеме и в пористой

среде. Из сравнительного анализа этих двух зависимостей был сделан очень нетривиальный вывод о том, что механизм трансляционной подвижности макромолекул в расплаве контролируется таким фактором, который подавляется при введении полимера в среду ограниченной. Это очень важный вывод для понимания механизмов сложной трансляционной подвижности линейных макромолекул. В другом примере демонстрируется (Н.В. Каширин, В.Д. Скирда, И.В. Овчинников) возможность регистрации эффектов предпереходных состояний в нематических жидкостях. Такие эффекты удалось зафиксировать только при введении жидкости в пористую среду. Этот пример демонстрирует возможности градиентного ЯМР в исследованиях тонких эффектов самоорганизации молекул.

Еще одна методическая разработка авторов цикла относится к модификации (А.В. Филиппов) известного метода криопорометрии путем включения в дополнительный анализ данных градиентного ЯМР. Показано, что в таком режиме методика, названная как «ЯМР-криодиффузометрия», дает существенно более богатую информацию об исследуемом объекте.

Впервые методом градиентного ЯМР были изучены (А.И. Маклаков, Р.С. Гиматдинов, Д.Ш. Идиятуллин и др.) процессы кристаллизации полимеров в растворах. Установлена связь коэффициента самодиффузии с динамической степенью кристалличности.

Также впервые были исследованы (А.И. Маклаков, Н.М. Азанчеев, Г.Г. Пименов) системы полимер-пластификатор. Показана связь между значением регистрируемого коэффициента самодиффузии молекул пластификатора и характером его распределения в полимерной матрице. Установлена связь между поступательным и вращательным движениями молекул пластификатора.

Изучение трансляционной подвижности молекулярных компонент такой сложной молекулярной системы, как остаточная нефть в пористых средах, позволило впервые обнаружить (Н.К. Двояшкин, А.И. Маклаков) явление селективной адсорбции высокомолекулярных фракций нефти на поверхности пор. Предложен метод определения

температуры, при которой все компоненты остаточной нефти приобретают свойства обычных текучих жидкостей.

К еще более сложным молекулярным системам по праву относятся биологические. Кроме воды (представленной в наибольшей степени) они содержат десятки тысяч белков, липидов, сахаров, низкомолекулярных веществ и ионов. Кроме этого, биологические системы характеризуются еще и чрезвычайно сложной надмолекулярной структурной организацией. Несмотря на сложность объектов, именно в них могут максимально проявиться возможности ЯМР с мощными градиентами магнитного поля.

В настоящий цикл работ вошли исследования, касающиеся в основном двух типов биосистем: растворы биомолекул и мембраны.

В водных растворах амилоидных А $\beta$ -пептидов задача исследования сводилась к необходимости регистрации процессов самоагрегации с целью обнаружения ранних признаков болезни Альцгеймера. Процессы самоорганизации фибрина были изучены (А.Р. Мутина, В.Д. Скирда и др.) в нативной плазме крови человека. При исследовании биомембран преимущества градиентного ЯМР удалось (А.В. Филиппов, М.А. Рудакова) максимально реализовать, используя в качестве объекта исследования ориентированные на подложке плоские мультибислои. В итоге были получены следующие важные результаты:

- показано, что в условиях агрегации, близких к равновесию, димеры молекул протеина для лизоцима являются, а для амилоидного пептида – не являются стабильными интермедиатами. Исследована агрегация А $\beta$ -пептидов в условиях низких температур и воздействия ультразвука.
- исследована самодиффузия воды в макроскопически ориентированных липидных мультибислоях. Предложена методика выделения вклада, соответствующего трансбислойной самодиффузии воды. Исследована трансбислойная самодиффузия воды в зависимости от гидратации, температуры и состава биомембраны.

- впервые экспериментально получены зависимости латеральных коэффициентов самодиффузии липидов в двухкомпонентных липидных модельных биомембранах в зависимости от насыщенности цепи, длины цепи, концентрации холестерина, степени гидратации. Установлен механизм влияния холестерина на локальную подвижность насыщенной и ненасыщенной цепи. Наиболее неожиданными оказались результаты, полученные для липидов с двойными связями в цепи. В этом случае, независимо от липида доминирует эффект уменьшения подвижности молекул при увеличении концентрации холестерина. Этот экспериментальный результат заставил исследователей в области биомембран пересмотреть существующие представления о взаимодействии холестерина с фосфолипидами.

В заключение отметим следующее – к началу работ данного цикла не существовало устоявшихся теоретических представлений, описывающих молекулярное движение, как в полимерных системах, так и в пространственно неоднородных. Устранению ряда пробелов в этой области были посвящены работы одного из членов коллектива (Н.Ф. Фаткуллин). Им были получены следующие результаты, имеющие фундаментальное значение:

- впервые было отмечено, что метод градиентного ЯМР аналогичен методу рассеяния нейтронов. Показано, что под волновым вектором рассеяния  $\vec{k}$  следует понимать  $\vec{k} = \gamma \delta \vec{g}$ , где  $\gamma$  – гиромагнитное отношение,  $\delta$  и  $\vec{g}$  – длительность и амплитуда градиента магнитного поля. В явном виде это положение было впервые сформулировано в совместной монографии (А.И. Маклаков, В.Д. Скирда, Н.Ф. Фаткуллин, 1987 г.). С тех пор язык волновых векторов стал общепринятым практически во всех работах данной области магнитного резонанса;
- на основе формализма матрицы плотности развита теория спинового эха с импульсным градиентом магнитного поля в системах с диполь-дипольными взаимодействиями. Показано, что для систем

- с медленными молекулярными движениями, в зависимости от соотношения характерных времен системы, амплитуда спинового эха содержит информацию либо о спиновой диффузии, либо о самодиффузии исследуемых частиц;
- построена теория спиновой диффузии для концентрированных полимерных систем. Показано, что в полимерных системах с молекулярной массой, превышающей некоторое критическое значение, коэффициент спиновой диффузии существенно больше коэффициента самодиффузии самих макромолекул и характеризуется слабой температурной и молекулярно-массовой зависимостями. В последующем наличие эффекта спиновой диффузии в полимерных расплавах было экспериментально доказано в совместных исследованиях с университетом г. Ульм (Германия);
  - исследовано взаимодействие спина со случайным магнитным полем, порожденным различием магнитных восприимчивостей компонент пространственно неоднородных сред. Получены аналитические выражения для измеряемого коэффициента диффузии, спада свободной индукции и времени спин-решеточной релаксации для случая спина, свободно диффундирующего в случайном гауссовом поле. Показано, что в зависимости от условий эксперимента, наблюдаемый коэффициент самодиффузии может быть как больше, так и меньше истинного коэффициента самодиффузии.

#### ***2.2.4. Ядерный магнитный резонанс высокого разрешения в структурно-динамических исследованиях молекулярных систем***

2010 г. «Ядерный магнитный резонанс высокого разрешения в структурно-динамических исследованиях молекулярных систем»: А.В. Аганов, Р.М. Аминова, В.В. Ключков, Ш.К. Латыпов (ИОФХ), А.А. Нафикова (ИОФХ), Ю.Ю. Самитов (посмертно), А.И. Хаяров.





Слева направо: А.Ю. Самитова, А.И. Хаяров, А.А. Нафикова,  
М.Ш. Шаймиев, Ш.К. Латыпов, А.В. Аганов, В.В. Клочков,  
Р.М. Аминова

Данный цикл работ охватывает длительный период – со времени первых в СССР шагов ЯМР высокого разрешения в химии до того времени, когда этот метод стал неотъемлемой частью структурных, структурно-динамических и кинетических исследований.

В 1960–1965 гг. в Казанском государственном университете под руководством Ю.Ю. Самитова в числе первых в СССР был создан комплекс спектрометров ЯМР высокого разрешения (см. раздел 2.1). Все они имели высокие для того времени характеристики, сопоставимые с первыми зарубежными спектрометрами; были опубликованы первые в стране результаты структурных исследований в химии методами ЯМР  $^1\text{H}$ ,  $^{31}\text{P}$  (1960–1964 гг.) и начато широкое внедрение ЯМР в

практику химических исследований не только в Казани, но и далеко за ее пределами.

В последующем путем модернизации спектрометров НА-100D (Вариан, США), WH-90 (Брукер, Германия) был создан уникальный комплекс для специализированных ЯМР-экспериментов, который позволял проводить эксперименты, принципиально важные для всех классов изучаемых органических и фосфорорганических соединений, а именно, стала возможной запись спектров в режимах гетероядерного двойного резонанса ( $^1\text{H} - \{^{31}\text{P}^{\text{TOT}}\}$ ), ( $^1\text{H} - \{^{31}\text{P}^{\text{сел}}\}$ ), спектров тройного резонанса ( $^1\text{H} - \{^1\text{H}^{\text{TOT}}\}\{^{31}\text{P}^{\text{TOT}}\}$ ), ( $^1\text{H} - \{^1\text{H}^{\text{сел}}\}\{^{31}\text{P}^{\text{TOT}}\}$ ) и ( $^1\text{H} - \{^1\text{H}^{\text{сел}}\}\{^{31}\text{P}^{\text{сел}}\}$ ) с широкополосным или селективным облучением ядер фосфора; разработаны приставки для реализации экспериментов в режиме селективной релаксации и отработана методика этих экспериментов, что позволяло производить измерения времен релаксации  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_{1\rho}$  и проводить эксперименты по переносу намагниченности (по модифицированному нами методу Форзена-Хоффмана); была разработана новая безинерционная система, позволяющая варьировать температуру образца уже в интервале 133÷423 К и стабилизировать ее с точностью  $\pm 0,2$  К; был предусмотрен контроль температуры в месте расположения образца в датчике ЯМР; спектрометр WH-90 фирмы «Брукер» был адаптирован для измерения селективных времен релаксации  $T_1$  и  $T_2$  и проведения исследований при еще более низких температурах и т.д. (Ю.Ю. Самитов, А.В. Аганов, А.И. Хаяров, Р.Х. Садыков, П.П. Чернов и др.).

С целью извлечения информации о пространственной структуре молекул на основе ЯМР спектроскопии высокого разрешения:

- впервые в СССР (1960 г.) стали развиваться квантовохимические методы и подходы для теоретической интерпретации магнитно-резонансных параметров сложных молекулярных систем;
- впервые методы теоретической интерпретации параметров спектров ЯМР были применены для установления пространственной

структуры 1,3-сульфита и карбоната, ряда 1,3-диоксанов и 1,3-диоксоланов;

- дана теоретическая интерпретация спектров ПМР производных ферроцена, уникальных для того времени новых «сэндвичевых» соединений с необычной электронной структурой;
- впервые были проведены квантовохимические расчеты значений анизотропии магнитной восприимчивости  $\Delta\chi$ , циклопропанового и окисного трехчленных циклов, которые были применены для анализа спектров ПМР и установления строения стереоизомеров природных соединений, в частности, ряда бициклических терпенов и их окисей ( $\alpha$ - и  $\beta$ -окисей  $\Delta^3$ -карена, пинена,  $\alpha$ - и  $\beta$ -форм каранола-4 и каранола, бицикло[3.1.0] и [4.1.0]гепт-3-енов) (Ю.Ю. Самитов, Р.М. Аминова и др.).

В дальнейшем, рассчитанные значения  $\Delta\chi$  успешно использовались при установлении строения многих соединений, содержащих циклопропановые или окисные фрагменты, а теоретические значения анизотропии диамагнитной восприимчивости  $\Delta\chi$  различных связей – S–O, S=O, Se–O, Se=O, C–C, C–O, C=C, N–N и неподелённой пары электронов атома кислорода использовались для анализа строения других классов шестичленных гетероциклических соединений – таких как селениты, 1,3-дитианы и дитиоланы, оксазины и т.п.

На основе расчетов спин-дипольного, орбитального и контактного вкладов в константы спин-спинового взаимодействия было показано, что спин-спиновое взаимодействие с участием ядра фосфора обуславливается, в основном, контактным механизмом Ферми, проведенные квантово-химические расчеты стереохимических зависимостей констант спин-спинового взаимодействия были успешно использованы для установления пространственного строения многих молекул.

Для развития более строгих подходов при интерпретации экспериментальных ЯМР данных по сравнению с методами, основанными

на учете магнитно-анизотропных и электрических эффектов, Р.М. Аминовой с учениками была разработана теория констант ядерного магнитного экранирования, а также соответствующие ЭВМ программы на основе вариационных методов (прямые вариационные методы и вариационные методы теории возмущений).

Было установлено, что использование калибровочно-инвариантных атомных орбиталей для описания возмущенной магнитным полем волновой функции молекулы и неэмпирических волновых функций основного состояния даже в простом базисе атомных орбиталей позволяет с хорошей точностью рассчитывать константы протонного магнитного экранирования молекул, при этом результаты успешно коррелировали с зарубежными литературными данными. Развитие вариационных методов привело к необходимости расчетов большого массива интегралов. Эта проблема была успешно решена впервые с применением аппроксимации атомных орбиталей гауссовыми функциями.

На основе разработанных методов расчета констант экранирования и магнитной восприимчивости и соответствующих ЭВМ программ была показана возможность использования локализованных молекулярных орбиталей для успешной оценки вкладов в химические сдвиги от различных локализованных фрагментов и связей молекулы. Этот подход был использован для установления пространственного строения молекул на основе спектров ЯМР.

Были рассчитаны удобные для практических применений диаграммы линий магнитного изоэкранирования в окрестности различных связей и неподеленных электронных пар (C–C, C–H, C–N, C–O, P–C, O–O и т.д.). Многочисленные диаграммы линий изоэкранирования, а также теоретически обоснованные угловые корреляции КССВ в последующем широко использовались в структурном ЯМР анализе.

Теоретические оценки химических сдвигов оказались чрезвычайно полезными при изучении методами ЯМР стереохимически

нежестких молекул, для которых имеет место многокомпонентное конформационное равновесие. Для целого ряда производных стереохимически нежестких семичленных 1,3,2-диоксагетероциклов, а также их шестичленных гетероаналогов были обобщены наблюдаемые спектральные ЯМР закономерности и дана теоретическая интерпретация на основе проведенных расчетов протонных химических сдвигов.

Развита теория (Р.М. Аминова и др.) констант протонного магнитного экранирования и их изменения под влиянием электрических полей, создаваемых полярными группами молекулы. Были получены формулы, которые позволяют рассчитывать более строго вклады в химические сдвиги различных связей, обусловленные электрическим влиянием полярных групп молекулы.

Установлено, что электрические эффекты играют основную роль в механизме формирования молекулярных кластеров, приводящего к образованию супрамолекулярных ансамблей и наноструктур. Проведены исследования зависимости констант экранирования от влияния электронного перераспределения для различных ассоциатов пиримидиновых оснований, макромолекулярные производные которых склонны к значительным межмолекулярным взаимодействиям и к формированию хорошо упорядоченных супрамолекулярных структур. Были проведены расчеты констант магнитного экранирования ядер  $^1\text{H}$ ,  $^{13}\text{C}$  с учетом электронной корреляции в рамках современного метода DFT и установлен нетривиальный характер изменений этих магнитно-резонансных параметров в супрамолекулярных системах.

Для моделирования пространственной структуры молекулы в кристаллическом окружении, а также структуры молекулы в растворе:

- был разработан способ построения молекулярных кластеров большого размера;
- была разработана усовершенствованная версия программы для расчетов методом молекулярной механики, в которой учтена периодичность

кристаллической решетки и введены более сложные силовые поля для учета вкладов дальнедействующих взаимодействий.

Моделирование кристаллической структуры и квантовохимические расчеты методами функционала плотности констант экранирования ядер  $^{13}\text{C}$  позволили установить наиболее вероятную схему упаковки молекул в кристалле для ряда соединений и объяснить причины усложненной структуры сигналов ядер  $^{13}\text{C}$  в порошке по сравнению со спектром этого соединения в растворе. Были проведены квантовохимические расчеты констант экранирования молекулярных кластеров растворенной молекулы в окружении молекул растворителя, которые позволили установить структуру сольватной оболочки (Р.М.Аминова, А.А. Нафикова, А.В. Аганов, В.В. Клочков, А.Р. Юльметов и др.).

Важные результаты были получены в области применения ЯМР к исследованию систем химического обмена. Был создан комплекс программ (В.В. Клочков), позволявший проводить анализ формы линии сигналов ЯМР во всем температурном диапазоне измерений, и разработаны экспериментальные подходы для определения термодинамических параметров (свободная энергия активации ( $\Delta G^\ddagger$ ) и равновесия ( $\Delta G_0$ ); энтальпия активации ( $\Delta H^\ddagger$ ) и равновесия ( $\Delta H_0$ )), характеризующих внутримолекулярные перегруппировки.

Был впервые проведен полный анализ проблем, возникающих при использовании одномерного динамического ЯМР для решения структурно-динамических задач в сложных молекулярных системах, включая фактор среды, и предложены способы их преодоления. (А.В. Аганов, В.В. Клочков). С использованием селективных нестационарных методик ДЯМР разработан комплекс подходов для проведения уникальных экспериментов ДЯМР в газовой фазе и растворах при предельно низких температурах. Все это позволило расширить диапазон измеряемых констант скоростей химического обмена и проводить исследования процессов, характеризующихся термодинамическими

параметрами активации от 25 до 120 кДж/моль, предельными для спектроскопии ЯМР высокого разрешения. На основании разработанных приемов в динамической ЯМР спектроскопии обнаружены и детально описаны разнообразные молекулярные перегруппировки в гетероциклах среднего размера, пента- и гексакоординированных полиэдрических структурах и т.д. Впервые установлены конформационные закономерности в различных фазовых состояниях – газ–раствор (расплав) – молекулярный кристалл (А.В. Аганов, Ш.К. Латыпов, А.А. Нафикова, А.И. Хаяров, А.Р. Юльметов и др.).

Методом ЯМР ( $^1\text{H}$  и  $^{13}\text{C}$ ) спектроскопии в диапазоне температур растворов 133–293 К проведены исследования конформационного состава большого числа шести-, восьми-, двенадцатичленных монозамещенных карбоциклов; шести-, семи-, восьмичленных гетероциклов (O и S содержащих) с вариацией атомов [C,  $\text{P}^{\text{III}}$ ,  $\text{P}^{\text{IV}}$ ,  $\text{As}^{\text{III}}$ ,  $\text{Sb}^{\text{III}}$ , Se, S] во втором положении. Описан конформационный состав этих соединений; при этом для них наблюдались практически все известные типы процессов, такие как обмен между энергетически эквивалентными конформерами типа кресло–кресло, твист–твист, твист–ванна–твист–ванна, ванна–ванна, ванна–кресло–ванна–кресло и обменные процессы между энергетически неэквивалентными конформерами типа кресло-а–кресло-е, кресло–твист, кресло-е–ванна-е, ванна-е–кресло-е, и т.п. Получен большой массив данных (активационных, равновесных), характеризующих эти процессы химического обмена в гетероциклических системах (А.В. Аганов, В.В. Клочков и др.).

Экспериментально показано, что при анализе активационных параметров интерконверсии циклических молекул может быть применен принцип аддитивности энергетических свойств заместителя, согласно которому изменение химической структуры за счет введения того или иного заместителя влечет за собой изменение активационных параметров конформационного перехода на величину, характерную для этого типа замещения.

Предложен подход (В.В. Клочков) для определения межпротонных расстояний в малых органических молекулах, попадающих под условие быстрого движения ( $\omega_0\tau_c \ll 1$ ;  $\tau_c$  – время корреляции,  $\omega_0$  – резонансная частота ядер), путем комбинации ЯМР NOESY эксперимента с методами обработки данных.

Получено выражение, связывающее скорость кросс-релаксации, константу скорости обмена и интегральные интенсивности кросс- и диагональных пиков в спектрах двумерной ЯМР спектроскопии (NOESY модификация) для системы двух спинов в отсутствии и наличии скалярного спин-спинового взаимодействия между ними. Предложен подход для разделения вкладов кросс-релаксации и химического обмена, основанный на анализе температурных изменений интегральных интенсивностей кросс-пиков между двумя магнитными ядрами (В.В. Клочков, Б.И. Хайрутдинов и др.).

В.В. Клочковым с сотрудниками развит подход для определения конформаций наноразмерных молекул, подпадающих под условие быстрого движения, растворенных в магнитно-ориентированных лиотропных жидкокристаллических системах, в основе которого лежит анализ остаточного диполь-дипольного взаимодействия (residual dipolar couplings, RDC) между магнитными ядрами  $^{13}\text{C}$  и  $^1\text{H}$ , разделенных одной химической связью. На основании этого подхода определено пространственное строение наноразмерных олигопептидов: дипептида Glu-Trp, являющегося основной составляющей лекарственного средства; трипептидов Gly-Gly-Gly, Gly-Gly-His, Gly-Gly-Tyr, Glu-Cys-Gly, которые используются в качестве лигандов в комплексах с Cu (II) и применяются в качестве моделей активных центров ферментов; тетрапептида nAc-Ser-Phe-Val-Gly-OMe – модельного олигопептида при исследовании межмолекулярных взаимодействий пептидов с растворителями.

Предложен метод  $^2\text{H}$  ЯМР спектроскопии для определения границ существования магнитно-ориентированной ламеллярной  $L_\alpha$ -фазы



в координатах температура – концентрация мицеллообразующих соединений, основанный на рассмотрении квадрупольного расщепления ЯМР сигналов  $^2\text{H}$  дейтерированной воды. Предложена и изучена лиотропная жидкокристаллическая система n-алкилполи(этилен)гликоль ( $\text{C}_{12}\text{E}_5$ ), диметилсульфоксид и вода, которая может быть использована для частичного ориентирования нерастворимых (или плохо растворимых) в воде органических или биоорганических молекул и определены границы магнитно-ориентированной ламеллярной  $L_\alpha$ -фазы для этой среды.

Ш.К. Латыповым предложен комплексный подход на основе комбинированного использования корреляционных методов ЯМР и квантово-химических оценок (*ab initio*) химических сдвигов (ХС) для установления химической структуры органических соединений. Систематически проанализированы возможности и ограничения такого подхода. «Напрямую» установлена изомерная структура ряда практически важных соединений (хиноксалинов, хинолинонов, кумаринов, фуллеренов). Также разработаны теоретические основы определения абсолютной конфигурации хиральных молекул методом ЯМР и дизайна хиральных дериватизирующих реагентов (ХДР). Выявлены основные факторы, определяющие надежность этого подхода и границы его применимости. Сформулированы принципы рационального дизайна ХДР. Разработаны и экспериментально апробированы новые эффективные реагенты для анализа вторичных/первичных спиртов, первичных аминов,  $\alpha$ -замещенных карбоновых кислот. Впервые показано, что абсолютная конфигурация вторичных спиртов может быть определена путем синтеза и анализа ЯМР спектра только одного из диастереомеров путем сравнения  $^1\text{H}$  ЯМР спектров при двух температурах. Впервые разработана стереонежесткая модель для определения абсолютной конфигурации вторичных спиртов по химическим сдвигам групп, непосредственно связанных с хиральным центром реагента.

А.А. Нафиковой (Мусиной) и др. исследована конформационная и надмолекулярная структуры ряда макроциклических производных пиримидиновых оснований и установлено, что для макроциклов с определенной длиной спейсера в растворе реализуется «свернутая» структура, которая стабилизируется за счет внутримолекулярного водородного связывания. Обнаружено, что такая внутримолекулярная упаковка дестабилизируется при протонировании за счет конкуренции с межмолекулярными водородными связями, что, в свою очередь, приводит к специфичной самоассоциации, в которой противоион кислоты играет роль нековалентного мостика.

Развиты методические аспекты комбинированного применения релаксационных и диффузионных ЯМР методов высокого разрешения к решению структурных проблем супрамолекулярных систем. Показаны возможности и ограничения метода 2D DOSY в таких исследованиях. Изучены ряд индивидуальных/бинарных и многокомпонентных систем, склонных к ассоциации/самоассоциации, и показано, что они могут служить моделями различных молекулярных устройств (молекулярная капсула, двух/трех компонентная молекулярная машина, псевдо-ротоксан и т.д. (Ш.К. Латыпов, А.В. Аганов и др.).

Результаты исследований обобщенные в пяти монографиях. Среди них уникальный «Атлас спектров ЯМР пространственных изомеров» (1, 2 том) (Ю.Ю. Самитов).

В этих циклах работ подведены итоги многолетней работы коллективов, созданных первопроходцами магнитного резонанса в СССР и в Казанском университете, по тематикам, сформированным ими на заре магнитного резонанса, и в известной степени это наша дань уважения их памяти.

До 1995 года работы в области магнитного резонанса велись в рамках Основного Научного Направления (ООН) КГУ (научной школы) «Резонансные свойства конденсированных сред» (рук. Б.И. Кочелаев).

В 1995 г. из него выделилось ОНН «Биомедицинская радиоспектроскопия и оптика» (рук. А.В. Аганов и В.Д. Скирда). По ОНН «Резонансные свойства конденсированных сред» (рук. Б.И. Кочелаев и А.В. Аганов) по-прежнему продолжались физические исследования, в которых принимали участие и группы А.В. Аганова и В.Д. Скирды. После полного перехода на проектное финансирование эти направления были адаптированы (формализованы) к решению комплексных задач по принятым стратегическим направлениям развития университета. Фактически в двух из 4-х естественно-научных направлений Института физики принимают участие все группы магнитного резонанса, точнее, радиоспектроскопии.

1. Перспективные материалы (структура и свойства новых веществ и материалов, в том числе для квантовых технологий. Координатор – Д.А. Таюрский).

2. Исследования медико-биологических систем физическими методами. Координаторы – руководители А.В. Аганов и В.Д. Скирда.

3. В соответствии с требованиями времени было выделено направление «Развитие приложений физики в различных секторах экономики (в нефтегазовой, нефтехимической, химической, в фармацевтической и т.д.)». Здесь также принимают участие практически все группы магнитного резонанса. Ниже приведены и более ранние основные публикации, относящиеся к этим направлениям, но не вошедшие в приведенные циклы работ, непосредственно связанные с работами последнего десятилетия. Общее число публикаций слишком велико, чтобы быть приведенными в небольшой монографии. Ниже приведены только краткие описания результатов исследований и только не полная часть основных публикаций. Естественно, в основе этих работ лежат исследования методами магнитного резонанса. Однако приведены и работы, посвященные изучению резонансных свойств конденсированных сред, поскольку они стимулируют развитие методов магнитного резонанса.

## **2.3. Теоретические и экспериментальные исследования в области магнитного резонанса и родственных явлений по основным научным направлениям Института физики Казанского университета современного периода**

### **2.3.1. Направление «Перспективные материалы – структура и свойства новых веществ и материалов, в том числе для квантовых технологий»**

*Физика сильно-коррелированных систем* – одна из самых «горячих» тем физики конденсированного состояния. Группой Б.И. Кочелаева (С.И. Белов, А.М. Скворцова, Е.В. Шилова, А.С. Кутузов, А.В. Вишина) совместно с зарубежными партнерами в этой области выполнен большой цикл работ.

Б.И. Кочелаевым была предложена идея использовать парамагнитные зонды внутри плоскостей  $\text{CuO}_2$  для измерения скоростей релаксации намагниченности в купратных высокотемпературных сверхпроводниках, которая была реализована в совместных исследованиях с группой профессора Б. Элшнера в Дармштадтском университете (Германия) [20а–б]. Дальнейшие исследования были проведены в сотрудничестве с группой лауреата Нобелевской премии профессора К.А. Мюллера из Цюрихского университета (Швейцария) [21а–д]. Эта работа привела к пониманию природы очень быстрой спиновой релаксации электронов и разработке модели, объясняющей наблюдаемое разделение фаз на наноразмерные металлические и диэлектрические домены в плоскостях  $\text{CuO}_2$  [22а]. Б.И. Кочелаев решил давнюю проблему «не наблюдаемого ЭПР» в сверхпроводящих купратах и показал, что она вызвана очень быстрой спин-решеточной релаксацией ионов  $\text{Cu}$  со скоростью, значительно усиленной обменной связью между ними [22б].

Б.И. Кочелаев предложил новый подход, основанный на идее спиновых волн в средах с топологическими возбуждениями (скирмионами) [22в], и вместе с учениками (С.И. Белов, А.М. Скворцова,

А.С. Кутузов) описал с единых позиций как статические, так и динамические параметры слоистых манганитов, такие как длина спиновой когерентности, магнитная восприимчивость и т.д. Их сотрудничество с экспериментальными группами профессора Х.-А. Круг фон Нидда и профессора Алоиса Лойдла из Аугсбургского университета, а также с группой доктора Й. Зихельшмидта из Дрездена было чрезвычайно плодотворным [22г–е]. Кинетика электронного спина в веществах с гигантским магнитосопротивлением была исследована методами ЭПР, а также изучены спектры ЭПР соединений с тяжелыми фермионами ниже температуры Кондо. Было показано, что отсутствие «пика Сликхтера», установленного в некоторых сверхпроводниках путем измерений ЭПР, и неожиданное обнаружение сигнала ЭПР в решетке Кондо с тяжелыми фермионами ниже температуры Кондо являются последствиями формирования коллективных спиновых возбуждений парамагнитных ионов и электронов проводимости.

Вместе с коллегами (С.Л. Царевский, Ю.Н. Прошин, М.Г. Хусаинов) и аспирантами из Якутска (Е.П. Шарин, С.А. Ефремова) была решена задача о форме линии ЯМР в сверхпроводниках второго рода, в том числе высокотемпературных, в наклонных с учетом изменения неоднородности магнитного поля вихревой решетки магнитных полях и скин-эффекта вблизи поверхности сверхпроводника. Показано, что ЯМР дает возможность получить более подробные сведения о параметрах сверхпроводника, в частности, о его параметре анизотропии [22ж–и].

***В области магнитного резонанса*** Б.З. Малкиным\* и сотрудниками выполнены исследования когерентной динамики и релаксации электронных и ядерных магнитных возбуждений, спиновой релаксации

---

\* Борис Залманович Малкин больше известен как физик–теоретик, специалист в области оптической спектроскопии кристаллов. Лауреат премии им. Д.С. Рождественского 2019 года за цикл работ «Спектроскопия высокого разрешения кристаллов, содержащих редкоземельные ионы», награжден медалью Е.Ф. Гросса (2016) и медалью С.И. Вавилова за достижения в области когерентной динамики спиновых возбуждений в кристаллах, допированных редкоземельными ионами (2019).

имплантированных мюонов в зависимости от концентрации примесных редкоземельных ионов в кристаллах оксидов и фторидов со структурой шеелита с учетом процессов кросс-релаксации, спиновой диффузии и фононного узкого горла в спин-решеточной релаксации [23а–е].

Им разработана микроскопическая теория антипересечений электронно-ядерных подуровней в спектрах редкоземельных ионов, обусловленных случайными деформациями кристаллической решетки [24а–в] и методика идентификации спектральных характеристик редкоземельных ионов в многоцентровых системах на основе данных комплексных исследований оптических и ЭПР спектров и спектров неупругого рассеяния нейтронов [24г].

В работах М.В. Еремина [25а–ж] и коллег представлены результаты *исследований спектров ЭПР и ЯМР концентрированных парамагнетиков*. Дан анализ температурных и угловых зависимостей линий магнитного резонанса. Определены параметры анизотропных спин-спиновых взаимодействий.

Как уже отмечалось выше, большой цикл работ по исследованию магнитного резонанса и релаксации в диэлектрических ван-флековских парамагнетиках в сильных магнитных полях, начатых еще под руководством С.А. Альтшулера и продолженных затем М.А. Тепловым, безвременно ушедшим из жизни в расцвете творческих сил (1998), был отмечен госпремией РТ в области науки и техники за 2006 г. Эта тема завершена. В работе [26] можно найти необходимые ссылки на исследования в этой области.

Из работ раннего периода следует отметить *исследования спиновой кинетики в парамагнитных кристаллах при низких и сверхнизких температурах* (Д.А. Таюрский, Б.И. Кочелаев). Д.А. Таюрским была построена теория магнитного резонанса и спиновой релаксации в диэлектрических парамагнитных кристаллах при низких и сверхнизких температурах, в условиях, когда энергия магнитного момента во внешнем поле одного порядка или больше тепловой

энергии. За счет сильной термодинамической связи в таких условиях динамика электронно-ядерной спиновой системы приобретает сложный нелинейный характер, а характерные времена релаксации экспоненциально зависят от температуры [27а–д].

***Магнитная релаксация жидкого гелия-3 в ограниченной геометрии*** (Д.А. Таюрский, М.С. Тагиров, А.В. Клочков, А.В. Егоров, В.В. Налётов, Г.В. Мамин, Е.М. Алакшин и Р.Р. Газизулин, В.В. Кузьмин, К.Р. Сафиуллин, А.Н. Юдин). Наиболее важные результаты опубликованы в работах [28а–к].

Установлены механизм и закономерности ускоренной магнитной релаксации ядерных спинов жидкого гелия-3 в условиях ограниченной геометрии – в нанопорах порошковых соединений, в нанотрещинах на кристаллических поверхностях, в аэрогелях, карбонизатах. Обнаружено, что помимо поверхностных парамагнитных центров на релаксацию ядерных спинов жидкого гелия-3 оказывает существенное влияние модуляция диполь-дипольного взаимодействия диффузионным движением в условиях сильно ограниченной геометрии, когда «выживают» только резонансные моды диффузионного движения. Совокупность полученных результатов легла в основу метода криопрометрии с использованием жидкого гелия-3. Установлено, что поверхностные парамагнитные центры в исследованных карбонизатах обладают высокой концентрацией, имеют обменно-суженую линию ЭПР и свободно взаимодействуют с ядрами  $^3\text{He}$ , находящимися в системе. Показано, что между системой электронных спинов парамагнитных центров и ядерной системой  $^3\text{He}$  имеется надежная магнитная связь. Спектр ЭПР поверхностных парамагнитных центров может быть насыщен. На основании перечисленных данных сделан вывод о возможности использования данной системы для реализации метода динамической поляризации  $^3\text{He}$ .

***Исследования методами ЯМР/ЯКР и мюонной спектроскопии различных фаз натриевых кобальтатов  $\text{Na}_x\text{CoO}_2$  с различным содержанием натрия, а также сверхпроводящей фазы***

$Na_{0.35}CoO_2 \cdot 1.3H_2O$  с  $T_C \sim 4K$ . Большой цикл работ выполнен Д.А. Таюрским с сотрудниками (И.Р. Мухамедшин, А.В. Дуглав и др.) в сотрудничестве с зарубежными коллегами.

Выделено шесть стабильных фаз на участке фазовой диаграммы с содержанием натрия  $0,65 < x < 0,9$ , три из которых переходят в магнитоупорядоченное состояние при низких температурах. Показано, что в фазе с  $x = 0.35$  и сверхпроводящей фазе наблюдается единое зарядовое состояние атомов кобальта и отсутствие упорядочения атомов натрия. Во всех же фазах с содержанием натрия  $x > 0.45$  наблюдается упорядочение атомов натрия. Методами ЯМР и ЯКР была определена структура упорядочения атомов натрия в соединениях  $Na_{2/3}CoO_2$  и  $Na_{0.77}CoO_2$ . Это упорядочение в  $Na_{2/3}CoO_2$  приводит к зарядовому расслоению атомов кобальта в плоскостях на две подрешетки: треугольную решетку из немагнитных  $Co^{3+}$  и решетку типа «кагомэ», состоящую из магнитных атомов  $Co$  с зарядовым состоянием  $3.44+$ , для которых экспериментально обнаружена необычно большая анизотропия магнитных свойств. Подобное зарядовое расслоение атомов кобальта на немагнитное состояние  $Co^{3+}$  и магнитное с зарядом кобальта  $\sim 3.5+$  оказалось характерным для различных фаз натриевых кобальтатов с  $x > 0.55$ , причем различия в структуре упорядочения атомов натрия обуславливают отличия магнитных свойств различных фаз. Наиболее важные работы опубликованы в работах [29а–м].

***Новые методы характеристики магнитных свойств наночастиц и наноразмерных пор с помощью ЯМР  $^3He$  при низких температурах.*** (М.С. Тагиров, Е.М. Алакшин, Р.Р. Газизулин, Т.Р. Сафин, А.В. Клочков, В.В. Кузьмин, С.Б. Орлинский, Г.В. Мамин, К.Р. Сафиуллин и др.).

Методами ЯМР обнаружено влияние микроволнового облучения на реструктуризацию наноразмерных кристаллических порошков  $PrF_3$ . Серия наноразмерных кристаллических порошков  $PrF_3$  синтезирована в КФУ [30а]. Исследована спиновая кинетика  $^3He$  в контакте



с синтезированными в КФУ наноразмерными порошками  $\text{LaF}_3$ ,  $\text{PrF}_3$  различного размера. Установлены каналы ядерной магнитной релаксации  $^3\text{He}$ . Обнаружены особенности эффекта кросс-релаксационной передачи намагниченности в системе “ $^3\text{He}$  – наноразмерный порошок  $\text{PrF}_3$ ” [30б,в].

***Исследование методами нелинейного магнитного резонанса бозе-эйнштейновской конденсации магнонов*** (рук. М.С. Тагиров, Ю.М. Буньков. Состав группы: кандидаты наук Р.Р. Газизулин, Т.Р. Сафин, А.В. Клочков, Е.М. Алакшин, В.В. Кузьмин, С.Б. Орлинский, Г.В. Мамин, К.Р. Сафиуллин).

Это явление – магнитный аналог сверхтекучести и сверхпроводимости – имеет огромный потенциал для применения в различных приложениях: от обработки сигналов, квантовой памяти, сверхчувствительных сенсоров, смарт-материалов с управляемыми свойствами до квантовых вычислений. Однако применение явления бозе-эйнштейновской конденсации ранее ограничивалось его наблюдением только при рекордно низких температурах. В работах группы М.С. Тагирова – Ю.М. Бунькова было обнаружено существенное удлинение сигналов спада свободной индукции в состоянии БЭК (бозе-эйнштейновской конденсации) магнонов после длительной радиочастотной накачки по сравнению с линейным режимом в двух образцах  $\text{CsMnF}_3$  [31а,б]. Наконец, бозе-эйнштейновская конденсация магнонов была обнаружена в плёнках иттриевого феррита-граната при комнатной температуре. Это революционное открытие можно сравнить с давно ожидаемым открытием сверхтекучести при комнатной температуре, что открывает возможность его широкого использования. Результаты представлены в работах [32а–и].

***Магнитные системы пониженной размерности, сверхтонкие магнитные пленки и магнитные гетероструктуры.*** В последние десятилетия такие достоинства магнитного резонанса, как экстраординарная чувствительность, возможность выступать в качестве зонда в многокомпонентных соединениях и структурах, исключительная

тонкость в реакции на локальные окружения и поля позволили распространить его применения на магнитные системы пониженной размерности, сверхтонкие магнитные пленки и магнитные гетероструктуры.

Так, в сериях работ И.Р. Мухамедшина, Д.А. Таюрского, Л.Р. Тагирова [33а–33е] и их коллег были исследованы квазидвумерные натриевые кобальтаты, квазиодномерные тройные халькогениды железа и квазидвумерные бинарные и смешанные халькогениды железа, взаимная корреляция магнетизма и сверхпроводимости в которых совершенно неслучайно связана с пониженной размерностью решетки, а сами эти соединения родственны высокотемпературным сверхпроводникам.

***Ультра-тонкопленочные гетероструктуры.*** Современные нанотехнологии позволяют оперировать монослоями и нанометрами веществ и соединений, комбинируя из них синтетические наноструктурированные материалы, которые не встречаются в природе. Более того, они позволяют комбинировать антагонистические материалы в слоистые структуры, новые функциональные свойства которых обусловлены исключительно контактами их составляющих и квантово-механической прозрачностью самих слоев для квазичастиц, определяющих их свойства. В большинстве случаев это ультра-тонкопленочные гетероструктуры, для построения моделей которых оказались очень полезными такие магниторезонансные методы, как ферромагнитный резонанс и ядерный магнитный резонанс. Так, Л.Р. Тагиров с коллегами из КФТИ КазНЦ РАН, Технологического университета Гебзе, Турция, университета Аугсбурга, Германия, и АН Республики Молдова исследовали ультратонкие пленки и тонкопленочные гетероструктуры, сочетающие антагонистические состояния сверхпроводников и ферромагнетиков, с использованием которых продемонстрировали возвратную сверхпроводимость и функциональное свойство переключателя между сверхпроводящим и нормальным состояниями с помощью небольшого магнитного поля [34а–и].

**Сверхпроводимость в гетероструктурах.** Отметим, что теоретическое предсказание возвратной и периодически возвратной сверхпроводимости в гетероструктурах ферромагнетик-сверхпроводник (F/S) было сделано М.Г. Хусаиновым и Ю.Н. Прошиным еще в 1997 году [35а]. Подробный анализ этой и других работ по эффекту близости в системах F/S можно найти в высокоцитируемом обзоре, первом в мире, который появился по этой тематике, написанном ими вместе с академиком РАН Ю.А. Изюмовым (ИФМ УрО РАН) [35б]. Среди более поздних работ этой теоретической группы (Ю.Н. Прошин, М.Г. Хусаинов, С.Л. Царевский, Н.Г. Фазлеев, М.М. Хусаинов, М.В. Авдеев, В.А. Туманов) отметим работы по магнитным и транспортным свойствам таких систем [35в-и], в том числе были предсказаны эффекты уединенной возвратной сверхпроводимости [35к,л] и проявления скрытого спаривательного взаимодействия электронов ферромагнетика при контакте с сверхпроводником [35м]. Так, например, в сотрудничестве с Ю.В. Горюновым, экспериментатором из КФТИ КазНЦ РАН, были исследованы сверхпроводящие и магнитные свойства слоистой системы (Fe/Cr/Fe)/V/Fe с изменением толщины прослойки хрома, в том числе и методом ферромагнитного резонанса. Было показано, что при изменении толщины прослойки Cr возникают немонотонные осцилляции критической температуры  $T_c$  сверхпроводящего перехода большой амплитуды (более 2 К!), что удалось объяснить в рамках теории эффекта близости, связав эти осцилляции с особенностями магнитной структуры образцов [35н].

**Керамика SiCN, допированная ионами металлов переходных групп,** обладает сверхпарамагнитными свойствами и является весьма перспективным материалом для создания высокотемпературных магнитных сенсоров и сенсоров давления [36а]. Методы ЭПР, ФМР могут предоставить важную информацию о свойствах SiCN керамик и их магнитных производных, в совокупности с изучением их магнитных и электрических свойств. Плодотворное сотрудничество

С.И. Андроненко\* и группы экспериментаторов – сотрудников КФУ (А.А. Родионов, Р.В. Юсупов, И. Гильмутдинов) с проф. С.К. Мисра (Misra, Sushil K.) из университета Конкордия (Монреаль, Канада) по ЭПР и ФМР исследованию керамик SiCN и магнитных производных SiCN отражено в работах [36б–г]. Они обобщены в главе монографии [36д].

Отметим также высокоцитируемые работы этой группы, посвященные исследованиям методом ЭПР магнитных полупроводников  $Zn_{1-x}Fe_xO$  [36е] и фазы Гриффитса [36ж].

В работах И.А. Ларионова, выполненных совместно с зарубежными коллегами, представлены *исследования динамического спинового отклика в высокотемпературных сверхпроводящих слоистых купратах* [37а–д]. Получены аналитические выражения для динамических спиновых восприимчивостей методом проекционных операторов Мори-Цванцига в парамагнитном состоянии, в области легирования от чистого антиферромагнитного диэлектрика до оптимального легированных (максимум  $T_c$ ) высокотемпературных сверхпроводящих слоистых купратов. Используемое представление корректно учитывает роль всех волновых векторов зоны Бриллюэна. В рамках единого подхода объяснены особенности поведения наблюдаемых экспериментально скоростей спин-решеточной релаксации на ядрах меди  $^{63}(1/T_1)$  и кислорода  $^{17}(1/T_1)$  [37а,б], а также эксперименты по неупругому рассеянию нейтронов, включая  $\omega/T$  скейлинг усредненной по зоне Бриллюэна мнимой части динамической спиновой

---

\* С.И. Андроненко, последние 10 лет – с.н.с. кафедры теоретической физики КФУ, защитил докторскую диссертацию. Ранее он работал научным сотрудником Лаборатории Электронных Процессов, созданной В.А. Иоффе в Институте Химии Силикатов АН СССР (ныне РАН). Затем долгое время работал в группе проф. Мисра, С.К. (Misra, Sushil K.). В.А. Иоффе впервые стала применять ЭПР (начиная с 1960 г.) для исследования дефектов (кислородных дефектов, вакансий, дырок, а также и примесных парамагнитных ионов) в оксидах и их влияния на электрические свойства оксидов. В.А. Иоффе активно сотрудничала с сотрудниками С.А. Альтшулера А.А. Антипиным, И.Н. Куркиным и др. (лаборатория МРС при кафедре КЭ РС КГУ).

восприимчивости [37в] и данные резонансного неупругого рассеяния рентгеновских лучей (RIXS) [37г], что достигается при учете теплового затухания элементарных возбуждений вида спиновых волн (парамагнонов) в слоистых купратах  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  и  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$  в диапазоне индексов легирования от 0 до оптимального и температур выше  $T_c$ .

Также показано, что получаемая величина затухания элементарных возбуждений вида спиновых волн (парамагнонов) в слоистых купратах  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  и  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$  при анализе данных RIXS принципиальным образом зависит от используемых аналитических выражений для мнимой части динамических спиновых восприимчивостей [37г].

В слабо легированной сверхпроводящей фазе  $\text{Y}_{1-x}\text{Ca}_x\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$  расходимость  $^{89}(1/T_1)$  при понижении температуры связывается с замедлением возбуждений, возможно связанным со скользящим движением орбитальных токов или с сопутствующим «замораживанием» антиферромагнитно коррелированных спинов [37д].

***Развитие и применение методов магнитного резонанса для изучения перспективных материалов и наноструктур*** представлены в серии работ [38а-е], выполненных большой группой экспериментаторов (координаторы-руководители М.С. Тагиров и С.Б. Орлинский).

Продемонстрированы преимущества импульсных и высокочастотных методов ЭПР/ДЭЯР при изучении изменения состава (допировании) и функционализации поверхностей широкого класса веществ, (нано)кристаллов и тонких пленок полупроводниковой, оптической, биомедицинской, химической промышленности  $\text{ZnO}$ ,  $\text{AlN}$ ,  $\text{SiC}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , и др. различными примесями с целью определения химического состава и «чистоты» наночастиц, идентификации парамагнитных центров и установления мест их локализации, что крайне важно для контроля процессов синтеза наночастиц с заранее заданным химическим составом и структурой и состояния их поверхности.

В работах [39а–е] показано, что применение высокополевых импульсных методов ЭПР и ДЭЯР позволяет разделять сигналы от дефектов в ядре наноалмаза и на его поверхности. Кроме этого, в ряде случаев удалось идентифицировать химическую природу этих дефектов.

*Спиновые манипуляции для квантового компьютеринга.* Сотрудниками лаборатории магнитного резонанса (И.Н. Куркин, М.Р. Гафуров, Р.М. Рахматуллин, С.Б. Орлинский, Г.В. Мамин) и кафедры теоретической физики (Э.И. Байбеков, Б.З. Малкин) вместе с зарубежными коллегами была продемонстрирована возможность использования электронных состояний примесных ионов в кристаллах в качестве основы для элементарных квантовых логических ячеек – кубитов [40а–ж]. Управление данными состояниями осуществлялось методами импульсного ЭПР, используя возможности коммерческих спектрометров ЭПР. В работе [40а] (см. также [23в]) продемонстрировано выполнение до  $10^4$  последовательных однокубитных логических операций на состояниях иона  $\text{Yb}^{3+}$  в кристалле  $\text{CaWO}_4$ . Изучались электронные спиновые нутации примесных ионов  $\text{Cr}^{5+}$  [40б],  $\text{Nd}^{3+}$  [40в],  $\text{Gd}^{3+}$  [39г], возникающие под действием СВЧ импульса на частоте резонанса. Демонстрация спиновых нутаций является необходимым шагом для успешной реализации алгоритмов квантовых вычислений при помощи электронных кубитов. Процессы электронной спиновой релаксации, происходящие непосредственно во время действия импульса СВЧ поля на ансамбль спинов, а также вклады различных механизмов в затухание электронных спиновых нутаций, были теоретически изучены в работах [40д–з]. Оказалось, что времена затухания спиновых нутаций существенно отличаются от значений, рассчитанных с использованием известных в литературе механизмов фазовой релаксации (между СВЧ импульсами). В работах [40д,и] изучалась роль ядерного ансамбля в релаксации электронного спина в присутствии резонансного СВЧ поля на примере молекулярного магнита  $\text{V}_{15}$  и спинового маркера – нитроксильного радикала ТЕМРО.

Сотрудниками кафедры квантовой электроники и радиоспектроскопии Казанского университета С.Б. Орлинским и Г.В. Маминым с партнерами из Физико-технического Института им. А.И. Иоффе, Голландии и Германии (П.Г. Баранов, И. Шмидт (J. Schmidt), и др.) *выполнены обширные исследования в области высокочастотного ЭПР и ДЭЯР современных материалов.* Основные результаты представлены в публикациях [41а–о].

*ЭПР в исследованиях фундаментальных процессов фотоиндуцированного разделения зарядов в органических электрондонорно-акцепторных системах.* Разработка источников энергии, основанных на прямом преобразовании солнечной энергии в электрическую энергию, является в настоящее время одной из наиболее приоритетных задач физики и химии органических материалов. Светоиндуцированный перенос электрона в органических электрон донорно-акцепторных системах генерирует пару анион/катион радикалов, достаточно стабильных при низких температурах вплоть до  $\sim 130$  К. Таким образом, эти радикалы являются важными объектами для изучения светоиндуцированного разделения зарядов методом ЭПР и его мульти-резонансными производными (двойной электрон-электронный резонанс (ДЭЭР), двойной электрон-ядерный резонанс (ДЭЯР), тройной электрон-ядерно-ядерный резонанс (ТЭЯЯР) и др.). Основные результаты сотрудничества исследовательских групп Казанского федерального Университета (А.В. Аганов, Г.В. Мамин, С.Б. Орлинский, В.В. Клочков, А.А. Конькин, М.Р. Гафуров, В.Г. Штырлин) и Технического Университета Ильменау (Уве Риттер, А.Л. Конькин и др.), главным образом, в изучении ряда новых производных фуллеренов (акцепторов электронов), синтезированных в ТУ-Ильменау, отражены в [42а–з]. Техника высокочастотной ЭПР спектроскопии (94 ГГц) позволила разделить спектры анион и катион радикалов и исключить перекрывание их  $^1\text{H}$  ДЭЯР спектров, но главным образом спектров ТЭЯЯР. В этом случае применение мультирезонансных методов высокочастотной ( $> 90$  ГГц) магнитной

радиоспектроскопии позволило значительно повысить разрешение спектров лигандных сверхтонких взаимодействий (ЛСТВ) в органических донорных и акцепторных ион радикалах с неразрешенной ЛСТВ в спектре ЭПР и сделало доступным получение уникальной дополнительной экспериментальной информации о распределении и знаке электронной спиновой плотности.

***Спиновая релаксометрия протонов в расплавах полимеров как метод измерения тепловых смещений сегментов макромолекул в нано и мезоскопических пространственных диапазонах.*** Н.Ф. Фаткуллиным и коллегами было показано, что аномальный характер диффузии полимерных сегментов при временах меньших времени терминальной релаксации макромолекул в расплавах существенным образом влияет на процессы спиновой релаксации протонов. Оказалось, что при достаточно низких частотах, соизмеримых и меньших со 100 МГц, спиновая релаксация протонов определяется в основном не магнитными диполь-дипольными взаимодействиями ближайших внутримолекулярных протонных пар, а взаимодействиями удаленных протонов из различных макромолекул. Этот эффект носит частотный характер, что позволило на основе частотной зависимости скоростей спин-решеточной релаксации и временной зависимости начальных спадов ССИ, эха Хана, твердотельного спинового эха измерять пространственные смещения полимерных сегментов, связанные с тепловыми флуктуациями в диапазоне 30–300 Å, недоступном для иных ныне существующих экспериментальных методов (см. [43а–з] и цитированную там литературу).

Л.К. Аминовым с коллегами систематизированы результаты наблюдений и моделирования ***суперсверхтонкой (лигандной сверхтонкой) структуры (ССТС) спектров ЭПР примесных ионов редких земель и урана в диэлектрических кристаллах.*** Наибольшее внимание уделено тетрагональным двойным фторидам  $\text{LiRF}_4$  ( $R = \text{Y, Lu, Tm}$ ) [44а–г]. Проведены исследования различных моделей редкоземельных



парамагнитных центров в смешанных кристаллах со структурой флюорита [44д–и].

Р.М. Аминовой и сотр. проводились *квантовохимические расчеты структуры, параметров спектров ЯМР  $^1\text{H}$ ,  $^{13}\text{C}$ ,  $^{31}\text{P}$*  молекул в растворах, кристаллах и фрагментах полибутадиенов с использованием комбинированных методов квантовой химии и молекулярной механики. Разработаны методы расчета параметров ядерного магнитного экранирования в молекулярных кластерах растворенной молекулы с ионами кальция [45а–и].

### ***2.3.2. Направление «Исследования медико-биологических систем физическими методами»***

***Исследование методами ЯМР высокого разрешения структуры и свойств биомолекул, в том числе лекарственных препаратов, и их взаимодействия с клеточными мембранами*** (руководители А.В. Аганов, В.В. Клочков. Состав группы: К.С. Усачев, Л.Ф. Галиуллина, С.В. Ефимов, А.Р. Юльметов, И.А. Ходов, И.З. Рахматуллин, Д.С. Блохин и др.).

Это новое в университете направление в области спектроскопии ЯМР высокого разрешения исследований начато в 2005 году. Выделены наиболее важные результаты.

Установлена пространственная структура и определены координаты атомов в pdb формате пептидов (декапептида Val-Ile-Lys-Lys-Ser-Thr-Ala-Leu-Leu-Gly, бета-амилоида A $\beta$ 16–22, бета-амилоида A $\beta$ 10–35 (фрагмента бета-амилоида A $\beta$ 1–40), в водном растворе и в комплексе с модельными биологическими мембранами (мицеллы на основе додецилсульфата натрия). Основные результаты представлены в публикациях [46а–в]. Установлен конформационный состав, определены термодинамические параметры конформационного равновесия в растворе

хлороформа и описано пространственное строение минорного конформера циклоспорина CsA [46г].

Определены пространственное строение и координаты атомов в pdb формате для антимикробных пептидов (протегрин-1 – протегрин-5) в растворе и в комплексе пептид–модель поверхности мембраны клетки (мицеллы, на основе DPC) [47а–в], пространственное строение и координаты атомов в pdb формате комплексов правастатина и симвастатина с моделями поверхности мембраны клетки (мицеллы, на основе додецилсульфата натрия, ДСН) [47г].

В работе [47д] определены координаты атомов (pdb формат) пространственной структуры RGD- и AGDV-пептидов в растворе и в комплексе пептиды – тромбоциты + Integrin  $\alpha\text{IIb}\beta\text{3}$ .

Представлены кристаллографическая и ЯМР структуры N-концевого домена TERT (TEN-домена) термофильных дрожжей *Hansenulapolyomorpha* и показано, что центральный структурный мотив сохраняется у эволюционно различных организмов [47е].

***Трансляционная подвижность липидов в модельных биомембранах*** (А.В. Филиппов, М.А. Рудакова и др.). Метод ЯМР с ИГМП был успешно применен для исследования ориентированных бислоев липидов различного состава с целью установления особенностей латеральной диффузии липидов, латерального фазового расслоения и влияния на эти процессы различных солей и полимеров [48а–з]. В частности показано, что система из смеси липидов диолеоилфосфатидилглицерина, сфингомиелина и холестерина образует ламеллярную жидкокристаллическую фазу, а в определенной области температур и концентраций холестерина происходит разделение системы на две подфазы. Влияние полиакриловой кислоты (ПАК) на фазовое состояние и латеральную диффузию в бислоях димиристоилфосфатидилхолина было изучено методом  $^{31}\text{P}$  ЯМР,  $^1\text{H}$  ЯМР ИГМП и  $^1\text{H}$  спектроскопии NOESY. Полученные экспериментальные результаты указывают на образование, по меньшей мере, двух типов латеральных

комплексов ПАК-ДМФХ. Причем первый характеризуется стехиометрией 6-7 липидов на полимер и содержит молекулы ПАК, которые только частично адсорбируются на мембране [48г]. Второй же тип комплексов имеет время жизни порядка 0,1 с и характеризуется стехиометрией около 28 липидов на полимер, что соответствует адсорбции всей молекулы ПАК на мембране.

***Трансляционная подвижность и особенности надмолекулярной организации белков с внутренней неупорядоченной структурой*** (В.Д. Скирда, Д.Л. Мельникова, И.В. Несмелова). Впервые методом ЯМР с импульсным градиентом магнитного поля детально исследованы особенности трансляционной подвижности молекул в водных растворах  $\alpha$ -казеина и  $\kappa$ -казеина, как типичных представителей нового класса белков – белков с неупорядоченной внутренней структурой. Впервые получены данные о характерных временах жизни молекул в состоянии геля и о соотношении долей молекул белка в состоянии геля и в свободном состоянии [49а,б].

Результаты, полученные в этих работах, с одной стороны, дополняют современные представления о механизмах воздействия агента ТСЕР на внутри- и межмолекулярные дисульфидные связи молекул белков в концентрированных растворах. С другой стороны, полученные на примере концентрированных растворов  $\alpha$ -казеина и  $\kappa$ -казеина данные свидетельствуют о неоднозначности результатов применения подобных восстанавливающих молекулярных агентов и указывают на необходимость более осторожного их применения и в других исследованиях.

***Биомедицинские приложения ЭПР.*** Эти работы были начаты в конце 1990-х в рамках проекта «Биомедицинская оптика и радиоспектроскопия» Федеральной программы «Интеграция» (А.В. Аганов, Н.И. Силкин, Ю.А. Чельшев и др., см., например, [50а,б]). Они получили дальнейшее развитие в совместных работах группы Н.И. Силкина, МКДЦ и КГМУ (И.М. Игнатъев, Р.Н. Хайруллин)

[51а-д]. В них показано, что кальцифицированная атеросклеротическая бляшка представляет собой органоминеральный агрегат, в образовании которого существенную роль играет гидроксиапатит. Обнаружено, что в зависимости от состава и структуры органоминерального отложения меняются спектроскопические и релаксационные характеристики наблюдаемых парамагнитных центров. Продемонстрировано, что спектральные и релаксационные характеристики наблюдаемых радикалов ( $Mn^{2+}$  и  $CO^{2-}$ ) коррелируют со степенью кальцификации и стабильностью атеросклеротической бляшки и могут служить для диагностических целей, для мониторинга развития и прогресса атеросклеротических изменений, оценки эффективности терапевтического воздействия.

Проведены и продолжаются исследования методами магнитного резонанса и теоретическими расчетами допированных различными примесями синтетических фосфатов кальция (микро и наноразмерных порошков и керамик) с целью оптимизации способов их синтеза, улучшения их физико-химических, биологических свойств, контроля качества, процессов постсинтетической обработки и хранения. Работа проводится совместно с ИМЕТ РАН им. А.А. Байкова, Химическим факультетом и факультетом наук о материалах МГУ. Данные материалы используются в качестве имплантов для замещения и регенерации костной ткани, а также являются модельными для изучения процессов патологической кальцификации [52а-ж].

**Магнитно-резонансная томография (МРТ).** История развития МРТ в Казани и Татарстане начинается с 80-х годов и базируется на достижениях Казанской школы ЭПР и ЯМР. Инициаторами создания этого направления были А.В. Ильясов, зав. лабораторией радиоспектроскопии ИОФХ им. А.Е.Арбузова КНЦ РАН, и И.В. Ключкин, главный врач Республиканского Диагностического Центра №2 (позже РКБ-2, ныне университетская клиника КФУ). Благодаря их усилиям в 1989 г. был приобретен клинический ЯМР томограф Bruker Tomikon

R28 с напряженностью магнитного поля 0,28 Тл (на тот момент третий медицинский томограф на всей территории СССР). Детали истории по приобретению томографа подробно изложены в [14].

С первых дней была создана междисциплинарная команда, в которую вошли специалисты по ЯМР В.Н. Зинин и К.А. Ильясов, а со стороны врачей-диагностов Р.Ф. Бахтиозин и И.Р. Чувашаев. У В.Н. Зинина был опыт по созданию, ремонту и использованию ЯМР спектрометров, К.А. Ильясов владел на тот момент современными методами импульсного ЯМР и двумерной ЯМР спектроскопии. Р.Ф. Бахтиозин был признанным специалистом в новом тогда методе ультразвуковой диагностики, а И.Р. Чувашаев – успешным хирургом-онкологом. С марта 1990 г. пошел поток пациентов. Активное участие МРТ команды клиники в монтаже позволило впоследствии проводить большую часть обслуживания и ремонта томографа собственными силами. Большая заслуга главного врача И.В. Ключкина в том, что он сумел убедить руководство Минздрава РТ и руководство Республики Татарстан в необходимости выделения «методического» дня на приборе. Несмотря на огромную потребность в МРТ исследованиях и очередь пациентов на обследования, у МРТ команды в клинике была возможность осваивать и отрабатывать на приборе новые передовые технологии и методы МРТ диагностики. Это дало свои результаты – МРТ обследования проводились на более высоком уровне с максимальным использованием возможностей прибора и имеющихся на тот момент МРТ технологий, а также разрабатывались новые методы и подходы. Уже через 1,5 года научный доклад команды на международной конференции по МРТ в Берлине получил премию общества ISMRM [53a], а в следующем году на европейской конференции МРТ в Риме доклад был отмечен премией европейского общества ESMRMB [53б]. Большое значение для формирования направления научных исследований имели поддержка в 1994 г. Проекта МРТ исследований К.А. Ильясова фондом Александра фон Гумбольдта

и установление контактов с проф. Юргеном Хеннигом (Фрайбургский университет, Германия). Это впоследствии привело к развитию быстрых методов МРТ по диффузии и аксональной трактографии и методов МРТ измерений локальной температуры в теле человека, что было обобщено в докторской диссертации К.А. Ильясова (2011) г. (Приложение 1). Наиболее важные результаты того периода отражены в [53в–е].

Развитие клинических приложений, начатых в работе [53б], вылилось в докторскую диссертацию Р.Ф. Бахтиозина в 1996 г., а опыт по МРТ диагностике опорно-двигательного аппарата и опухолей головного мозга был обобщен в докторских диссертациях И.В. Ключкина (1996 г.) и М.М. Ибатуллина (2002 г.), соответственно.

Большое значение для развития клинических приложений в МРТ имели международные конференции Modern Developments in MRI, проведенные в г. Казани в 1997, 2001, 2007, 2015 годах коллективами МРТ при поддержке обществ ISMRM и ESMRMB. Большую помощь в этом оказал проф. Юрген Хенниг. В 2014 г. заслуги коллектива клиники в развитии и внедрении методов МРТ в клиническую практику были отмечены государственной премией Татарстана в области науки и техники «Разработка и применение методов магнитно-резонансной томографии в медицинской диагностике»: Р.Ф. Бахтиозин (Москва), К.А. Ильясов (КФУ), И.Р. Чувашаев, М.М. Ибатуллин (МКДЦ), Н.А. Ильясов (Казань-Самара), И.В. Ключкин, А.Р. Абашев, К.Ю. Хенниг (Германия).



Слева направо: И.В. Ключкин, К.А. Ильясов, М.М. Ибатуллин,  
Р.Ф. Бахтиозин, Р.Н. Минниханов, И.Р. Чувашаев, Н.А. Ильясов,  
А.Р. Абашев

В настоящее время разработки клинических приложений МРТ продолжают группой проф. кафедры медицинской физики Института физики КФУ К.А. Ильясова в тесном сотрудничестве с Университетской клиникой и зарубежными коллегами. Результаты последних лет отражены в публикациях [53ж–к].

### ***2.3.3. Направление «Развитие приложений физики в различных секторах экономики (в нефтегазовом, нефтехимическом, химическом, фармацевтическом и др.)»***

Работы по заказам предприятий реальных секторов экономики в прежние годы велись весьма интенсивно. По ряду известных причин их интенсивность резко спала в так называемые годы «перестройки».

В последнее пятилетие они, в основном, проводятся в рамках национальных программ. В настоящее время – по программе «ЭкоНефть – глобальная энергия и ресурсы для материалов будущего», Центр превосходства в области исследований и разработки экономичных, экологических и энергоэффективных технологий добычи и переработки углеводородов с участием коллективов ИФ КФУ по ряду направлений. Основные задачи исследований:

- исследование структур асфальтеновых комплексов нефтяных дисперсных систем с целью их дальнейшей эффективной переработки и утилизации;
- развитие радиочастотной и микроволновой техник для изучения полимеров, катализаторов и нефтесистем. Проводятся они и на инициативной основе.

***Расшифровка структуры нефти и нефтепродуктов методом спектроскопии ЯМР высокого разрешения*** (рук. В.В. Ключков). Задачи проекта – адаптация методов современной ЯМР спектроскопии высокого разрешения к определению состава нефти и нефтепродуктов, а также определение тест-признаков ЯМР типичных примесей, присутствующих в этих образцах; анализ образцов нефтей различных месторождений, образцов вязких нефтей с высоким содержанием арильных и нафтальных фрагментов и образцов различных нефтепродуктов и т.п. Результаты представлены в работах [54а–в].

***Изучение структурно-динамических свойств нефти и факторов, определяющих ее реологические характеристики*** (группа В.Д. Скирды). По итогам проведения совместных исследований с компанией «Шлюмберже» образцов тяжелых нефтей разработаны и запатентованы [55а,б] способы получения информации о количественной доле асфальтенов и закристаллизованных парафинов методом ЯМР. Разработанная методика оказалась востребованной, так как имеет существенные преимущества по сравнению с действующей по ГОСТ.



В результате исследования методом ЯМР спин-спиновой релаксации в образцах смолы и в модельных системах «смола-асфальтен» показано, что только часть молекул смолы взаимодействуют с асфальтенами и изменяют в результате свои характеристики, в то время как для другой, достаточно большой, части молекул смолы структурно-динамические характеристики остаются неизменными. При этом, соотношение между этими частями зависит от размера частиц асфальтенов.

Обнаружена зависимость от размера частиц асфальтенов доли регистрируемой в сигнале ЯМР компоненты с признаками, характерными для твердых асфальтенов.

На основании результатов анализа экспериментальных данных и соответствующих расчетов сформулирована гипотеза о частичном растворении молекул асфальтена в модельной системе «смола-асфальтен».

Впервые получены и охарактеризованы кинетические зависимости доли твердотельной компоненты в сигнале ЯМР и доли молекул смолы, находящейся в состоянии взаимодействия с асфальтенами, что является свидетельством того, что на начальном этапе модельная система «смола-асфальтен» находится в неравновесном состоянии. Показано, что молекулы смолы, взаимодействующие с асфальтеном, находятся не только на поверхности частиц асфальтенов, но и в их объёме. На базе полученных экспериментальных результатов предложено дополнение к существующей модели смолисто-асфальтенового агрегата.

Для характеристики свойств асфальтено-смолистых агрегатов, продемонстрирована высокая информативность извлекаемых из экспериментов ЯМР данных по ядерной магнитной релаксации в диапазоне, включающем область значений времен спин-спиновой релаксации, типичных для твердого тела.

Разработана методика, позволяющая определить относительную долю молекул смолы, непосредственно взаимодействующих с асфальтенами.

Показано, что возможность предварительного растворения асфальтеновых образований с последующей их агрегацией в смоле обусловлена условиями их выделения из нефти, в результате которых структура полученных агрегатов оказывается отличной от нативной.

Продемонстрирована возможность установления корреляции данных ЯМР релаксации со степенью зрелости керогена. Это обстоятельство имеет важное значение для выработки методических рекомендаций по анализу кернового материала, отбираемого в процессе проводимого комплекса ГИС [56а–г].

Следует отметить, что фундаментальные исследования группы М.С. Тагирова свойств  $^3\text{He}$  не нашли своего практического применения для изучения пористых сред. Предложен и запатентован способ измерения пористости материалов, веществ и минералов на основе ядерного магнитного резонанса инертных газов. Впервые к данным ядерной магнитной релаксации  $^3\text{He}$  применено обратное преобразование Лапласа, позволившее получить распределение пор по размерам [57].

**Приложения ЭПР спектроскопии** (рук. М.Р. Гафуров). Предложен «Способ определения фактора насыщения электронных переходов парамагнитной подсистемы в веществе» [58а]. Продемонстрированы возможности применения высокочастотного ЭПР для изучения структуры асфальтенов *in-situ*, процессов агрегации, каталитических преобразований, определения структур ванадил-порфириновых комплексов и их изменений с химической или термической обработкой. Впервые в мире опубликован англоязычный обзор по применению методов высокочастотного ЭПР для изучения нефтесистем [58б]. Результаты работы представлены также в статьях [58в–е].

### **3. ПРИЛОЖЕНИЯ ЯМР В ХИМИИ**

В предыдущем разделе были представлены результаты исследований, которые касались, прежде всего, создания экспериментальной базы, теории магнитного резонанса в приложении к решению физических задач и развития методов и методик исследования, проводимых на физическом факультете (Институте физики) университета. Развитие прикладных исследований активно велось на химическом факультете и НИХИ им. А.М. Бутлерова (ныне Химический институт им. А.М. Бутлерова) и геологическом факультете (ныне Институт нефтегазовых технологий и геологии).

#### **3.1. ЯМР в химических исследованиях**

В Химическом институте им. А.М. Бутлерова исследования ведутся в нескольких коллективах в различных направлениях.

##### ***3.1.1. Спектроскопия ЯМР высокого разрешения в органической и элементарорганической химии***

В упомянутом выше цикле работ «Ядерный магнитный резонанс высокого разрешения в структурно-динамических исследованиях молекулярных систем», отмеченных Госпремией РТ по науке и технике в 2010 году, подведен итог многолетней работы группы спектроскопии ЯМР высокого разрешения совместно с кафедрами органической химии, элементарорганической химии, Проблемными лабораториями «Изучение строения органических соединений» и «Химия мономеров и полимеров» химического факультета, НИХИ им. А.М. Бутлерова и лабораторией радиоспектроскопии ИОФХ КФ АН СССР им. А.Е. Арбузова под руководством проф. Ю.Ю. Самитова, А.В. Аганова. В этот цикл работ были включены только разработка и создание экспериментальной базы спектроскопии ЯМР высокого

разрешения, разработка теоретических основ ряда методик и физической интерпретации результатов исследований. Все работы велись в тесном сотрудничестве с физическим факультетом (Институтом физики). После преждевременной кончины Ю.Ю. Самитова этот коллектив возглавил А.В. Аганов, организовавший в 2005 г. лабораторию ЯМР высокого разрешения для медико-биологических исследований на физическом факультете (Институте Физики) КФУ, будучи деканом (директором) этого подразделения. Собственно, это – специализированная лаборатория биоЯМР, функционирующая при кафедре медицинской физики, выделившейся из состава кафедры общей физики ИФ КФУ в 2015 г. (зав. кафедрой А.В. Аганов). В настоящее время лабораторию возглавляет В.В. Ключков. Естественно, продолжаются и традиционные структурно-динамические исследования методом спектроскопии ЯМР высокого разрешения в химии.

На кафедре органической химии (заведующий И.С. Антипин) для выполнения научных исследований широко используется ЯМР спектроскопия, в первую очередь, для установления структуры сложных органических, металлоорганических и супрамолекулярных соединений с использованием широкого набора современных методик ЯМР в тесном сотрудничестве с ЯМР группами ИФ КФУ и Института органической и физической химии ФИЦ РАН.

Под руководством И.С. Антипина и А.И. Коновалова, начиная с середины девяностых годов XX-го столетия, проводятся работы в области синтеза и супрамолекулярной химии макроциклических соединений: мета- и пара-циклофанов [59а–д]. В частности, в группе И.И. Стойкова ведутся исследования по моделированию и разработке подходов к синтезу рецепторов и наноразмерных структур на основе (тия)каликс[4]арена, пиллар[5]арена, а также наноразмерных частиц диоксида кремния, способных к молекулярному распознаванию биологически значимых субстратов [59е–и]. Основным направлением работ научной группы В.А. Бурилова является направленный синтез новых макроциклических амфифильных соединений на платформе

*n*-трет-бутилтиакаликс[4]арена, способных выступать в роли «умных» поверхностно-активных веществ, способных как к самоассоциации, так и к связыванию с другими молекулами [59к–м]. За цикл работ по супрамолекулярной химии калик[4]аренов в 2005 году коллективу авторов в составе А.И. Коновалов, И.С. Антипин, А.Р. Бурилов, И.И. Стойков, С.Е. Соловьева (ИОФХ), А.Р. Мустафина (ИОФХ), Л.Я. Захарова (ИОФХ), И.С. Рыжкина (ИОФХ), А.Т. Губайдуллин (ИОФХ) была присуждена Государственная премия РТ в области науки и техники.



Слева направо: А.И. Коновалов, И.С. Антипин, А.Р. Бурилов, А.Т. Губайдуллин, А.Р. Мустафина, М.Ш. Шаймиев, И.С. Рыжкина, С.Е. Соловьева, И.И. Стойков

Сотрудники кафедры органической химии проводят исследования по синтезу новых карбо- и гетероциклических соединений, установлению структуры и их применению для биомедицинских приложений (биологическая активность, визуализация опухолевых

тканей и т.д.). Научная группа А.Р. Курбангалиевой занимается разработкой препаративных методов синтеза, изучением строения и свойств новых химически и биологически активных производных пятичленных гетероциклов ряда 2(5Н)-фуранона и 3-пирролин-2-она, а также гомо- и гетерогенных гликоконъюгатов (молекулярных рецепторов) для селективного распознавания и визуализации целевых опухолевых клеток и тканей в живых организмах [60а–г]. Группа по химии возобновляемого природного сырья (рук. В.Ф. Миронов, А.В. Немтарев) сконцентрирована на выделении биологически активных компонентов из растительного сырья с последующей химической модификацией наиболее ценных из них с целью придания последним необходимого уровня активности [60д].

Также широко используется ЯМР  $^{31}\text{P}$  для контроля протекания реакций, особенно в случае нестабильных соединений, и как метод определения координации фосфора при установлении строения полученных продуктов. Под руководством Ф.Х. Каратаевой методом одно- и двумерной спектроскопии ЯМР  $^1\text{H}$  и  $^{13}\text{C}$  и полуэмпирических квантово-химических расчетов (метод AM1) впервые изучена структура гиперразветвленных полиэфиров полиолов BOLTORN H<sub>2</sub>O-OH и BOLTORN H<sub>2</sub>O-OH с малеиновым ангидридом. Показано, что полиолы имеют нестереорегулярную структуру, где попарно сближены две линейные, а также терминальная и дендритная ветви.

Выявлено три основных типа водородных взаимодействий (C=O...HO, OH...OH и C=O...HO...HO), носящих как внутри-, так и межмолекулярный характер [61а–б].

Столь же активно использовался метод ЯМР высокого разрешения на кафедре элементоорганических соединений и Проблемной лаборатории химии мономеров и полимеров. Структурно-динамические исследования полимеров методом ЯМР релаксации были начаты Г.Г. Пименовым из группы А.И. Маклакова в 1963 г., но развития на химическом факультете не получили.

Исследования с использованием спектроскопии ЯМР высокого разрешения (преимущественно ЯМР  $^{31}\text{P}$ ) проводились с первых шагов применения ЯМР в химии в нашей стране на базе ПЛИСОС Химфака при кафедре органической химии и лаборатории радиоспектроскопии ИОФХ КФ АН СССР (с середины 1960-х) под руководством Ю.Ю. Самитова и А.Н. Пудовика. От ПЛИСОС работ курировала Ф.Х. Каратаева (ныне проф. кафедры органической химии), от ИОФХ – А.А. Нафикова (Мусина) и Т.А. Зябликова. Работы проводились в разных направлениях. На начальном этапе это были работы, посвященные установлению пространственной структуры фосфорсодержащих соединений и установлению корреляций ЯМР параметр – структура. Наиболее важные результаты этого периода отражены в публикациях [62а–в].

Результаты активного использования метода ЯМР при изучении реакционной способности ФОС отражены в многочисленных оригинальных публикациях и обзорах. Основные результаты представлены в публикация [63а–г].

Одно из таких направлений на кафедре курировали А.Н. Пудовик, Р.А. Черкасов, М.Г. Зимин, позднее Н.Г. Забиров – изучение ФОС с нежестким молекулярным каркасом, внутримолекулярную динамику которых в растворах определяют несколько разновидностей обратимых и необратимых перегруппировок. Схемы перегруппировок в таких молекулах носят предположительный, дискуссионный характер [64].

Использование метода динамического ЯМР  $^1\text{H}$ ,  $^{13}\text{C}$  и  $^{31}\text{P}$  при изучении N-(тио)фосфорил(тио)амидов различного строения в растворах позволило выделить несколько внутримолекулярных процессов с определением спектральных признаков каждого из них и выявить схему обмена [65а–е].

Цикл работ, выполненных по одному из современных направлений работ – синтез физиологически активных веществ, отмечен Госпремией РТ в области науки и техники за 2015 г: «Направленный



синтез физиологически активных веществ для медицины и ветеринарии на основе биомиметического подхода». (В.И. Галкин, И.В. Галкина, С.Н. Егорова (КГМУ), М.Х. Лутфуллин (КГАВиМ), Л.М. Юсупова (КНИТУ – КХТИ), О.К. Поздеев (КГМА), О.И. Гнездилов (КФУ – КФТИ КНЦ РАН), М.П. Шулаева (КГМА)).



Слева направо: О.К. Поздеев, В.И. Галкин, О.И. Гнездилов, И.В. Галкина, Р.Н. Минниханов, С.Н. Егорова, М.Х. Лутфуллин, М.П. Шулаева, Л.М. Юсупова

### ***3.1.2. Методы ЯМР релаксации в неорганической химии***

Это направление приложений ЯМР развивается на кафедре неорганической химии. На рубеже 1960–1970-х гг., как уже отмечалось во Введении, А.А. Попелем на базе первого релаксометра, созданного в СССР в 1958 г. на физическом факультете КГУ Р.А. Даутовым, В.М. Фадеевым, В.Д. Корепановым, был разработан новый физико-химический метод анализа и исследования неорганических веществ, названный им магнитно-релаксационным методом [бба].



Далее метод развивался и внедрялся в химические исследования А.А. Попелем совместно с Е.Д. Гражданниковым [66б,в] и затем А.В. Захаровым, З.А. Сапрыковой и Ю.И. Сальниковым на релаксометрах, созданных по типовым схемам в лаборатории А.А. Попеля. Работы раннего периода обобщены в [66г–д].

С 1977 г. на химическом факультете также успешно работает научно-исследовательская лаборатория координационных соединений. Основное направление ее работ – исследование термодинамики и кинетики образования сложных координационных соединений металлов с применением комплекса физико-химических методов (в первую очередь ЯМР и ЭПР); изучение их полезных физико-химических и биологических свойств. В разные годы ее возглавляли А.А. Попель, З.А. Сапрыкова, Ю.И. Сальников, А.В. Захаров (в настоящее время В.Г. Штырлин). В исследованиях принимали участие А.Н. Глебов, Ф.В. Девятов, В.В. Чевела и др. Результаты обобщены в [67а–в].

С 1988 г. под руководством Р.Р. Амирова (зав. кафедрой неорганической химии с 2012 г.) с использованием метода ЯМР релаксации проводятся систематические исследования водных дисперсий разнообразных нанообъектов (растворов ПАВ, макроциклов, наночастиц оксидов металлов, оксида графена и др.). С 2004 г. совместно с ИОФХ им. А.Е. Арбузова (А.Р. Мустафина, Р.Р. Заиров, А.С. Степанов, С.В. Федоренко и др.) изучаются магнитно-релаксационные характеристики наноразмерных комплексов гадолиния (III) и наночастиц оксидов железа в липидных, силикатных и полимерных оболочках. Результаты исследования позволили предложить прототипы новых контрастных агентов для магнитно-резонансной томографии. Их результаты обобщены в [68а], а последние результаты представлены в [68б].

С 2016 г. исследуются водные дисперсии оксида графена и наночастиц магнетита в качестве потенциальных сенсоров в биологии и медицине [68в].

## 3.2. Магнитный резонанс в геологии

### 3.2.1. ЭПР и ЯМР в исследованиях структуры и свойств минералов

На геологическом факультете (ныне Институт геологии и нефтегазовых технологий – ИГНГТ) внедрение современных физических методов для изучения минералов восходит ко второй половине 1950-х гг. Внедрение осуществлялось по двум направлениям. Инициаторами одного из них, «Приложения ЭПР и ЯМР в исследованиях структуры и свойств природных минералов», были С.А. Альтшулер и заведующий кафедрой минералогии Леонид Михайлович Миропольский. Возглавить это новое направление было поручено геологу доценту Владимиру Михайловичу Винокурову и физика доценту Максуту Мухаметзяновичу Зарипову. В группе появились и их молодые коллеги В.Г. Степанов (КГУ) и Н.Р. Яфаев (КФТИ КФ АН СССР). Естественно, в начале работ основным методом был метод ЭПР, а первыми образцами – минералы из коллекции геологического музея КГУ\*.

Первые публикации датированы 1959–1961 гг. [69а–д].

Итоги начального периода подведены в работе [69е] и обобщены в докторской диссертации В.М. Винокурова «Магнитные свойства минералов» (1966) (см. Приложение 1).

С начала 1970-х активно внедрялись и другие физические методы. Основные подходы и результаты были описаны в монографии [69е].

В 1989 г. на базе отдельных лабораторий В.М. Винокуровым была создана научно-исследовательская лаборатория «Физика минералов

---

\* Вероятно, минералы из коллекции музея послужили тестовыми образцами и для других исследователей благодаря любезности В.М. Винокурова. Для многих из них были уже получены кристаллографические данные. По крайней мере, одному из авторов книги были предоставлены монокристаллы гипса («ласточкин хвост») для отработки методик на спектрометре ЯМР широких линий в начале 1960-х [см. 11].

и их аналогов», и по его инициативе создана группа во Всесоюзном институте нерудных материалов (ЦНИИГеолнеруд Казань, рук. В.Ф. Крутиков). В задачи группы входило создание и внедрение методик ЭПР, ЯМР и гамма-резонанса в технологической минералогии, которые активно применяются в технологическом отделе института, сотрудниками института были защищены три докторские диссертации в Казанском государственном университете (В.Ф. Крутиков, В.А. Гревцев, Ф.М. Булатов, см. Приложение 1).

Довольно длительное время ЭПР был основным методом изучения минералов. Несколько позже стали применять и методы ЯМР. В этой работе принимали участие Г.Р. Булка, Н.М. Хасанова, И.М. Низамутдинов, А.А. Галеев и др. [70а–г]. В значительной степени в исследованиях решались физические задачи.

На рубеже 1970–1980 гг. эти тенденции усилились. К исследованиям подключилась еще группа физиков (Р.А. Даутов, В.Д. Щепкин, Д.И. Вайнштейн), которые внедрили довольно сложный метод – импульсный двойной ядерно-ядерный резонанс в исследования примесных кристаллов [71а–г].

Исследования кристаллов с применением методов ЯМР и оптической спектроскопии, начатые в 1977 г. [72], в дальнейшем активного развития не получили.

Использование методов ЯМР при разведке и добыче нефти и битумов берет начало в 1970-х гг. [73а,б]. Работы в этой области сегодня ведутся с прямым участием научных коллективов ИФ, что уже было отмечено в предыдущем разделе.

### ***3.2.2. Методы ЯКР и ЯГР в минералогии***

Это направление радиоспектроскопических исследований на геологическом факультете было создано И.Н. Пеньковым в тесном сотрудничестве с И.А. Сафиным (КФТИ КФ АН СССР) в 1961 г. Это были также пионерские работы в СССР по использованию методов ядерного квадрупольного резонанса (ЯКР) в минералогии, первая

из которых была опубликована в 1962 г. [74а]. Они были посвящены определению параметров спектров ЯКР природных минералов (стибнит, прустит, пираргирит, стефанит, бурнонит и т.д.) и обобщены в работе [74б] и, следом, в докторской диссертации И.Н. Пенькова (ГЕОХИ АН СССР, 1970 г.) (см. Приложение 1).

В ней были показаны возможности метода как тонкого инструмента в исследовании реальных электронной и кристаллической структуры, динамики решетки минералов, с которыми связаны фундаментальные свойства и природный типоморфизм, впервые описан обнаруженный альтернативный механизм вовлечения структурных примесей в минералы, связанный с аномально высокой реакционной способностью кристаллического вещества при полиморфном превращении (фазовом переходе). Завершает этот цикл исследований работа, посвященная установлению природы малых структурных примесей в некоторых халькогенидах As, Sb и Bi [74в].

В 1976 году И.Н. Пеньковым была организована лаборатория ЯКР-спектроскопии на возглавляемой им кафедре, где исследования проводились совместно с Р.Р. Абдуллиным, В.П. Кальчевым, Н.В. Тогулевым. Уже в следующем году появилась серия публикаций [75а–в]. Завершается этот 10–летний цикл работ ЯКР исследованиями кристаллохимии, электронной структуры и решеточной динамики медьсодержащих минералов [75г–е].

К этому периоду относятся работы по использованию гамма резонансной (мессбауэровской) спектроскопии в минералогии, начало которым положило сотрудничество с кафедрой ФТТ физического факультета КГУ, на которой собственно и были начаты под руководством Ш.Ш. Башкирова пионерские в СССР работы в области ЯГР и уже сформировалась физическая школа мессбауэровской спектроскопии как одна из ветвей Казанской школы радиоспектроскопии. Первые публикации были посвящены ЯГР Sn119, Fe57 в франкците и цилиндрите [76а] и катионному распределению в природных хромшпиделидах [76б].

Обобщая исследования 25-летнего цикла работ группы ЯКР кафедры, следует отметить, что впервые было исследовано более 60 минералов разных классов и их искусственных аналогов. Полученные результаты представляют интерес и для современной (генетической) минералогии, кристаллохимии, геохимии, материаловедения.

После длительного перерыва работы по исследованиям ЯКР минералов возобновились в 2000-х годах с участием достаточно большой группы исследователей с физического факультета (А.В. Дуглав, Р.Р. Гайнов, И.Р. Мухамедшин, Ф.Г. Вагизов и др.). Данное сотрудничество оказалось очень плодотворным, доказательством чего служат публикации в рейтинговых журналах как физического, так и минералогического профиля [77а–г]. В этих работах уже доминировали физические и физико-химические аспекты. Исследования приняли комплексный характер, стали привлекаться и другие методы, прежде всего ЯМР, к тому времени уже показавший свою эффективность в самых разнообразных областях, в комбинации с ЯКР, сверхчувствительной магнитометрии (SQUID) и теоретическими расчетам из первых принципов [75г,д]. Одно из последних направлений совместных исследований находилось на стыке сразу трех научных областей – физики конденсированного состояния, биоминералогии и нанодиагностики: изучались возможности диагностики методом ЯКР ультра- и нанодисперсных частиц бинарных сульфидов меди, образовавшихся в процессе жизнедеятельности бактерий в органических остатках (в частности фрагментах древесины) [77ж]. Совместно с учеными из Австралии рассматривалась возможность применения методов ЯКР и ЯГР для экспресс-анализа медьсодержащих руд [77з].

## 4. МАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС СЕГОДНЯ

ЭПР и ЯМР имеют одинаковую природу. Но между ними есть существенная разница, которая, в конечном счете, предопределила динамику их развития и степень влияния на разные области науки и техники.

У ЭПР более высокая резонансная частота (примерно в 2000 раз), следовательно, и более высокая чувствительность. Не столь высоки требования к однородности и стабильности магнитного поля, как в ЯМР. На рубеже 1940-х–1950-х гг. экспериментальную установку можно было собрать из промышленных узлов, например, радиолокационных установок, которые после Второй мировой войны были переданы гражданским организациям (к сожалению, у нас в стране гриф «совершенно секретно» был снят значительно позже, чем за рубежом). К тому же реальные перспективы развития ЯМР и его приложений выявились примерно на пять лет позже. В первое десятилетие после открытия ЭПР в совокупности эти факторы обусловили более высокие темпы ЭПР исследований, чем исследований методом ЯМР. Ситуация не очень сильно изменилась и после появления во второй половине 1950-х промышленных ЭПР и ЯМР спектрометров. Спектрометры, созданные в лабораториях, были вполне конкурентоспособны в сравнении с промышленными. Основное преимущество ЯМР – возможность прямого наблюдения сигнала магнитных ядер атомов химических элементов (а это практически все элементы таблицы Д.И. Менделеева) – было реализовано много позже как результат создания Р. Эрнстом с коллегами на рубеже 1960–1970 гг. метода импульсной спектроскопии ЯМР с преобразованием Фурье\*. Следующий

---

\* Р. Эрнст. Нобелевская премия 1991 г. по химии «За вклад в развитие методологии спектроскопии ядерного магнитного резонанса (ЯМР) высокого разрешения».

этап развития ЯМР связан с разработкой К. Вютрихом\* методов расшифровки ЯМР спектров макробиомолекул. Эти работы также были отмечены Нобелевской премией.

Сегодня имеется около тысячи разновидностей методик ЯМР для решения структурно-динамических задач в самых разнообразных молекулярных системах. Техника эксперимента усложнялась, и ее создание становилась не под силу не только специалистам лабораторий, но и большинству фирм – производителей оборудования для магнитного резонанса\*\*. Очевидные преимущества имели коллективы, располагавшие оборудованием с полным комплектом опций. В этом плане отечественные лаборатории находились явно в проигрышном положении и, безусловно, это обстоятельство сдерживало темпы исследований, особенно в университетах России. Эта проблема достаточно подробно освещена в цитированных выше изданиях. Стратегическая линия любого метода – повышение чувствительности и разрешения. В магнитном резонансе это означает получение высоких однородных магнитных полей (реализуется в магнитах со сверхпроводящими соленоидами), соответственно больших рабочих частот спектрометра. В спектроскопии ЯМР уже достигнута рабочая частота 1,1 ГГц. Рабочие частоты современных спектрометров ЭПР только начинаются с 9,4 ГГц (в серийное производство запущены спектрометры с частотой 256 ГГц, разработаны спектрометры и на более высоких частотах). Создание электронных узлов в радиочастотном диапазоне существенно проще, чем в СВЧ диапазоне. Поэтому вариации методик в техническом плане в спектроскопии ЯМР значительно шире. Есть еще одно обстоятельство. Ядерные спиновые метки разных типов существуют в подавляющем большинстве соединений. Элек-

---

\* К. Вютрих. Нобелевская премия 2002 г. по химии «За развитие ядерной магнитно-резонансной спектроскопии для определения трехмерной структуры макромолекул в растворах».

\*\* На этом рынке практически остались два производителя ЯМР и ЭПР спектрометров: фирма Брукер (Германия) и Джеол (Япония) с более короткой линейкой приборов. Число производителей МР томографов существенно шире.

тронные спиновые метки имеются в ограниченном классе соединений. Зачастую их нужно вводить. Далее, спектры ЭПР не столь информативны, как спектры ЯМР. Их интерпретация осуществляется путем сопоставления теоретически рассчитанных спектров с экспериментальными спектрами и в настоящее время. Спектры ЯМР содержат множество линий. В биологических макромолекулах их десятки тысяч. Этап сопоставления теоретических и экспериментальных спектров давно пройден. Алгоритмы расшифровки разработаны и автоматизированы. Но есть большой круг задач, которые не решаются методами ЯМР, и наоборот, доступны методам ЭПР. Временные шкалы этих методов различаются на три порядка. Они дополняют друг друга при решении комплексных задач. Уже создан промышленный спектрометр с магнитным полем 9.4 Тл, что соответствует резонансной частоте ЭПР 263 ГГц и 400 МГц ЯМР на протонах. Завойский наблюдал ЭПР на частоте 10 МГц, т.е. рабочая частота современных ЭПР спектрометров выше примерно на четыре порядка ( $10^4$ ), что соответствует увеличению интенсивности сигнала в 100 миллионов ( $10^8$ ) раз. Созданы спектрометры, позволяющие регистрировать и сигналы ЯМР, и сигналы ЭПР со сменными датчиками.

Методы магнитного резонанса нашли применение не только в научных исследованиях в физике, химии, биологии, медицине, геофизике и т.д., в области создания новых материалов и веществ разного назначения, но едва ли во многих областях производства. Кроме уже упомянутой роли ЭПР в создании материалов квантовой электроники (физическое материаловедение) в первые послевоенные годы (С.А. Альтшулер, А.А. Маненков, А.М. Прохоров), можно привести яркий пример – создание сверхпроводящих материалов на основе открытия высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП) в керамических материалах, сделанного К.А. Мюллером\*, сотрудником физического

---

\* К.А. Мюллер (совместно с Г. Беднорцем), удостоен Нобелевской премии по физике 1987 г. «За важный прорыв в физике, выразившийся в открытии сверхпроводимости в керамических материалах».



отдела отделения фирмы IBM в Цюрихе, предтечей которых было исследование перовскитов методом ЭПР [78а,б]. В течение многих лет, начиная с 1986 г., как уже отмечалось выше, длилось плодотворное сотрудничество К.А. Мюллера и Б.И. Кочелаева в области исследования свойств материалов ВТСП методом ЭПР.

В ряде производств, например, в фармацевтической промышленности, в лабораториях, работающих по крупным международным программам исследований (например, по установлению структуры белков), в линии стоят по несколько десятков спектрометров ЯМР. Создание огромной отрасли высокотехнологического производства спектрометров для магнитного резонанса и томографии напрямую связано с научными разработками и потребностями конкурирующих экономик стран – мировых лидеров. Поэтому в списке наиболее крупных мировых центров, где используются методы магнитного резонанса, далеко не все являются научными или научно-образовательными центрами. Общее число спектрометров в лабораториях этих стран насчитывает тысячи единиц. В целом, оснащённость большого количества крупных зарубежных центров примерно на порядок выше, чем оснащённость лучших российских академических и университетских центров (лабораторий в научно-производственных и подобных организациях практически нет, ранее спектрометры в единичных экземплярах были в составе ЦЗЛ некоторых крупных предприятий в качестве аналитического инструмента). Привлечение методов магнитного резонанса к решению производственных задач ранее и сегодня осуществляется с использованием экспериментальной базы лабораторий институтов Академии наук и ВУЗов.

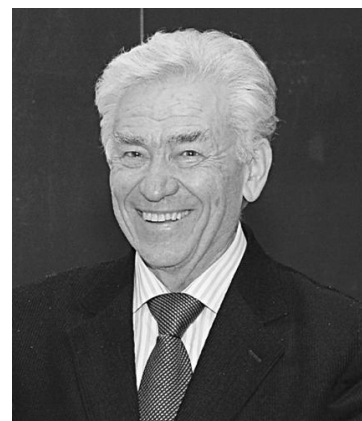
Как уже отмечалось выше, в соответствии с общими тенденциями развития МР был сформирован МЦМР КФУ и его тематика. В качестве консультантов в работе МЦМР принимают участие Р.З. Сагдеев (МТЦ СО РАН) и А. Аллул (Франция). Руководителем МЦМР является А.В. Аганов.



Почётный доктор  
КФУ Р.З. Саغدеев



Почётный доктор КФУ  
А. Аллул (Франция)



А.В. Аганов

Экспериментальные работы структурированы следующим образом:

- ЯМР высокого разрешения (В.В. Клочков);
- ЯМР ИГМП, диффузометрия, микро- и минитомография (В.Д. Скирда);
- Мультиядерный резонанс (М.С. Тагиров);
- МРТ человека (К.А. Ильясов (на базе университетской клиники));
- ЭПР-спектроскопия (С.Б. Орлинский);
- Разработка конкурентоспособной аппаратуры по областям применения (координаторы: В.Д. Скирда, М.С. Тагиров).

Дополнительно для проведения работ используется экспериментальная база:

- ФЦКП ФХИ (рук. отдела экспериментальных работ С.И. Никитин);
- Центра квантовых технологий (рук. Д.А. Таюрский).

Плодотворно сотрудничают с экспериментаторами известные в мире магнитного резонанса физики – теоретики, профессора: Б.И. Кочелаев, Л.К. Аминов, М.В. Еремин, Б.З. Малкин, Л.Р. Тагиров, Д.А. Таюрский, Н.Ф. Фаткуллин.



В.В. Ключков



В.Д. Скирда



М.С. Тагиров



К.А. Ильясов



С.Б. Орлинский



Д.А. Тажорский



С.И. НИКИТИН

Сегодня достаточно просто отслеживать развитие любого направления исследований, например, используя международную базу данных по публикациям, индексируемым в базах данных, таких как Scopus или Web of Science.

Вполне естественно задать вопрос: каковы тенденции и темпы исследований с использованием методов магнитного резонанса в мире, России? Какое место в мире магнитного резонанса занимает Казанский университет? Общее представление о темпах развития магнитного резонанса и его приложений в мире дают графики, представленные на рис. 1–19.

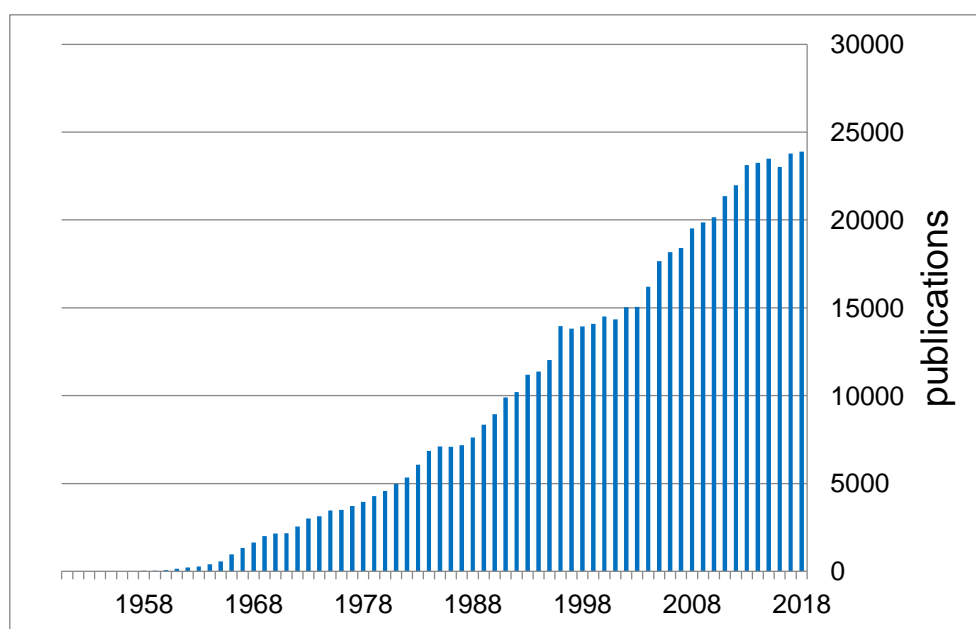


Рис. 1. Темпы развития магнитного резонанса и его приложений по всем областям применения (здесь и далее во всем мире без томографии) (Scopus Key words: “NMR”, “ESR”, “EPR”)

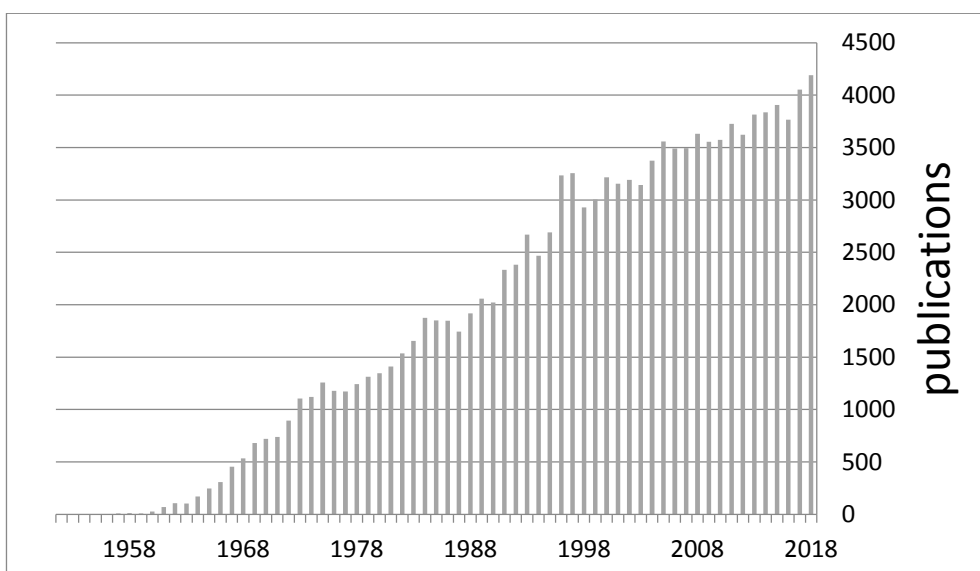


Рис. 2. Темпы развития ЭПР и его приложений по всем областям применения (Scopus Key words: “ESR”, “EPR”)

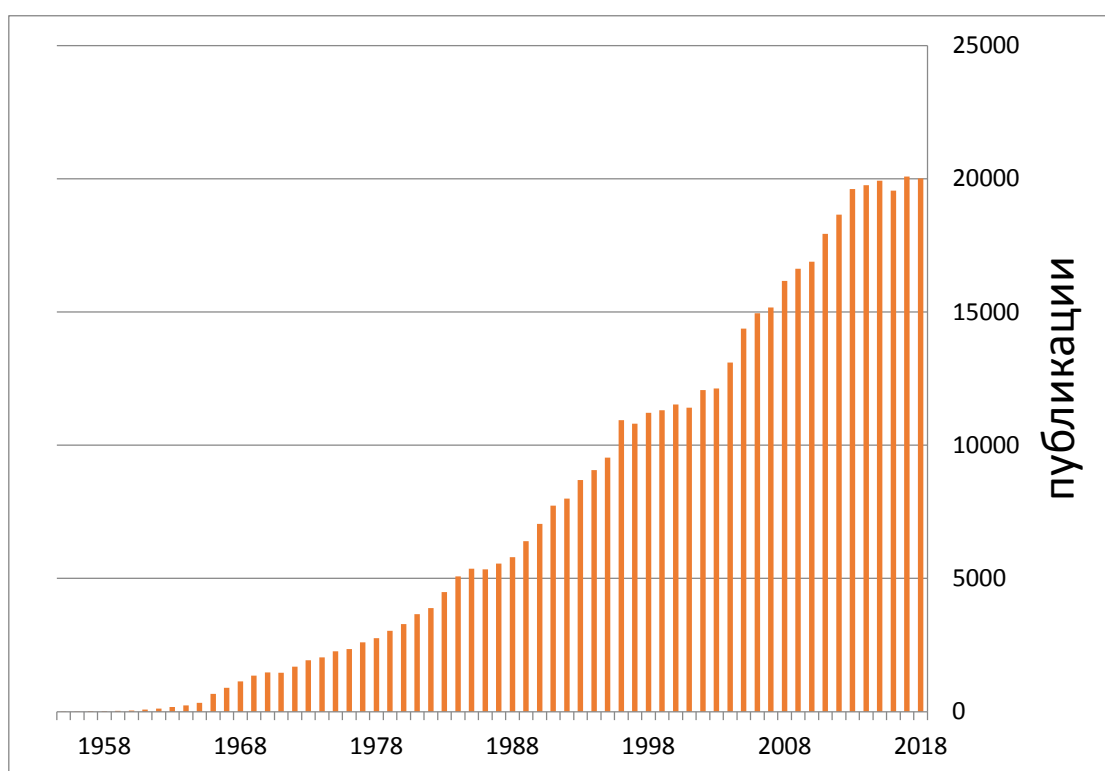


Рис. 3. Темпы развития ЯМР и его приложений по всем областям применения в мире (Scopus Key words: “NMR”)

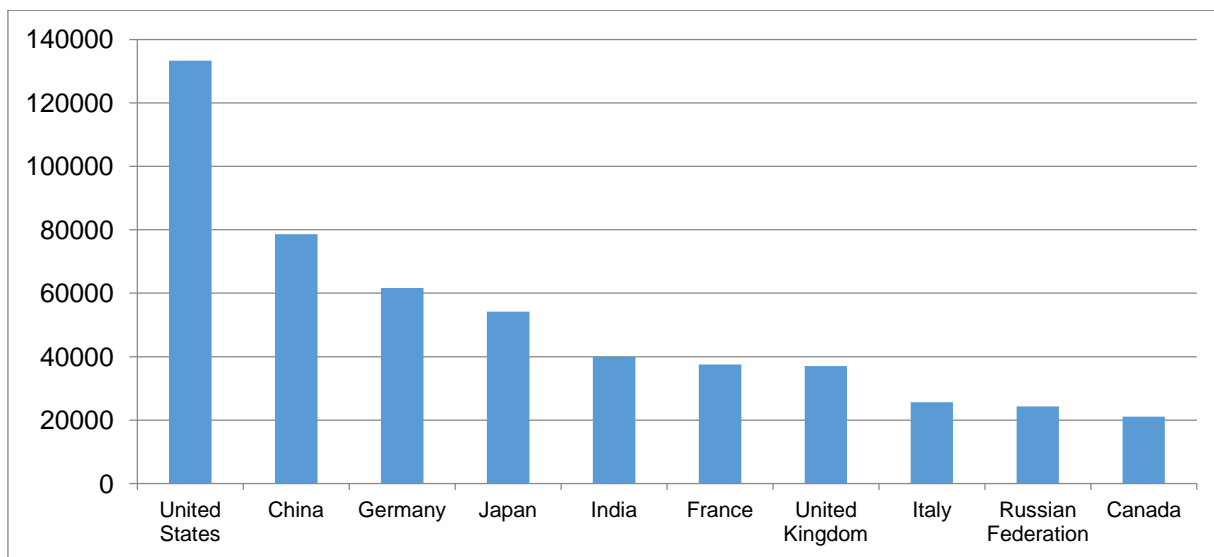


Рис. 4. Вклад стран – мировых лидеров в исследования методами магнитного резонанса (Scopus Key words: “NMR”, “ESR”, “EPR”)

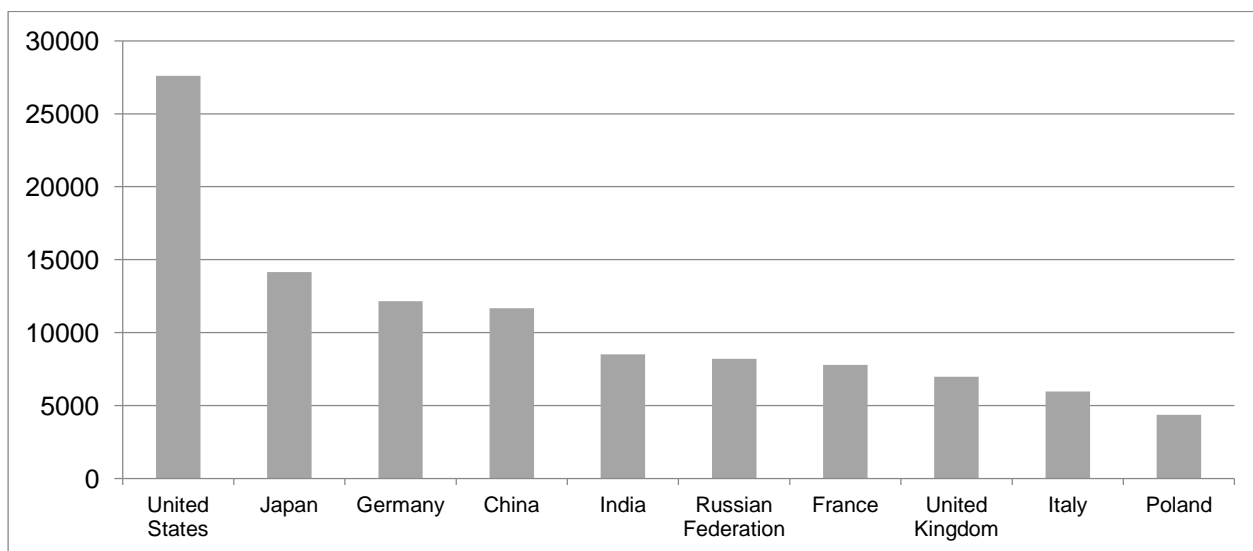


Рис. 5. Вклад стран – мировых лидеров в ЭПР исследования (Scopus Key words: “ESR”, “EPR”)

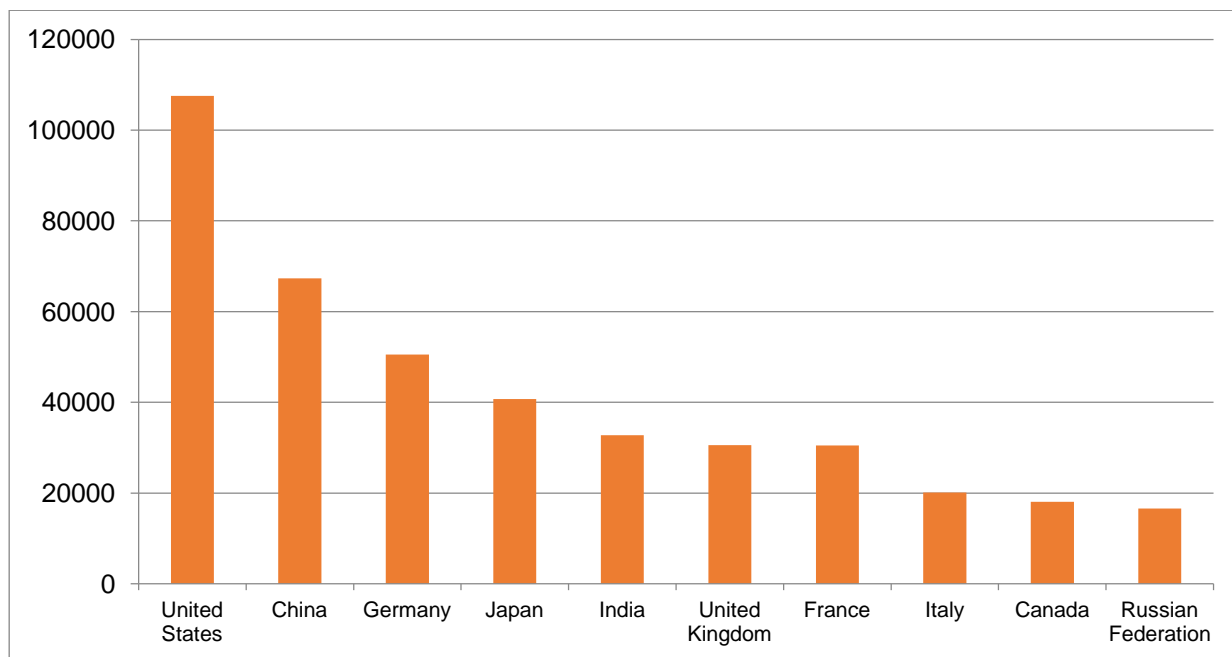


Рис. 6. Вклад стран – мировых лидеров в исследования методами ЯМР (Scopus Key words: “NMR”)

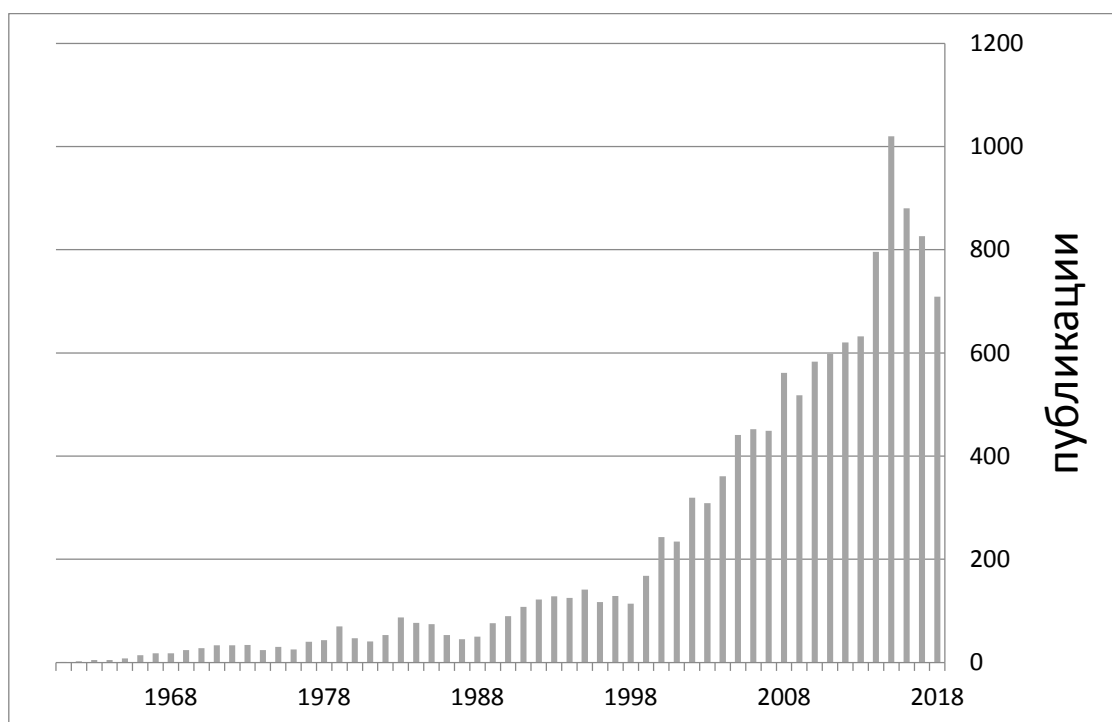


Рис. 7. Темпы развития ЭПР исследований в химии (Scopus Key words: “chemistry”, “ESR”, “EPR”)

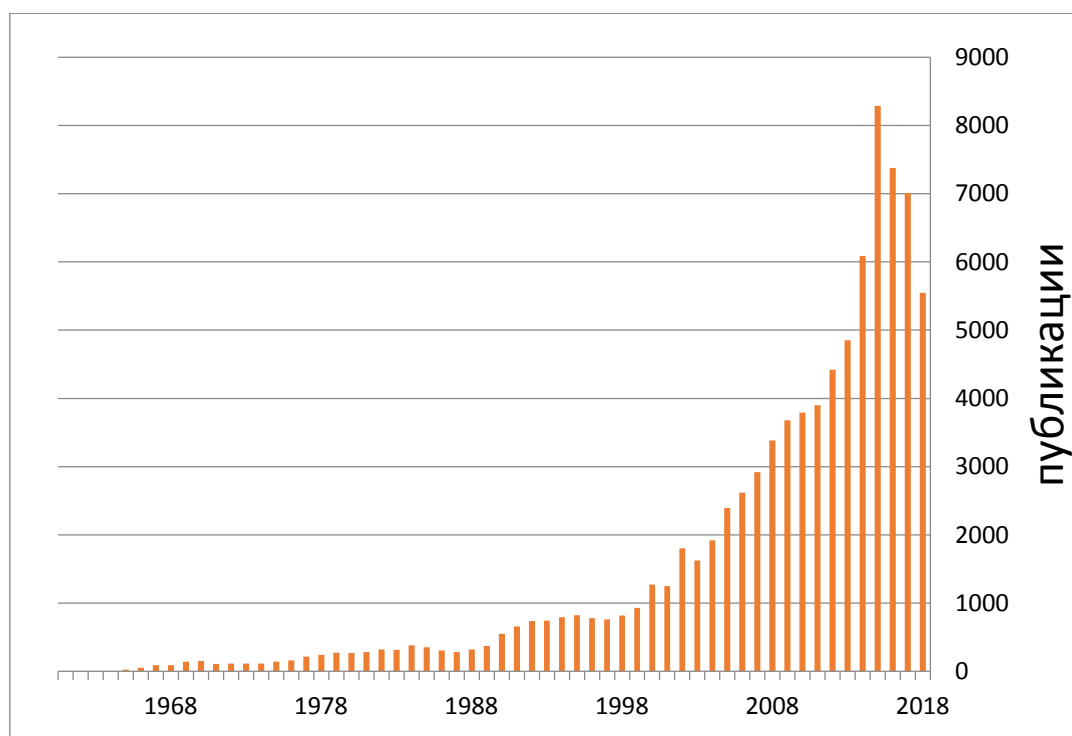


Рис. 8. Темпы развития ЯМР исследований в химии (Scopus Key words: “NMR”, “chemistry”)

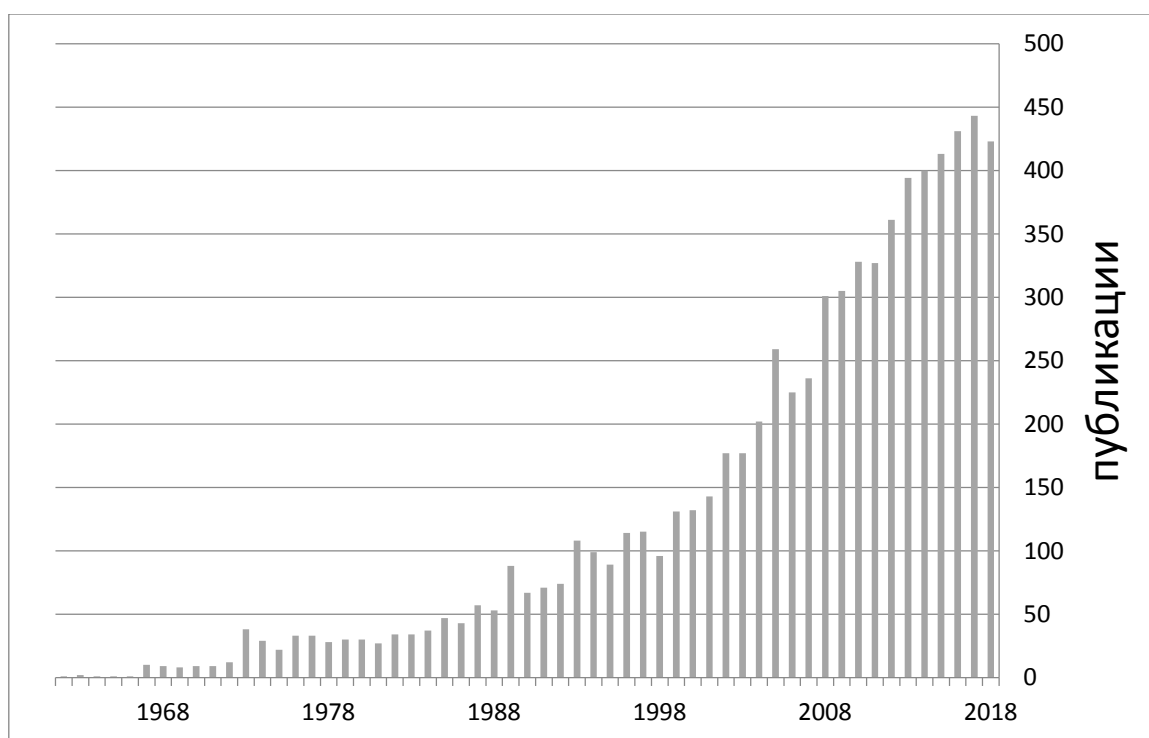


Рис. 9. Темпы развития ЭПР исследований в биологии и медицине (Scopus Key words: “Biology”, “Medicine”, “ESR”, “EPR”)



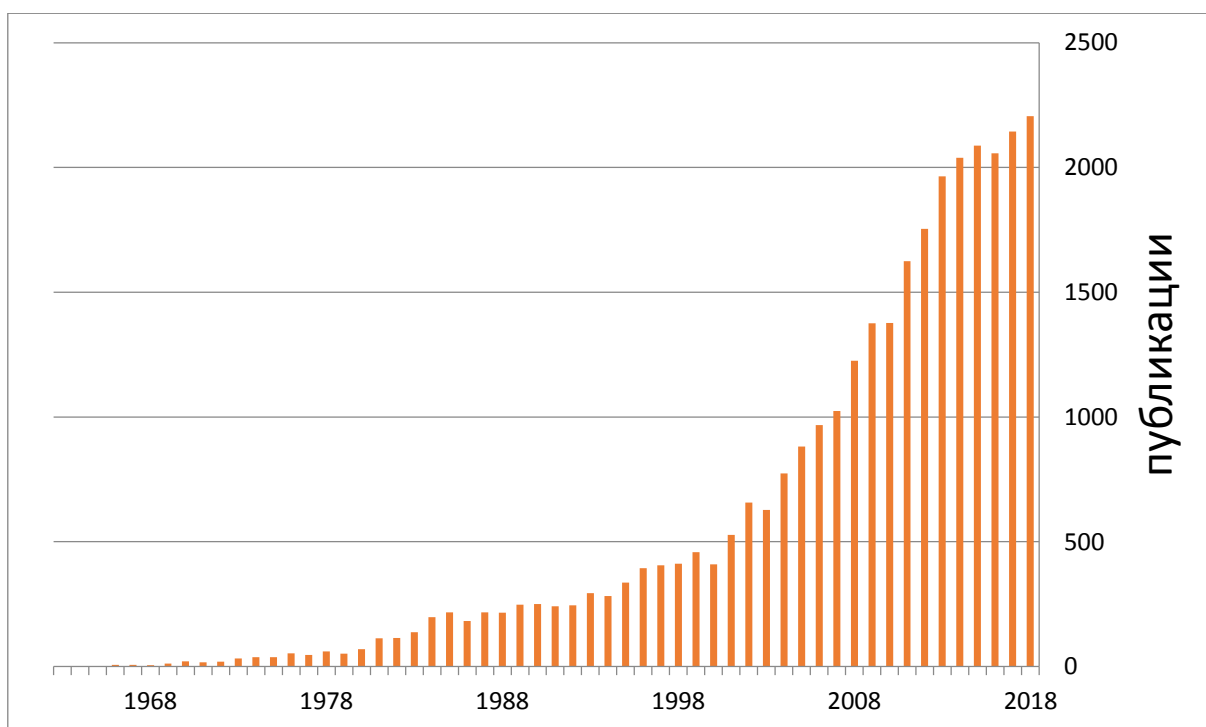


Рис. 10. Темпы развития ЯМР исследований в биологии и медицине (Scopus Key words: “Biology”, “Medicine”, “NMR”)

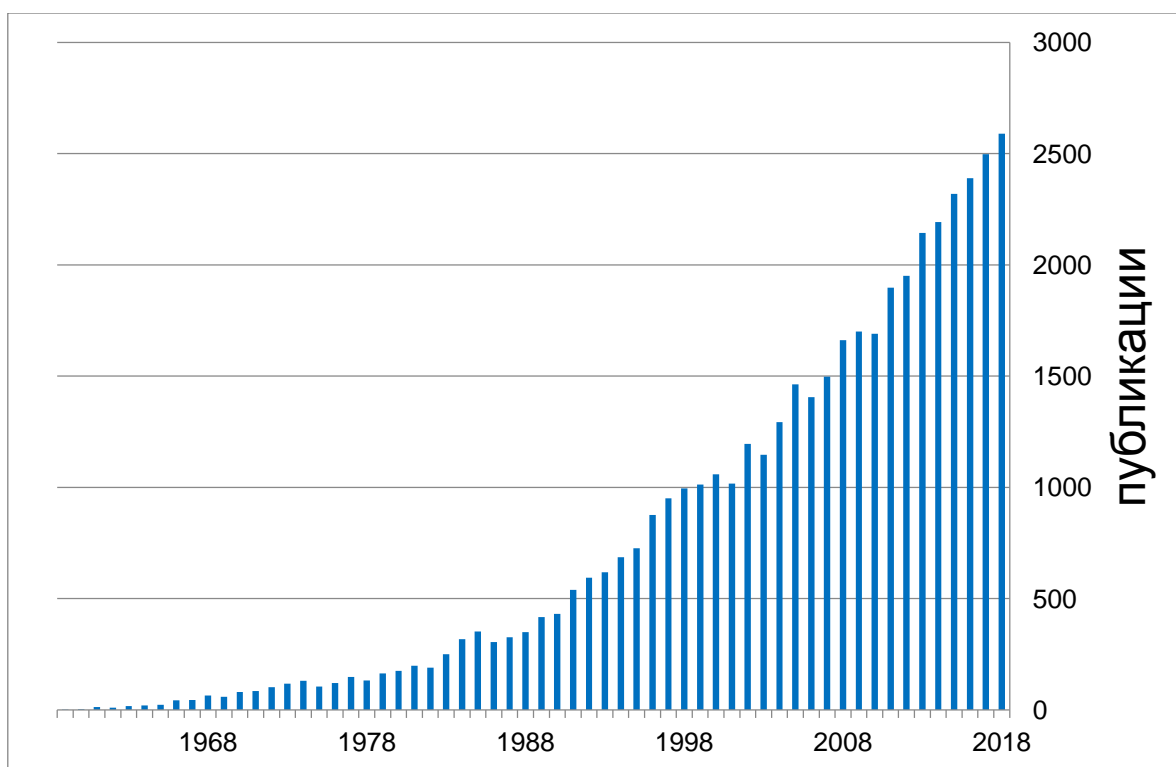


Рис. 11. Темпы развития магнитного резонанса в нефтегазовых технологиях (Scopus Key words: “NMR”, “ESR”, “EPR”, “Oil”, “Gas”)

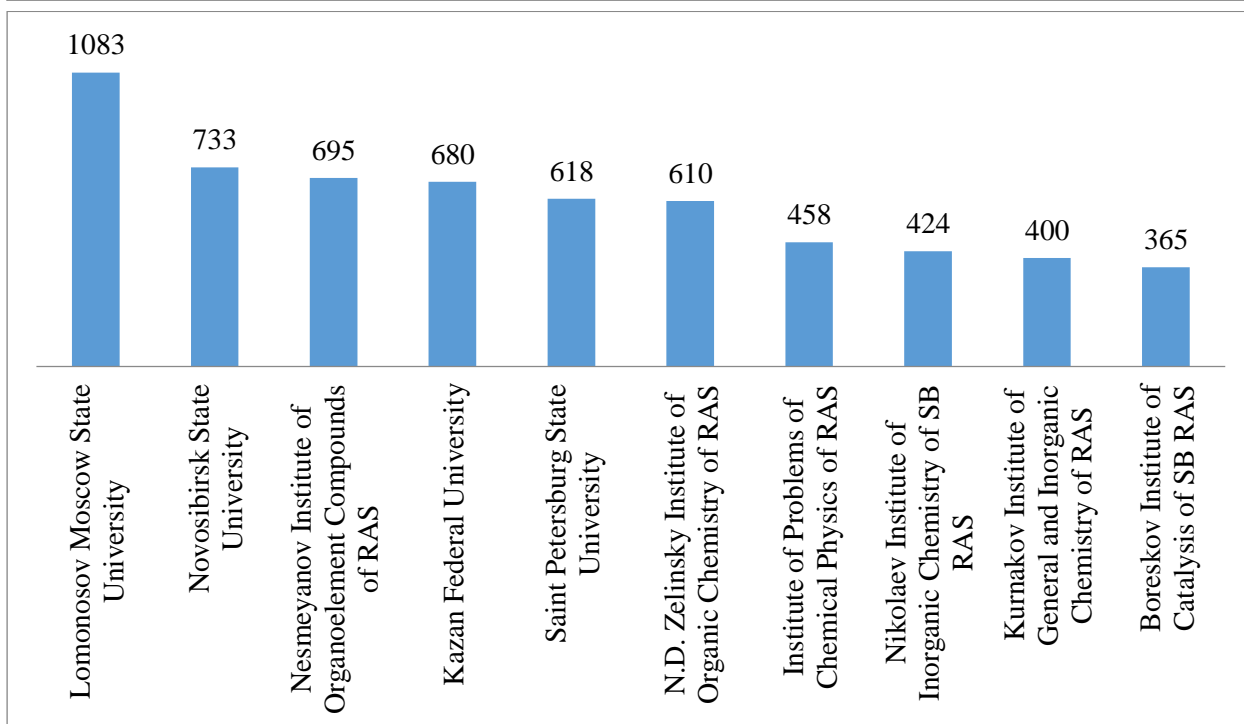
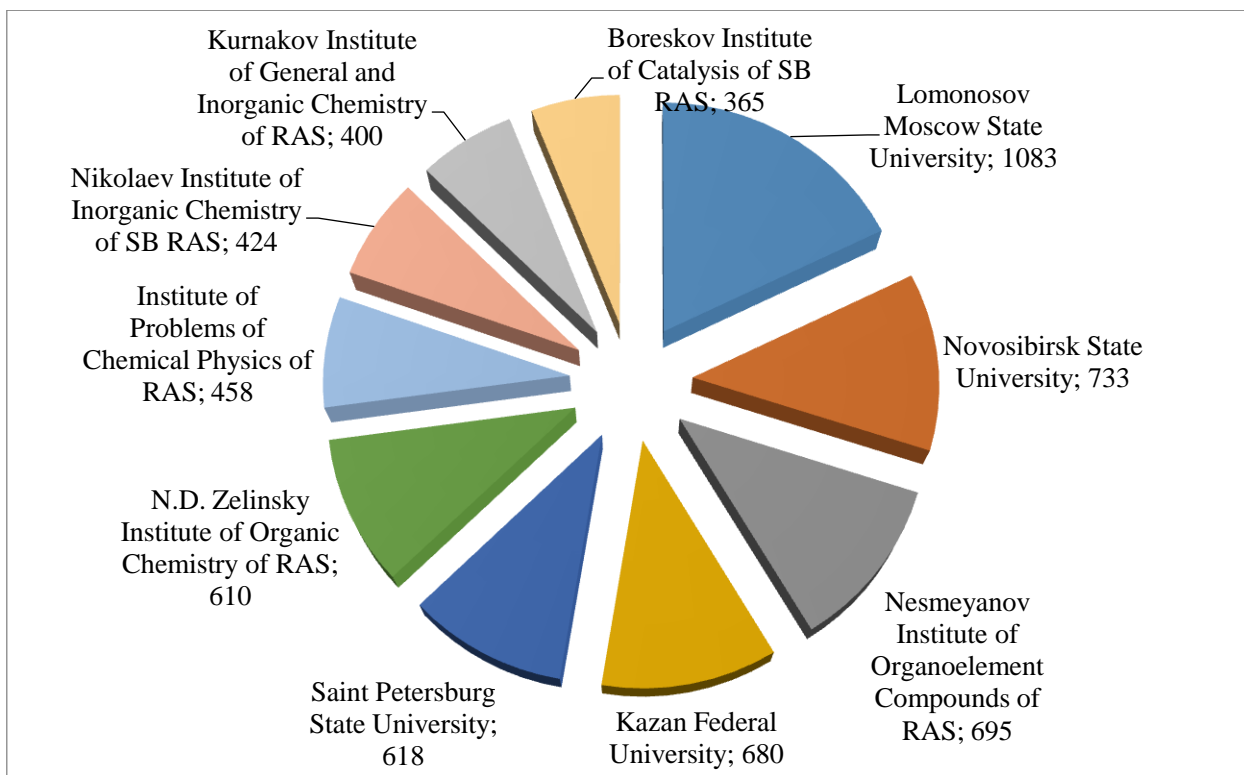


Рис. 12. Публикационная активность ведущих российских исследовательских центров магнитного резонанса по всем областям применения. Здесь и далее учтены публикации ведущих центров (групп) РФ за период 2009–2018 гг., индексируемые в базе данных Scopus

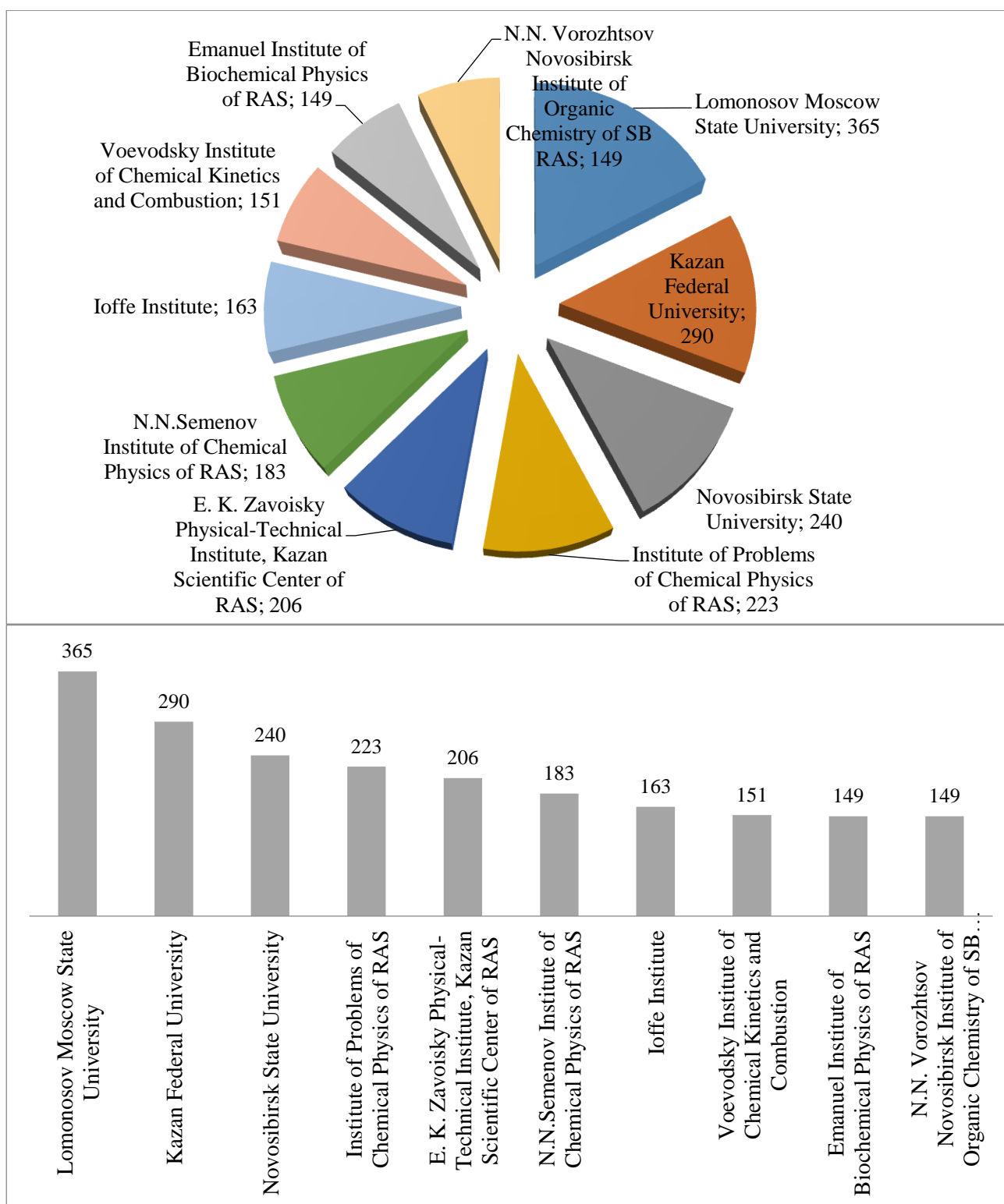


Рис. 13. Публикационная активность по всем областям применения ЭПР. С 2009 г. по 2018 г. опубликовано 2622 статьи (РАН 1464)

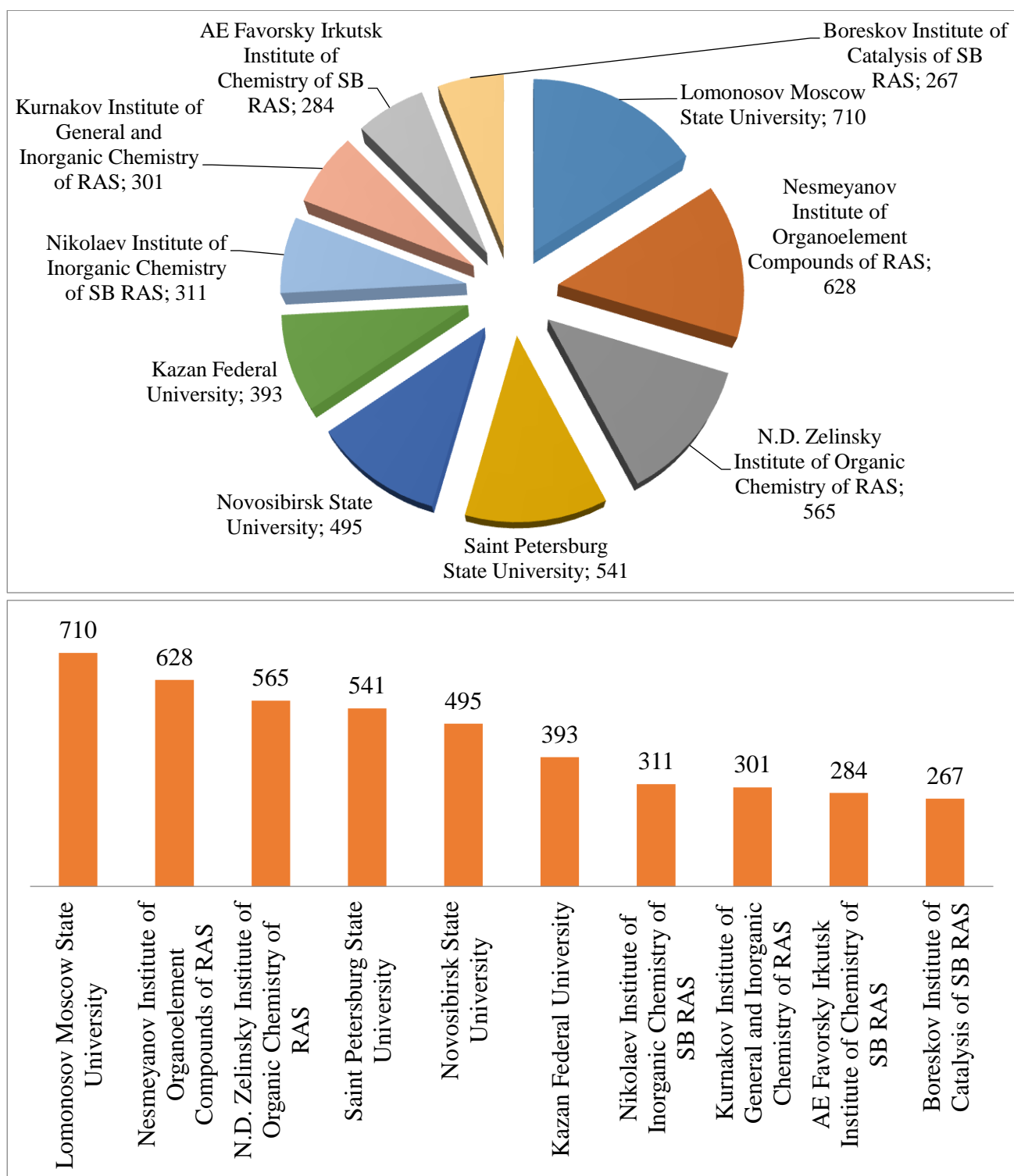


Рис. 14. Публикационная активность по всем областям применения ЯМР. С 2009 г. по 2018 г. опубликовано 7126 статей (РАН 3457)

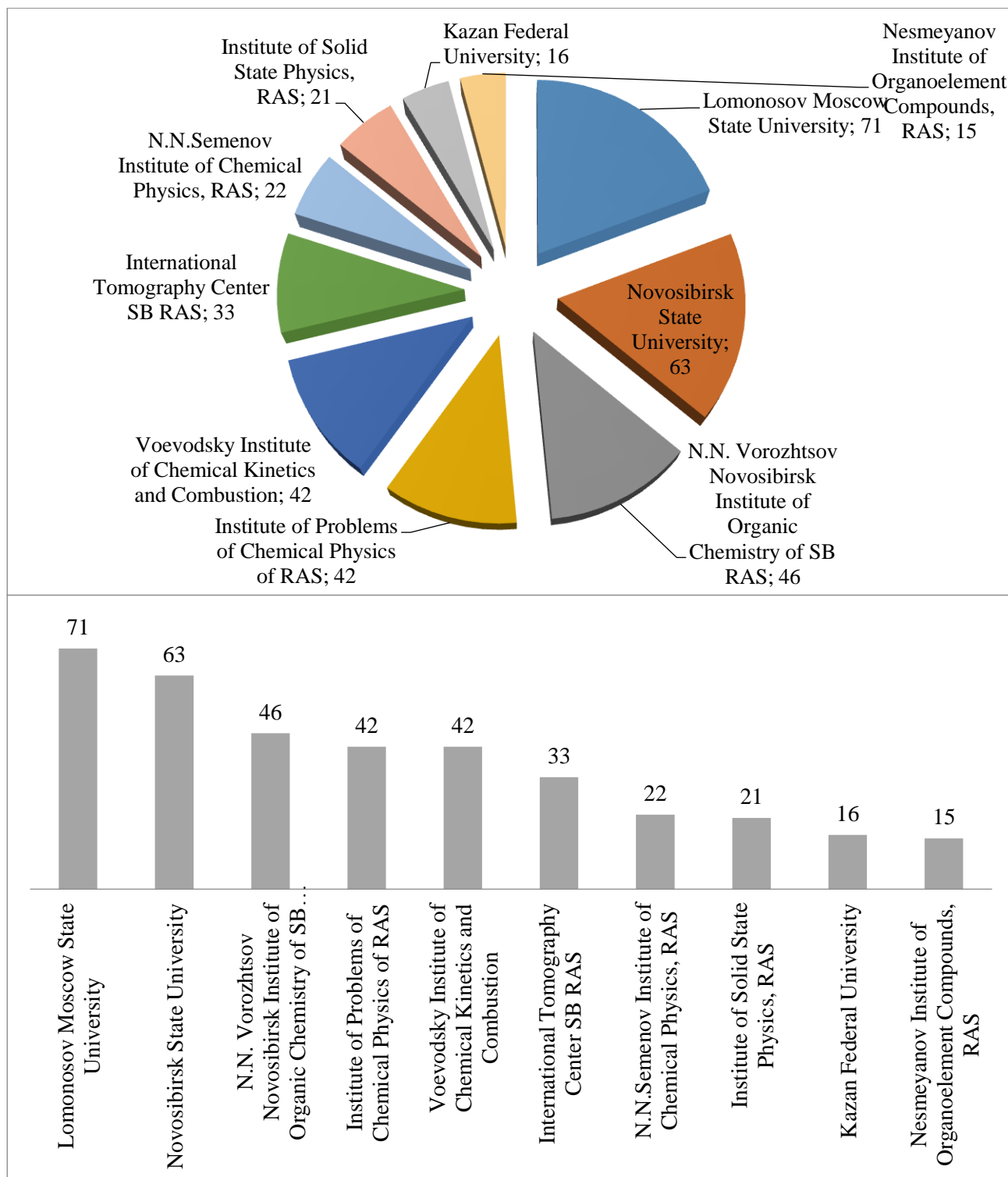


Рис. 15. Публикационная активность в ЭПР исследованиях в химии.  
С 2009 г. по 2018 г. опубликовано 352 статьи (РАН 146)

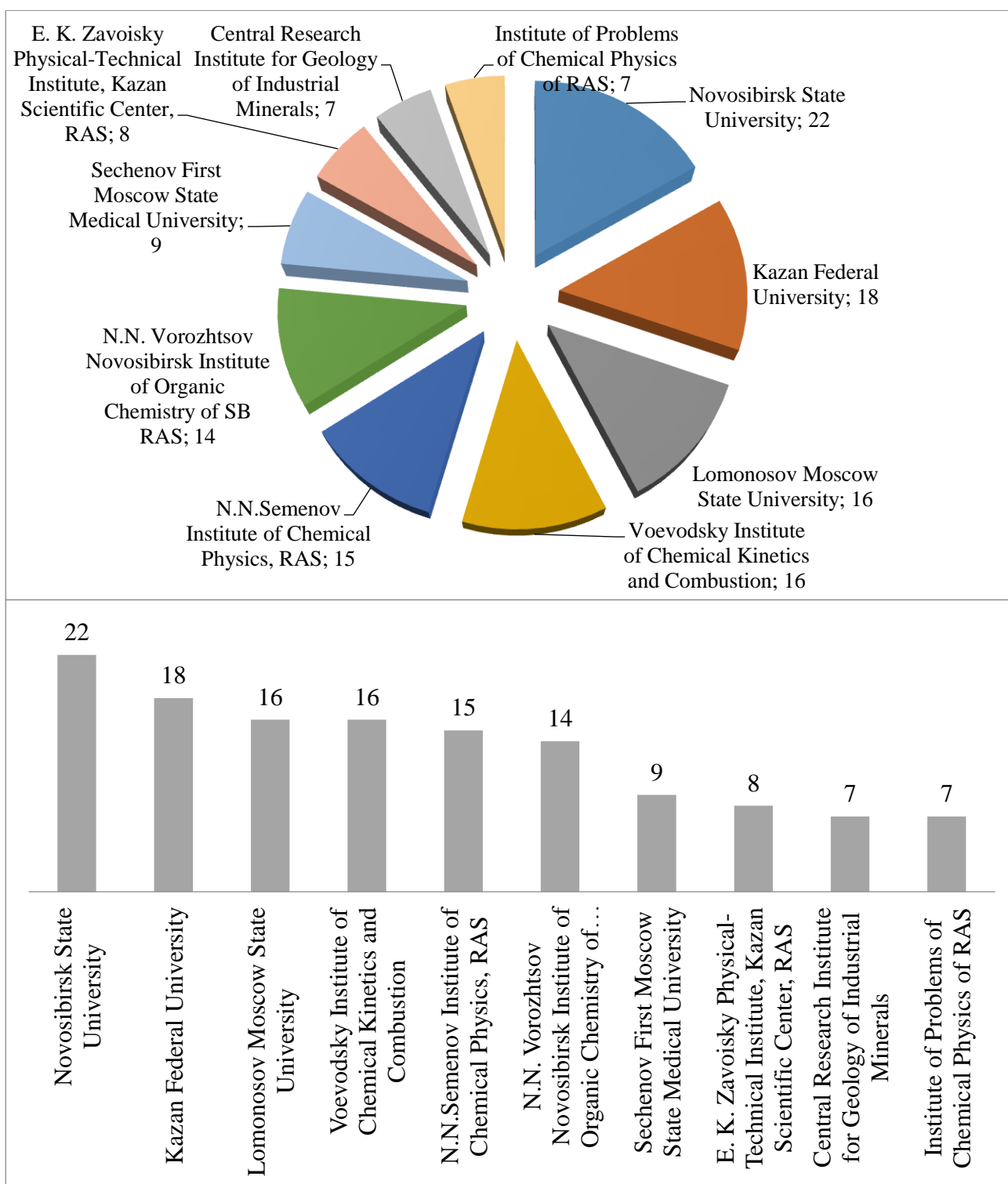


Рис. 16. Публикационная активность ЭПР исследований в биологии и медицине. С 2009 г. по 2018 г. опубликовано 165 статей (РАН 56)

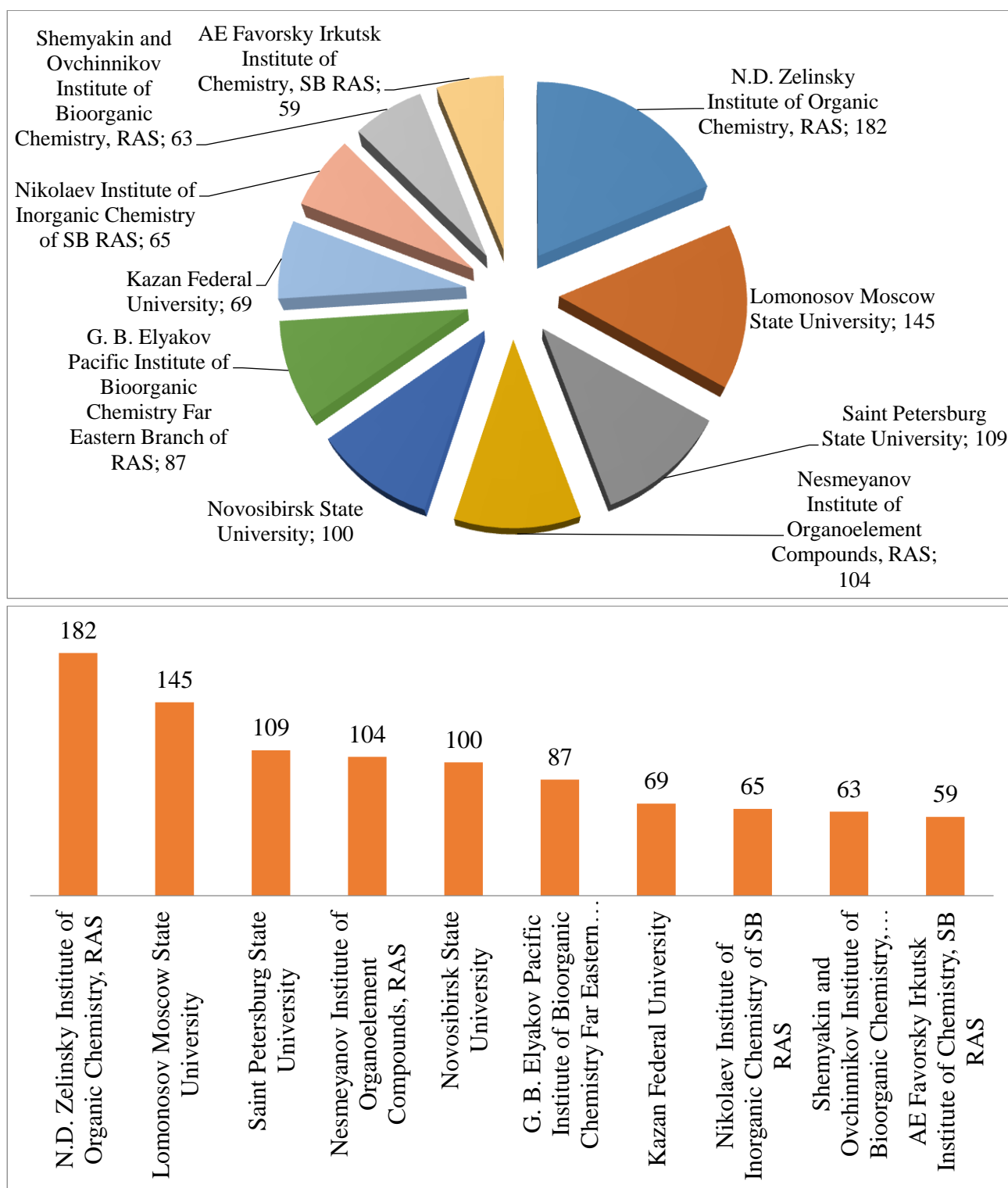


Рис. 17. Публикационная активность по применению ЯМР в химии.  
С 2009 г. по 2018 г. опубликовано 1266 статей (РАН 645)

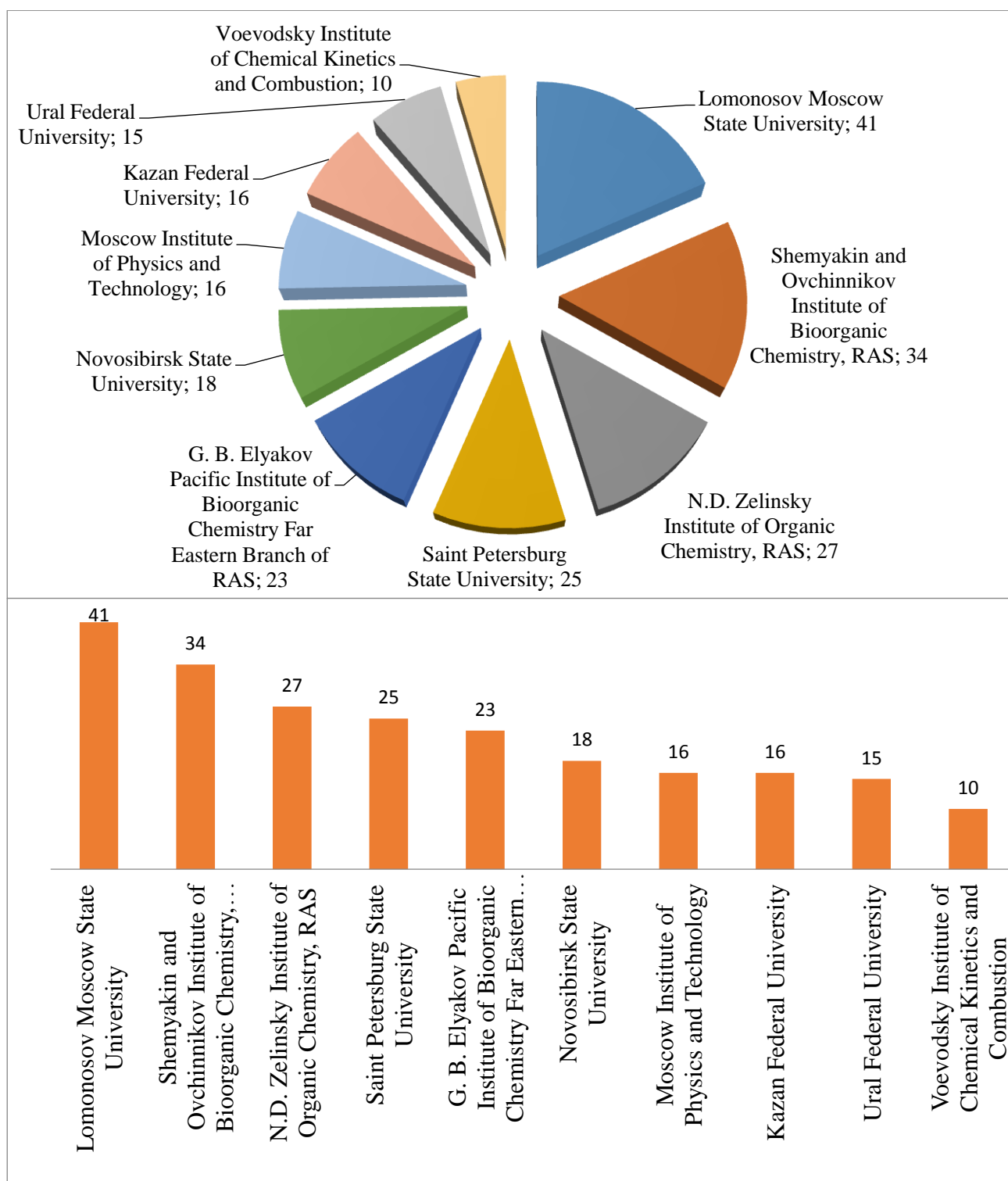


Рис. 18. Публикационная активность по применению ЯМР в биологии и медицине. С 2009 г. по 2018 г. опубликовано 351 статья (РАН 157)



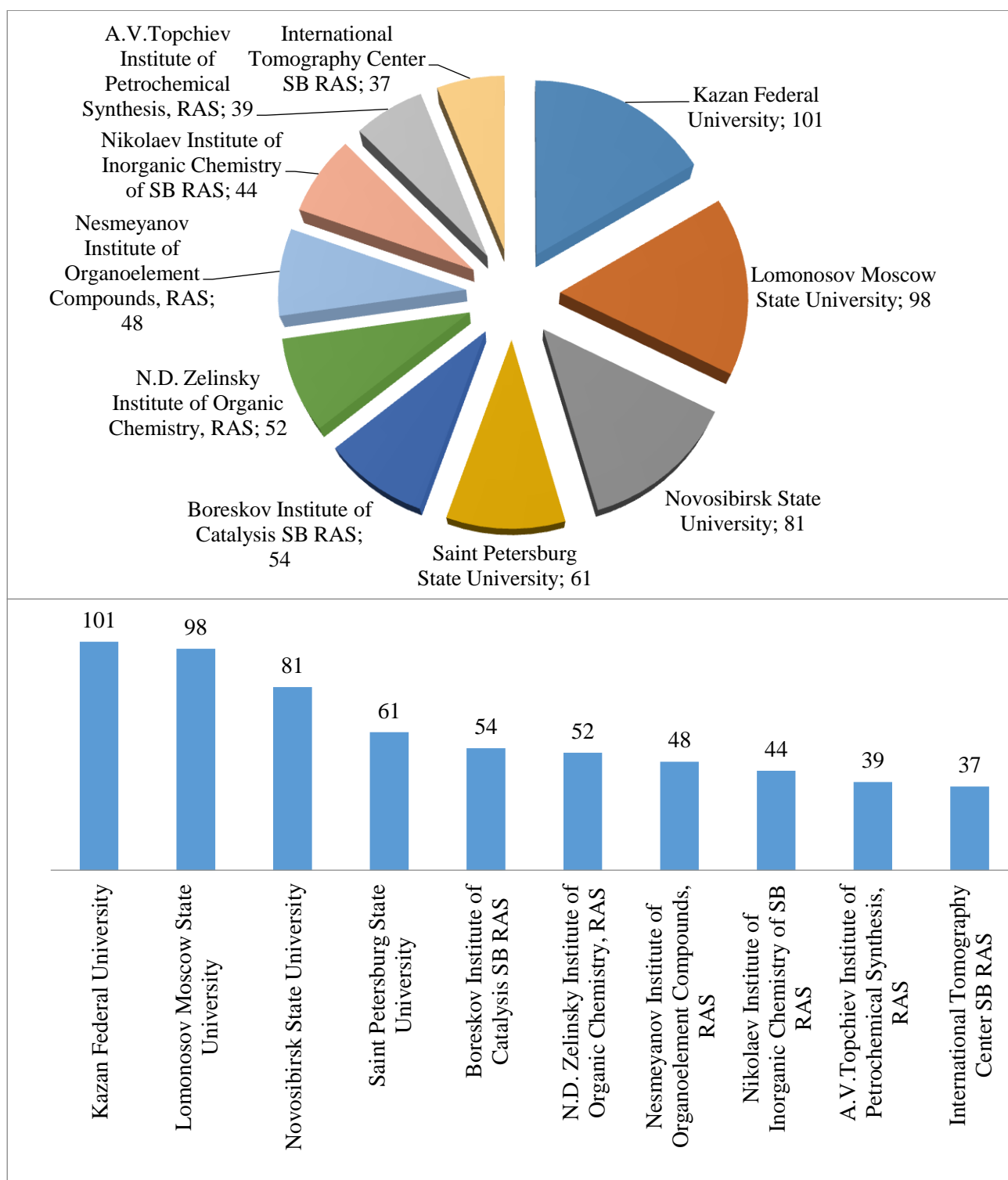


Рис. 19. Публикационная активность по применению магнитного резонанса в нефтегазовых технологиях. С 2009 г. по 2018 г. опубликовано 895 статей (РАН 326)

В области магнитного резонанса в международном рейтинге (в базе данных Scopus) учтены 600 наиболее крупных научных центров всего мира. В этих графиках отражен их вклад. В рейтинге представлены и ведущие исследовательские центры России. Казанский университет в нем представлен практически во всех областях применения магнитного резонанса. По всем областям применения магнитного резонанса КФУ входит в число 150 ведущих центров мира по всем областям применения ЭПР, в области ДЯМР входит в первую сотню, а по ряду узкоспециализированных направлений входит в число 10 мировых лидеров: ЯМР в области сверхтекучести и нелинейного ЯМР, ЯМР ИГМП, в частности, в нефтегазовых технологиях, в области времяразрешенной светоиндуцированной ЭПР спектроскопии.

Как обстоят дела в нашей стране в целом? В 2018 г. в мире было опубликовано порядка 23 тыс. статей по всем областям применения магнитного резонанса, из них примерно треть с применением ЭПР. Число аналогичных отечественных публикаций научных, научно-образовательных и научно-производственных организаций порядка 400–450 и составляет 2,3% от общего числа публикаций в мире (из них треть с применением ЭПР). Этот показатель коррелирует с общим вкладом России в научные исследования и в мировую экономику. Примерно две трети – это вклад университетов, которые получили огромную финансовую поддержку по Программе развития в течение 2010–2015 гг., благодаря чему проведено переоснащение лабораторий магнитного резонанса университетов, где собственно и зарождался магнитный резонанс: Казанского, Московского, Санкт-Петербургского, что обеспечило высокую динамику их развития. К ним примыкает Новосибирский государственный университет, глубоко интегрированный с институтами СО РАН. Эта четверка университетов неизменно находится в первой десятке в целом и на первых пяти позициях в ряде областей применения. Остальные позиции, как правило, занимают Институты РАН (Москва) и СО РАН, которые регулярно обновляли

парк спектрометров. Формальный рейтинг (по числу публикаций, индексируемых в базе данных Scopus без учета нормировки на число занятых в этих исследованиях ученых) российских центров исследований с применением методов магнитного резонанса был озвучен на двух предыдущих конференциях, проходивших в Казани в 2015 и 2016 гг. (VI Всероссийская конференция «Новые достижения ЯМР в структурных исследованиях» при участии зарубежных ученых с элементами школы для молодых исследователей, Казань, КФУ, 6–9 апреля 2015 г.; Международный симпозиум «Магнитный резонанс: от фундаментальных исследований к практическим приложениям» с элементами школы для молодых исследователей, Казань, КФУ 21–23 апреля 2016 г., на Российской конференции ЯЛЧИК 2017 г., Международной школе “Actual problems of magnetic resonance and its application” (Казань, 2018 г.)).

При всей условности составления такого рейтинга публикационной активности, поскольку приведены данные без учета импакт – факторов журналов и не выделены перекрестные совместные публикации ученых российских центров, они в целом отражают реальное положение дел в исследованиях, разработках и приложениях в области магнитного резонанса ведущих центров магнитного резонанса РФ.

К большому сожалению, общий вклад российских центров магнитного резонанса в области томографии примерно на порядок ниже. Отметим лишь, что в России ведущие позиции в разработке методов МРТ занимают Центр магнитного резонанса и спектроскопии МГУ и Международный Томографический Центр СО РАН, рост активности клинических приложений отмечается в медицинских Вузах Москвы. В десятке российских лидеров и Казанский Федеральный университет.

## Вместо Заключения

Открытие электронного парамагнитного резонанса было встречено скептически и с недоверием. Однако вскоре после публикации первых работ в области магнитного резонанса (ЭПР и ЯМР) стали очевидными перспективы развития магнитного резонанса и его приложений. Но активное использование методов магнитного резонанса началось лишь с появлением первых промышленных спектрометров в середине 1950-х гг. С середины 1990-х гг., когда появились многофункциональные, высокопроизводительные спектрометры, обеспеченные программами для обработки спектров, началось триумфальное шествие по планете магнитного резонанса. Венцом его является магнитно-резонансная томография, за создание которой П. Лаутербур и П. Мэнсфилд были удостоены Нобелевской премии по медицине 2003 г. (МРТ – это отдельная и большая тема, которая в этой статье практически не затрагивается). Нобелевские премии были присуждены также за ряд других выдающихся работ, выполненных с использованием магнитного резонанса – **по физике: 1966 г.** – А. Кастлер (Двойной оптический магнитный резонанс), **1989 г.** – И. Рэмси и др. (Водородный генератор на сверхтонких уровнях атома), **1991 г.** – П. Де Жен (Жидкие кристаллы и ЯМР в антиферромагнетиках), **1996 г.** – Д. Ли и др. (Открытие сверхтекучего гелия-3 методом ЯМР), **1997 г.** – Ван Флек и др. (За вклад в изучение магнитных и электрических свойств материалов), **2003 г.** – А. Леггетт (пионерские работы по сверхпроводимости и сверхтекучести, включая ЯМР сверхтекучего гелия-3); **по химии: – 1998 г.** – Дж. Попл и др. (За вклад в вычислительные методы квантовой химии, включая параметры спин-гамильтониана).

Неслучайно Лауреат Нобелевской премии Академик В.Л. Гинзбург причислил открытие ЭПР к числу «выдающихся достижений физики 20 века».

Авторы благодарны за предоставленные материалы, дополнения и исправления нашим коллегам: Р.Р. Амирову, И.С. Антипину, М.Р. Гафурову, А.В. Дуглаву, А.В. Захарову, А.А. Калачёву, Ф.Х. Каратаевой, В.В. Ключкову, Б.З. Малкину, Ю.Н. Прошину, В.Д. Скирде, Л.Р. Тагирову, М.С. Тагирову, Д.А. Таюрскому, Н.М. Хасановой.

Авторы благодарны Н.Ф. Галиуллиной за подготовку материалов к публикации, доценту К.С. Усачеву за подготовку данных к рис. 1–19.

## АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

### А

Абашев А.Р. 94  
Абдуллин Р.Р. 108  
Абдулсабиров Р.Ю. 28  
Абубакиров Д.И. 33  
Аввакумов В.И. 11, 17  
Авдеев М.В. 83  
Аганов А.В. 27, 31, 64–66, 70,  
71, 74, 75, 87, 89, 91, 99, 100,  
113, 114  
Азанчеев Н.М. 34, 61  
Алакшин Е.М. 33–35, 79, 80, 81  
Александров А.С. 34  
Александров Е.Б. 23  
Аллул А. 113, 114  
Альварес Л.У. 7, 13  
Альтшулер С.А. 6, 9, 10, 13–17,  
25, 27, 29, 36, 37, 78, 106, 112  
Амамчан Р.Г. 32  
Аминов Л.К. 25, 36, 40, 88, 114  
Аминова Р.М. 64, 65, 67–70, 89  
Амиров Р.Р. 105, 133  
Андроненко С.И. 84  
Антипин А.А. 28, 29, 84  
Антипин И.С. 100, 101, 133  
Арбузов Б.А. 19–21  
Аркадьев В.К. 6  
Архипов Р.В. 34  
Асланян И.Ю. 56

### Б

Байбеков Э.И. 86  
Баранов П.Г. 87  
Басов Н.Г. 11, 22  
Баталова Л.А. 34  
Бахтиозин Р.Ф. 93–95  
Башкиров Ш.Ш. 17, 18, 108  
Беднорц Г. 112  
Белов С.И. 76  
Бильдюкевич А.Л. 27  
Блини Б. 11  
Бломберген Н. 9, 24  
Блох Ф. 7, 8, 13, 40  
Блохин Д.С. 89  
Блюменфельд Л.А. 23  
Богайчук А.В. 35  
Болдырев С.Н. 32  
Бородин П.М. 24  
Бубнов Н.Н. 11, 23  
Буишвили Л.Л. 22  
Булатов Ф.М. 107  
Булка Г.Р. 107  
Буньков Ю.М. 33, 81  
Бурилов А.Р. 101  
Бурилов В.А. 100  
Буторин В. 32  
Быстров В.Ф. 31

### В

Вагизов Ф.Г. 109

Вайнштейн Д.И. 107  
Валиев К.А. 17, 18  
Валиуллин Р.Р. 58–60  
Валишев Р.М. 17, 29  
Валлер И. 7  
Ван Флек Д.Х. 7, 132  
Васильев Г.И. 51, 52, 55  
Ведерников В. 32  
Вейсс П. 10  
Винокуров В.М. 26. 106  
Вишина А.В. 76  
Владимирский К.В. 24  
Воеводский В.В. 23  
Володин А.Г. 32  
Вютрих К. 111

## Г

Газизулин Р.Р. 79–81  
Гайнов Р.Р. 109  
Галеев А.А. 107  
Галиуллина Л.Ф. 89  
Галиуллина Н.Ф. 133  
Галкин В.И. 104  
Галкина И.В. 104  
Гарифуллин И.А. 43–49  
Гарифьянов Н.Н. 43, 44, 48, 49  
Гарифьянов Н.С. 11, 17  
Гафуров И.Р. 56  
Гафуров М.Р. 34, 86, 87, 98, 133  
Гвоздовер С.Д. 24, 25  
Герлах В. 7  
Гизатуллин Б.И. 34

Гильмутдинов И. 84  
Гиматдинов Р.С. 61  
Гинзбург В.Л. 47, 132  
Глебашев Г.Я. 17  
Глебов А.Н. 105  
Гнездилов О.И. 34, 104  
Голобурдов П.М. 28  
Горди В. 11  
Гортер К.Я. 7–9, 11, 15  
Горюнов Ю.В. 83  
Гражданников Е.Д. 105  
Гревцев В.А. 107  
Гриффитс Дж. 9, 84  
Губайдуллин А.Т. 101  
Гутовский Х. 21

## Д

Даутов Р.А. 25, 26, 30, 104, 107  
Двояшкин Н.К. 51, 52, 58–60,  
61  
Де Жен П. 57, 132  
Девятов Ф.В. 105  
Демельт Х. 9  
Детч М. 9  
Дикинсон В. 21  
Долгоруков Г.А. 35  
Дорогиницкий М.М. 34, 56  
Дорфман Я.Г. 7  
Дуглав А.В. 29, 43, 44, 48, 50,  
80, 109, 133  
Дю Пре Ф.К. 7

**Е**

Егоров А.В. 33, 34, 36, 42, 79  
Егорова С.Н. 104  
Еремин М.В. 43, 44, 48, 50, 78,  
114  
Ефимов С.В. 89  
Ефремова С.А. 77

**З**

Забиров Н.Г. 103  
Завойский Е.К. 5–10, 12–16, 25,  
36, 112  
Заиров Р.Р. 105  
Зарипов М.М. 17, 18, 25, 26, 36,  
37, 106  
Захаров А.В. 31, 105, 133  
Захаров М.Ю. 34  
Захарова Л.Я. 101  
Звиададзе М.Д. 22  
Зимин М.Г. 103  
Зинин В.Н. 93  
Зихельшмидт Й. 77  
Зыкова Т.В. 31  
Зябликова Т.А. 103

**И**

Ибатуллин М.М. 94, 95  
Иванов А.А. 34  
Игнатъев И.М. 91  
Идиятуллин Д.Ш. 54, 55, 61  
Изюмов Ю.А. 83  
Ильясов А.В. 20, 92

Ильясов К.А. 93–95, 114, 115

Ильясов Н.А. 94, 95

Имамутдинов Ф.С. 28, 29

Ингланд Т. 10

Иоффе В.А. 84

**К**

Казимир Х. 7

Калачёв А.А. 133

Калмансон А.Е. 23

Кальчев В.П. 108

Капица П.Л. 32

Капустин В.Н. 32

Каратаева Ф.Х. 102, 103, 133

Кастлер А. 132

Катышев А.Н. 28

Каширин Н.В. 55, 61

Кессених А.В. 24, 25

Кириллов Е.И. 28

Клочков А.В. 33–35, 79–81

Клочков В.В. 64, 65, 70–72, 87,  
89, 96, 100, 114, 115, 133

Клюшкин И.В. 92–95

Козырев Б.М. 6, 10, 11, 13, 14,  
16, 18, 24

Коновалов А.И. 100, 101

Конькин А.А. 87

Конькин А.Л. 87

Корепанов В.Д. 28, 30, 104

Кортунов П.В. 60

Кочелаев Б.И. 16, 17, 25, 44–48,  
50, 74–76, 78, 113, 114



Крониг Р. 7  
Круг фон Нидда Х.-А. 77  
Крюгер Х. 9  
Кудряшов А.А. 32  
Кузьмин В.В. 33, 35, 79–81  
Курбангалиева А.Р. 102  
Куренев В.Я. 16, 17  
Куркин И.Н. 28, 84, 86  
Курчатов И.В. 12  
Кутузов А.С. 76, 77  
Кэммероу Р. 10

## Л

Ларионов И.А. 84  
Латыпов Ш.К. 20, 64, 65, 71, 73,  
74  
Лаутербур П. 132  
Легgett А. 132  
Ли Д. 132  
Логинова Э.И. 31  
Лозовой А.Р. 34  
Лойдл А. 77  
Лундин А.С. 31  
Лутфуллин М.Х. 134

## М

Магазанник А.А. 24  
МакКолл Д. 21  
Маклаков А.И. 25, 26, 31, 32,  
51, 52, 54–56, 58–61, 63, 102  
Малкин Б.З. 36, 38, 77, 86, 114,  
133

Мамин Г.В. 34, 79–81, 86, 87  
Маненков А.А. 11, 22, 112  
Матевосян Р.О. 23  
Мельникова Д.Л. 91  
Менделеев Д.И. 110  
Минниханов Р.Н. 95, 104  
Миронов В.Ф. 102  
Миропольский Л.М. 106  
Мисра С.К. 84  
Митрофанов Ю.Ф. 29  
Молин Ю.Н. 23  
Мур Г. 10  
Мустафина А.Р. 101, 105  
Мутина А.Р. 62  
Мухамедшин И.Р. 34, 80, 82,  
109  
Мухтаров А.И. 33  
Мэнсфилд П. 132  
Мюллер К.А. 50, 76, 112, 113

## Н

Назаров Ю.Г. 29  
Найт В. 21  
Налетов В.В. 33  
Нафикова (Мусина) А.А. 64,  
65, 70, 71, 74, 103  
Неганов Б.С. 32  
Некрасов И.К. 35,  
Немтарев А.В. 102  
Непримеров Н.Н. 11, 17, 18  
Несмелов А.В. 14  
Несмелова И.В. 55, 91

Нигматуллин Р.Ш. 17  
Низамутдинов И.М. 107  
Никитин С.И. 114, 115

## О

Овчинников И.В. 61  
Орлинский С.Б. 80, 81, 86, 87,  
114, 115

## П

Парселл Э.М. 8, 9  
Паунд Р.В. 9  
Пеньков И.Н. 26, 107, 108  
Петров Ю.А. 31  
Пец Б.Д. 28  
Пименов Г.Г. 31, 32, 51, 52, 55,  
58, 59, 61, 102  
Поздеев О.К. 104  
Польский Ю.Е. 27, 29  
Попель А.А. 26, 104, 105  
Попл Дж. 132  
Поулис Р. 9  
Проктор В. 9, 21  
Прохоров А.М. 11, 22, 112  
Прошин Ю.Н. 77, 83, 133  
Пудовик А.Н. 103

## Р

Раби И.А. 7, 13  
Рахматуллин И.З. 89  
Рахматуллин Р.М. 29, 86  
Ривкинд А.И. 24

Ритгер У. 87  
Ричардсон О.У. 41  
Родионов А.А. 84  
Розенцвайг Ю.К. 29  
Рудакова М.А. 62, 90  
Рыжжина И.С. 101  
Рэмси И. 132

## С

Савинков А.В. 34  
Сагдеев Р.З. 113, 114  
Сагидуллин А.И. 55  
Садыков Р.Х. 66  
Салихов К.М. 19  
Салихов С.Г. 10, 16, 17, 31  
Салихов Т.М. 34  
Сальников Ю.И. 31, 105  
Самитов Ю.Ю. 20, 21, 24, 25,  
27, 30, 31, 64–67, 74, 99, 100,  
103  
Самитова А.Ю. 65  
Самсонов В.М. 28  
Санадзе Т.И. 22  
Сапрыкова З.А. 105  
Сафин И.А. 107  
Сафин Т.Р. 33, 34, 80, 81  
Сафиуллин К.Р. 34, 35, 79–81  
Севрюгин В.А. 51, 52, 54, 55,  
58, 59  
Семенов А.Г. 11, 23  
Сергеев Н.М. 12  
Силкин Н.И. 91

Скворцова А.М. 76  
Скирда В.Д. 32, 34, 51, 52, 54–  
63, 75, 91, 96, 114, 115, 133  
Скрипов Ф.И. 24  
Скроцкий Г.В. 23  
Слихтер Ч. 21, 77  
Смит В. 11  
Соловьев Б.В. 28  
Соловьева С.Е. 101  
Сорокин П.П. 24  
Стежко А.Г. 32, 55  
Степанов А.С. 105  
Степанов В.Г. 28, 106  
Стивенс К. 11  
Стойков И.И. 100, 101  
Стрендберг В. 11  
Сундуков В.И. 54, 55

## Т

Тагиров Л.Р. 44–46, 82, 114, 133  
Тагиров М.С. 32–36, 43, 79–81,  
85, 98, 114, 115, 133  
Тамм И.Е. 14  
Тарасов Б.Г. 28  
Таунс Ч.Н. 11  
Таюрский Д.А. 36, 43, 75, 78–  
80, 82, 114, 115, 133  
Тейтельбаум Г.Б. 44, 48–50  
Теплов М.А. 31, 32, 36, 37, 78  
Тишков П.Г. 11, 17  
Тогулев Н.В. 108  
Трамбаруло Р. 11

Туманов В.А. 83

## У

Уитнер К. 10  
Урядов А.В. 58, 60  
Усачев К.С. 89, 133  
Уэйднер Р. 10

## Ф

Фадеев В.М. 30, 104  
Фазлеев Н.Г. 83  
Фалин М.Л. 29  
Фаткуллин Н.Ф. 51, 52, 57, 63,  
88, 114  
Федоренко С.В. 105  
Филиппов А.В. 51, 61, 62, 90  
Франк И.М. 14  
Френкель Я.И. 8, 15

## Х

Хайруллин Р.Н. 91  
Хайрутдинов Б.И. 72  
Хакимов А.М. 59  
Хан Э.Л. 21, 23, 88  
Харахашьян Э.Г. 44–47  
Хасанов А.Х. 29  
Хасанова Н.М. 107, 133  
Хаяров А.И. 32, 64–66, 71  
Хенниг К.Ю. 94  
Ходов И.А. 89  
Холидей Д. 10  
Хохлов А.Р. 56

Хсианг Дж. 10

Хурлиманн М. 58

Хусаинов М.Г. 77, 83

Хусаинов М.М. 83

Хуцишвили Г.Р. 22

## Ц

Царевский С.Л. 77, 83

Цветков Ю.Н. 23

## Ч

Чевела В.В. 105

Чельшев Ю.А. 91

Черенков П.А. 14

Черкасов Р.А. 103

Черницын А.И. 28, 30

Чернов К.П. 28

Чернов П.П. 66

Чиркин Ю.К. 28

Чирков А.К. 23

Чувашаев И.Р. 93–95

## Ш

Шаймиев М.Ш. 36, 44, 52, 65,  
101

Шамонин Ю.Я. 31

Шапошников И.Г. 22

Шарин Е.П. 77

Швец А.Д. 28

Шекун Л.Я. 17, 18

Шилова Е.В. 76

Шипунов Т.Р. 34

Шленкин В.И. 29

Шмидт И. 87

Шнайдер Е. 10

Штерн О. 7

Штырлин В.Г. 87, 105

Шулаева М.П. 104

## Щ

Щепкин В.Д. 107

## Э

Эйнштейн А. 7

Элшнер Б. 76

Эндрю Э. 21

Эренфест П. 7

Эрнст Р. 110

## Ю

Юдин А.Н. 79

Юльметов А.Р. 70, 71, 89

Юсупов Р.В. 84

Юсупова Л.М. 104

## Я

Яфаев Н.Р. 106

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1]. Парамагнитный резонанс. Казанская школа радиоспектроскопии, 1944-1971: сборник [Текст] / Отв. ред. Митин А.В. – М.: Атомиздат, 1974. – 296 с.

[2]. Kochelaev, B.I. The Beginning of Paramagnetic Resonance [Text] / B.I. Kochelaev, Yu.V. Yablokov. – Singapore, Hong Kong: World Scientific, 1995. – 176 p.

[3]. Кессених, А.В. Открытие, исследования и применения магнитного резонанса [Текст] / А.В. Кессених. // УФН. – 2009. – Т.179, №7. – С.737-764.

[4]. Евгений Константинович Завойский (1907–1976). Материалы к биографии [Текст] / Под редакцией К.М. Салихова. – Казань: Унипресс, 1998. – 96 с.

[5]. Чародей эксперимента. Сборник воспоминаний об академике Завойском [Текст] / Отв.ред. С.Т. Беляев., Ред.-сост. В.Д. Новиков, Н.Е. Завойская. 2-е изд., М.: Наука, 1994. – 256 с.

[6]. Кессених, А.В. К 100-летию со дня рождения академика Е.К. Завойского [Текст] / А.В. Кессених // УФН. – 2007. – Т.177, №9. – С.1029–1030.

[7]. Силкин, И.И. Евгений Константинович Завойский. Документальная хроника научной и педагогической деятельности в Казанском университете [Текст] / И.И. Силкин. – Казань: Изд-во КГУ, 2007. – 240 с.

[8]. История физики и астрономии в Казанском университете за 200 лет. Коллективная монография [Текст] / Отв. ред.: А.В. Аганов, М.Х. Салахов; Сост. и ред. Н.С. Альтшулер. – Казань: Изд-во КГУ, 2007. – 498 с.

[9]. Альтшулер, С.А. Электронный парамагнитный резонанс [Текст] / С.А. Альтшулер, Б.М. Козырев. – М.: Физматгиз, 1961. – 368 с.

[10]. Альтшулер, С.А. Электронный парамагнитный резонанс соединений элементов промежуточных групп [Текст] / С.А. Альтшулер, Б.М. Козырев. – М.: Наука, 1972. – 672 с.

[11]. Аганов А.В. Жизнь в науке и наука жизни. Магнитный резонанс и его люди [Текст] / А.В. Аганов. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2013. – 354 с.

[12]. Евгений Константинович Завойский. Серия «Выдающиеся ученые Курчатовского института» [Текст] / Под ред. К.В. Чукбара; Составитель В.А. Скорюпин. – М.: НИЦ «Курчатовский Институт», 2017. – 198 с.

[13]. Тагиров, М.С. Физические институты Академии Наук СССР а Казанском университете в годы Великой Отечественной войны [Текст] / М.С. Тагиров, Б.Г. Тарасов, С.Б. Писарева. – Казань: Изд-во Казанс. ун-та, 2005. – С.41.

[14]. Ильясов, А.В. Среди великих людей [Текст] / А.В. Ильясов. – Казань: АНТ, 2016. – 102 с.

[15]. Эндрю, Э.Р. Ядерный магнитный резонанс [Текст] / Перевод с англ. Н.М. Померанцева и Е.Н. Скубур; Под ред. В. Н. Лазукина. – Москва: Изд-во иностр. лит., 1957. – 299 с.

[16]. Леше, Артур. Ядерная индукция [Текст]: Пер. с нем. / Под ред. [и с предисл.] П.М. Бородина. – Москва: Изд-во иностр. лит., 1963. – 684 с.

[17]. Попл, Дж. Спектры ядерного магнитного резонанса высокого разрешения [Текст] / Дж. Попл, В. Шнейдер, Г. Бернштейн; Перевод с англ. В. Ф. Быстрова [и др.]; Под ред. д-ра физ.-мат. наук Н.Д. Соколова. – Москва: Изд-во иностр. лит., 1962. – 592 с.

[18]. Научное сообщество физиков СССР, 1950–1960-е годы [Текст]: документы, воспоминания, исследования / Российская акад. наук, Ин-т истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова; сост. и ред.: В.П. Визгин и А.В. Кессених. – Санкт-Петербург: Изд-во Русской христианской гуманитарной акад., 2005: а) Вып. 1. – 2005. – 719 с.; б) Вып. 2. – 2007. – 751 с.

[19]. А.В. Кессених. Как в СССР покоряли ЯМР. Развитие аналитических методов в СССР и России. Часть 1 [Текст] / А.В. Кессених // Аналитика. Научно-технический журнал. – 2016. – Вып. 1., Т. 26. – С. 80-96.

[20] а). Kochelaev, B.I. EPR study of the dynamic spin susceptibility in heavily doped  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+d}$  [Text] / B.I. Kochelaev, J. Sichelschmidt, B. Elschner and A. Loidl // Phys. Rev. B. – 1995. – Vol. 51. – P. 9199; б). Sichelschmidt, T. Intrinsic EPR in  $\text{LaSrCuO}_4$ : Manifestation of Three-Spin Polarons [Text] / T. Sichelschmidt, B. Elschner, B. Lemor, B. Kochelaev and A. Loidl // Phys. Rev. Lett. B. – 1997. – Vol.79. – P.4274.

[21]. а). Shengelaya, A. EPR in  $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ : Relaxation and bottleneck [Text] / A. Shengelaya, Guo-meng Zhao, H. Keller, K.-A. Müller, B.I. Kochelaev // Phys. Rev. B. – 2000. – Vol. 61. – P. 5888; б). Kochelaev, B.I. Three-Spin Polarons and their Elastic Interactions in Cuprates [Text] / B.I. Kochelaev, A.M. Safina, A. Shengelaya, H. Keller, K.-A. Müller, K. Conder // J. Modern Physics Letters. – 2003. – B. 17. – P. 415; в). Deisenhofer, J. Orbital order parameter in  $\text{La}_{0.95}\text{Sr}_{0.05}\text{MnO}_3$  probed by electron spin resonance [Text] / J. Deisenhofer, B.I. Kochelaev, E. Shilova, A.M. Balbashov, A. Loidl, and H.-A. Krug von Nidda // Phys. Rev. B. – 2003. – Vol. 68, P. 214427; г). Kochelaev, B.I. Oxygen Isotope Effects on  $T_c$  Related to Polaronic Superconductivity in Underdoped Cuprates [Text] / B.I. Kochelaev, K.-A. Müller, A. Shengelaya // Journal of Modern Physics. – 2014. – Vol. 5. – P. 473; д). Maisuradze, A. Probing the  $\text{Yb}^{3+}$  spin relaxation in  $\text{Y}_{0.98}\text{Yb}_{0.02}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  by electron paramagnetic resonance [Text] / A. Maisuradze, A. Shengelaya, B.I. Kochelaev, E. Pomjakushina, K. Conder, H. Keller, K.-A. Müller // Physical Review B. – 2009. – Vol. 79. – P. 54519.

[22] а). Kochelaev, B.I. Spin Texture and Spin Dynamics in Superconducting Cuprates Near the Phase Transition Revealed by the Electron Paramagnetic Resonance [Text] / B.I. Kochelaev // Journal of Low Temperature Physics. – 2016. – Vol. 185. – P. 417–430; б). Kochelaev, B.I. Spin-Phonon Interaction and the EPR Linewidth in  $\text{La}_2\text{CuO}_4$  and Related Cuprates [Text] / B.I. Kochelaev // J. Superconductivity. – 1999. – Vol.

12. – P. 53; **в**). Belov, S.I. Spin waves in Heisenberg two-dimensional antiferromagnets  $S = 1/2$  with skyrmions [Text] / S.I. Belov, B.I. Kochelaev // Solid State Commun. – 1997. – Vol. 103. – P. 249-253; **г**). Kochelaev, B.I. Why could electron spin resonance be observed in a heavy fermion Kondo lattice? [Text] / B.I. Kochelaev, S.I. Belov, A.M. Skvortsova, A.S. Kutuzov, J. Sichelschmidt, J. Wykhoff, C. Geibel, F. Steglich // Eur. Phys. J. B. – 2009. – Vol. 72. – P. 485; **д**). Belov, S.I. Kondo lattice with heavy fermions: peculiarities of spin kinetics [Text] / S.I. Belov, A.S. Kutuzov, B.I. Kochelaev, and J. Sichelschmidt // J. Phys: Condens. Matter. – 2012. – Vol. 24, P. 365601; **е**). Kochelaev, B.I. Magnetic properties and spin kinetics of a heavy-fermion Kondo lattice [Text] / B.I. Kochelaev // Low Temperature Physics. – 2017. – Vol. 43. – P. 76–85; **ж**). Кочелаев, Б.И. Распределение локального магнитного поля вихревой решетки вблизи поверхности анизотропного сверхпроводника [Текст] / Б.И. Кочелаев, Е.П. Шарин // Сверхпроводимость: физ., химия, техн. – 1992. – Вып. 5, №11. – С.1982–1992; **з**). Кочелаев, Б.И. Форма линии магнитного резонанса в сверхпроводниках второго рода с учетом скин-эффекта [Текст] / Б.И. Кочелаев, Ю.Н. Прошин, С.Л. Царевский // ФТТ. – 1996. – Вып. 38, №11. – С.3220–3225; **и**). Khusainov, M.G. NMR Line Shape in Anisotropic Superconductors lattice [Text] / M.G. Khusainov, Yu.N. Proshin, S.A. Efremova, S.L. Tsarevskii // Physica B. – 2000. – Vol.284-288. – P. 927–928.

[23] **а**). Bertaina, S. Cross-relaxation and phonon bottleneck effects on magnetization dynamics in  $\text{LiYF}_4:\text{Ho}^{3+}$  crystals [Text] / S. Bertaina, B. Barbara, R. Giraud, B.Z. Malkin, M.V. Vanuynin, A.I. Pominov, A.L. Stolov, A.M. Tkachuk // Phys. Rev. B. – 2006. – Vol. 74, N18. – P. 184421; **б**). Malkin, B.Z.  $^{19}\text{F}$  nuclear spin relaxation and spin diffusion effects in the single-ion magnet  $\text{LiYF}_4:\text{Ho}^{3+}$  [Text] / B.Z. Malkin, M.V. Vanyunin, M.J. Graf, J. Lago, F. Borsa, A. Lascialfari, A.M. Tkachuk, B. Barbara // Eur. Phys. J. B. – 2008. – Vol. 66, N2. – P.155–163; **в**). Rakhmatullin, R.M. Coherent spin manipulations in  $\text{Yb}^{3+}:\text{CaWO}_4$  at X and W – band EPR frequencies [Text] / R.M. Rakhmatullin, I.N. Kurkin, G.V. Mamin, S.B. Orlinskii, M.R. Gafurov, E.I. Baibekov, B.Z. Malkin, S.



Gambarelli, S. Bertaina, B. Barbara // *Phys. Rev. B.* – 2009. – Vol. 79, N17. – P. 172408; **г**). Bertaina, S. Spin-orbit qubits of rare earth ions in axially symmetric crystal fields [Text] / S. Bertaina, J.H. Shim, S. Gambarelli, B.Z. Malkin, B. Barbara // *Phys Rev Lett.* – 2009. – Vol.103, N22. – P. 226402; **д**). Johnson, R.C.  $\mu$ SR Study of Spin Dynamics in  $\text{LiY}_{1-x}\text{Ho}_x\text{F}_4$  [Text] / R.C. Johnson, K. Chen, S.R. Giblin, J.S. Lord, A. Amato, C. Baines, B. Barbara, B.Z. Malkin, M.J. Graf // *Phys. Rev. B.* – 2011. – Vol. 83, N17. – P. 174440 (1–5); **е**). Johnson, R.C. Evolution of Spin Relaxation Processes in  $\text{LiY}_{1-x}\text{Ho}_x\text{F}_4$  with Increasing  $x$  Studied via AC-susceptibility and Muon Spin Relaxation [Text] / R.C. Johnson, B.Z. Malkin, J.S. Lord, S.R. Giblin, A. Amato, C. Baines, A. Lascialfari, B. Barbara and M. J. Graf // *Phys. Rev. B.* – 2012. – Vol. 86. – P. 014427.

[24]. **а**). Shakurov, G.S. Random strain effects in Optical and EPR spectra of electron-nuclear excitations in  $\text{CaWO}_4:\text{Ho}^{3+}$  single crystals [Text] / G.S. Shakurov, E.P. Chukalina, M.N. Popova, B.Z. Malkin, A.M. Tkachuk // *Physical Chemistry Chemical Physics.* – 2014. – Vol. 16. – P. 24727; **б**). Shakurov, G.S. Direct measurements of anticrossings of the electron-nuclear energy levels in  $\text{LiYF}_4:\text{Ho}^{3+}$  with the submillimeter EPR spectroscopy [Text] / G.S. Shakurov, M.V. Vanyunin, B.Z. Malkin, B. Barbara, R.Yu. Abdulsabirov, S.L. Korableva // *Appl. Magn. Res.* – 2005. – Vol. 28. – P. 251–265. **в**). Boldyrev, K.N. Direct Observation of Hyperfine Level Anticrossings in High Resolution Optical Spectra [Text] / K.N. Boldyrev, M.N. Popova, B.Z. Malkin, N.M. Abishev // *Phys. Rev. B.* – 2019. – Vol. 99. – P. 04; **г**). Malkin, B.Z. Magnetic and spectral properties of multi-sublattice oxides  $\text{SrY}_2\text{O}_4:\text{Er}^{3+}$  and  $\text{SrEr}_2\text{O}_4$  [Text] / B.Z. Malkin, S.I. Nikitin, R.V. Yusupov, I.F. Gilmutdinov, I.E. Mumdzhi, R.G. Batulin, A.G. Kiiamov, D.G. Zverev, B.F. Gabbasov, D.T. Androja, O. Young, O.A. Petrenko // *Phys. Rev. B.* – 2015. – Vol. 92. – P. 094415-1–094415-13.

[25]. **а**). Schaile, S. ESR evidence for partial melting of the orbital order in  $\text{LaMnO}_3$  below the Jahn-Teller transition [Text] / S. Schaile, H.-A. Krug von Nidda, J. Deisenhofer, M. V. Eremin, Y. Tokura, A. Loidl // *Phys. Rev. B.* – 2014. – V. 90, – P. 054424; **б**). Fayzullin, M.A. Spin cor-

relations and Dzyaloshinskii-Moriya interaction in  $\text{Cs}_2\text{CuCl}_4$  [Text] / M.A. Fayzullin, R.M. Eremina, M.V. Eremin, A. Dittl, N. van Well, F. Ritter, W. Assmus, J. Deisenhofer, H.-A. Krug von Nidda, A. Loidl // Schaile, S. ESR evidence for partial melting of the orbital order in  $\text{LaMnO}_3$  below the Jahn-Teller transition [Text] / S. Schaile, H.-A. Krug von Nidda, J. Deisenhofer, M. V. Eremin, Y. Tokura, A. Loidl // Phys. Rev. B. – 2013. – V. 88. – P. 174421; **в**). Trokiner, A. Melting of the orbital order in  $\text{LaMnO}_3$  probed by NMR [Text] / A. Trokiner, S. Verkhovskii, A. Gerashenko, Z. Volkova, O. Anikeenok, K. Mikhalev, M. Eremin, and L. Pinsard-Gaudart // Phys. Rev. B. -2013. – Vol. 87. – P. 125142; **г**). Deisenhofer, J. Electron spin resonance and exchange paths in the orthorhombic dimer system  $\text{Sr}_2\text{VO}_4$  [Text] / J. Deisenhofer, S. Schaile, J. Teyssier, Zhe Wang, M. Hemmida, H.-A. Krug von Nidda, R. M. Eremina, M.V. Eremin, R. Viennois, E. Giannini, D. van der Marel, A. Loidl // Phys. rev. B. – 2012. – Vol. 86. – P. 214417; **д**). Eremin, M.V. Dynamical Dzyaloshinsky-Moriya Interaction in  $\text{KCuF}_3$  [Text] / M.V. Eremin, D.V. Zakharov, H.-A. Krug von Nidda, R.M. Eremina, A. Shuvaev, A. Pimenov, P. Ghigna, J. Deisenhofer, A. Loidl // Phys. Rev. Lett. – 2008. – Vol. 101. – P.147601; **е**). Zakharov, D.V. Exchange and Relaxation in Spin Chains. In book: Quantum Magnetism. [Text] / D.V. Zakharov, H.- A. Krug von Nidda, M. V. Eremin, J. Deisenhofer, R.M. Eremina, A. Loidl; ed. by B. Barbara et al. – Dordrecht: Springer, 2008. – P. 193–238; **ж**). Eremin, M.V. Unconventional Anisotropic Superexchange in  $\text{a-NaV}_2\text{O}_5$  [Text] / M.V.Eremin, D.V. Zakharov, R.M. Eremina, J. Deisenhofer, H.-A. Krug von Nidda, G. Obermeier, S. Horn, A. Loidl // Phys. Rev. Lett. – 2006. – Vol.96 – P . 027209.

[26]. Savinkov, A.V. Anisotropic magnetic susceptibility and crystal field analysis in the Van Vleck paramagnet  $\text{PrF}_3$  [Text] / A.V. Savinkov, D.S. Irisov, B.Z. Malkin, K.R. Safiullin, H. Suzuki, M.S. Tagirov, D.A. Tayurskii // J. Phys.: Cond. Matt. – 2006. – Vol.18. – P. 6337–6447.

[27]. **а**). Tayurskii, D.A. Cross-relaxation in paramagnetic crystals at low temperatures [Text] / D.A. Tayurskii // Physica B. – 1990. – Vol. 165&166, part 1. – P. 231–232; **б**). Tayurskii, D.A. Spin kinetics in para-

magnets at low temperatures [Text] / D.A. Tayurskii // *Physica Status Solidi B*. – 1989. – Vol. 152. – P. 645–655; **в**). Tayurskii, D.A. Cross-relaxation in paramagnetic crystals at low temperatures [Text] / D.A. Tayurskii // *Sov. Phys. Solid State*. – 1989. – Vol. 31, N 11. – P. 1890–1893; **г**). Tayurskii, D.A. Low temperature spin kinetics of paramagnetic cubic crystals [Text] / D.A. Tayurskii // *Sov. Phys. Solid State*. – 1988. – Vol. 30, N 11. – P. 1995–1996; **д**). Kochelaev, B.I. Spin kinetics in paramagnetic crystals at low temperatures [Text] / B.I. Kochelaev, D.A. Tayurskii // *Sov. Phys. Solid State*. – 1988. – Vol. 30, N 10. – P. 1769–1774.

[28]. **а**). Alakshin, E.M. On the thermodynamic equilibrium in the  $^3\text{He}$ -aerogel system at low temperatures [Text] / E.M. Alakshin, R.R. Gazizulin, A.V. Klochkov, V.V. Kuzmin, N. Mulders, M.S. Tagirov, D.A. Tayurskii // *JETP Lett.* – 2011. – Vol. 93, N.4. – P.223-225; **б**). Egorov, A.V. The Study of the System “Van Vleck Paramagnet  $\text{PrF}_3$ - Helium-3” [Text] / A.V. Egorov, D.S. Irisov, A.V. Klochkov, K. Kono, V.V. Kuzmin, K.R. Safiullin, M.S. Tagirov, D.A. Tayurskii, A.N. Yudin // *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2009. – Vol. 150. – P. 032019(1–4); **в**). Klochkov, A.V. Nuclear Magnetic Relaxation of  $^3\text{He}$  in Contact with an Aerogel above the Fermi Temperature [Text] / A.V. Klochkov, V.V. Kuz'min, K.R. Safiullin, M.S. Tagirov, D.A. Tayurskii, N. Mulders // *JETP Lett.* – 2008. – Vol. 88. – P. 823–827; **г**). Mamin, G.V. Electron Paramagnetic Resonance of Radiation-Induced Paramagnetic Centers in an Aerogel [Text] / G.V. Mamin, A.A. Rodionov, M.S. Tagirov, D.A. Tayurskii, N. Mulders // *JETP Lett.* – 2008. – Vol. 88. – P. 244–248; **д**). Tagirov, M.S. Nuclear Spin-Kinetics of  $^3\text{He}$  in Carbonizates with Various Porosity [Text] / M.S. Tagirov, A.N. Yudin, G.V. Mamin, A.A. Rodionov, D.A. Tayurskii, A.V. Klochkov, R.L. Belford, P.J. Ceroke, B.M. Odintsov // *JLTP*. – 2007. – Vol. 148, N. 5–6. – P. 815–819; **е**). Mamin, G.V. Effect of phase transitions of helium-3 in pores of wood carbonizate on the spin kinetics of  $^3\text{He}$  nuclei [Text] / G.V. Mamin, M.S. Tagirov, D.A. Tayurskii, A.N. Yudin, R.L. Belford, P.J. Ceroke, B.M. Odintsov // *JETP Lett.* – 2006. – Vol. 84, N 1. – P. 41–44; **ж**). Naletov, V.V. Magnetic coupling between liquid  $^3\text{He}$  and solid insula-

tors (Review) [Text] / V.V. Naletov, M.S. Tagirov, D.A. Tayurskii // *Low Temp. Phys.* – 2002. – Vol. 28, N5. – P. 299–311; з). Klochkov, A.V. Magnetic coupling between liquid  $^3\text{He}$  and a solid substrate: a new approach [Text] / A.V. Klochkov, V.V. Naletov, D.A. Tayurskii, M.S. Tagirov, H. Suzuki // *Physics B.* – 2000. – Vol. 284. – P. 210–211; и). Tagirov, M.S. Possible dynamic polarization of nuclei through the use of dielectric Van Vleck paramagnet [Text] / M.S. Tagirov, D.A. Tayurskii // *JETP Lett.* – 1995. – Vol. 61, N8. – P. 672–675; к). Naletov, V.V. Relaxation of the nuclear magnetism of liquid He-3 at the surface of paramagnetic crystals [Text] / V.V. Naletov, M.S. Tagirov, D.A. Tayurskii, M.A. Teplov // *JETP.* – 1995. – Vol. 81, N2. – P. 311–319.

[29]. а). Mukhamedshin, I.R.  $^3\text{Na}$  NMR evidence for charge order and anomalous magnetism in  $\text{Na}_x\text{CoO}_2$  [Text] / I.R. Mukhamedshin, H. Alloul, G. Collin, N. Blanchard // *Phys. Rev. Lett.* – 2004. – Vol. 93, N 16. – P. 167601; б). Mendels, P. Cascade of bulk magnetic phase transitions in  $\text{Na}_x\text{CoO}_2$  as studied by muon spin rotation [Text] / P. Mendels, D. Bono, J. Bobroff et al. // *Phys. Rev. Lett.* – 2005. – Vol. 94, N 13. – P. 136403; в). Mukhamedshin, I.R.  $^{59}\text{Co}$  NMR study of the Co states in superconducting and anhydrous cobaltates [Text] / I.R. Mukhamedshin, H. Alloul, G. Collin, N. Blanchard // *Phys. Rev. Lett.* – 2005. – Vol. 94, N 24. – P. 247602; г). Alloul, H. Na atomic order, Co charge disproportionation and magnetism in  $\text{Na}_x\text{CoO}_2$  for large Na contents [Text] / H. Alloul, I.R. Mukhamedshin, G. Collin, N. Blanchard // *EPL (Europhysics Letters)*. – 2008. – Vol. 82, N 1. – P. 17002; д). Alloul, H. Na ordering imprints a metallic kagomé lattice onto the Co planes of  $\text{Na}_{2/3}\text{CoO}_2$  [Text] / H. Alloul, I.R. Mukhamedshin, T.A. Platova, A.V. Dooglav // *EPL (Europhysics Letters)*. – 2009. – Vol. 85, N 4. – P. 47006; е). Platova, T.A. Nuclear quadrupole resonance and x-ray investigation of the structure of  $\text{Na}_{2/3}\text{CoO}_2$  [Text] / T.A. Platova, I.R. Mukhamedshin, H. Alloul et al. // *Phys. Rev. B.* – 2009. – Vol. 80, N 22. – P. 224106; ж). Platova, T.A. Phase segregation in  $\text{Na}_x\text{CoO}_2$  for large Na contents [Text] / T.A. Platova, I.R. Mukhamedshin, A.V. Dooglav, H. Alloul // *Письма в ЖЭТФ.* – 2010. – Т. 91, № 7–8. – С. 457–460; з). Mukhamedshin, I.R.  $^{59}\text{Co}$  NMR evidence for

charge and orbital order in the kagome-like structure of  $\text{Na}_{2/3}\text{CoO}_2$  [Text] / I.R. Mukhamedshin, H. Alloul // *Phys. Rev. B.* – 2011. – Vol. 84. – P. 155112; **и**). Alloul, H.  $^{23}\text{Na}$  NMR study of sodium order in  $\text{Na}_x\text{CoO}_2$  with 22 K Néel temperature [Text] / H. Alloul, I.R. Mukhamedshin, A.V. Dooglav et al. // *Phys. Rev. B.* – 2012. – Vol. 85. – P. 134433; **к**). Mukhamedshin, I.R. Complex magnetic differentiation of cobalts in  $\text{Na}_x\text{CoO}_2$  with 22 K Néel temperature [Text] / I.R. Mukhamedshin, I.F. Gilmutdinov, M.A. Salosin, H. Alloul // *Письма в ЖЭТФ.* – 2014. – Т. 99. – С. 542–546; **л**). Mukhamedshin, I.R. Evolution of Co charge disproportionation with Na order in  $\text{Na}_x\text{CoO}_2$  [Text] / I.R. Mukhamedshin, A.V. Dooglav, S.A. Krivenko, H. Alloul // *Phys. Rev. B.* – 2014. – Vol. 90. – P. 115151; **м**). Lysogorskiy, Y.V. Origin of electron disproportionation in metallic sodium cobaltates [Text] / Y.V. Lysogorskiy, S.A. Krivenko, I.R. Mukhamedshin et al. // *Phys. Rev. B.* – 2016. – Vol. 94. – P. 205138.

[30]. **а**). Alakshin, E.M. Annealing of  $\text{PrF}_3$  Nanoparticles by Microwave Irradiation [Text] / E.M. Alakshin, R.R. Gazizulin, A.V. Klochkov, S.L. Korableva, T.R. Safin, K.R. Safiullin, M.S. Tagirov // *Optics and Spectroscopy.* – 2014. – Vol. 116, I. 5. – P.721–723; **б**). Alakshin, E.M. The influence of restricted geometry of diamagnetic nanoporous media on  $^3\text{He}$  relaxation [Text] / E.M. Alakshin, R.R. Gazizulin, M.Y. Zakharov, A.V. Klochkov, E.V. Morozov, T.M. Salikhov, T.R. Safin, K.R. Safiullin, M.S. Tagirov, O.B. Shabanova // *Low Temperature Physics.* – 2015. – V. 41. – I. 1 – P. 39; **в**). Alakshin, E.M. Comments on the cross-relaxation effect between adsorbed  $^3\text{He}$  and  $\text{PrF}_3$  nanoparticles [Text] / E.M. Alakshin, R.R. Gazizulin, A.M. Gazizulina, A.V. Klochkov, S.B. Orlinskii, A.A. Rodionov, T.R. Safin, K.R. Safiullin, M.S. Tagirov, M.Yu. Zakharov // *ФНТ.* – 2015. – Т. 41, В. 1. – С.62–64.

[31]. **а**). Alakshin, E.M. Long-lived free induction decay signal in  $\text{CsMnF}_3$  single crystal [Text] / E.M. Alakshin, Yu.M. Bunkov, R.R. Gazizulin, A.M. Gazizulina, L.I. Isaenko, A.V. Klochkov, T.R. Safin, K.R. Safiullin, M.S. Tagirov, V.N. Vedenyapin, S.A. Zhurkov // *Magnetic Resonance in Solids.* – 2014. – Vol. 16, N 3. – P. 14302 (4pp); **б**). Tagirov, M.S. Magnon BEC in Antiferromagnets with Suhl–Nakamura Interaction

[Text] / M.S. Tagirov, E.M. Alakshin, Yu.M. Bunkov, R.R. Gazizulin, A.M. Gazizulina, L.I. Isaenko, A.V. Klochkov, T.R. Safin, K.R. Safiullin, S.A. Zhurkov // Journal of Low Temperature Physics. – 2014. – Vol. 175, N 1–2. – P.167–176.

[32]. **а).** Bunkov, Y.M. Nonresonant Excitation of a Magnon Bose–Einstein Condensate in  $\text{MnCO}_3$  [Text] / Y.M. Bunkov, A.V. Klochkov, T.R. Safin, K.R. Safiullin, M.S. Tagirov // JETP Letters. – 2019. – Vol.109. – P.40–44; **б).** Bunkov, Y.M. Magnon condensation and spin superfluidity [Text] / Y.M. Bunkov, V.L. Safonov // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2018. – Vol. 452. – P. 30; **в).** Abdurakhimov, L.V. Nonlinear NMR and magnon BEC in antiferromagnetic materials with coupled electron and nuclear spin precession [Text] / L.V. Abdurakhimov, M.A. Borich, Y.M. Bunkov, R.R. Gazizulin, D. Konstantinov, M.I. Kurkin, A.P. Tankeyev // Physical Review B. – 2018. – Vol.97. – P. 024425; **г).** Bunkov, Y.M. Goldstone mode of a magnon Bose–Einstein condensate in  $\text{MnCO}_3$  / Y.M. Bunkov, A.V. Klochkov, T.R. Safin, K.R. Safiullin, M.S. Tagirov // JETP Letters. – 2017. – Vol. 106. – P.677–681; **д).** Gazizulin, R.R. Y Critical parameters of nuclear magnon Bose–Einstein condensation in systems with dynamic frequency shift [Text] / R.R. Gazizulin, Y.M. Bunkov, V.L. Safonov // JETP Letters. – 2015. – Vol. 102. – P.766–770; **е).** Bunkov, Y.M. Observation of majorana quasiparticles' edge states in superfluid  $^3\text{He}$  [Text] / Y.M. Bunkov, R.R. Gazizulin // Applied Magnetic Resonance. – 2014. – Vol.45. – P. 1219–1224; **ж).** Alakshin, E.M. Experimental Setup for Observation the Bose-Einstein Condensation of Magnons in Solid Antiferromagnets  $\text{CsMnF}_3$  and  $\text{MnCO}_3$  [Text] / E.M. Alakshin, Y.M. Bunkov, R.R. Gazizulin, A.V. Klochkov, V.V. Kuzmin, R.M. Rakhmatullin, A.M. Sabitova, T.R. Safin, M.S. Tagirov // Applied Magnetic Resonance. – 2013. – Vol. 44. – P.595–603; **з).** Bunkov, Y.M. High- $T_c$  spin superfluidity in antiferromagnets [Text] / Y.M. Bunkov, E.M. Alakshin, R.R. Gazizulin, A.V. Klochkov, V.V. Kuzmin, V.S. L'Vov, M.S. Tagirov // Physical Review Letters. – 2012. – Vol. 108. – P. 177002; **и).** Bunkov, Y.M. Discovery of the classical Bose-Einstein condensation

of magnons in solid antiferromagnets [Text] / Y.M. Bunkov, E.M. Alakshin, R.R. Gazizulin, A.V. Klochkov, V.V. Kuzmin, T.R. Safin, M.S. Tagirov // JETP Letters. – 2011. – Vol. 94. – P. 68–72.

[33]. **а).** Mukhamedshin, I.R.  $^{59}\text{Co}$  NMR evidence for charge and orbital order in the kagome-like structure of  $\text{Na}_{2/3}\text{CoO}_2$  [Text] / I.R. Mukhamedshin, H. Alloul // Physical Review B. – 2011. – Vol. 84. – P. 155112; **б).** Mukhamedshin, I.R. Evolution of Co charge disproportionation with Na order in  $\text{Na}_x\text{CoO}_2$  [Text] / I.R. Mukhamedshin, A.V. Dooglav, S.A. Krivenko, H. Alloul // Physical Review B. – 2014. – Vol. 90. – P. 115151; **в).** Lysogorskiy, Y.V. Origin of electron disproportionation in metallic sodium cobaltates [Text] / Y.V. Lysogorskiy, S.A. Krivenko, I.R. Mukhamedshin, O.V. Nedopekin, D.A. Tayurskii // Physical Review B. – 2016. – Vol. 94. – P. 205138; **г).** Seidov, Z. Magnetic properties of the covalent chain antiferromagnet  $\text{RbFeSe}_2$  [Text] / Z. Seidov, V. Tsurkan, F. Vagizov, H.-A. Krug von Nidda, I. Filipova, A. Günther, T. Gavrilova, A.G. Kiiamov, L.R. Tagirov, A. Loidl // Physical Review B. – 2016. – Vol. 94. – P. 134414; **д).** Kiiamov, A.G. Vibrational properties and magnetic specific heat of the covalent chain antiferromagnet  $\text{RbFeSe}_2$  [Text] / A.G. Kiiamov, Y.V. Lysogorskiy, F.G. Vagizov, L.R. Tagirov, D.A. Tayurskii, Z. Seidov, H.-A. Krug von Nidda, V. Tsurkan, D. Crotori, A. Günther, F. Mayer, A. Loidl // Physical Review B. – 2018. – Vol. 98. – P. 21441; **е).** Kiiamov, A.G. Mössbauer spectroscopy evidence of intrinsic non-stoichiometry in iron telluride single crystals [Text] / A.G. Kiiamov, Y.V. Lysogorskiy, F.G. Vagizov, L.R. Tagirov, D.A. Tayurskii, D. Crotori, V. Tsurkan, A. Loidl // Annalen der Physik (Berlin). – 2017. – Vol. 529. – P. 1600241.

[34]. **а).** Aktaş, B. Magnetic anisotropies in ultra-thin iron films grown on the surface-reconstructed GaAs substrate [Text] / B. Aktaş, B. Heinrich, G. Woltersdorf, R. Urban, L.R. Tagirov, F. Yıldız, K. Özdoğan, M. Özdemir, O. Yalçın, B.Z. Rameev / Journal of Applied Physics. – 2007. – Vol. 102. – P.013912; **б).** Salikhov, R.I. Spin screening effect in superconductor/ferromagnet thin film heterostructures studied using nuclear magnetic resonance [Text] / R.I. Salikhov, N.N. Garif'yanov, I.A.

Garifullin, L.R. Tagirov, K. Westerholt, H. Zabel // *Physical Review B*. – 2009. – Vol. 80. – P. 214523; **б**). Zdravkov, V.I. Reentrant superconductivity in superconductor/ferromagnetic-alloy bilayers [Text] / V.I. Zdravkov, J. Kehrle, G. Obermeier, S. Gsell, M. Schreck, C. Müller, H.-A. Krug von Nidda, J. Lindner, J. Moosburger-Will, E. Nold, R. Morari, V.V. Ryazanov, A.S. Sidorenko, S. Horn, R. Tidecks, L.R. Tagirov // *Physical Review B*. – 2010. — Vol. 82. – P. 054517; **г**). Zdravkov, V.I. Experimental observation of the triplet spin-valve effect in a superconductor-ferromagnet heterostructure [Text] / V.I. Zdravkov, J. Kehrle, G. Obermeier, D. Lenk, H.-A. Krug von Nidda, C. Müller, M.Yu. Kupriyanov, A.S. Sidorenko, S. Horn, R. Tidecks, L.R. Tagirov // *Physical Review B*. – 2013. – Vol. 87. – P. 144507; **д**). Zdravkov, V.I. Memory effect and triplet pairing generation in the superconducting exchange biased  $\text{Co}/\text{CoO}_x/\text{Cu}_{41}\text{Ni}_{59}/\text{Nb}/\text{Cu}_{41}\text{Ni}_{59}$  layered heterostructure [Text] / V.I. Zdravkov, D. Lenk, R. Morari, A. Ullrich, G. Obermeier, C. Müller, H.A. Krug von Nidda, A.S. Sidorenko, S. Horn, R. Tidecks, and L.R. Tagirov // *Applied Physics Letters*. – 2013. – V.103. – P. 062604; **е**). Lenk, D. Influence of the FFLO-like state on the upper critical field of a superconductor/ferromagnet bilayer: Angular and temperature dependence [Text] / D. Lenk, M. Hemmida, R. Morari, V. I. Zdravkov, A. Ullrich, C. Müller, A. S. Sidorenko, S. Horn, L. R. Tagirov, A. Loidl, H.-A. Krug von Nidda, R. Tidecks // *Physical Review B*. – 2016. – Vol. 93. – P.1 84501; **ж**). Lenk, D. Full switching FSF-type superconducting spin-triplet MRAM-element [Text] / D. Lenk, R. Morari, V.I. Zdravkov, A. Ullrich, G. Obermeier, C. Müller, A.S. Sidorenko, H.-A. Krug von Nidda, S. Horn, L.R. Tagirov, and R. Tidecks // *Physical Review B*. – 2017. – Vol. 96. – P.184521; **з**). Esmaili, A. FMR studies of ultra-thin epitaxial  $\text{Pd}_{0.92}\text{Fe}_{0.08}$  film [Text] / A. Esmaili, I.R. Vakhitov, I.V. Yanilkin, A.I. Gumarov, B.M. Khaliulin, B.F. Gabbasov, M.N. Aliyev, R.V. Yusupov, L.R. Tagirov // *Applied Magnetic Resonance*. – 2018. – Vol. 49. – P. 175–183; **и**). Esmaili, A. Epitaxial growth of thin  $\text{Pd}_{1-x}\text{Fe}_x$  films on MgO single crystal [Text] / A. Esmaili, I.V. Yanilkin, A.I. Gumarov, I.R. Vakhitov, B.F. Gabbasov,



A.G. Kiiamov, A.M. Rogov, Yu.N. Osin, A.E. Denisov, R.V. Yusupov, L.R. Tagirov // *Thin Solid Films*. – 2019. – Vol. 669. – P. 338–344.

[35]. а). Khusainov, M.G. Possibility of periodically reentrant superconductivity in ferromagnet/superconductor layered structures [Text] / M.G. Khusainov, Yu.N. Proshin // *Phys. Rev. B*. – 1997. – Vol. 56, N 22. – P. 14283–14286; б). Изюмов, Ю.А. Конкуренция сверхпроводимости и магнетизма в гетероструктурах ферромагнетик/сверхпроводник [Текст] / Ю.А. Изюмов, Ю.Н. Прошин, М.Г. Хусаинов // *Успехи физических наук*. – 2002. – Т. 172, N 2. – С. 113–154; в). Fazleev, N.G. Spin screening of magnetic moments and inverse proximity effect in ferromagnet/superconductor nanostructures [Text] / N.G. Fazleev, M.M. Khusainov, Yu.N. Proshin, M.G. Khusainov // *Journal of Applied Physics*. – 2006. – Vol. 99, 08M506. – 3 p.; г). Proshin, Y.N. Hierarchy of critical temperatures in four-layered ferromagnet/superconductor nanostructures and control devices [Text] / Y.N. Proshin, A. Zimin, N.G. Fazleev, M.G. Khusainov // *Phys. Rev B*. – 2006. – Vol. 73, N 1. – 184514 (12 pages); д). Хусаинов, М.Г. Сверхпроводящее зондирование электронных корреляций и обменного поля на основе эффекта близости в наноструктурах F/S [Текст] / М.Г. Хусаинов, М.М. Хусаинов, Н.М. Иванов, Ю.Н. Прошин // *Письма в ЖЭТФ*. – 2009. – Т.90, № 2. – С. 134–139; е). Avdeev, M. Influence of a parallel magnetic field on critical temperature and inhomogeneous current distribution of a ferromagnet/superconductor structure [Text] / M. Avdeev, M. Khusainov, Y. Proshin, S. Tsarevskii // *Superconductor Science and Technology*. – 2010. – Vol. 23. – P. 105005; ж). Авдеев, М.В. Переключатели тока на основе асимметричных наноструктур ферромагнетик-сверхпроводник с учетом триплетного канала во внешнем магнитном поле [Текст] / М.В. Авдеев, Ю.Н. Прошин // *ЖЭТФ*. – 2013. – Т. 144, вып.6 (12). – С. 1251–1259; з). Avdeev, M.V. The influence of an external magnetic field on the triplet proximity effect in ferromagnet/superconductor trilayers [Text] / M.V. Avdeev, Yu.N. Proshin // *Superconductor Science and Technology*. – 2014. – Vol. 27, N. 3. – P. 035006; и). Avdeev, M.V. Long-range spin-singlet proximity effect for a Josephson system with a

single-crystal ferromagnet due to its band-structure features [Text] / M.V. Avdeev, Yu.N. Proshin // *Phys. Rev B.* – 2018. – Vol. 97. – P. 100502(R); **к**). Хусаинов, М.Г. Уединенная возвратная сверхпроводимость в асимметричных трислоях ферромагнетик/сверхпроводник/ ферромагнетик [Текст] / М.Г. Хусаинов, М.М. Хусаинов, Н.М. Иванов, Ю.Н. Прошин // *Письма в ЖЭТФ.* – 2009. – Т. 90, № 5. – С. 402–407; **л**). Avdeev, M.V. How experimentally to detect a solitary superconductivity in dirty ferromagnet-superconductor trilayers? [Text] / M.V. Avdeev, Y.N. Proshin // *JMMM.* – 2017. – Vol. 440. – P. 116–118; **м**). Proshin, Yu.N. Interelectronic interaction in dirty FS trilayers: a manifestation of “hidden” superconductivity [Text] / Yu.N. Proshin, M.V. Avdeev // *JMMM.* – 2015. – Vol. 383. – P. 166–169; **н**). Туманов, В.А. Осцилляции критической температуры в гетероструктуре (Fe/Cr/Fe)/V/Fe [Текст] / В.А. Туманов, Ю.В. Горюнов, Ю.Н. Прошин // *Письма в ЖЭТФ.* – 2018. – Т. 107, Вып. 7. – С. 449 – 454.

[36]. **а**). Leo, A. Thick and thin film SiCN for pressure sensor at high temperature and influence of temperature on mechanical properties [Text] / A. Leo, S. Andronenko, I. Stiharu, R.B. Bhat // *Sensors.* – 2010. – Vol. 10. – P. 1338–1354; **б**). Misra, S.K. EPR and magnetization studies of polymer-derived Fe-doped SiCN nanoceramics annealed at various temperatures: blocking temperatures, superparamagnetism and size distribution [Text] / S.K. Misra, S. Andronenko, I. Gilmudtinov, R. Yusupov // *Applied Magnetic Resonance.* – 2018. – Vol. 49, N. 12. – P. 1397–1415; **в**). Andronenko, S.I. A variable temperature X- and W-band EPR study of Fe-doped SiCN ceramics annealed at 1000° C, 1100° C, and 1285° C: dangling bonds,—ferromagnetism and superparamagnetism [Text] / S.I. Andronenko, A.A. Rodionov, S.K. Misra // *Applied Magnetic Resonance.* – 2018. – Vol. 49, N. 4. – P. 335–344; **г**). Andronenko, S.I. EPR/FMR investigation of Mn-doped SiCN ceramics [Text] / S.I. Andronenko, A Leo, I Stiharu, SK Misra // *Applied magnetic resonance.* – 2010. – Vol. 39, N 4. – P. 347–356; **д**). Misra, S.K. EPR and FMR of SiCN ceramics and SiCN magnetic derivatives [Text] / S.K. Misra, S.I. Andronenko. – In eBook: “EPR in modern carbon-based materials”, Chapter 10, eBook series:

“Frontiers in Magnetic Resonance”, Bentham Science STM-publisher. Editors: D. Savchenko, A.H. Kassiba, 2018. – Vol. 1. – P. 197-224; **e**). Misra, S.K. An X- and Q-band  $\text{Fe}^{3+}$  EPR study of nanoparticles of magnetic semiconductor  $\text{Zn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}$  [Text] / S.K. Misra, S.I. Andronenko, A. Thurber, A. Punnoose, A. Nalepa // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2014. – Vol. 363. – P. 82–87; **ж**). Andronenko, S.I. Electron paramagnetic resonance study of  $(\text{La}_{0.33}\text{Sm}_{0.67})_{0.67}\text{Sr}_{0.33-x}\text{Ba}_x\text{MnO}_3$  ( $x < 0.1$ ): Griffiths phase [Text] / S.I. Andronenko, A.A. Rodionov, A.V. Fedorova, S.K. Misra // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2013. – Vol. 326. – P. 151–156.

[37]. **a**). Larionov, I.A. Spin dynamics in lightly doped  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ : Relaxation function within the t-J model [Text] / I.A. Larionov // Phys. Rev. B. – 2004. – Vol. 69. – P. 214525-1–214525-17; **б**). Larionov, I.A. Paramagnonlike excitations and spin diffusion in magnetic resonance studies of copper oxide superconductors [Text] / I.A. Larionov // Phys. Rev. B. – 2007. – Vol. 76. – P. 224503-1–224503-5; **в**). Larionov, I.A. Relaxation function theory of dynamic spin susceptibility in layered copper oxides: Implications for neutron resonance peak and  $\omega/T$  scaling [Text] / I.A. Larionov // Phys. Rev. B. – 2005. – Vol. 72. – P. 094505-1–094505-5; **г**). Larionov, I.A. Paramagnon excitations’ theory for resonant inelastic X-ray scattering in doped plane copper oxide superconductors [Text] / I.A. Larionov // Solid State Communications. – 2015. – Vol. 208. – P. 29–33; **д**). Carretta, P.  $^{89}\text{Y}$  nuclear magnetic resonance study of Ca-doped  $\text{Y}_{1-x}\text{Ca}_x\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$  from the underdoped to the overdoped superconducting regime [Text] / P. Carretta, A. Lascialfari, A. Rigamonti, P. Tedesco, F. Tedoldi, I.A. Larionov // Phys. Rev. B. – 2004. – Vol. 69. – P. 104512-1–104512-7.

[38]. **a**). Baranov, P.G. Silicon vacancy in SiC as a promising quantum system for single-defect and single-photon spectroscopy [Text] / P.G. Baranov, A.P. Bundakova, A.A. Soltamova, S.B. Orlinskii, I.V. Borovykh, R. Zondervan, R. Verberk, J. Schmidt // Phys. Rev. B. – 2011. – Vol. 83, N 12. – Art. N 125203; **б**). Biktagirov, T. Polytypism driven zero-field splitting of silicon vacancies in 6 H-SiC [Text] / T. Biktagirov, W.G.

Schmidt, U. Gerstmann, B. Yavkin, S. Orlinskii, P. Baranov, V. Soltamov // *Phys. Rev. B.* – 2018. – Vol. 98, N 19. P. 195204; **в**). Badalyan, A.G. Pulsed electron-nuclear double resonance diagnostics of Ce<sup>3+</sup> emitters in scintillating garnets [Text] / A.G. Badalyan, G.V. Mamin, Y.A. Uspenskaya, E.V. Edinach, H.R. Asatryan, N.G. Romanov, S.B. Orlinskii, P.G. Baranov, V.M. Khanin, H. Wiczorek, C. Ronda // *Phys. Status Solidi B Basic Res.* – 2017. – Vol. 254, N.5. – P.1600631; **г**). Gafurov, M.R. Quantitative analysis of Lewis acid centres of gamma-alumina by using EPR of the adsorbed anthraquinone as a probe molecule: Comparison with the pyridine, carbon monoxide IR and TPD of ammonia [Text] / M.R. Gafurov, I.N. Mukhambetov, B.V. Yavkin, G.V. Mamin, A.A. Lamberov, S.B. Orlinskii // *J. Phys. Chem. C.* – 2015. – Vol. 119, N 49. – P. 27410–27415; **д**). Мамин, Г.В. ЭПР-исследование упорядоченного аэрогеля на основе Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (EPR study of ordered Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-based aerogel) [Текст] / Г.В. Мамин, С.Б. Орлинский, А.А. Родионов, М.С. Тагиров // *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики.* – 2015. – Т. 102, вып. 9. – С.628–631; **е**). Mamin, G.V. Electron paramagnetic resonance of radiation-induced paramagnetic centers in an aerogel [Text] / G.V. Mamin, A.A. Rodionov, M.S. Tagirov, D.A. Tayurskii, N. Mulders // *JETP Letters.* – 2008. – Vol. 88 – P. 244.

[39]. **а**). Baranov, P.G., Electron spin resonance detection and identification of nitrogen centers in nanodiamonds [Text] / P.G. Baranov, I.V. Il'in, A.A. Soltamova, A.Ya. Vul', S.V. Kidalov, F.M. Shakhov, G.V. Mamin, S.B. Orlinskii, M.Kh. Salakhov // *JETP Letters.* – 2009. – Vol. 89, N 8. – P. 409–413; **б**). Soltamova, A.A. Electron paramagnetic resonance detection of the giant concentration of nitrogen vacancy defects in sintered detonation nanodiamonds [Text] / Soltamova, I.V. Il'in, F.M. Shakhov, S.V. Kidalov, A.Y. Vul', B.V. Yavkin, G.V. Mamin, S.B. Orlinskii, P.G. Baranov // *JETP Letters.* – 2010. – Vol. 92, N 2. – P. 102–106; **в**). Baranov, P.G. Enormously high concentrations of fluorescent nitrogen-vacancy centers fabricated by sintering of detonation nanodiamonds [Text] / P.G. Baranov, A.A. Soltamova, D.O. Tolmachev, N.G. Romanov, R.A. Babunts, F.M. Shakhov, S.V. Kidalov, A.Y. Vul', G.V. Mamin, S.B.

Orlinskii, N.I. Silkin // *Small*. – 2011. – Vol. 7, N 11. – P. 1533–1537; **г**). Yavkin, B.V. High-frequency pulsed ENDOR spectroscopy of the NV-centre in the commercial HPHT diamond [Text] / B.V. Yavkin, G.V. Mamin, S.B. Orlinskii // *J. Magn. Reson.* – 2016. – Vol. 262, N 1. – P.15–19; **д**). Soltamov, V. Paramagnetic Defects and Impurities in Nanodiamonds as Studied by Multi-frequency CW and Pulse EPR Methods [Text] / V. Soltamov, G. Mamin, S. Orlinskii, P. Baranov. – Chapter 5 in *Frontiers in Magnetic Resonance 1: Electron Paramagnetic Resonance in Modern Carbon-Based Nanomaterials*, Ed. D. Savchenko and A.H. Kassiba. – Bentham Science Publishing: Sharjah, UAE, 2018. – P. 182–196; **е**). Yavkin, B.V. Size-dependent concentration of N0 paramagnetic centres in HPHT nanodiamonds [Text] / B.V. Yavkin, G.V. Mamin, M.R. Gafurov, S.B. Orlinskii // *Magnetic Resonance in Solids. Electronic Journal*. – 2015. – Vol. 17, N1. – P. 15101 (1–7).

[40]. **а**). Bertaina, S. Rare-earth solid-state qubits [Text] / S. Bertaina, S. Gambarelli, A. Tkachuk, I.N. Kurkin, B. Malkin, A. Stepanov, B. Barbara // *Nature nanotechnology*. – 2007. – Vol. 2, N 1. – P. 39–42; **б**). Baibekov, E.I. Coherence times and Rabi oscillations in  $\text{CaWO}_4:\text{Cr}^{5+}$  crystal [Text] / E.I. Baibekov, I.N. Kurkin, M.R. Gafurov, B. Endeward, R.M. Rakhmatullin, G.V. Mamin // *J. Magn. Res.* – 2011. – Vol. 209. – P. 61–68; **в**). Baibekov, E.I. Decay of Rabi oscillations induced by magnetic dipole interactions in dilute paramagnetic solids [Text] / E.I. Baibekov // *JETP Letters*. – 2011. – Vol. 93. – P. 292–297 (Письма в ЖЭТФ. – 2011. – № 93. – С. 323-327); **г**). Baibekov, E.I. Coherent spin dynamics in a gadolinium-doped  $\text{CaWO}_4$  crystal [Text] / E.I. Baibekov, M.R. Gafurov, D.G. Zverev, I.N. Kurkin, A.A. Rodionov, B.Z. Malkin, B. Barbara // *Phys. Rev. B*. – 2017. – Vol. 95. – P. 064427(1–9)); **д**). Shim, J.H. Decoherence window and electron-nuclear cross relaxation in the molecular magnet  $\text{V}_{15}$  [Text] / J.H. Shim, S. Bertaina, S. Gambarelli, T. Mitra, A. Müller, E.I. Baibekov, B.Z. Malkin, B. Tsukerblat, B. Barbara // *Phys. Rev. Lett.* – 2012. – Vol. 109. – P. 050401(1–5); **е**). Baibekov, E.I. Transient nutations in magnetically diluted solids: an account of the spin flip-flop transitions [Text] / E.I. Baibekov // *J. Supercond. Nov. Magn.* – 2013. –

Vol. 26. – P. 1595–1597; **ж**). Baibekov, E.I. High temperature collective spin-photon coupling in a microwave cavity [Text] / E.I. Baibekov // Optics and Spectroscopy. – 2014. – Vol. 116. – P. 889–896 (Оптика и Спектроскопия. – 2014. – № 116. – С. 965–972); **з**). Baibekov, E.I. Coherent manipulation of dipolar coupled spins in an anisotropic environment [Text] / E.I. Baibekov, M.R. Gafurov, D.G. Zverev, I.N. Kurkin, B.Z. Malkin, B. Barbara // Phys. Rev. B. – 2014. – Vol. 90. – P. 174402 (1–9); **и**). Baibekov, E.I. Rabi oscillations as a tool to detect strong coupling of paramagnetic center with the nuclear spin bath [Text] / E.I. Baibekov, J. Jurec, B. Rakvin, M. Kveder // J. Non-Crystalline Solids. – 2019. – Vol. 519. – P. 119440 (1–9).

[41]. **а**). Blok, H., Disselhorst, J.A.J.M., Orlinskii, S.B., Schmidt, J. A continuous-wave and pulsed electron spin resonance spectrometer operating at 275 GHz (2004) Journal of Magnetic Resonance, 166 (1), pp. 92–99; **б**). Blok, H. ENDOR spectroscopy at 275 GHz [Text] / H. Blok, J.A.J.M. Disselhorst, H. Van Der Meer, S.B. Orlinskii, J. Schmidt // Journal of Magnetic Resonance. – 2005. – Vol. 173, N 1. – P. 49–53; **в**). Hofmann, D.M. Hydrogen: A relevant shallow donor in zinc oxide [Text] / D.M. Hofmann, A. Hofstaetter, F. Leiter, H. Zhou, F. Henecker, B.K. Meyer, S.B. Orlinskii, J. Schmidt, P.G. Baranov // Physical Review Letters. – 2002. – Vol. 88, N 4. – Art. N 045504, P. 455041–455044; **г**). Blok, H. Overhauser Effect of  $^{67}\text{Zn}$  Nuclear Spins in ZnO via Cross Relaxation Induced by the Zero-Point Fluctuations of the Phonon Field [Text] / H. Blok, S.B. Orlinski, J.Schmidt, P.G. Baranov // Physical Review Letters. – 2004. – Vol. 92, N 4. – P. 476021–476024; **д**). Orlinskii, S.B. Probing the Wave Function of Shallow Li and Na Donors in ZnO Nanoparticles [Text] / S.B. Orlinskii, J. Schmidt, P.G. Baranov, D.M. Hofmann, C. De Mello Donegá, A. Meijerink // Physical Review Letters. – 2004. – Vol. 92, N 4. – P. 476031–476034; **е**). Orlinskii, S.B. Shallow donors in semiconductor nanoparticles: Limit of the effective mass approximation [Text] / S.B. Orlinskii, J. Schmidt, E.J.J. Groenen, P.G. Baranov, C. De Mello Donegá, A. Meijerink // Physical Review Letters. – 2005. – Vol. 94, N 9. – Art. N 097602; **ж**). Orlinskii, S.B. Identification of shallow Al donors in

Al-doped ZnO nanocrystals: EPR and ENDOR spectroscopy [Text] / S.B. Orlinskii, J. Schmidt, P.G. Baranov, V. Lormann, I. Riedel, D. Rauh, V. Dyakonov // *Physical Review B – Condensed Matter and Materials Physics*. – 2008. – Vol. 77, N 11. – Art. N 115334; з). Herklotz, F. Identification of shallow Al donors in ZnO [Text] / F. Herklotz, E.V. Lavrov, J. Weber, G.V. Mamin, Y.S. Kutin, M.A. Volodin, S.B. Orlinskii // *Physica Status Solidi (B) Basic Research*. – 2011. – Vol. 248, N 6. – P. 1532–1537; и). Kutin, Y.S. Effect of quantum confinement and influence of extra charge on the electric field gradient in ZnO [Text] / Y.S. Kutin, G.V. Mamin, S.B. Orlinskii, A.P. Bundakova, P.G. Baranov // *JETP Letters*. – 2012. – Vol. 95, N 9. – P. 471–475; к). Kutin, Y.S. Identification of Fe<sup>3+</sup>-Li<sup>+</sup> complexes in ZnO by means of high-frequency EPR/ENDOR spectroscopy [Text] / Y.S. Kutin, G.V. Mamin, S.B. Orlinskii // *Journal of Magnetic Resonance*. – 2013. – Vol. 237. – P. 110–114; л). Баранов, П.Г. Эффект пространственного ограничения и воздействие избыточного заряда на градиент электрического поля в ZnO (Effect of quantum confinement and influence of extra charge on the electric field gradient in ZnO) [Текст] / Г.В. Мамин, С.Б. Орлинский, А.П. Бундакова, П.Г. Баранов // *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*. – 2016. – Т. 95, вып. 9. – С. 534–539; м). Baranov, P.G. High-Frequency EPR and ENDOR Spectroscopy on Semiconductor Quantum Dots [Text] / P.G. Baranov, S.B. Orlinskii, C. de Mello Donegá, J. Schmidt // *(Applied Magnetic Resonance)*. – 2010. – Vol. 39, N 1. – P. 151–183; н). Baranov, P.G. High-frequency EPR, ESE, and ENDOR spectroscopy of Co- and Mn-doped ZnO quantum dots [Text] / P.G. Baranov, S.B. Orlinskii, C. de Mello Donegá, J. Schmidt // *Physica Status Solidi (B) Basic Research*. – 2013. – Vol. 250, N 10. – P. 2137–2140; о). (Глава в монографии) Baranov, P.G. Electron Paramagnetic Resonance Based Spectroscopic Techniques in Nanoparticles Workhorses of Nanoscience [Text] / P.G. Baranov, N.G. Romanov, C. de Mello Donegá, S.B. Orlinskii, J. Schmidt; Ed. C. de Mello Donegá. – Springer, 2014. – P. 257–272.

[42]. **а).** Konkin, A. W-Band ENDOR of Light-Induced PPerAcr Anion Radicals in Double-Crystalline Donor-Bridge-Acceptor P3HT-b-PPerAcr Block Copolymer in Frozen Solution: Experimental and DFT Study [Text] / A. Konkin, U. Ritter, A. A. Konkin, G. Mamin, S. Orlinskii, M. Gafurov, A. Aganov, V. Klochkov, R. Lohwasser, M. Thelakkat, H. Hoppe, P. Scharff // *J. Phys. Chem. C.* – 2018. – Vol. 122, N 40. – P. 22829–22837; **б).** Konkin, A. Combined W-Band Light-Induced ESR/ENDOR/TRIPLE and DFT Study of PPVtype/PC61BM Ion Radicals [Text] / A. Konkin, A. Popov, U. Ritter, Sergei Orlinskii, G. Mamin, A. Aganov, A.A. Konkin, P. Scharff // *J. Phys. Chem. C.* – 2016. – Vol. 120, N 51. – P. 28905–28911; **в).** Konkin, A. Light-induced X,W-band Electron Spin Resonance study of double-crystalline donor-acceptor P3HT-b-PPerAcr block copolymers in solid thin films [Text] / A. Konkin, C.R. Singh, S. Orlinskii, G. Mamin, A. Aganov, R. Lohwasser, U. Ritter, P. Scharff, M. Thelakkat, H. Hoppe // *Syn. Met.* – 2016. – Vol. 215. – P. 251–259; **г).** Konkin, A. Improvement of P3HT–ICBA solar cell photovoltaic characteristics due to the incorporation of the maleic anhydride additive: P3HT morphology study of P3HT–ICBA and P3HT–ICBA–MA films by means of X-band LESR [Text] / A. Konkin, U. Ritter, P. Scharff, M. Schrödner, S. Sensfuss, A. Aganov, V. Klochkov, G. Ecke // *Syn. Met.* – 2014. – Vol. 197. – P. 210–216; **д).** Konkin, A. Multifrequency X,W-band ESR study on photo-induced ion radical formation in solid films of mono- and di-fullerenes embedded in conjugated polymers [Text] / A. Konkin, U. Ritter, P. Scharff, G. Mamin, A. Aganov, S. Orlinskii, V. Krinichnyi, D.A.M. Egbe, G. Ecke, H. Romanus // *CARBON.* – 2014. – Vol. 77. – P. 11–17; **е).** Konkin, A. ESR and LESR X-band study of morphology and charge carrier interaction in blended P3HT-SWCNT and P3HT-PCBM-SWCNT solid thin films [Text] / A. Konkin., C. Bounioux, U. Ritter., P. Scharff., E.A.Katz, A. Aganov., G. Gobsch., H. Hoppe, G. Ecke., H.-K Roth // *Synthetic Metals.* – 2011. – Vol. 161, N 21–22. – P. 2241–2248; **ж).** Konkin, A. Photo-induced charge separation process in (PCBM-C120O)/(M3EH-PPV) blend solid film studied by means of X and K-bands ESR at 77 and 120K [Text] / A. Konkin, U. Ritter, P. Scharff, H.-



K. Roth, A. Aganov, N.S. Sariciftci, D.A.M. Egbe // *Synthetic Metals*. – 2010. – Vol. 160. – P. 485–489; **з**). Konkin, A. K-band ESR studies of structural anisotropy in P3HT and P3HT /PCBM blend polymer thin solid films. Paramagnetic defects after continuous wave Xe-lamp photolysis [Text] / A. Konkin, H-K. Roth, P. Scharff, O.Ambacher, A.Aganov, S.Sensfuss // *Sol. State Comm.* – 2009. – Vol. 149. – P. 893.

[43]. **а**). Kehr, M. Molecular diffusion on a time scale between nano- and milliseconds probed by field-cycling NMR relaxometry of intermolecular dipolar interactions: Application to polymer melts [Text] / M. Kehr, N. Fatkullin, R. Kimmich // *J. Chem. Phys.* – 2007. – Vol. 126. – P. 094903; **б**). Fatkullin, N. Features of polymer chain dynamics as revealed by intermolecular nuclear magnetic dipole-dipole interaction: Model calculations and field-cycling NMR relaxometry [Text] / N. Fatkullin, A. Gubaidullin, and S. Stapf // *J. Chem. Phys.* – 2010. – Vol. 132. – P. 094903; **в**). Fatkullin, N. On the theory of the proton Free Induction Decay and Hahn Echo in polymer system: the role of the intermolecular magnetic dipole-dipole interactions and modified Anderson – Weiss approximation [Text] / N. Fatkullin, A. Gubaidullin, C. Mattea, S. Stapf // *Journal of Chemical Physics*. – 2012. - Vol. 137, N 22. – P. 224907; **г**). Rössler, E.A. Recent NMR investigations on molecular dynamics of polymer melts in bulk and in confinement [Text] / E.A. Rössler, S. Stapf, N. Fatkullin // *Current Opin Colloid Interface Sci.* – 2013. – Vol. 18, I. 3. – P. 173–182; **д**). Kresse, B. All Polymer Diffusion Regimes Covered by Combining Field-Cycling and Field-Gradient <sup>1</sup>H NMR [Text] / B. Kresse, M. Hofmann, A.F. Privalov, N. Fatkullin, F. Fujara, E.A. Rössler // *Macromolecules*. – 2015. – Vol. 48, N13. – P. 4491–4502; **е**). Lozovoi, C. Proton NMR dipolar-correlation effect as a method for investigating segmental diffusion in polymer melts [Text] / C. Lozovoi, A. Mattea, A. Herrmann, E.A. Rössler, S. Stapf, N. Fatkullin // *Journal of Chemical Physics*. – 2016. – Vol. 144, N 24. – P. 241101; **ж**). Kimmich, R. Self-diffusion studies by intra-and inter-molecular spin-lattice relaxometry using field-cycling: Liquids, plastic crystals, porous media, and polymer segments [Text] / R. Kimmich, N. Fatkullin // *Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spec-*

troscopy. – 2017. – Vol. 101. – P. 18–50; з). Rössler, E.A. Application of Field-cycling  $^1\text{H}$  NMR Relaxometry to the Study of Translational and Rotational Dynamics in Liquids and Polymers [Text] / E.A. Rössler, M. Hofmann, N. Fatkullin. – New Developments in NMR, 2018. – № 18, P. 181–228; Ed. by R. Kimmich, The Royal Society of Chemistry, 2019.

[44]. а). Аминов, Л.К. Суперсверхтонкая структура спектров ЭПР и оптических спектров примесных  $f$ -ионов в диэлектрических кристаллах (Обзор) [Текст] / Л.К. Аминов, И.Н. Куркин, Б.З. Малкин // Физика твердого тела. – 2013. – Т. 55, вып. 7. – С.1249–1267; б). Аминов, Л.К. Суперсверхтонкая структура спектров ЭПР примесных ионов  $\text{Gd}^{3+}$  в двойном фториде  $\text{LiYF}_4$  [Текст] / Л.К.Аминов, М.Р.Гафуров, С.Л. Кораблева, И.Н. Куркин, А.А. Родионов // Физика твердого тела. – 2017. – Т. 59, вып. 3. – С.546–549; в). Аминов, Л.К. Суперсверхтонкая структура спектров ЭПР примесных ионов  $\text{Nd}^{3+}$  во флюорите  $\text{CaF}_2$  [Текст] / Л.К. Аминов, М.Р. Гафуров, И.Н. Куркин, Б.З. Малкин, А.А. Родионов // Физика твердого тела. – 2018. – Т. 60, вып.5. – С. 910–914; г). Аминов, Л.К. Суперсверхтонкая структура спектров ЭПР примесных ионов в системе  $\text{LiYF}_4 : \text{Nd}^{3+}$ , обогащенной изотопами  $^{143}\text{Nd}$  [Текст] / Л.К. Аминов, М.Р. Гафуров, С.Л. Кораблева, И.Н. Куркин, А.А. Родионов// Физика твердого тела. – 2015. – Т.57, вып. 12. – С.2329–2332; д). Аминов, Л.К. Исследование кластеров редкоземельных ионов в смешанных кристаллах на основе флюоритов методом ЭПР/ Л.К. Аминов, М.Р. Гафуров, И.Н. Куркин, А.А. Родионов// Оптика и спектроскопия. – 2014. – Т. 116, вып.5. – С.128–132; е). Аминов Л.К. О кластерах редкоземельных ионов в примесных кристаллах со структурой флюорита [Текст] / Л.К. Аминов, И.Н. Куркин // Физика твердого тела. – 2009. – Т. 51, вып.4. – С.700–702; ж). Аминов, Л.К. Концентрационная зависимость спектров ЭПР в смешанных кристаллах  $(\text{BaF}_2)_{1-x}(\text{CeF}_3)_x$  [Текст] / Л.К. Аминов, И.Н. Куркин // Физика твердого тела. – 2013. – Т.55, вып. 1.– С.108–111; з). Rakhmatullin, R.M. Electron paramagnetic resonance linewidth narrowing of  $\text{Gd}^{3+}$  ions in Y-doped ceria nanocrystals with decreasing crystallite size [Text] / R.M. Rakhmatullin, L.K. Aminov, I.N.

Kurkin, R. Bottcher, A. Poppl, H. Avila-Paredes, S. Kim, S. Sen // J. Chem. Phys. – 2009. – Vol. 131. – 124515; **и**). Аминов, Л.К. ЭПР иона  $Gd^{3+}$  в смешанных нанокристаллах  $CeO_2 - Y_2O_3$  [Текст] / Л.К. Аминов, И.Н. Куркин, Р.М. Рахматуллин, R. Bottcher, A. Poppl, S. Sen // Физика твердого тела. – 2009. – Т. 51, вып.11. – С. 2151–2154.

[45]. **а**). Aminova, R.M. Calculations of  $^{31}P$  Magnetic Shielding Constants in Clusters of betaine and phosphine derivatives with Solvent Molecules by Using Combined methods of Quantum Chemistry and Molecular Mechanics [Text] / R.M.Aminova, E. R. Baisupova, A.V. Aganov // Appl. Magn.Reson. – 2011. – Vol. 40, I. 2. – P.147–170; **б**). Аминова, Р.М. Эволюция теории химических сдвигов от молекулы в газовой фазе к сложным молекулярным системам / Р.М.Аминова, А.В.Аганов, Э.Р.Мартынчук // Учен.зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-мат. н.– 2012. – Т.154, кн.1.– С. 5-23; **в**). Aminova, R.M. Investigation of complex formation between hydroxyapatite and fragments of collagen by NMR spectroscopy and quantum-chemical modeling [Text] / R.M. Aminova, L.F. Galiullina, N.I. Silkin, A.R. Ulmetov, V.V. Klochkov, A.V. Aganov // J. Mol. Struc. – 2013. – Vol. 1049. – P. 13-21; **г**). Makhyanov, N.  $^{13}C$  NMR Chemical Shifts and Local Structure of *cis*-1,4-Polybutadiene: Calculation and Experiment [Text] / N. Makhyanov, M.M. Minnegaliev, R.M. Aminova // Polymer Science. Ser. A. – 2016. – V. 58, N 2. – P. 121–129.

[46]. **а**). Blokhin, D.S. Spatial structure of the decapeptide Val-Ile-Lys-Lys-Ser-Thr-Ala-Leu-Leu-Gly in water and in a complex with sodium dodecyl sulfate micelles [Text] / D.S. Blokhin, S.V. Efimov, A.V. Klochkov, A.R. Yulmetov, A.V. Filippov, O.N.Antzutkin, A.V. Aganov, V.V. Klochkov // Applied Magnetic Resonance. – 2011. – Vol. 41, N 2–4. P. 267-282; **б**). Usachev, K.S. Spatial structure of heptapeptide A $\beta$ 16-22 (beta-amyloid A $\beta$ 1-40 active fragment) in solutions and in a complex with a biological membrane model [Text] / K.S. Usachev, S.V. Efimov, A.R. Yulmetov, A.V. Filippov, O.N. Antzutkin, S. Afonin, V.V. Klochkov // Magnetic Resonance in Chemistry. – 2012. – Vol.50, N 12. – P. 784–792; **в**). Usachev, K.S. Use of combination of the RDC method and NOESY NMR spectroscopy for structural determination of the Alzheimer's amy-

loid A $\beta$ 10-35 peptide in solution and in SDS micelles [Text] / K.S. Usachev, A.V. Filippov, O.N. Antzutkin, V.V. Klochkov // *European Biophysics Journal*. – 2013. – Vol. 42, I. 11–12. – P. 803–810; **г**). Efimov, S. Observation of conformational exchange in cyclosporin in media of varying polarity by NMR spectroscopy [Text] / S. Efimov, Yu. Zgadzay, V. Klochkov // *Appl. Magn. Resonance*. – 2014. – Vol. 45. – P. 1225–1235.

[47]. **а**). Usachev, K.S. High-resolution NMR structure of the antimicrobial peptide protegrin-2 in the presence of DPC micelles [Text] / K.S. Usachev, S.V. Efimov, O.V. Kolosova, A.V. Filippov, V.V. Klochkov // *Journal of Biomolecular NMR*. – 2015. – Vol. 61. – P. 227–234; **б**). Usachev, K.S. Antimicrobial peptide protegrin-3 adopt an antiparallel dimer in the presence of DPC micelles. A high-resolution NMR study [Text] / K.S. Usachev, S.V. Efimov, O.A. Kolosova, E.A. Klochkova, A.V. Aganov, V.V. Klochkov // *Journal of Biomolecular NMR*. – 2015. – Vol. 62. – P. 71–79; **в**). Usachev, K.S. Oligomerization of the antimicrobial peptide protegrin-5 in membrane mimicking environment. Structural studies by high-resolution NMR spectroscopy [Text] / K.S. Usachev, O.A. Kolosova, E.A. Klochkova, A.R. Yulmetov, A.V. Aganov, V. V. Klochkov // *European Biophysics Journal*. – 2017. – Vol. 46. – P. 293–300; **г**). Rakhmatullin, I.Z. Structural studies of pravastatin and simvastatin and their complexes with membrane-like objects by NMR spectroscopy [Text] / I.Z. Rakhmatullin, L.F. Galiullina, E.A. Klochkova, I.A. Latfullin, A.V. Aganov, V.V. Klochkov // *Journal of Molecular Structure*. – 2016. – Vol. 1105. – P. 25–29; **д**). Kononova, O. Mechanistic Basis for the Binding of RGD- and AGDV-Peptides to the Platelet Integrin  $\alpha$ IIb $\beta$ 3 [Text] / O. Kononova, R.I. Litvinov, D.S. Blokhin, V.V. Klochkov, J.W. Weisel, J.S. Bennett, V. Barsegov // *Biochemistry*. – 2017. – Vol. 56. – P. 1932–1942; **е**). Petrova, O.A. Structure and function of the N-terminal domain of the yeast telomerase reverse transcriptase [Text] / O.A. Petrova, A.B. Mantsyzov, E.V. Rodina, S.V. Efimov, C. Hackenberg, J. Hakanpää, V.V. Klochkov, A.A. Lebedev, A.A. Chugunova, A.N. Malyavko, T.S. Zatsepin, A.V. Mishin, M.I. Zvereva, V.S. Lamzin, O.A. Dontsova, V.I.

Polshakov // *Nucleic Acids Research*. – 2018. – Vol. 46, N 3. – P. 1525–1540.

[48] **а).** Filippov, A. Effect of NaCl and CaCl<sub>2</sub> on the lateral diffusion of zwitterionic and anionic lipids in bilayers [Text] / A. Filippov, G. Orädd, G. Lindblom // *Chemistry and Physics of Lipids* – 2009 – Vol. 159, N 2. – P. 81–87; **б).** Filippov, A.V. Lateral diffusion in sphingomyelin bilayers [Text] / A.V. Filippov, M.A. Rudakova, B.V. Munavirov // *Magnetic Resonance in Chemistry* – 2010 – Vol. 48, – P. 945–950; **в).** Филиппов А.В., Особенности латеральной диффузии липидов в трехкомпонентных бислоях [Text] / А.В. Филиппов, М.А. Рудакова // *Журнал физической химии* – 2011 – Т. 85, – С. 585–591; **г).** Filippov, A. Interaction of polyacrylic acid oligomer with dimyristoylphosphatidylcholine bilayers [Text] / A. Filippov, B. Munavirov, T. Sparrman, Ishmuhametova, M. Rudakova, P. Shriram, S. Tavelin // *Langmuir* – 2011 – Vol. 27, N 7. – P. 3454–3761; **д).** Filippov, A. Lateral diffusion in bilayers of equimolar mixtures of natural sphingomyelins with dioleoylphosphatidylcholine [Text] / A. Filippov, B. Munavirov, G. Gröbner, M. Rudakova // *Magnetic Resonance Imaging* – 2012 – Vol. 30, – P. 413–421; **е).** Filippov, A. Phase transition, ordering and lateral diffusion in phospholipid bilayers in the presence of poly ethylene oxide [Text] / A. Filippov, B. Munavirov, O. N. Antzutkin // *Mendeleev Communications* – 2012 – Vol. 22, N 5. – P. 250–251; **ж).** Filippov, A. Disordering of phospholipid headgroups induced by a small amount of polyethylene oxide. [Text] / A. Filippov, B. Munavirov, B. Gizatullin, O. N. Antzutkin // *Magnetic Resonance in Chemistry* – 2013 – Vol. 51, N 1. – P. 1–3; **з).** Munavirov, B. Interaction of polyacrylic acid with lipid bilayers: Effect of polymer mass [Text] / B. Munavirov, O. Gnezdilov, M. Rudakova, O. Antzutkin, A. Filippov // *Magnetic Resonance in Chemistry* – 2013 – Vol. 51, N 6. – P. 750–755.

[49]. **а).** Melnikova, D.L. Effect of Intrinsic Disorder and Self-Association on the Translational Diffusion of Proteins: The Case of  $\alpha$ -Casein [Text] / D.L. Melnikova, V.D. Skirda, I.V. Nesmelova // *Journal of Physical Chemistry B*. – 2017. – Vol. 121, N 14. – P. 2980–2988; **б).** Melnikova D.L. Effect of Reducing Agent TCEP on Translational Diffu-

sion and Supramolecular Assembly in Aqueous Solutions of  $\alpha$ -Casein [Text] / D.L. Melnikova, V.D. Skirda, I.V. Nesmelova // Journal of Physical Chemistry B. – 2019. – Vol.1 23. – P. 2305–2315.

[50]. **а).** Aganov, A.V. Cu(II) Content in the Structures of the Peripheral Nervous System at Their Damage [Text] / A.V. Aganov, D.S. Guseva, D.G. Zverev, N.I. Silkin, V.G. Shtyrlin, and Yu.A. Chelyshev // Appl. Magn. Reson. – 2006. – Vol. 30. – P.201–206; **б).** Яруллина, Д.З. Альтернативные пути образования оксида азота у лактобацилл: обнаружение возможной NO-синктазной активности методом ЭПР [Текст] / Д.З. Яруллина, О.Н. Ильинская, А.В. Аганов, Н.И. Силкин, Д.Г. Зверев // Микробиология. – 2006. – Т. 75, № 6. – С. 1–6.

[51]. **а).** Абдульянов, В.А. Стационарный и импульсный высокочастотный ЭПР кальцифицированной атеросклеротической бляшки [Текст] / В.А. Абдульянов, Л.Ф. Галиуллина, А.С. Галявич, В.Г. Изотов, Г.В. Мамин, С.Б. Орлинский, А.А. Родионов, М.Х. Салахов, Н.И. Силкин, Л.М. Ситдикова, Р.Н. Хайруллин, Ю.А. Чельшев // Письма в ЖЭТФ. – 2008. – Т. 88, вып.1. – С. 75–79; **б).** Chelyshev, Yu.A. Paramagnetic manganese in the atherosclerotic plaque of carotid arteries [Text] / Yu.A. Chelyshev, M.R. Gafurov, I. Ignatyev, A. Zanochnik, G.V. Mamin, B. Sorokin, A. Sorokina, N. Lyapkalo, N. Gizatullina, Y. Mukhamedshina, S.B. Orlinskii // BioMed Res. Int. – 2016. – Vol. 2016. – P. 3706280 (1–7); **в).** Игнатьев, И.М. Кальцификация атеросклеротических бляшек и оценка их стабильности [Текст] / И.М. Игнатьев, Ю.А. Чельшев, А.В. Заночкин, М.Р. Гафуров, С.Б. Орлинский, Г.В. Мамин, Р.Н. Хайруллин // Ангиология и сосудистая хирургия. – 2017. – Т. 23, вып. 1. – С. 13–20; **г).** Gabbasov, B. Conventional, pulsed and high-field electron paramagnetic resonance for studying metal impurities in calcium phosphates of biogenic and synthetic origins [Text] / B. Gabbasov, M. Gafurov, A. Starshova, D. Shurtakova, F. Murzakhanov, G. Mamin, S. Orlinskii // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2019. – Vol. 470. – P. 109–117; **д).** Игнатьев, И.М. Критерии нестабильности атеросклеротических бляшек сонных артерий [Текст] / И.М. Игнатьев, А.В. Заночкин, М.Р. Гафуров, И.В. Рычкова, Н.В. Кривошеева, А.К.

Демидова // Ангиология и сосудистая хирургия. – 2019. – Т. 25, №2. – С. 48–55.

[52]. **а).** Yavkin, B.V.  $Pb^{3+}$  radiation defects in  $Ca_9Pb(PO_4)_6(OH)_2$  hydroxyapatite nanoparticles studied by high-field (W-band) EPR and ENDOR [Text] / B.V. Yavkin, G.V. Mamin, S.B. Orlinskii, M.R. Gafurov, M.Kh. Salakhov, T.B. Biktagirov, E.S. Klimashina, V.I. Putlayev, Yu.D. Tretyakov, N.I. Silkin. // Phys. Chem. Chem. Phys. – 2012. – Vol. 14. – P. 2246–2249; **б).** Gafurov, M. Nitrogen-containing species in the structure of the synthesized nano-hydroxyapatite [Text] / M. Gafurov, T. Biktagirov, B. Yavkin, G. Mamin, Y. Filippov, E. Klimashina, V. Putlayev, S. Orlinskii // Письма в ЖЭТФ. – 2014. – Т. 99, вып. 4. – С. 223–230; **в).** Biktagirov, T. Combination of EPR Measurements and DFT Calculations To Study Nitrate Impurities in the Carbonated Nanohydroxyapatite [Text] / T. Biktagirov, M. Gafurov, G. Mamin, E. Klimashina, V. Putlayev, S. Orlinskii // J. Phys. Chem. A. – 2014. – Vol. 118, N 8. – P. 1519–1526; **г).** Gafurov, M.R. The Interplay of manganese and nitrate in hydroxyapatite nanoparticles as revealed by pulsed EPR and DFT [Text] / M.R. Gafurov, T.B. Biktagirov, G.V. Mamin, E.S. Klimashina, V.I. Putlayev, L. Kuznetsova, S.B. Orlinskii // Phys. Chem. Chem. Phys. – 2015. – Vol. 17, N.31. – P. 20331–20337; **д).** Гафуров, М.Р. Изучение эффектов содопирования нанокристаллов гидроксиапатита методами импульсного электронного парамагнитного резонанса (Study of the effects of hydroxyapatite nanocrystal codoping by pulsed electron paramagnetic resonance methods) [Текст] / М.Р. Гафуров, Т.Б. Биктагиров, Г.В. Мамин, Д.В. Шуртакова, Е.С. Климашина, В.И. Путляев, С.Б. Орлинский // Физика твердого тела. – 2016. – Т. 58, № 3. – С. 469-474; **е).** Biktagirov, T.B. Phonon Spectrum in Hydroxyapatite: Calculations and EPR Study at Low Temperatures [Text] / T.B. Biktagirov, M.R. Gafurov, K. Iskhakova, G.V. Mamin, S.B. Orlinskii // J. Low Temp. Phys. – 2016. – Vol. 185, N 5. – P.627–632; **ж).** Fadeeva, I.V. Tricalcium phosphate ceramics doped with silver, copper, zinc, and iron (III) ions in concentrations of less than 0.5 wt.% for bone tissue regeneration [Text] / I.V. Fadeeva, M.R. Gafurov, I.A. Kiiaeva, S.B. Orlinskii, L. Kuznetsova, Y. Filippov, A.S. Fomin, G.A.

Davydova, I.I. Selezneva, S.M. Barinov // BioNanoScience. – 2017. – Vol. 7, N 2. – P. 434–438.

[53]. **а).** Il'yasov, A.V., In vivo T2 Measurement ambiguity in liver tissues [Text] / A. V. Il'yasov, I.V. Klushkin, K.A. Ilyasov, R.F. Bakhtiozin and V.N. Zinin// Abstr. of Eleventh Annual Scientific Meeting of Society of Magnetic Resonance in Medicine, 1992, Berlin, Germany. Vol."Works in progress". – P.1332; **б).** Bakhtiozin R.F. Evaluation of focal liver lesions (FLL) with MRI, T2-relaxome-try and color velocity imaging (CVI) [Text] / R.F. Bakhtiozin, I.V. Klushkin, A.V. Il'yasov, M.M. Ibatullin, K.A. Il'yasov // The European Society for Magnetic resonance in Medicine and Biology. 10th Annual Scientific Meeting. June 3-6. Book of abstracts. — Rome, 1993. — P. 339; **в).** Schneider, J.F. Fast quantitative diffusion-tensor imaging of cerebral white matter from the neonatal period to adolescence [Text] / J.F. Schneider, K.A. Il'yasov, J. Hennig, E. Martin // Neuroradiology. – 2004. – Vol. 46, N 4. – P. 258–266; **г).** Kiselev, V.G. Is the "biexponential diffusion" biexponential? [Text] / V.G. Kiselev, K.A. Ilyasov // Magn Reson Med. – 2007. – Vol. 57, N 3. – P. 464–4694 **д).** Fossheim, S.L. Thermosensitive paramagnetic liposomes for temperature control during MR imaging-guided hyperthermia: in vitro feasibility studies [Text] / S.L. Fossheim, K.A. Il'yasov, J. Hennig, A. Bjornerud // Acad Radiol. – 2000. – Vol. 7, N 12. – P. 1107–1115; **е).** Il'yasov, K.A. Single-shot diffusion-weighted RARE sequence: application for temperature monitoring during hyperthermia session [Text] / K.A. Il'yasov, J. Hennig // J Magn Reson Imaging. – 1998. – Vol. 8, N 6. – P. 1296–1305; **ж).** Konopleva, L.V. Validation of MRI-based fiber tracking results [Text]/ K.A. Il'yasov, L. V. Konopleva, O.V. Nedopekin // Applied Magnetic Resonance – 2017.- Vol. 48.- №3.- P. 241-25; **з).** Konopleva, L.V. Model-free global tractography [Text] / L.V. Konopleva, K.A. Il'yasov, H. Skibbe, V.G. Kiselev, E. Kellner, B. Dhital, M. Reisert// NeuroImage. – 2018. – Vol. 174. – P. 576–586; **и).** Ильясов, К.А. МР-томография по диффузии для исследования микроструктуры тканей и для обнаружения проводящих путей в головном мозге. Монография [Текст] / К.А. Ильясов, О.В. Недопекин. – Казань: Изд-во РИЦ «Школа», 2019. –



149 с.; **к**). Konopleva, L.V. Verification of Diffusion MRI Fiber Tracking Results In Vivo [Text] / L.V. Konopleva, O.V. Nedopekin, K.A. Il'yasov // Applied Magnetic Resonance. – 2019. – Vol. 50. – № 1-3. – P. 121-136

[54]. **а**). Rakhmatullin, I.Z. Qualitative and quantitative analysis of oil samples extracted from some Bashkortostan and Tatarstan oilfields based on NMR spectroscopy data [Text] / I.Z. Rakhmatullin, S.V. Efimov, B.Ya. Margulis, V.V. Klochkov // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2017. – Vol. 156. – P. 12–18; **б**). Rakhmatullin, I.Z. Application of high resolution NMR ( $^1\text{H}$  and  $^{13}\text{C}$ ) and FTIR spectroscopy for characterization of light and heavy crude oils [Text] / I.Z. Rakhmatullin, S.V. Efimov, V.A. Tyurin, A.A. Al-Muntaser, A.E. Klimovitskii, M.A. Varfolomeev, V.V. Klochkov // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2018. – Vol. 168. – P. 56–62; **в**). Rakhmatullin, S. Efimov, M. Varfolomeev, V. Klochkov. High-resolution NMR study of light and heavy crude oils: “structure-property” analysis [Text] / IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2018. – Vol. 155. – P. 012014.

[55]. **а**). Patent 2383884 RF, G01N 24/08 Method for determining the content of liquid-phase and solid-state components in a mixture of hydrocarbons [Text], Nikolin I.V. (RU), Shkalikov N.V. (RU), Skirda V.D. (RU), the applicant Schlumberger technology B. V. (NL) (2009) (in Russian); **б**). Patent 2423686 RF, G01N 24/08 Method for determining the molecular mass distribution of paraffins in a hydrocarbon mixture using the nuclear magnetic resonance method [Text] / Shkalikov N.V. (RU), Skirda V.D. (RU), the applicant and the priority Kazan Federal University (RU), (2009) (in Russian).

[56]. **а**). Ivanov, D.S. Size effect for asphaltene particles in the resin by NMR [Text] / D.S. Ivanov, E.E. Barskaya, V.D. Skirda // Electronic Journal Magnetic Resonance in Solids. – 2019. – Vol. 21, N 2. – P. 19201 (10 pp.); **б**). Ivanov, D.S. The processes of aggregation and dissolution in model systems resin-asphaltene by NMR [Text] / D.S. Ivanov, E.E. Barskaya, V.D. Skirda // Electronic Journal Magnetic Resonance in Solids. – 2019. – Vol. 21, N 2. – P. 19202 (12 pp.); **в**). Вахин, А.В. Перспективы использования ЯМР-релаксации для оценки состава и степени зрело-

сти органического вещества сланцевых пород [Текст] / А.В. Вахин, Д.С. Иванов, Я.В. Онищенко, В.Д. Скирда, Д.К. Нургалиев // Нефть. Газ. Новации. – 2019. – № 2. – С. 38–42; г). Иванов, Д.С. Особенности корреляции динамической вязкости и релаксационных характеристик в бинарной системе масло+смола [Текст] / Д.С. Иванов, А.С. Александров, М.М. Дорогиницкий // Нефтяное хозяйство. – 2016. – № 10. – С. 38–41.

[57]. Alakshin, E. The Calcium Carbonate Geological Samples Study by  $^3\text{He}$  NMR [Text] / E. Alakshin, R. Gazizulin, A. Klochkov, E. Kondratyeva, A. Laskin, M. Tagirov // Applied Magnetic Resonance. – 2017. – Vol. 48, I. 7. – P.723–729.

[58]. а). Способ определения фактора насыщения электронных переходов парамагнитной подсистемы в веществе. Патент на изобретение RU 2547899 Дата начала отсчета срока действия патента: 19.11.2013. Опубликовано: 10.04.2015 Бюл. № 10. Автор: М.Р. Гафуров. Патентообладатели: ФГАОУ ВПО КФУ, ООО "ТНГ-Групп"; б). Gafurov, M. High-field, pulsed, and double resonance studies of crude oils and their derivatives [Text] / Gafurov, M., Volodin, M., Biktagirov, T., Mamin, G., & Orlinskii, S.B. – In (A.K. Shukla, ed.) Analytical Characterization Methods for Crude Oil and Related Products (pp. 101–124). JohnWiley & Sons Ltd Hoboken, NJ, 2018; в). Gafurov, M. High-Field (3.4 T) ENDOR Investigation of Asphaltenes in Native Oil and Vanadyl Complexes by Asphaltene Adsorption on Alumina surface [Text] / M. Gafurov, G. Mamin, I. Gracheva, F. Murzakhanov, Y. Ganeeva, T. Yusupova, S. Orlinskii // Geofluids. – 2019. – Vol. 2019. – Article ID 3812875, (9 pp.); г). Gafurov, M.R., EPR study of spectra transformations of the intrinsic vanadyl-porphyrin complexes in heavy crude oils with temperature to probe the asphaltenes' aggregation [Text] / M.R. Gafurov, M.A. Volodin, A.A. Rodionov, A.T. Sorokina, M.Y. Dolomatov, A.V. Petrov, A.V. Vakhin, G.V. Mamain, S.B. Orlinskii // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2018. – Vol. 166. – P. 363–368; д). Biktagirov, T. In situ identification of various structural features of vanadyl porphyrins in crude oil by high-field (3.4 T) electron–nuclear

double resonance spectroscopy combined with density functional theory calculations [Text] / T. Biktagirov, M. Gafurov, G. Mamin, I. Gracheva, A. Galukhin, S. Orlinskii // *Energy & Fuels*. – 2017. – Vol. 31, N2. – P.1243–1249; e). Mamin, G.V. Toward the asphaltene structure by electron paramagnetic resonance relaxation studies at high fields (3.4 T) [Text] / G.V. Mamin, M.R. Gafurov, R.V. Yusupov, I.N. Gracheva, Y.M. Ganeeva, T.N. Yusupova, S.B. Orlinskii // *Energy & Fuels*. – 2016. – Vol. 30, N 9. – P. 6942–6946.

[59]. a). Konovalov, A.I. Supramolecular systems based on calixarenes. Focus article [Text] / A.I. Konovalov, I.S. Antipin // *Mendeleev Commun.* – 2008. – №18. – P. 229–237; б). Solovieva, S.E. Thiacalix[4]arene's lower rim derivatives: Synthesis and supramolecular properties [Text] / S.E. Solovieva, V.A. Burilov, I.S. Antipin // *Macrocyclics*. – 2017. – Vol. 10. – P. 134–146; в). Solovieva, S.E. Langmuir monolayers and thin films of amphiphilic thiacalix[4]arenes. properties and matrix for the immobilization of cytochrome c [Text] / S.E. Solovieva, R.A. Safiullin, E.N. Kochetkov, N.B. Melnikova, M.K. Kadirov, E.V. Popova, I.S. Antipin, A.I. Konovalov // *Langmuir*. – 2014. – Vol. 30, N50. – P. 15153–15161; г). Ovsyannikov, A. Coordination Polymers based on calixarene derivatives: Structures and properties [Text] / A. Ovsyannikov, S. Solovieva, I. Antipin, S. Ferlay // *Coordination Chemistry Reviews* – 2017. – Vol. 352. – P. 151–186; д). Chernova, E.F. Synthesis of four new carboxylic derivatives based on the [1.1.1.1]metacyclophane backbone blocked in 1,3-Alternate conformation [Text] / E.F. Chernova, A.S. Ovsyannikov, S. Ferlay, S.E. Solovieva, I.S. Antipin, A.I. Konovalov, N. Kyritsakas, M.W.Hosseini // *Tetrahedron Lett.* 2018. – Vol. 59. – P. 1377–1381; e). Shurpik, D.N. Selective stepwise oxidation of 1,4-decamethoxypillar[5]arene [Text] / D.N. Shurpik, P.L. Padnya, L.I. Makhmutova, L.S. Yakimova, I.I. Stoikov // *New J. Chem.* – 2015. – Vol. 39. – P. 9215–9220; ж). Vavilova, A.A. P-tert-Butylthiacalix[4]arenes functionalized by N-(4'-nitrophenyl)acetamide and N,N-diethylacetamide fragments: Synthesis and binding of anionic guests [Text] / A.A. Vavilova, I.I. Stoikov // *Beilstein Journal of Organic Chem-*

istry. – 2017. – Vol. 13. P. 1940–1949; **з**). Padnya, P.L. Self-assembly of chiral fluorescent nanoparticles based on water-soluble L-tryptophan derivatives of p-tert-butylthiacalix[4]arene [Text] / P.L. Padnya, I.A. Khripunova, O.A. Mostovaya, T. A. Mukhametzyanov, V. G. Evtugyn, V. V. Vorobev, Yu. N. Osin, I. I. Stoikov // Beilstein J. Nanotech. – 2017. – Vol. 8. – P. 1825–1835; **и**). Shurpik, D.N. Hybrid multicyclophanes based on thiacalix[4]arene and pillar[5]arene: synthesis and influence on the formation of polyaniline [Text] / D.N. Shurpik, L.S. Yakimova, V.V.Gorbachuk, D.A. Sevastyanov, P.L. Padnya, O.V.Bazanov, I.I. Stoikov // Organic Chemistry Frontiers – 2018. – Vol.5. – P. 2780–2786; **к**). Burilov, V. «Clickable» thiacalix[4]arene derivatives bearing polymerizable 1,3-butadiyne fragments: Synthesis and incorporation into polydiacetylene vesicles [Text] / V. Burilov, A. Valiyakhmetova, D. Mironova, R. Safiullin, M. Kadirov, K. Ivshin, O. Kataeva, S. Solovieva, I. Antipin // RSC Adv. – 2016. – Vol. 6. – P. 44873–44877; **л**). Burilov, V. Novel amphiphilic conjugates of: P-tert-butylthiacalix[4]arene with 10,12-pentacosadiynoic acid in 1,3- alternate stereoisomeric form. Synthesis and chromatic properties in the presence of metal ions [Text] / V. Burilov, A. Valiyakhmetova, D. Mironova, E. Sultanova, V. Evtugyn, Yu. Osin, S. Katsyuba, T. Burganov, S. Solovieva, I. Antipin // New J. Chem. – 2018. – Vol.42. – P. 2942–2951; **м**). Burilov, V.A. Synthesis of new p-tert-butylcalix[4]arene-based polyammonium triazolyl amphiphiles and their binding with nucleoside phosphates [Text] / V.A. Burilov, G.A. Fatikhova, M.N. Dokuchaeva, R.I. Nugmanov, D.A. Mironova, P.V. Dorovatovskii, V.N. Khrustalev, S.E. Solovieva, I.S. Antipin // Beilstein J. Org. Chem. – 2018. – Vol. 14. – P. 1980–1993.

[60] **а**). Kurbangalieva, A.R. Structural Diversity of Interaction. Products of Mucochloric Acid and its Derivatives with 1,2-Ethanedithiol [Text] / A.R. Kurbangalieva, O.A. Lodochnikova, N.F. Devyatova, E.A. Berdnikov, O.I. Gnezdilov, I.A. Litvinov, G.A. Chmutova // Tetrahedron. – 2010. – Vol. 66. – P. 9945–9953; **б**). Kayumov, A.R. Inhibition of bio-film formation in *Bacillus subtilis* by new halogenated furanones [Text] / A.R. Kayumov, E.N. Khakimullina, I.S. Sharafutdinov, E.Y. Trizna, L.Z.

Latypova, T.L. Hoang, A.B. Margulis, M.I. Bogachev, A.R. Kurbangalieva // *Journal of Antibiotics*. – 2015. – Vol. 68. – № 5. – P. 297–301; в). Tsubokura, K. In vivo gold complex catalysis within live mice [Text] / K. Tsubokura, K.K.H. Vong, A.R. Pradipta, A. Ogura, S. Urano, T. Tahara, S. Nozaki, H. Onoe, Y. Nakao, R. Sibgatullina, A. Kurbangalieva, Y. Watanabe, K. Tanaka // *Angew. Chem. Int. Ed.* – 2017. – Vol. 56. – № 13. – P. 3579–3584; г). Latypova, L. Sequential double “clicks” toward structurally well-defined heterogeneous N-glycoclusters: the importance of cluster heterogeneity on pattern recognition in vivo [Text] / L. Latypova, R. Sibgatullina, A. Ogura, K. Fujiki, A. Khabibrakhmanova, T. Tahara, S. Nozaki, S. Urano, K. Tsubokura, H. Onoe, Y. Watanabe, A. Kurbangalieva, K. Tanaka // *Adv. Sci.* – 2017. – V. 4. – № 2. – P.1600394; д). Tsepaeva, O.V. Design, synthesis, and cancer cell growth inhibitory activity of triphenylphosphonium derivatives of triterpenoid betulin [Text] / O.V.Tsepaeva, A.V.Nemtarev, T.I.Abdullin, L.R.Grigor'eva, E.V.Kuznetsova, R.A.Akhmadishina, L.E.Ziganshina, H.K.Cong, V.F.Mironov // *J. Nat. Prod.* – 2017. – Vol. 80. – P. 2232–2239.

[61]. а). Каратаева, Ф.Х. Данные одно- и двумерной спектроскопии ЯМР по изучению структуры и ассоциаций гиперразветвленного полиэфира полиола Boltorn H2O-OH. Данные ЯМР [Текст] / Ф.Х. Каратаева, М.В Резепова, А.Р. Юльметов, М.Г. Кутырева, Г.А. Кутырев // *Ж. Общ. Химии*. – 2010. – Т. 80 (1412), вып. 12. – С. 2017–2025; б). Каратаева, Ф.Х. Изучение методом одно- и двумерной спектроскопии ЯМР особенностей строения гиперразветвленного полиэфира полиола BOLTORN H2O-OH с малеиновым ангидридом [Текст] / Ф.Х. Каратаева, М.В. Резепова, А.А. Балтаев // *Ж. Общ. Химии*. – 2012. – Т. 82, вып. 12. – С. 2028–2032.

[62]. а). Самитов, Ю.Ю. Стереохимия фосфорорганических соединений. XVII. Стереоспецифичность геминальной  $^2J$  ( $P^{IV}CH$ ) и вицинальной  $^3J$  ( $P^{III} OCH$ ) констант спин-спинового взаимодействия [Текст] / Ю.Ю. Самитов // *ЖОХ*. – 1984. – Т. 52, вып. 10. – С. 2211–2218; б). Самитов, Ю.Ю. Стереохимия фосфорорганических соедине-

ний. XVIII. Стереохимические зависимости для вицинальных констант спин-спинового взаимодействия вида  $^3 J (P^{III} OS^{13} C)$ ,  $^3 J (P^{IV} OS^{13} C)$  и  $^3 J (PCC^{13} C)$  с учетом ориентации неподеленной электронной пары и связей  $P=O$  и  $P=S$  [Текст] / Ю.Ю. Самитов, Ф.Х. Каратаева // Ж. Общ. Химии. – 1984. – Т. 54, вып. 4. – С. 805–812; **в**). Самитов, Ю.Ю. Стереохимия фосфорорганических соединений. XIX. Угловые зависимости для вицинальных констант спин-спинового взаимодействия вида  $^3 J (P^{IV} OCH)$  и  $^3 J (P^{IV} OS^{13} C)$ . Конформации стереоизомерных 2-меркапто-2-тионо-1,3,2-диоксафосфоринанов [Текст] / Ю.Ю. Самитов, Ф.Х. Каратаева, В.В. Овчинников, Р.А. Черкасов // Ж. Общ. Химии. – 1986. – Т. 56, вып. 10. – С. 2442–2456.

[63]. **а**). Kutyrev, G.A. Interaction of Sulfenil Chlorides with Unsaturated Organophosphorus compounds: Ad<sub>E</sub> 3 Reaction Mechanism and Regiochemistry of Addition [Text] / Kutyrev G.A., Kapura A.A., Karatayeva F.kh., Cherkasov R.A., Samitov Yu.Yu. , Pudovik A.N. // Phosph. and Sulf. – 1983. – Vol. 16, N 3. – P. 345–361; **б**). Овчинников, В.В. Циклические триметилсилилфосфиты и фосфористые кислоты в реакциях с карбонильными и  $\alpha$ -дикарбонильными соединениями [Текст] / В.В. Овчинников, Ю.Г. Сафина, Р.А. Черкасов, Ф.Х. Каратаева, А.Н. Пудовик // Ж. Общ. Химии. – 1988. – Т. 58, вып. 9. – С. 2066–2080; **в**). Миронов, В.Ф. Реакция внедрения в связь  $P-Nlg$  в фосфоранах [Текст] / В.Ф. Миронов, Т.Н. Синяшина, Е.Н. Офицеров, Ф.Х. Каратаева, П.П. Чернов, И.В. Коновалова, А.Н. Пудовик // Ж. Общ. Химии. – 1991. – Т. 61, вып. 3. – С. 581–600; **г**). Овчинников, В.В. Перегруппировка 2-арил-2-оксо-4,5-дифенил-1,3,2-диоксафосфофанов. Строение и свойства кислых бензоксафосфоринанов [Текст] / В.В. Овчинников, Ф.Х. Каратаева, Р.А. Черкасов // Ж. Общ. Химии. – 1995. – Т. 65, вып. 3. – С. 412–425.

[64]. Пудовик, А.Н. Молекулярные перегруппировки, сопровождающиеся миграцией фосфорильных групп между двумя нуклеофильными центрами [Текст] / А.Н. Пудовик, М.Г. Зимин // Успехи химии. – 1983. – Т. 52, вып. 11. – С. 2595 – 2602.

[65]. **а).** Karatayeva, F.Kh. Dynamic NMR  $^1\text{H}$ ,  $^{13}\text{C}$ ,  $^{31}\text{P}$  spectroscopy of the crown containing N-(thio)phosphoryl(thio)ureas [Text] / F.Kh. Karatayeva, A.V. Aganov, V.V. Klochkov // Applied Magnetic Resonance. – 1998. Vol. 14, N 4. – P. 545–558; **б).** Каратаева, Ф.Х. Структура и внутримолекулярная подвижность N-(тио)фосфорил(тио)амидов. VI. Интерпретация методом спектроскопии ЯМР  $^1\text{H}$ ,  $^{13}\text{C}$  и  $^{31}\text{P}$  фосфорилотропной перегруппировки в N,N'-бис(диизопропокситиофосфорил амидокарбонил)-1,10-диаза-18-краун-6-эфире в растворе ДМСО [Текст] / Ф.Х. Каратаева // Ж. Общей Химии. – 1999. – Т. 69, Вып. VII. – С. 1183–1187; **в).** Каратаева, Ф.Х. Структура и внутримолекулярная подвижность N-(тио)фосфорил(тио)амидов. VIII. Исследование строения N-(тиофосфорил)-S-органилбензимидазотиоатов методами спектроскопии ЯМР [Текст] / Ф.Х. Каратаева, Ф.Д. Соколов, Н.Г. Забиров // Ж. Общ. Химии. – 2000. – Т. 70, вып. 4. – С. 567–570; **г).** Каратаева, Ф.Х. Структура и внутримолекулярная подвижность N-(тио)фосфорил(тио)амидов. X. Исследование строения N,N'-бис(тио)фосфорил(тио)мочевины, содержащей открытоцепной фрагмент, методом спектроскопии ЯМР  $^1\text{H}$ ,  $^{13}\text{C}$  и  $^{31}\text{P}$  [Текст] / Ф.Х. Каратаева, Н.Ф. Галиуллина, А.В. Аганов, Н.Г. Забиров // Ж. Общ. Химии. – 2000. – Т. 70, вып. 78. – С. 1303–1307; **д).** Каратаева, Ф.Х. Структура и внутримолекулярная подвижность N-(тио)фосфорил(тио)амидов. Интерпретация методом спектроскопии ЯМР  $^1\text{H}$ ,  $^{13}\text{C}$  и  $^{31}\text{P}$  N-бензоил(ацетил)амидолтиофосфат→N-тиобензоил(ацетил)амидофосфатной перегруппировки  $\text{P}=\text{S}$   $\text{P}=\text{O}$  [Текст] / Ф.Х. Каратаева, Р.А. Черкасов, Н.Г. Забиров, В.В. Клочков // Ж. Общ. Химии. – 2002. – Т. 72, вып. 10. – С. 1657–1661; **е).** Каратаева, Ф.Х. Структура и внутримолекулярная подвижность N-(тио)фосфорил(тио)амидов. XIII. Исследование структуры N-фенил,N'-диизопропокситиофосфорилтиомочевины методом спектроскопии ЯМР [Текст] / Ф.Х. Каратаева, А.Р. Юльметов, Н.Г. Забиров, А.В. Аганов, В.В. Клочков // Ж. Общ. Химии. – 2005. – Т. 75, вып. 6. – С. 908–911.

[66]. **а).** Попель, А.А. Применение метода спин-эхо для изучения состояния парамагнитных ионов [Текст] / А.А. Попель, Р.А. Даутов, В.Д. Корепанов. – Парамагнитный резонанс: Сб. – Казань: Изд-во Казанск. ун-та, 1960. – С. 195–198; **б).** Попель, А.А. Определение малых количеств парамагнитных и диамагнитных ионов методом ядерной магнитной релаксации [Текст] / А.А. Попель, Е.Д. Гражданников // Журн. аналит. химии. – 1963. – Т. 18, № 11. – С. 1291–1294; **в).** Попель, А.А. Определение парамагнитных ионов методом протонного магнитного резонанса [Текст] / А.А. Попель, Е.Д. Гражданников // Труды по химии и хим. технологии. Горький. – 1963. – Вып. 1. – С. 37–42; **г).** А.А. Попель Применение ядерной магнитной релаксации в анализе неорганических соединений [Текст] / А.А. Попель. – Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1975. – 174 с.; **д).** Попель, А.А. Магнитно-релаксационный метод анализа неорганических веществ [Текст] / А.А. Попель. – М.: Химия, 1978. – 222 с.

[67]. **а).** Захаров, А.В. Быстрые реакции обмена лигандов. Исследование лабильных комплексов переходных металлов [Текст] / А.В. Захаров, В.Г. Штырлин – Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1985. – 128 с.; **б).** Сальников, Ю.И. Полиядерные комплексы в растворах [Текст] / Ю.И. Сальников, А.Н. Глебов, Ф.В. Девятов. – Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1989. – 288 с. **в).** Сальников, Ю.И. Магнетохимия и радиоспектроскопия координационных соединений [Текст] / Ю.И. Сальников, А.Н. Глебов, Ф.В. Девятов. – Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1990. – 128 с.

[68]. **а).** Амиров, Р.Р. Соединения металлов как магнитно-релаксационные зонды для высокоорганизованных сред. Применение в МР-томографии и химии растворов [Текст] / Р.Р. Амиров. – Казань: ЗАО «Новое знание», 2005. – 316 с. **б).** Stepanov, A. Amphiphiles with polyethyleneoxide–polyethylenecarbonate chains for hydrophilic coating of iron oxide cores, loading by Gd(III) ions and tuning R2/R1 ratio [Text] / A. Stepanov, A. Mustafina, S. Soloveva, S. Kleshnina, I. Antipin, I. Rizvanov, I. Nizameev, R.G. Mendes, M.H. Rümmele, L. Giebeler, R. Amirov, A. Konovalov // Reactive and Functional Polymers. – 2016. –



Vol. 99. – P. 107–113; **в**). Amirov, R.R. Chemistry of Graphene Oxide. Reactions with Transitional Metal Cations [Text] / R.R. Amirov, J. Shayimova, Z. Nasirova, A.M. Dimiev // Carbon. – 2017. – Vol. 116. – P.356–365.

[69]. **а**). Винокуров, В.М. Магнитные свойства турмалина [Текст] / В.М. Винокуров, М.М. Зарипов // Кристаллография. – 1959. – Т. 4, вып. 6. – С. 873-877; **б**). Винокуров, В.М. Тонкая структура спектра парамагнитного резонанса естественного сапфира [Текст] / В.М. Винокуров, М.М. Зарипов, Н.Р. Яфаев // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1959. – Т. 37. – С. 312; **в**). Винокуров, В.М. Парамагнитный резонанс  $Mn^{2+}$  в доломите и магнезите [Текст] / В.М. Винокуров, М.М. Зарипов, В.Г. Степанов // Журн. эксп-ерим. и теорет. физики. – 1960. – Т. 39, вып. 6/12. – С. 1552–1553; **г**). Винокуров, В.М. Исследование некоторых Mn-содержащих карбонатов методом ЭПР [Текст] / В.М. Винокуров, М.М. Зарипов, В.Г. Степанов // Кристаллография. – 1961. – Т. 6, № 1. – С. 104–108; **д**). Винокуров, В.М. О возможностях электронного парамагнитного резонанса при изучении минералов [Текст] / В.М. Винокуров. – Новые методы в минералогии и петрографии и результаты их применения: Материалы совещ. по новым методам исслед. в минералогии и петрографии: [Москва. 20–23 февр. 1962 г.]. М.: Госгеолтехиздат, 1963. С. 117-118.; **е**). Минералогические и петрофизические исследования пород осадочного чехла и фундамента территории ТАССР методами рентгенографии, оптической и радиоспектроскопии [Текст] / Н.М. Низамутдинов, Г.Р. Булка, В.М. Винокуров и др. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1986. – 167 с.

[70]. **а**). Gaite, J.M. EPR of  $Gd^{3+}$  in  $Na_2Cd(SO_4)_2 \cdot 2H_2O$ , comparison with previous results obtained for  $Fe^{3+}$  [Text] / J.M. Gaite, G.R. Bulka, N.M. Hasanova, <...> V.M. Vinokurov // Journal of Chemical Physics. – 1985. - Vol. 83, N 12. – P. 6088–6090; **б**). Gaite, J.M. Electron paramagnetic study of  $Fe^{3+}$  and  $Gd^{3+}$  in  $Na_2Zn(SO_4)_2 \cdot 4H_2O$  [Text] / J.M. Gaite, G.R. Bulka, N.M. Hasanova, <...> V.M. Vinokurov // Journal of Physics: Condensed Matter. – 1986. – Vol. 19, N 12. – P. 2077–2083; **в**). Низа-

мутдинов, И.М. Псевдосимметрия тензора спин-гамильтониана и координационных полиэдров ионов  $Fe^{3+}$  в монокристаллах  $KTiOPO_4$  по данным ЭПР [Текст] / И.М. Низамутдинов, Н.М. Хасанова, Г.Р. Булка, В.М. Винокуров и др. // Кристаллография. – 1987. – Т. 32. – С. 695–703; г). Galeev, A.A. EPR and SEM study of organo-mineral associations in lower permian evaporite dolomites [Text] / A.A. Galeev, V.M. Vinokurov, F.A. Mouraviev, Y.N. Osin // Applied Magnetic Resonance. – 2009. – Т. 35, № 3. – С. 473–479.

[71]. а). Щепкин, В.Д. Импульсный ДЯЯР в  $CaF_2: Li$  [Текст] / Щепкин В.Д., Низамутдинов Н.М., Вайнштейн Д.И., <...> Винокуров В.М. // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1977. – Т. 73, № 4. – С. 1407; б). Shchepkin, V.D. Double nuclear magnetic resonance and crystal chemistry at the lattice positions of diamagnetic atoms, both structural, and foreign [Text] / V.D. Shchepkin, D.I. Vainshtein, R.A. Dautov, V.M. Vinokurov // Physics and Chemistry of Minerals. – 1980. – Vol. 6, N 4. – P. 269–281; в). Вайнштейн, Д.И. ДЯМР точечных дефектов в монокристалле  $\beta PbF_2 + Na^+$  [Текст] / Д.И. Вайнштейн, В.Д. Щепкин и др. // ФТТ. – 1982. – Т. 24. – С. 1904–1907; г). Вайнштейн, Д.И. Импульсный ДЯМР в примесном кристалле  $CaF_2: La^{3+}$  [Текст] / Д.И. Вайнштейн, В.Д. Щепкин, В.А. Сафин, В.М. Винокуров // ФТТ. – 1982. – Т. 24. – С. 3480–3483; д). Вайнштейн, Д.И. Импульсный ДЯМР в примесном кристалле  $NaF$  [Текст] / Д.И. Вайнштейн, В.Д. Щепкин и др. // ФТТ. – 1983. – Т. 25. – С. 2570–2574.

[72]. Булка, Г.Р., Винокуров В.М. Протонный магнитный резонанс в монокристаллах  $Li_1Cr_2O_7 \times 2H_2O$  [Текст] / Магнитная и оптическая спектроскопия минералов и горных пород. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1974. – С. 68-71.

[73]. а). Булка, Г.Р. ЯМР-метод определения типов вод в коллекторах нефти [Текст] / Г.Р. Булка, С.В. Веденин, В.М. Винокуров, Т.А. Захарченко и др. // Геология нефти и газа. – 1971. – № 6. – С. 42–45; б). Веденин, С.В. Определение среднего диаметра пор гранулярных коллекторов нефти и газа импульсным методом ЯМР [Текст] / С.В.

Веденин, В.М. Винокуров, Т.А. Захарченко, В.Д. Щепкин // Геология нефти и газа. – 1974. – № 4. – С. 47–53.

[74]. а). Сафин, И.А. Ядерный квадрупольный резонанс в стибните [Текст] / И.А. Сафин, И.Н. Пеньков // Доклады АН СССР. – 1962. – Т. 147. – С. 410–413; б). Pen'kov, I.N. Application NQR method in study of minerals [Text] / I.N. Pen'kov // Internal. Geology Review. – 1967. – Vol. 9, N 6. – P.793–804.; в). Пеньков, И.Н. Природа малых структурных примесей в некоторых халькогенидах As, Sb и Bi по данным ядерного квадрупольного резонанса [Текст] / И.Н. Пеньков // Геохимия. – 1971. – Т.6. – С. 731–742.

[75]. а). Abdullin, R.S. Temperature Dependence of NQR Spectra of  $^{121,123}\text{Sb}$  IN  $\text{Sb}_2\text{S}_3$  [Text] / R.S. Abdullin, I.N. Pen'kov, N.M. Nizamutdinov, I. Grigas, I.A. Safin // Soviet Physics, Solid State. – 1977. – Vol. 19. – P. 1632; б). Abdullin, R.S. Influence of Temperature on Nuclear Quadrupole Resonance Spectra of  $^{121,123}\text{Sb}$  in  $\text{Sb}_2\text{S}_3$  [Text] / R.S. Abdullin, I.N. Pen'kov, N.M. Nizamutdinov, I.Grigas, I.A. Safin // Sov. Phys. Solid State. – 1977. – Vol. 19, N 9. P. – 1542–1544; в). Пеньков, И.Н. Аномальная хемосорбция примесей на минералах, стимулированная фазовым переходом [Текст] / И.Н. Пеньков // Доклады АН СССР. – 1977. – Т. 184, № 2. – С. 390-392.; г). Абдуллин, Р.С. ЯКР  $^{63,65}\text{Cu}$  в ковеллине,  $\text{CuS}$  [Текст] / Р.С. Абдуллин, В.П. Кальчев, И.И. Пеньков // Доклады Академии наук СССР. – 1987. – Т. 294, № 6. – С. 1439; д). Abdullin, R.S. Investigation of copper minerals by NQR: Crystallochemistry, electronic structure, lattice dynamics [Text] / R.S.Abdullin, V.P. Kal'chev, I.N. Pen'kov // Physics and Chemistry of Minerals. – 1987. – Vol. 14, N3. – P. 258–263.

[76]. а). Manapov, R.A. Nuclear gamma resonance of  $\text{Sn}^{119}$  and  $\text{Fe}^{57}$  in  $\text{Fe}^{57}$  in franckeite and cylindrite [Text] / R.A. Manapov, I.N. Pen'kov // Doklady Academy of Sciences of the USSR, Earth Science Sections. – 1977. – Vol. 228. – P. 103–105; б). Яковлев, В.В. Катионное распределение в природных хромшпинелидах по данным ЯГР [Текст] / В.В. Яковлев, Ш.Ш. Башкиров, И.Н. Пеньков // Доклады Академии наук СССР. – 1980. – Т. 250, № 4. – С. 911.

[77]. **а).** Begaev, B.B. Electronic Structure and Lattice Dynamics of Domeykite  $\text{Cu}_3\text{As}$  According to Nuclear Quadrupolar Resonance of  $^{75}\text{As}$  and  $^{63,65}\text{Cu}$  [Text] / B.B. Begaev, A.V. Dooglav, V.P. Kal'chev, E.V. Krjukov, I.R. Mukhamedshin, I.N. Pen'kov // Appl. Magn. Resonance. – 2002. – Vol. 22. – P. 570–590; **б).** Gainov, R.R. Evidence for low-temperature internal dynamics in  $\text{Cu}_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$  according to copper NQR and nuclear relaxation [Text] / R.R. Gainov, A.V. Dooglav, I.N. Pen'kov // Solid State Communications. – 2006. – Vol.140, I. 11-12. – P. 544–548; **в).** Gainov, R.R. Copper valence, structural separation and lattice dynamics in tennantite (fahlore): NMR, NQR and SQUID studies [Text] / R.R. Gainov, A.V. Dooglav, I.N. Pen'kov, I.R. Mukhamedshin, A.V. Savinkov, N.N. Mozgova // Physics and Chemistry of Minerals. – 2008. – Vol. 35. – P. 37–48; **г).** Gainov, R.R. Phase transition and anomalous electronic behavior in layered superconductor CuS probed by [Text] / R.R. Gainov, A.V. Dooglav, I.N. Pen'kov, I.R. Mukhamedshin, N.N. Mozgova, I.A. Evlampiev, I.A. Bryzgalov // Phys. Rev. B. – 2009. – Vol.79. – P. 075115; **д).** Gainov, R.R. NQR/NMR and Mossbauer spectroscopy methods: potentials and versatility in geochemical studies [Text] / R.R. Gainov, A.V. Dooglav, F.G. Vagizov, I.N. Pen'kov, V.A. Golovanevskiy, A.Yu. Orlova, I.A. Evlampiev, V.V. Klekovkina, G. Klingelhofer, V. Ksenofontov, N.N. Mozgova // European Journal of Mineralogy. – 2013. – Vol. 25. – P. 569–578; **е).** Klekovkina, V.V. Oxidation and Magnetic States of Chalcopyrite  $\text{CuFeS}_2$ : A First Principles Calculation [Text] / V.V. Klekovkina, R.R. Gainov, F.G. Vagizov, A.V. Dooglav, V.A. Golovanevskiy, I.N. Pen'kov // Optics and spectroscopy. – 2014. – Vol. 116, N 6. – P. 885 – 888; **ж).** Хасанов, Р.Р. Механизмы формирования сульфидов меди в гидrogenных осадочных рудах Вятско–Камской меденосной полосы [Текст] / Р.Р. Хасанов, Е.С. Варламова, Р.Р. Гайнов, А.Ф. Исламов, Э.А. Королев // Материалы Международного минералогического семинара: Минералогическая интервенция в микро– и наномир (9–11 июня 2009 г.). Сыктывкар: Геопринт, 2009. – С.257–259; **з).** Gainov, R.R. Application of  $^{57}\text{Fe}$  Mössbauer spectroscopy as a tool for mining exploration of bornite ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ ) copper ore [Text] / R.R. Gainov, F.G. Vagizov, V.A.

Golovanevskiy, V.A. Ksenofontov, G. Klingelhöfer, V.V. Klekovkina, T.G. Shumilova, I.N. Pen'kov // *Hyperfine Interactions*. – 2014. – Vol. 226, I.1-3. – P. 51-55.

[78]. **a)**. Kochelaev, B.I. Electron paramagnetic resonance in superconducting cuprates [Text] / B.I. Kochelaev // Chapter 13 in “High- $T_c$  Copper Oxide Superconductors and Related Novel Materials” Dedicated to Prof. K.A. Muller on the Occation of his 90<sup>th</sup> Birthday. Editors: A. Bussett-Holder, H. Keller, A. Bianconi; **б)**. Muller, K.A. The Impact of ESR(EPR) on the Understanding of the Cuprates and Their Superconductivity [Text] / K.A. Muller // *EPR newsletter*. – 2012. – Vol.22, N 1. – P.5–6.

**Диссертации на соискание учёной степени доктора наук,  
выполненные в Казанском государственном (федеральном)  
университете сотрудниками, докторантами и соискателями  
физического факультета (Института физики) в области  
радиоспектроскопии и её приложений\***

1. **Завойский Е.К.** «Парамагнитная абсорбция в перпендикулярных и параллельных полях для солей, растворов и металлов». Докторская диссертация (д.ф.-м. н.) (1945 год).
2. **Альтшулер С.А.** «Теория некоторых явлений парамагнитного резонанса». Докторская диссертация (д.ф.-м.н.) (1954 год).
3. **Валиев К.А.** «Теоретические вопросы исследования жидкого вещества спектрометрическими методами (магнитный резонанс и молекулярное рассеяние и поглощение света)». Докторская диссертация (д.ф.-м.н.) (1963 год).
4. **Винокуров В.М.** «Магнитные свойства минералов». Докторская диссертация (д.г.-м.н.) (1964 год).
5. **Зарипов Макс.Мухам.** «Исследования спектров электронного парамагнитного резонанса в кристаллах». Докторская диссертация (д.ф.-м.н.) (1966 год).
6. **Кочелаев Б.И.** «Теория динамических эффектов в парамагнитных кристаллах». Докторская диссертация (д.ф.-м.н.) (1967 год).
7. **Самитов Ю.Ю.** «Спектры ядерного магнитного резонанса и стереоизомерия молекул». Докторская диссертация (д.ф.-м.н.) (1967 год).
8. **Попель А.А.** «Применение ядерной магнитной релаксации в неорганическом анализе». Докторская диссертация (д.х.н.) (1968 год).
9. **Маклаков А.И.** «Исследование молекулярной подвижности и некоторых других свойств полимерных систем методом ядерного

---

\* В этот перечень включены и диссертации сотрудников других учреждений, которые были защищены в диссертационном совете КГУ (КФУ).

- магнитного резонанса». Докторская диссертация (д.ф.-м.н.) (1970 год).
10. **Башкиров Ш.Ш.** «Применение ядерного гамма-резонанса к исследованию парамагнитных кристаллов». Докторская диссертация (д.ф.-м.н.) (1970 год).
  11. **Пеньков И.Н.** «Исследование особенностей химизма и структуры минералов методом ядерного квадрупольного резонанса». Докторская диссертация (д.г.-м.н.) (1971 год).
  12. **Аминов Л.К.** «К теории спин-решёточной релаксации в парамагнитных ионных кристаллах». Докторская диссертация (д.ф.-м.н.) (1973 год).
  13. **Кессених А.В.** «Некоторые эффекты электронно-ядерных взаимодействий в поляризации, релаксации и форме линий ЯМР органических соединений». Докторская диссертация (д.ф.-м.н.) (1973 год).
  14. **Салихов К.М.** «Кинетика процессов, обусловленных спин-спиновыми взаимодействиями частиц в магнитно-разбавленных системах». Докторская диссертация (д.ф.-м.н.) (1974 год).
  15. **Яблоков Ю.В.** «Электронный парамагнитный резонанс обменных кластеров некоторых элементов группы железа» Докторская диссертация (д.ф.-м.н.) (1974 год).
  16. **Даутов Р.А.** «Релаксация и перенос намагниченности ядерных спиновых систем в твёрдых телах». Докторская диссертация (д.ф.-м.н.) (1978 год).
  17. **Харахашьян Э.Г.** «Экспериментальные исследования явления электронного спинового резонанса в металлах» Докторская диссертация (д.ф.-м.н.) (1980 год).
  18. **Теплов М.А.** «Ядерный магнитный резонанс в ван-флековских парамагнетиках». Докторская диссертация (д.ф.-м.н.) (1981 год).
  19. **Зарипов Махм.Муб.** «Теоретические вопросы релаксационных процессов в жидкостях». Докторская диссертация (д.ф.-м.н.) (1981 год).

20. **Сафин И.А.** «Ядерный квадрупольный резонанс ядер элементов пятой группы» Докторская диссертация (д.ф.-м.н.) (1981 год).
21. **Юльметьев Р.М.** «Исследование корреляций частиц в жидкостях методом сокращённого описания». Докторская диссертация (д.ф.-м.н.) (1981 год).
22. **Малкин Б.З.** «Кристаллическое поле и электрон-фононное взаимодействие в ионных редкоземельных парамагнетиках». Докторская диссертация (д.ф.-м.н.) (1984 год).
23. **Осокин Д.Я.** «Импульсная спектроскопия ядерного квадрупольного резонанса» Докторская диссертация (д.ф.-м.н.) (1984 год).
24. **Вишневская Г.П.** «Внутримолекулярная и межмолекулярная релаксация и электронный резонанс парамагнитных ионов в растворах и полимерах». Докторская диссертация (д.ф.-м.н.) (1985 год).
25. **Хасанов А.Х.** «Экспериментальное исследование сильно неравновесных спиновых систем в парамагнитных ионных кристаллах». Докторская диссертация (д.ф.-м.н.) (1985 год).
26. **Аганов А.В.** «Спектроскопия ЯМР и молекулярная динамика органических производных элементов V и VI групп». Докторская диссертация (д.х.н.) (1986 год).
27. **Ерёмин М.В.** «Процессы переноса заряда и взаимодействие спиновых и орбитальных моментов в ионных кристаллах». Докторская диссертация (д.ф.-м.н.) (1987 год).
28. **Аминова Р.М.** «Неэмпирические модели в исследовании магнитных свойств, спектральных параметров ЯМР и их связи с электронным и пространственным строением молекул органических соединений». Докторская диссертация (д.х.н.) (1990 год).
29. **Клочков В.В.** «Динамический ЯМР карбо- и гетероциклов среднего размера». Докторская диссертация (д.х.н.) (1991 год).
30. **Скирда В.Д.** «Самодиффузия в полимерных системах». Докторская диссертация (д.ф.-м.н.) (1992 год).



31. **Тагиров М.С.** «Ядерная магнитная релаксация, обусловленная флуктуациями сверхтонких полей». Докторская диссертация (д.ф.-м.н.) (1992 год). Научный консультант (н.к.) – М.А Теплов.
32. **Косов А.А.** «Кинетические явления в сверхпроводниках с локальными электронными и колебательными состояниями». Докторская диссертация (д.ф.-м.н.) (1993 год). Н.к. – Б.И. Кочелаев.
33. **Нигматуллин Р.Р.** «Физика дробного исчисления и её реализация на фрактальных структурах». Докторская диссертация (д.ф.-м.н.) (1993 год).
34. **Садыков Э.К.** «Вопросы теории ЯГР спектроскопии и радиочастотных методов в исследовании модуляционных явлений в магнитных системах». Докторская диссертация (д.ф.-м.н.) (1993 год).
35. **Царевский С.Л.** «Теория спин-волнового и электронно-ядерного резонансов в сверхпроводниках». Докторская диссертация (д.ф.-м.н.) (1994 год).
36. **Двояшкин Н.К.** «Экспериментальное исследование самодиффузии жидкости в пористых средах методом ЯМР ИГМП». Докторская диссертация (д.ф.-м.н.) (1995 год).
37. **Прошин Ю.Н.** «Теория магнитного пробоя с переворотом спина». Докторская диссертация (д.ф.-м.н.) (1995 год).
38. **Фаткуллин Н.Ф.** «К теории спин-решёточной релаксации и диффузионного затухания сигнала стимулированного спиновое эха в полимерных системах и неоднородных средах». Докторская диссертация (д.ф.-м.н.) (1995 год).
39. **Тагиров Л.Р.** «Теория электронного парамагнитного резонанса в сверхпроводниках». Докторская диссертация (д.ф.-м.н.) (1996 год).
40. **Хусаинов М.Г.** «Сверхпроводящие и магнитные свойства слоистых структур». Докторская диссертация (д.ф.-м.н.) (1997 год). Н.к. – Б.И. Кочелаев.
41. **Зябликова Т.А.** «Спектры ядерного магнитного резонанса и строение молекул со связью фосфор-углерод». Докторская диссертация (д.х.н.) (1999 год).

42. **Латыпов Ш.К.** «Дизайн хиральных дериватирующих реагентов для определения абсолютной конфигурации органических соединений методом ЯМР». Докторская диссертация (д.х.н.) (1999 год).
43. **Усачев А.Е.** «ЭПР исследование фазовых переходов и эффекта Яна-Теллера в перовскитоподобных соединениях». Докторская диссертация (д.ф.-м.н.) (1999 год).
44. **Каратаева Ф.Х.** «Стереодинамика и таутометрия органических производных четырёхкоординированного фосфора». Докторская диссертация (д.х.н.) (2000 год).
45. **Низамутдинов Н.М.** «ЭПР и закономерности распределения парамагнитных точечных эффектов в кристаллах». Докторская диссертация (д.ф.-м.н.) (2000 год).
46. **Таланов Ю.И.** «Исследование вихревого состояния оксидных сверхпроводников методами микроволнового поглощения». Докторская диссертация (д.ф.-м.н.) (2000 год).
47. **Таюрский Д.А.** «Магнитная связь жидкого  $^3\text{He}$  и диэлектрических ван-флековских парамагнетиков». Докторская диссертация (д.ф.-м.н.) (2001 год). Н.к. – М.С. Тагиров.
48. **Крутиков В.Ф.** «Радиоспектроскопия минералов и горных пород месторождений нерудных полезных ископаемых». Докторская диссертация (д.г.-м.н.) (2002 год).
49. **Тарасов В.Ф.** «Субмиллиметровая ЭПР спектроскопия примесных парамагнитных центров в диэлектрических кристаллах». Докторская диссертация (д.ф.-м.н.) (2002 год).
50. **Филиппов А.В.** «Самодиффузия в многофазных системах с ограничениями». Докторская диссертация (д.ф.-м.н.) (2003 год).
51. **Баширов Ф.И.** «Спектроскопия заторможенных движений молекул в кристаллах» (д.ф.-м.н.) (2006 год).
52. **Крушельницкий А.Г.** «Молекулярная динамика белков и полипептидов. Исследование методом релаксационной и обменной ЯМР-спектроскопии». Докторская диссертация (д.ф.-м.н.) (2006 год).

53. **Миронов Г.И.** «Теория двумерных и наноразмерных систем с сильными корреляциями в модели Хаббарда». Докторская диссертация (д.ф.-м.н.) (2008 год). Н.к. – Б.И. Кочелаев.
54. **Иваньшин В.А.** «Исследование сильно-коррелированных электронных систем методами электронного парамагнитного резонанса». Докторская диссертация (д.ф.-м.н.) (2009 год).
55. **Силкин Н.И.** «Оптическая и ЭПР-спектроскопия материалов квантовой электроники и нелинейной оптики на основе кристаллов фторидов, семейств дигидрофосфата и сульфата калия». Докторская диссертация (д.ф.-м.н.) (2009 год).
56. **Гревцев В.А.** «Минералого-технологическая оценка качества неметаллических полезных ископаемых методами радиоспектроскопии». Докторская диссертация (д.г.-м.н.) (2011 год).
57. **Ерёмина Р.М.** «Исследование низкоразмерных магнитных структур методом ЭПР». Докторская диссертация (д.ф.-м.н.) (2011 год).
58. **Ильясов К.А.** «Развитие методов магнитно-резонансной томографии в исследовании самодиффузии и температурных полей в живых системах» Докторская диссертация (д.ф.-м.н.) (2011 год). Н.к. – А.В. Аганов.
59. **Булатов Ф.М.** «Кристаллохимия промышленных минералов в решении задач прикладной минералогии по данным мёссбауэровской спектроскопии». Докторская диссертация (д.г.-м.н.) (2012 год).
60. **Андроненко С.И.** «Магнитное состояние примесных ионов и дефектов в магнитных полупроводниках и их диэлектрических аналогах». Докторская диссертация (д.ф.-м.н.) (2013 год). Н.к. – Б.И. Кочелаев.
61. **Мамин Р.Ф.** «Фазовые переходы и образование неоднородных состояний в сегнетоэлектрических и магнитных полупроводниках». Докторская диссертация (д.ф.-м.н.) (2013 год).
62. **Аникеёнок О.А.** «Метод вторичного квантования с неортогональным базисом и его приложение к теории локальных полей

на ядрах диамагнитных ионов в кристаллах с незаполненными 3d- и 4f- оболочками». Докторская диссертация (д.ф.-м.н.) (2015 год).

63. **Ерёмин И.М.** «Спиновые возбуждения и электронные корреляции в необычных высокотемпературных сверхпроводниках». Докторская диссертация (д.ф.-м.н.) (2016 год).
64. **Мухамедшин И.Р.** «Исследование натриевых кобальтатов  $\text{Na}_x\text{CoO}_2$  методами ЯМР, ЯКР и мюонной спектроскопии. Докторская диссертация (д.ф.-м.н.) (защищена в 2019 году).

**Диссертации на соискание учёной степени кандидата наук,  
выполненные в Казанском государственном (федеральном)  
университете аспирантами, сотрудниками и соискателями  
физического факультета (Института физики) в области  
радиоспектроскопии и её приложений**

1. **Козырев Б.М.** «Парамагнитная релаксация в кристаллах некоторых солей». 1945 г. Научный руководитель (Н.р.) – Е.К. Завойский.
2. **Романов И.М.** «Парамагнитная дисперсия в перпендикулярных полях на частотах  $10^8$  герц». 1950 г.
3. **Глебашев Г.Я.** «Применение метода моментов к изучению формы кривых резонансного парамагнитного поглощения». 1954 г. Н.р. – С.А. Альтшулер.
4. **Непримеров Н.Н.** «Парамагнитный резонанс и вращение плоскости поляризации в микроволновом диапазоне». 1954 г. Н.р. – С.А. Альтшулер.
5. **Ситников К.П.** «Парамагнитное поглощение в некоторых солях элементов переходных групп». 1954 г. Н.р. – С.А. Альтшулер.
6. **Зарипов Макс. Мухам.** «К теории тонкой и сверхтонкой структуры спектров парамагнитного резонанса». 1955 г. Н.р. – С.А. Альтшулер.
7. **Шекун Л.Я.** «Спин-решёточное взаимодействие в солях редкоземельных элементов». 1956 г. Н.р. – С.А. Альтшулер.
8. **Аввакумов В.И.** «Теория спин-решёточной релаксации в парамагнитных солях элементов группы железа с чётным числом электронов». 1957 г. Н.р. – С.А. Альтшулер.
9. **Даутов Р.А.** «Влияние высокочастотного магнитного поля на электросопротивление ферромагнетиков». 1957 г.
10. **Башкиров Ш.Ш.** «К теории парамагнитной спин-решёточной релаксации». 1958 г. Н.р. – С.А. Альтшулер.

11. **Валиев К.А.** «Ядерный магнитный резонанс на ядрах парамагнитных атомов». 1958 г. Н.р. – С.А. Альтшулер.
12. **Копвиллем У.Х.** «О влиянии внутренних взаимодействий на форму линии парамагнитного поглощения». 1958 г. Н.р. – С.А. Альтшулер.
13. **Кессель А.Р.** «Вопросы теории ядерного акустического резонанса». 1960 г. Н.р. – С.А. Альтшулер.
14. **Кочелаев Б.И.** «Некоторые вопросы спин-решётчного взаимодействия в ионных кристаллах». 1960 г. Н.р. – С.А. Альтшулер.
15. **Аминов Л.К.** «Некоторые вопросы спин-фононного взаимодействия». 1962 г. Н.р. – С.А. Альтшулер.
16. **Волохова Т.И.** «Исследование парамагнитной релаксации в монокристаллах солей элементов группы железа в параллельных полях при комнатной температуре». 1962 г. Н.р. – С.А. Альтшулер.
17. **Тимеров Р.Х.** «О влиянии движения и обменных взаимодействий на форму линий электронного и ядерного парамагнитного резонанса». 1962 г. Н.р. – С.А. Альтшулер.
18. **Колоскова Н.Г.** «К теории формы линии парамагнитного резонанса в ионных кристаллах». 1963 г. Н.р. – С.А. Альтшулер.
19. **Леушин А.М.** «Некоторые вопросы теории электронного парамагнитного резонанса ионов в S-состоянии в кристаллах». 1963 г. Н.р. – С.А. Альтшулер.
20. **Мороча А.К.** «Теория симметрии в задачах парамагнитного резонанса». 1963 г. Н.р. – С.А. Альтшулер.
21. **Овчинников И.В.** «Некоторые вопросы теории магнитных явлений в ковалентных соединениях». 1963 г. Н.р. – С.А. Альтшулер.
22. **Польский Ю.Е.** «Электронный парамагнитный резонанс ионов  $Gd^{3+}$  в  $CaF_2$ ». 1963 г. Н.р. – С.А. Альтшулер.
23. **Агишев А.Ш.** «Исследование теплового движения молекул в жидкостях методом ядерного магнитного резонанса». 1964 г. Н.р. – К.А. Валиев.

24. **Голенищев-Кутузов В.А.** «Релаксационное парамагнитное поглощение звука в кристаллах». 1964 г. Н.р. – У.Х. Копвиллем.
25. **Гражданников Е.Д.** «Химические факторы в магнитной релаксации ядер фтора и протонов в растворах парамагнитных ионов». 1964 г. Н.р. – А.А. Попель.
26. **Зарипов Махм. Мубар.** «Некоторые вопросы теории спинрешёточной релаксации в жидких растворах» 1964 г. Н.р. – К.А. Валиев.
27. **Кучерявенко Н.С.** «Исследование ядерного магнитного резонанса в растворах некоторых парамагнитных электролитов». 1964 г. Н.р. – К.А. Валиев.
28. **Мазитов Р.К.** «Экспериментальное исследование релаксации протонов, дейтронов и некоторых других ядер в чистых жидкостях и растворах электролитов». 1964 г. Н.р. – К.А. Валиев.
29. **Сергеев Н.М.** «Спектроскопия ЯМР  $^{19}\text{F}$  винилфторидов». 1964 г.
30. **Степанов В.Г.** «Экспериментальное исследование электронного парамагнитного резонанса ионов группы железа, находящихся в S-состоянии». 1964 г. Н.р. – М.М. Зарипов.
31. **Емельянов М.И.** «Исследование самодиффузии молекул воды в водных растворах электролитов и молекул одного из компонентов в двойных жидких системах методом спинового эха». 1965 г. Н.р. – К.А. Валиев.
32. **Ливанова Л.Д.** «Синтез и исследование методом ЭПР и оптической спектроскопии симметрии точечных дефектов в ряду флюорита и молибдата». 1965 г. Н.р. – М.М. Зарипов.
33. **Малкин Б.З.** «Теоретическое исследование влияния электронно-колебательного взаимодействия на оптические спектры парамагнитных кристаллов». 1965 г. Н.р. – С.А. Альтшулер.
34. **Мехтиев Г.Ф.** «К теории кроссрелаксации в различных явлениях парамагнитного резонанса». 1965 г. Н.р. – С.А. Альтшулер.

35. **Сапрыкова З.А.** «Применение метода ядерной магнитной релаксации для количественного определения ионов металлов в растворе». 1965 г. Н.р. – А.А. Попель.
36. **Черницын А.И.** «Разработка аппаратуры импульсного метода ЯМР – «Спиновое эхо» и её некоторые применения для физико-химических исследований». 1965 г. Н.р. – С.А. Альтшулер.
37. **Ахмедов А.Г.** «Релаксация и спиновая диффузия ядер  $F^{19}$  в непроводящих кристаллах». 1966 г. Н.р. – Р.А. Даутов.
38. **Валишев Р.М.** «Экспериментальное исследование обменных взаимодействий и парамагнитной релаксации во фторосиликате никеля». 1966 г. Н.р. – С.А. Альтшулер.
39. **Зыкова Т.В.** «Изучение строения фосфорорганических соединений методом ЯМР-спектроскопии высокого разрешения». 1966 г. Н.р. – А.И. Разумов, Ю.Ю. Самитов.
40. **Иванов Е.Н.** «Проблема случайных поворотных блужданий и некоторые другие вопросы теории вращательного броуновского движения». 1966 г. Н.р. – К.А. Валиев.
41. **Минеева Р.М.** «К теории магнитного резонанса на ядрах парамагнитных атомов». 1966 г. Н.р. – С.А. Альтшулер.
42. **Чиркин Г.К.** «Исследование электронного парамагнитного резонанса ионов группы железа в  $NH_4Cl$ ». 1966 г. Н.р. – М.М. Зарипов.
43. **Юльметьев Р.М.** «Теоретические вопросы динамики теплового движения частиц в жидкости». 1966 г. Н.р. – К.А. Валиев.
44. **Ястребов В.Н.** «Исследование ядерного магнитного резонанса на простых электронных уровнях ионов  $V^{3+}$  в корунде». 1966 г. Н.р. – С.А. Альтшулер.
45. **Куркин И.Н.** «Изучение спектров ЭПР, ширины линий и спин-решёточной релаксации ионов группы редких земель в кристаллах, имеющих структуру шеелита ( $CaWO_4$ )». 1967 г. Н.р. – Л.Я. Шекун.



46. **Муртазин Ш.Ф.** «Некоторые вопросы ядерного спин-решётчного взаимодействия в кристаллах». 1967 г. Н.р. – С.А. Альтшулер.
47. **Терпиловский Д.Н.** «Некоторые вопросы теории безызлучательной релаксации в водных растворах солей редких земель». 1967 г. Н.р. – С.А. Альтшулер.
48. **Ченборисова Л.Я.** «Применение ядерного магнитного резонанса для исследования пластифицированных полимерных систем». 1967 г. Н.р. – А.И. Маклаков.
49. **Бильданов М.М.** «Некоторые теоретические вопросы исследования молекулярных кристаллов и жидкостей спектроскопическими методами». 1968 г. Н.р. – К.А. Валиев.
50. **Ибраимов Д.И.** «Исследование межмолекулярных взаимодействий в растворах парамагнитных ионов и свободных радикалов методом ЯМР-спектроскопии высокого разрешения». 1968 г. Н.р. – Ю.Ю. Самитов.
51. **Пименов Г.Г.** «Ядерный магнитный резонанс в жёсткоцепных полимерах». 1968 г. Н.р. – А.И. Маклаков.
52. **Аганов А.В.** «Исследование инверсии циклических молекул методом спектроскопии ЯМР высокого разрешения». 1969 г. Н.р. – Ю.Ю. Самитов.
53. **Алиев М.Н.** «Теория некоторых эффектов в парамагнитных кристаллах при низких температурах». 1969 г. Н.р. – Б.И. Кочелаев.
54. **Альтшулер Т.С.** «Электронный парамагнитный резонанс ионов редких земель в растворах». 1968 г. Н.р. – Б.М. Козырев, Н.С. Гарифьянов.
55. **Аминова Р.М.** «Некоторые вопросы ядерного магнитного экранирования в молекулах». 1969 г. Н.р. – Б.А. Арбузов, Ю.Ю. Самитов.
56. **Антипин А.А.** «Экспериментальное исследование спектров ЭПР и спин-решётчной релаксации трёхвалентных редкоземельных

- ионов в монокристаллах структурного ряда флюорита». 1969 г. Н.р. – Л.Я. Шекун.
57. **Григорьев В.П.** «Изучение молекулярной подвижности в кремнеуглеводородных полимерах методом ЯМР». 1969 г. Н.р. – А.И. Маклаков.
  58. **Зайтов М.М.** «Исследование спин-фононного взаимодействия в парамагнитных кристаллах методом одноосного давления». 1969 г. Н.р. – М.М. Зарипов.
  59. **Катышев А.Н.** «Исследование примесных редкоземельных ионов в монокристаллах  $\text{CeO}_2$  методом ЭПР». 1969 г. Н.р. – Л.Я. Шекун.
  60. **Кропотов В.С.** «Экспериментальное исследование методом ЭПР элементов группы железа в кристаллах гомологического ряда флюорита». 1969 г. Н.р. – М.М. Зарипов.
  61. **Садыков Э.К.** «Квадрупольное сверхтонкое взаимодействие парамагнитных ионов в кристалле и вопросы теории ядерного гамма-резонанса». 1969 г. Н.р. – Ш.Ш. Башкиров.
  62. **Селютин Г.Я.** «К теории сдвига и интенсивности мёссбауэровского спектра». 1969 г. Н.р. – Ш.Ш. Башкиров.
  63. **Теплов М.А.** «ЯМР и спин-решётчатая релаксация в кристаллах, содержащих редкоземельные ионы с простым электронным уровнем». 1969 г. Н.р. – С.А. Альтшулер.
  64. **Зарипов М.Р.** «Влияние внутримолекулярных движений на магнитную релаксацию ядер в некоторых органических полимерах». 1970 г. Н.р. – А.И. Ривкинд.
  65. **Згадзай Э.А.** «Изучение строения и структурных особенностей органических соединений различных классов методом магнитной восприимчивости». 1970 г. Н.р. – А.И. Маклаков.
  66. **Корепанов В.Д.** «Исследование магнитного резонанса ядер  $\text{F}^{19}$  в кристалле  $\text{CaF}_2:\text{Gd}^{3+}$  импульсным методом в интервале температур (0.3 – 300)К». 1970 г. Н.р. – С.А. Альтшулер.

67. **Ланцов В.М.** «Исследование молекулярной подвижности в пластифицированном поливинилхлориде импульсным методом ядерного магнитного резонанса». 1970 г. Н.р. – АИ. Маклаков.
68. **Мокеев А.А.** «К статистической теории формы линии парамагнитного резонанса в магнитно-разбавленных кристаллах». 1970 г. Н.р. – С.А. Альтшулер.
69. **Скребнев В.А.** «Кроссрелаксация и некоторые вопросы спин-фононного взаимодействия в магнитно-разбавленных кристаллах». 1970 г. Н.р. – С.А. Альтшулер.
70. **Гаврилов В.В.** «Изучение обменно-связанных пар атомов меди методом ЭПР». 1971 г. Н.р. – Ю.В. Яблоков.
71. **Гильманов А.Н.** «Протонная магнитная релаксация в гидридах переходных металлов». 1971 г. Н.р. – М.А. Ильгамов, Ш.М. Сахабутдинов.
72. **Гольдгаммер К.А.** «Исследование полимеров с сопряжёнными связями и комплексов на их основе методом ядерного магнитного резонанса». 1971 г. Н.р. – А.И. Маклаков.
73. **Захаров А.В.** «Исследование реакций обмена лигандов в аминных комплексах меди (II) и никеля (II) методом ядерной магнитной релаксации». 1971 г. Н.р. – А.А. Попель.
74. **Куренёв В.В.** «Исследование релаксационных механизмов и кинетики кристаллизации в некоторых полимерах методом ядерного магнитного резонанса». 1971 г. Н.р. – А.И. Маклаков.
75. **Манапов Р.А.** «Исследование температурной зависимости квадрупольного расщепления мёссбауэровского спектра кристаллических соединений железа». 1971 г. Н.р. – Ш.Ш. Башкиров.
76. **Сальников Ю.И.** «Исследование реакций комплексообразования ионов железа (III), меди (II) и никеля (II) с некоторыми оксикислотами методом ядерной магнитной релаксации». 1971 г. Н.р. – А.А. Попель.

77. **Хасанов А.Х.** «Исследование эффекта фононного “узкого горла” методом рассеяния света Мандельштама-Бриллюэна». 1971 г. Н.р. – С.А. Альтшулер.
78. **Царевский С.Л.** «Теория электронно-ядерного резонанса и релаксации в проводниках». 1971 г. Н.р. – Б.И. Кочелаев.
79. **Аминов Н.М.** «Динамика кристаллической решётки парамагнетика». 1972 г. Н.р. – Б.И. Кочелаев.
80. **Баширов Ф.И.** «Ядерная магнитная релаксация и переориентация молекул в кристаллах». 1972 г. Н.р. – Р.А. Даутов.
81. **Фалин М.Л.** «Исследование ионов группы железа в гомологическом ряду кристаллов типа флюорита методом двойного электронно-ядерного резонанса». 1972 г. Н.р. – М.М. Зарипов, Ю.Е. Польский.
82. **Чистяков В.А.** «Мёссбауэровские исследования магнитно-упорядочивающихся систем». 1972 г. Н.р. – Ш.Ш. Башкиров.
83. **Аухадеев Ф.Л.** «Ядерная магнитная релаксация в некоторых разбавленных и концентрированных парамагнетиках». 1973 г. Н.р. – С.А. Альтшулер.
84. **Белов Ю.В.** «Некоторые вопросы двойного гетеро- и гомоядерного магнитного резонанса». 1973 г. Н.р. – Ю.Ю. Самитов.
85. **Романенко Л.Н.** «Исследование обменных взаимодействий в двухъядерных карбоксилатах меди». 1973 г. Н.р. – Ю.В. Яблоков.
86. **Федоров В.И.** «Некоторые вопросы стабилизации резонансных условий в экспериментах». 1973 г. Н.р. – Ю.Ю. Самитов.
87. **Вайсфельд М.П.** «К теории спин-решёточной релаксации ядер парамагнитных ионов в твёрдых телах». 1974 г. Н.р. – С.А. Альтшулер.
88. **Валеев И.И.** «Ядерный магнитный резонанс и релаксация в этилсульфатах редких земель». 1974 г. Н.р. – С.А. Альтшулер.
89. **Галеева С.И.** «Магнитно-релаксационный метод анализа и определения редкоземельных элементов». 1974 г. Н.р. – А.А. Попель.

90. **Гапоненко В.А.** «Парамагнитный резонанс обменно-связанных триад некоторых ионов группы железа». 1974 г. Н.р. – Ю.В. Яблоков.
91. **Гарифуллина Р.Л.** «Исследование обменно-связанных пар ионов марганца и железа методом ЭПР». 1974 г. Н.р. – М.М. Зарипов, В.Г. Степанов.
92. **Грезнев Ю.С.** «Исследование механизмов замещения и зарядовой компенсации некоторых элементов группы железа в кристаллах со структурой сульфата калия». 1974 г. Н.р. – М.М. Зарипов.
93. **Климачёв А.Ф.** «Некоторые вопросы, связанные с расчётом времён спин-решёточной релаксации». 1974 г. Н.р. – Л.К. Аминов.
94. **Митрофанов Ю.Ф.** «Исследование сверхтонких взаимодействий и динамических процессов в монокристаллах структуры флюорита методом двойного электронно-ядерного резонанса». 1974 г. Н.р. – Ю.Е. Польский, Б.З. Малкин.
95. **Нигматуллин Р.Р.** «Вопросы кинетики парамагнетиков при низких температурах». 1974 г. Н.р. – Б.И. Кочелаев.
96. **Попов Ю.Л.** «Экспериментальное исследование динамики ядерных спин-систем в твёрдых телах методом импульсного ЯМР». 1974 г. Н.р. – Р.А. Даутов.
97. **Садреев А.Ф.** «Исследование уравнений состояния модели Изинга, полученных диаграммным разложением функций Грина». 1974 г. Н.р. – Ш.Ш. Башкиров.
98. **Синявский В.И.** «Мёссбауэровские исследования процессов формирования магнитной структуры марганец-цинковых ферритов нестехиометрического состава». 1974 г. Н.р. – Ш.Ш. Башкиров.
99. **Тазеева Н.К.** «Исследование пространственной структуры и псевдовращения молекул мышьяксодержащих соединений методом спектроскопии ЯМР». 1974 г. Н.р. – Ю.Ю. Самитов.

100. **Воронкова В.К.** «Парамагнитный резонанс ионов Cu(II) и Co(II) в тетраэдрическом окружении». 1975 г. Н.р. – Ю.В. Яблоков, М.М. Зарипов.
101. **Глебов А.Н.** «Исследование реакций комплексообразования титана (III), ванадия (III) и ванадия (IV) с некоторыми оксикислотами методом ядерной магнитной релаксации». 1975 г. Н.р. – А.А. Попель.
102. **Сафиуллин Р.К.** «Некоторые вопросы теории констант спин-спинового взаимодействия с участием ядра изотопа  $^{31}\text{P}$ ». 1975 г. Н.р. – Р.М. Аминова, Ю.Ю. Самитов.
103. **Силкин Н.И.** «Парамагнетизм атомов и ионов в  $^2\text{S}_{1/2}$  – состоянии в низкосимметричных кристаллах». 1975 г. Н.р. – В.Г. Степанов.
104. **Тухватуллин Р.С.** «Исследование примесных  $3d^n$ -ионов методом ЭПР в ряду низкосимметричных искусственных кристаллогидратов с переменным числом кислородных лигандов». 1975 г. Н.р. – В.М. Винокуров.
105. **Волков В.Я.** «Исследование трансляционных движений молекул жидкостей в пористых средах импульсным методом ЯМР». 1976 г. Н.р. – Н.Н. Непримеров, Р.А. Даутов.
106. **Дёминов Р.Г.** «Некоторые вопросы теории нелинейных оптических эффектов в парамагнетиках и молекулярных кристаллах». 1976 г. Н.р. – Б.И. Кочелаев.
107. **Ивойлов Н.Г.** «Гамма-резонансные исследования магнитного превращения в ферри- и антиферромагнитных кристаллах». 1976 г. Н.р. – Ш.Ш. Башкиров.
108. **Либерман А.Б.** «Мёссбауэровские исследования магнитной структуры и обменных взаимодействий в сложных ферромагнитных соединениях со структурой шпинели и магнетоплюмбита». 1976 г. Н.р. – Ш.Ш. Башкиров.
109. **Низамутдинов Н.М.** «Схемы снятия ориентационной эквивалентности и спектры ЭПР парамагнитных центров в кристаллах». 1976 г. Н.р. – В.М. Винокуров.

110. **Бикчентаев И.Г.** «ЭПР комплексов меди, ванадила и хрома в жидких кристаллах». 1977 г. Н.р. – И.В. Овчинников.
111. **Конов И.С.** «Исследование диэлектрических парамагнетиков Ван Флека методом магнитного резонанса». 1977 г. Н.р. – С.А. Альтшулер, н.к. – М.А. Теплов.
112. **Мусина (Нафикова) А.А.** «Исследование констант магнитного экранирования и спин-спинового взаимодействия в ядерной спиновой системе  $^{31}\text{P}$ ». 1977 г. Н.р. – Ю.Ю. Самитов.
113. **Сабиров Р.Х.** «Вопросы релаксации, обусловленной двухчастичными взаимодействиями в спиновых системах». 1977 г. Н.р. – Б.И. Кочелаев.
114. **Щепкин В.Д.** «Импульсный двойной ядерно-ядерный резонанс в кристаллах». 1977 г. Н.р. – В.М. Винокуров, Р.А. Даутов.
115. **Евгеньева И.И.** «Исследование реакций обмена лигандов в смешанных комплексах меди (II) методом ядерной магнитной релаксации». 1978 г. Н.р. – А.А. Попель, А.В. Захаров.
116. **Корниенко А.А.** «Эффекты обмена металл-лиганд в теории кристаллического поля в диэлектриках». 1978 г. Н.р. – А.М. Леушин.
117. **Котельников Ю.Е.** «Некоторые вопросы теории коллективных свойств экситонов в молекулярных кристаллах». 1978 г. Н.р. – Б.И. Кочелаев.
118. **Мосина Л.В.** «ЭПР триплетных экситонов в координационных полимерах, построенных из двуядерных молекул». 1978 г. Н.р. – Ю.В. Яблоков.
119. **Одинцов Б.М.** «Изучение некоторых комплексных соединений переходных металлов методом ЭПР и динамической поляризации ядер». 1978 г. Н.р. – Б.М. Козырев.
120. **Соловьёв Б.В.** «Исследования методами электронного парамагнитного резонанса магнитных свойств ионов меди в некоторых кристаллах хелатных комплексов с ковалентными связями». 1978 г. Н.р. – Л.К. Аминов.

121. **Усманов Р.Ш.** «Исследование электрополевого эффекта в диэлектрических примесных кристаллах». 1978 г. Н.р. – С.А. Альтшулер.
122. **Цветков Е.А.** «Исследование структуры и свойств активаторных центров редкоземельных ионов в кристаллах фторфосфата кальция». 1978 г. Н.р. – С.А. Альтшулер, И.Н. Куркин.
123. **Абдулсабиров Р.Ю.** «Исследование структуры парамагнитных комплексов хрома и ванадия в кристаллах методом ЭПР». 1979 г. Н.р. – В.Г. Степанов.
124. **Булка Г.Р.** «Исследование кристаллической структуры и объемного распределения примесных ионов в кристаллогидратах методами ЯМР и ЭПР». 1979 г. Н.р. - В.М. Винокуров.
125. **Иванова Т.А.** «Изучение методом ЭПР стекол, содержащих ионы переходных групп, в сантиметровом и дециметровом диапазонах длин волн». 1979 г. Н.р. – М.М. Зарипов, Р.С. Абдрахманов.
126. **Константинов В.Н.** «К теории формы линии ЭПР в магнитно-разбавленных твердых системах». 1979 г. Н.р. – И.В. Овчинников.
127. **Крутиков В.Ф.** «ЭПР ионов в  $^2S_{1/2}$  состоянии в кристаллах ряда флюорита и фтористых перовскитов». 1979 г. Н.р. – В.Г. Степанов.
128. **Скирда В.Д.** «Особенности ядерной магнитной релаксации и молекулярного движения в аморфных полимерах». 1979 г. Н.р. – А.И. Маклаков.
129. **Федий А.А.** «Исследование ориентационных и температурных зависимостей спин-решёточной релаксации трёхвалентных редкоземельных ионов в монокристаллах двойных фторидов». 1979 г. Н.р. – С.А. Альтшулер, А.А. Антипин.
130. **Халиуллин Г.Г.** «К теории обменных взаимодействий и кристаллических полей в металлах». 1979 г. Н.р. – А.М. Леушин.



131. **Архипов С.М.** «Структурные и спектральные характеристики активированных парамагнитных кристаллов в электрическом поле». 1980 г. Н.р. – Б.З. Малкин.
132. **Галеева Н.М.** «Эффекты, вызванные взаимодействием спин-системы с локальными вращениями кристаллической решётки». 1980 г. Н.р. – Б.И. Кочелаев.
133. **Гатауллин О.Ф.** «ЭПР основного состояния и спи-спиновые взаимодействия примесных ионов хрома в изоморфном ряду-гидратов ГАС». 1980 г. Н.р. – Ю.М. Рыжманов.
134. **Гревцев В.А.** «Магнитоакустические явления в парамагнетиках». 1980 г. Н.р. – С.А. Альтшулер, н.к. – М.А. Теплов.
135. **Двояшкин Н.К.** «Изучение особенностей кристаллизации олигоэтиленгликоля из концентрированных растворов импульсным методом ЯМР». 1980 . Н.р. – А.И. Маклаков.
136. **Зябликова Т.А.** «Динамическая гетероядерная спиновая развязка  $^1\text{H} - ^{31}\text{P}$ ». 1980 г. Н.р. – Ю.Ю. Самитов.
137. **Клочков В.В.** «Динамический ЯМР средних гетероциклов (O, S, Sb), подверженных многопараметровому обмену». 1980 г. Н.р. – Ю.Ю. Самитов.
138. **Кораблёва С.Л.** «Выращивание монокристаллов фторидов со структурой перовскита и шеелита и исследование их методом ЭПР». 1980 г. Н.р. – С.А. Альтшулер.
139. **Косов А.А.** «Магнитный резонанс в сверхпроводниках с парамагнитными примесями». 1980 г. Н.р. – Б.И. Кочелаев.
140. **Тагиров М.С.** «Исследование ЯМР в некоторых ван-флековских парамагнетиках». 1980 г. Н.р. – С.А. Альтшулер, н.к. - М.А. Теплов.
141. **Хасанов Р.А.** «Исследование структуры и свойств радиационных парамагнитных центров в некоторых сульфатах». 1980 г. Н.р. - В.М. Винокуров.
142. **Храмов А.С.** «Особенности строения и параметры мёссбауэровских спектров фосфорорганических соединений галогенидов олова». 1980 г. Н.р. – Ш.Ш. Башкиров.

143. **Чиркин Ю.К.** «Спин-решёточная релаксация и эффект узкого фононного горла парамагнитных центров со спином  $S > 1/2$  в кристаллическом поле кубической симметрии». 1980 г. Н.р. – С.А. Альтшулер.
144. **Шлёнкин В.И.** «Исследование фазовой релаксации редкоземельных ионов в кристаллах со структурой шеелита методом электронного спинового эха». 1980 г. Н.р. – С.А. Альтшулер.
145. **Бикеев Ш.С.** «Дисперсия индуцированных лантанидами ЯМР сдвигов и межмолекулярный обмен». 1981 г. Н.р. – Ю.Ю. Самитов.
146. **Гринберг Е.С.** «Отклик на внешние переменные поля и неравновесные процессы в системе спинов и фононов парамагнетика». 1981 г. Н.р. – Б.И. Кочелаев.
147. **Данилова О.И.** «Статическая и динамическая стереохимия замещённых тетрагидро- 1,3-оксазинов и их бициклических аналогов». 1981 г. Н.р. – Ю.Ю. Самитов.
148. **Девятов Ф.В.** «Исследование гомо- и гетероцентровых комплексов гадолиния (III) и ионов редкоземельных элементов иттриевой группы с лимонной и трикарбаллиловой кислотами магнитно-релаксационным методом в водных растворах». 1981 г. Н.р. – Ю.И. Сальников.
149. **Захарченко Т.А.** «Ядерная магнитная релаксация протонов воды, водных растворов солей и углеводов в пористых средах с малой удельной поверхностью». 1981 г. Н.р. – В.М. Винокуров.
150. **Ивойлова Э.Х.** «Теория спектров редкоземельных ионов с наполовину заполненной 4f-оболочкой в кристаллах типа флюорита и перовскита». 1981 г. Н.р. – А.М. Леушин.
151. **Маненкова Л.К.** «Мёссбауэровское исследование температурной зависимости магнитных характеристик феррошпинелей сложного состава». 1981 г. Н.р. – Ш.Ш. Башкиров.

152. **Серебренникова Т.А.** «Молекулярное движение и поперечная ядерная магнитная релаксация в концентрированных растворах полистирола». 1981 г. Н.р. – А.И. Маклаков.
153. **Тагиров Л.Р.** «Исследование спин-спиновых взаимодействий в сверхпроводниках и их влияние на спектры ЭПР». 1981 г. Н.р. – Б.И. Кочелаев.
154. **Фазлеев Н.Г.** «Магнитная релаксация в проводниках с парамагнитными примесями при низких температурах». 1981 г. Н.р. – Б.И. Кочелаев.
155. **Фаткуллин Н.Ф.** «К теории спин-решёточной релаксации в молекулярных кристаллах». 1981 г. Н.р. – Л.К. Аминов.
156. **Хусаинов М.Г.** «Форма линии парамагнитного резонанса в сверхпроводнике II рода». 1981 г. Н.р. – Б.И. Кочелаев.
157. **Азанчеев Н.М.** «Молекулярное движение и ЯМР-релаксация в эфирах фталевой кислоты и слабоконцентрированных растворах поливинилхлорида и полистирола на их основе». 1982 г. Н.р. – А.И. Маклаков.
158. **Зубатов А.Г.** «Исследование парамагнитных дефектов в некоторых поли типах карбида кремния». 1982 г. Н.р. – В.Г. Степанов.
159. **Калиненко В.Н.** «К теории обменного взаимодействия орбитально вырожденных ионов в сильных кристаллических полях». 1982 г. Н.р. – М.В. Ерёмин.
160. **Кротов В.И.** «Исследование магнитострикции в редкоземельных парамагнитных кристаллах при низких температурах». 1982 г. Н.р. – С.А. Альтшулер.
161. **Парфёнов В.В.** «Электронные свойства и мёссбауэровские спектры полупроводниковых соединений железа и олова». 1982 г. Н.р. – Ш.Ш. Башкиров.
162. **Сахаров В.А.** «Влияние электрического поля на спектры и форму линий ЭПР редкоземельных ионов в кристаллах со структурой шеелита». 1982 г. Н.р. – С.А. Альтшулер.

163. **Садыков Р.Х.** «Стереоспецифичность спин-решёточной релаксации протонов органических молекул в спектроскопии ЯМР высокого разрешения». 1982 г. Н.р. – Ю.Ю. Самитов.
164. **Усачев А.Е.** «Изучение методом ЭПР фазовых переходов в кристаллах  $ABCl_3$ , содержащих ионы переходных групп». 1982 г. Н.р. – Ю.В. Яблоков.
165. **Вайнштейн Д.И.** «Импульсный ДЯМР точечных диамагнитных дефектов в примесных кристаллах  $CaF_2$ ,  $\beta$ - $PbF_2$ ,  $NaF$ ». 1983 г. Н.р. – В.М. Винокуров.
166. **Дуглав А.В.** «Исследование некоторых парамагнитных кристаллов с помощью ультразвукового и магнитного полей низкой частоты». 1983 г. Н.р. – С.А. Альтшулер.
167. **Каратаева Ф.Х.** «Конформации 1,3,2-диоксафосфор(IV)инанов и их производных по данным спектроскопии ЯМР  $^1H$ ,  $^{31}P$  и  $^{13}C$ ». 1983 г. Н.р. – Ю.Ю. Самитов, В.В. Овчинников.
168. **Рахматуллин Р.М.** «Исследование эффекта фононного горла в двухфононном резонансном процессе спин-решёточной релаксации редкоземельных ионов в монокристаллах двойных фторидов». 1983 г. Н.р. – С.А. Альтшулер.
169. **Садыкова А.Ю.** «Расчёт магнитных свойств второго порядка локализованных молекулярных фрагментов вариационным методом в базисе гауссовых функций». 1983 г. Н.р. – Р.М. Аминова.
170. **Чернов К.П.** «Спектроскопические и релаксационные характеристики примесных редкоземельных центров в кристаллах двойного фторида  $BaY_2F_8$  и оксиортосиликата  $Y_2SiO_5$ ». 1983 г. Н.р. – С.А. Альтшулер.
171. **Чирко Е.П.** «Изучение особенностей морфологии и кристаллизации частичнокристаллических олигоэфиров». 1983 г. Н.р. – В.С. Смирнов.

172. **Аникеёнок О.А.** «Теория лигандной сверхтонкой структуры парамагнитных центров с незаполненными 3d и 4f оболочками». 1984 г. Н.р. – М.В. Ерёмин.
173. **Булатов Ф.М.** «Мессбауэровское исследование роли изоморфных ионов железа в кристаллической структуре слоистых силикатов (хризотил-асбест, флогопит, вермикулит)». 1984 г. Н.р. – Ш.Ш. Башкиров.
174. **Ихсанов Р.Н.** «Нелинейные эффекты в спектроскопии ЯМР и методы оценки параметров спектров систем с обменом». 1984 г. Н.р. – Ю.Ю. Самитов.
175. **Масленников А.С.** «Динамика обмена энергией между резервуарами ядерных спинов во вращающейся системе координат». 1984 г. Н.р. – Р.А. Даутов.
176. **Сафин Р.Ш.** «Состояния ионов меди (II) и ванадила (II) в ионообменных смолах по данным ЭПР». 1984 г. Н.р. – Г.П. Вишневская.
177. **Фролов В.Ф.** «Акустический парамагнитный резонанс на электронах проводимости в металлах». 1984 г. Н.р. – Б.И. Кочелаев.
178. **Гиматдинов Р.С.** «Влияние молекулярной массы на кинетику кристаллизации макромолекул и структуру образующихся фаз». 1985 г. Н.р. – В.С. Смирнов.
179. **Жданов Р.Ш.** «Магнитоупругие взаимодействия в кристаллах  $\text{LiTRF}_4$ ». 1985 г. Н.р. – М.А. Теплов, н.к. – Д.Н. Терпиловский.
180. **Кудряшов А.А.** «Ядерный магнитный резонанс  $^{169}\text{Tm}$  в кристаллах ван-флековских парамагнетиков». 1985 г. Н.р. – М.А. Теплов.
181. **Курзин С.П.** «ЭПР и спин-решёточная релаксация некоторых полимеров с сопряжёнными связями в твёрдой фазе». 1985 г. Н.р. – С.А. Альтшулер, Л.К. Аминов.
182. **Назаров Ю.Г.** «Оптическое детектирование электронного парамагнитного резонанса ионов  $\text{Ce}^{3+}$  в кристаллах методом спинового комбинационного рассеяния света». 1985 г. Н.р. – Б.И. Кочелаев.

183. **Сафин В.А.** «ДЯМР и термодинамика спиновых систем в кристаллах  $\text{CaF}_2$ ,  $\text{LiF}$ ,  $\text{NaCl}$ ». 1985 г. Н.р. – В.М. Винокуров, В.А. Скребнев.
184. **Севрюгин В.А.** «Особенности трансляционной подвижности макромолекул в расплавах и растворах полимеров». 1985 г. Н.р. – А.И. Маклаков.
185. **Фушман Д.А.** «Спиновая кинетика в диэлектрических стёклах при низких температурах». 1985 г. Н.р. – Б.И. Кочелаев.
186. **Конькин А.Л.** «Исследование лигандных взаимодействий некоторых редкоземельных ионов в кристаллах со структурой перовскита и флюорита методом двойного электронно-ядерного резонанса». 1986 г. Н.р. – М.М. Зарипов, М.Л. Фалин.
187. **Сундуков В.И.** «Самодиффузия макромолекул и молекул растворителя в растворе и расплаве полиэтиленоксида». 1986 г. Н.р. – А.И. Маклаков, В.Д. Скирда.
188. **Хасанов Б.М.** «Термодинамика и спиновая кинетика в жидких кристаллах». 1986 г. Н.р. – Б.И. Кочелаев.
189. **Хаяров А.И.** «Импульсный и стационарный динамический ЯМР моноциклических фосфоранов». 1986 г. Н.р. – Ю.Ю. Самитов.
190. **Гринберг Ф.А.** «Самодиффузия в растворах блоксополимеров полисульфонэтиленоксида и полисульфонбутадиена ». 1987 г. Н.р. – А.И. Маклаков.
191. **Домрачева Н.Е.** «ЭПР исследование комплексов ряда металлов в жидкокристаллической матрице». 1987 г. Н.р. – И.В. Овчинников.
192. **Трофанчук Л.А.** «Фазовый переход и локальная динамика парамагнитных центров двухвалентного таллия в кристаллах семейства дигидрофосфата калия». 1987 г. Н.р. – В.Г. Степанов.
193. **Трутнев К.Ф.** «Эффекты электронного узкого горла в спиновой кинетике нормальных и сверхпроводящих металлов». 1987 г. Н.р. – Б.И. Кочелаев, н.к. – Л.Р. Тагиров.

194. **Вагизов Ф.Г.** «Экспериментальное исследование некоторых высокочастотных процессов методом гамма-резонансной спектроскопии». 1988 г. Н.р. – А.В. Митин, Р.А. Манапов.
195. **Завидонов А.Ю.** «Электронно-колебательное взаимодействие в парах магнитных ионов». 1988 г. Н.р. – М.В. Ерёмин.
196. **Згадзай О.Э.** «Самодиффузия и фазовое расслоение в растворах полимеров». 1988 г. Н.р. – А.И. Маклаков.
197. **Кальчев В.П.** «Исследование ядерных квадрупольных взаимодействий в тетраэдрических комплексах меди  $^{63,65}\text{Cu}$  методом ЯКР». 1988 г. Н.р. – И.Н. Пеньков.
198. **Прошин Ю.Н.** «Спиновая динамика электронов проводимости в условиях магнитного пробоя». 1988 г. Н.р. – Б.И. Кочелаев, М.И. Каганов.
199. **Хуцишвили О.Г.** «Сверхтонкие взаимодействия в кристаллах, активированных элементами переходных групп». 1988 г. Н.р. – М.В. Ерёмин.
200. **Гафуров И.Р.** «Самодиффузия и гелеобразование в растворах желатина и триацетата целлюлозы». 1989 г. Н.р. – А.И. Маклаков, В.Д. Скирда.
201. **Ефимов В.Н.** «ЭПР ионов в  $^2\text{S}_{1/2}$  состоянии в некоторых сульфатах и селенатах со структурными фазовыми переходами». 1989 г. Н.р. – В.Г. Степанов, н.к. - Е.С. Гринберг.
202. **Иваньшин В.А.** «Спин-решёточная релаксация парамагнитных центров в некоторых фторидных и оксидных кристаллах». 1989 г. Н.р. – Л.К. Аминов.
203. **Миронов Г.И.** «Спиновая релаксация в разбавленных магнитных сплавах при низких температурах». 1989 г. Н.р. – Б.И. Кочелаев, н.к. – Н.Г. Фазлеев.
204. **Орлинский С.Б.** «Экспериментальное исследование неорганических фосфатных стёкол, активированных редкоземельными ионами, методом электронного спинового эха». 1989 г. Н.р. – А.А. Антипин.

205. **Розенцвайг Ю.К.** «Селективный метод детектирования неравновесных фононов терагерцовых частот в кристаллах и в стёклах на основе метода ЭПР». 1989 г. Н.р. – А.А. Антипин.
206. **Салихов И.Х.** «ЭПР и спин-решёточная релаксация примесных редкоземельных ионов в ван-флековских парамагнетиках». 1989 г. Н.р. – М.А. Теплов, н.к. – И.Н. Куркин.
207. **Таюрский Д.А.** «Спиновая кинетика в парамагнитных кристаллах при низких температурах». 1989 г. Н.р. – Б.И. Кочелаев.
208. **Филиппов А.В.** «Структура, кристаллизация и плавление смесей кристаллизующегося полиэтиленоксида с некристаллизующимся полипропиленоксидом. Изучение методом импульсного ЯМР». 1989 г. Н.р. – В.С. Смирнов.
209. **Аминов К.Л.** «Явления переноса низкочастотных электронных возбуждений и энергии колебаний решётки в анизотропных парамагнитных кристаллах». 1990 г. Н.р. – Б.З. Малкин.
210. **Володин А.Г.** «Исследование магнитной релаксации дипольных изинговских ферромагнетиков при сверхнизких температурах». 1990 г. Н.р. – М.А. Теплов.
211. **Егоров А.В.** «Спин-спиновые взаимодействия в ван-флековских парамагнетиках и магнитная релаксация жидкого  $^3\text{He}$  в контакте с этим веществом». 1990 г. Н.р. – М.А. Теплов.
212. **Ильясов К.А.** «Спектроскопия ЯМР в изучении многопозиционного обмена в средних гетероциклах». 1990 г. Н.р. – А.В. Аганов.
213. **Латышов Ш.К.** «Исследование влияния среды на параметры конформационных превращений ряда средних гетероциклов методом динамического ЯМР». 1990 г. Н.р. – А.В. Ильясов.
214. **Назырова А.З.** «Взаимодействие ацилизо(тио)цианатов с бифункциональными гетероциклическими соединениями пиразолинового ряда». 1990 г. Н.р. – Н.Н. Зобова, А.В. Аганов.
215. **Сахаева С.И.** «Механизмы спин-решёточной релаксации в диэлектрических ван-флековских парамагнетиках». 1990 г. Н.р. – Л.К. Аминов.



216. **Соловьёв А.Е.** «Распространение фононов в твёрдом теле с резонансными центрами». 1990 г. Н.р. – Б.И. Кочелаев.
217. **Тюрин В.А.** «Ядерная спин-спиновая релаксация в пластифицированном поливинилхлориде при деформации». 1990 г. Н.р. – А.И. Маклаков.
218. **Хасанова Н.М.** «Инвариантные методы анализа тензоров спинового Гамильтониана спектров ЭПР и координационных полиэдров в структуре примесных кристаллов». 1990 г. Н.р. – В.М. Винокуров, Н.М. Низамутдинов.
219. **Скворцов А.И.** «Мёссбауэровские спектры магнетиков в условиях высокочастотного перемагничивания». 1991 г. Н.р. – Ш.Ш. Башкиров.
220. **Хайбуллин Р.И.** «Теория спин-решёточной релаксации в полиацетилене и молекулярных кристаллах диацетиленового ряда». 1991 г. Н.р. – Л.К. Аминов.
221. **Аль-Суфи Абдул Раззак.** «Кристаллофизика  $ZnSeO_4 \cdot 6H_2O$ ». 1992 г. Н.р. – В.М. Винокуров.
222. **Бахарев О.Н.** «Экспериментальные исследования ядерного магнитного резонанса в высокотемпературных сверхпроводниках  $Pr_{1.85}Ce_{0.15}CuO_{4-y}$  и  $TmBa_2Cu_3O_{7-y}$ ». 1992 г. Н.р. – М.А. Теплов.
223. **Маркелов А.А.** «Изучение процессов фото и термостимулированной перезарядки примесных ионов и собственных дефектов в кристаллах  $YAlO_3$  и  $Y_3Al_5O_{12}$ ». 1992 г. Н.р. - В.М. Винокуров, Н.М. Низамутдинов.
224. **Махиянов Н.** «Мультиплетности в протонных спектрах ЯМР стереорегулярных 1,4-полидиенов». Н.р. – Р.Х. Садыков, А.С. Хачатуров.
225. **Налётов В.В.** «Экспериментальное исследование ядерной магнитной релаксации меди в сверхпроводнике  $Y_{1-x}Yb_xBa_2Cu_3O_{7-y}$  методом ЯКР» 1992 г. Н.р. – М.А. Теплов.
226. **Недопекин О.В.** «Рассеяние света на парамагнитных ионах в твёрдом теле». 1992 г. Н.р. – Б.И. Кочелаев.

227. **Усеинов Н.Х.** «Магнитные осцилляции характеристик металла в условиях магнитного пробоя электронов проводимости с учётом спиновых степеней свободы». 1992 г. Н.р. – Б.И. Кочелаев, н.к. – Ю.Н. Прошин.
228. **Чистяков Д.В.** «Спин-температурные эффекты в парамагнетиках в условиях ФЦГ». 1992 г. Н.р. – Б.И. Кочелаев.
229. **Валиуллин А.А.** «Мёссбауэровские исследования структурного упорядочения многокомпонентных соединений железа». 1993 г. Н.р. – Ш.Ш. Башкиров.
230. **Шарин Е.П.** «Пространственное распределение магнитного поля вблизи поверхности анизотропного сверхпроводника». 1993 г. Н.р. – Б.И. Кочелаев.
231. **Изотов В.В.** «ЭПР ионов таллия в протонных стёклах, сегнето- и антисегнето-электрических фазах смешанных кристаллов дигидрофосфата рубидия-аммония (RADP)». 1994 г. Н.р. – В.Г. Степанов, н.к. – Е.С. Гринберг.
232. **Дело М.О.** «Мёссбауэровские исследования особенностей свойств комплексов железа и олова в растворах». 1995 г. Н.р. – Ш.Ш. Башкиров.
233. **Марвин О.Б.** «Исследование методом ЯМР дефектов кристаллической структуры и магнитных свойств соединений  $TmBa_2Cu_3O_{6+x}$ ». 1995 г. Н.р. – М.А. Теплов, н.к. – А.В. Дуглав.
234. **Валиуллин Р.Р.** «Некоторые особенности самодиффузии низкомолекулярных жидкостей в пористых средах». 1996 г. Н.р. – В.Д. Скирда.
235. **Галеев А.А.** «Топология тензоров спинового гамильтониана ионов  $Mn^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$  и квадратичных тензорных произведений кристаллического поля в монокристаллах». 1996 г. Н.р. – В.М. Винокуров, Н.М. Низамутдинов.
236. **Громов И.А.** «Исследование неорганических стёкол, активированных некрамерсовыми ионами, методом электронного спинового эха». 1996 г. Н.р. – А.А. Антипин.

237. **Идиятуллин Д.Ш.** «ЯМР релаксация и спиновая диффузия в сегментированных полиуретанах». 1996 г. Н.р. – В.С. Смирнов.
238. **Рябов Я.Е.** «Исследование влияния самоподобной структуры среды на физические процессы переноса и релаксации». 1996 г. Н.р. – Р.Р. Нигматуллин.
239. **Акст Е.Р.** «Мёссбауэровская спектроскопия модифицированных радиационным воздействием поверхностных слоёв сплавов на основе железа». 1997 г. Н.р. – Ш.Ш. Башкиров.
240. **Белов С.И.** «Спиновая кинетика в двумерных системах». 1997 г. Н.р. – Б.И. Кочелаев.
241. **Варламов С.В.** «Модель зон проводимости в бислойных купратах». 1997 г. Н.р. – М.В. Ерёмин.
242. **Исавнин А.Г.** «Исследование восприимчивости мелкодисперсных магнетиков». 1997 г. Н.р. – Э.К. Садыков.
243. **Крюков Е.В.** «Исследование методом ЯМР и ЯКР фазового расщепления в сверхпроводниках  $TmBa_2Cu_3O_{6+x}$  и  $TmBa_2Cu_3O_8$ ». 1997 г. Н.р. – М.А. Теплов, н.к. – А.В. Дуглав.
244. **Соловьянов С.Г.** «Некоторые вопросы электронного строения металлооксидов». 1997 г. Н.р. – М.В. Ерёмин.
245. **Антонова И.И.** «ЭПР-исследования и анализ параметров спинового гамильтониана ионов  $Fe^{3+}$  и  $Gd^{3+}$  в кристаллах структуры кольквирита». 1998 г. Н.р. – В.Г. Степанов.
246. **Васильев Г.И.** «Влияние структуры молекул на их подвижность в растворах и расплавах гибкоцепных полимеров» 1998 г. Н.р. – В.Д. Скирда.
247. **Ефремова С.А.** «Форма линии магнитного резонанса в анизотропных сверхпроводниках». 1998 г. Н.р. – С.Л. Царевский.
248. **Кондрашкин Ю.Е.** «Теоретический анализ спектров ЭПР последовательных радикальных пар реакционных центров фотосинтеза». 1998 г. Н.р. – К.М. Салихов.

249. **Лавизина О.В.** «Единая картина распределения электрических полей в высокотемпературных сверхпроводниках типа Y-Ba-Cu-O». 1998 г. Н.р. – М.В. Ерёмин.
250. **Лукоянов Д.А.** «Влияние дефектов структуры на спин-решёточную релаксацию ионов  $\text{Nd}^{3+}$  в иттрий-алюминиевом гранате и центров облучения в кварцевом стекле». 1998 г. Н.р. – Л.К. Аминов.
251. **Несмелова И.В.** «Изучение самодиффузии молекул глобулярных белков в водных растворах методом ЯМР с ИГМП». 1998 г. Н.р. – В.Д. Федотов, В.Д. Скирда.
252. **Сайкин С.К.** «Изотопические эффекты в оптических и ЯМР спектрах кристаллов ( ${}^6\text{Li}_x {}^7\text{Li}_{1-x} \text{YF}_4:\text{R}$ ,  $\text{R}=\text{Er}^{3+}$ ,  $\text{Ho}^{3+}$ ;  ${}^{73}\text{Ge}_x {}^{74}\text{Ge}_{1-x}$ ). 1998 г. Н.р. – Б.З. Малкин.
253. **Шайхутдинов Р.А.** «Стереодинамические свойства гетероциклов среднего размера в растворах по данным одно- и двумерной спектроскопии ЯМР». 1998 г. Н.р. – В.В. Клочков, А.В. Аганов.
254. **Асланян И.Ю.** «Трансляционная подвижность макромолекул полиэтиленгликоля в водных растворах, бинарных смесях и полиэлектролитном геле» 1999 г. Н.р. – В.Д. Скирда.
255. **Васина Е.Н.** «Самодиффузия низкомолекулярных жидкостей в хитозановых и трековых мембранных материалах» 1999 г. Н.р. – В.Д. Скирда, В.И. Волков.
256. **Ерёмин И.М.** «Спиновая восприимчивость квазидвумерных систем с сильными электронными корреляциями». 1999 г. Н.р. – Б.И. Кочелаев.
257. **Клочков А.В.** «Магнитные свойства мелкодисперсных порошков  $\text{LiYF}_4$  и  $\text{LiTmF}_4$  при низких температурах» 1999 г. Н.р. – М.С. Тагиров.
258. **Ларюхин М.А.** «Исследование парамагнитных дефектов в рентгенооблучённых кристаллах  $\text{KTiPO}_4$  и  $\text{RbTiPO}_4$ ». 1999 г. Н.р. – В.Г. Степанов.
259. **Мамин Г.В.** «Локальная динамика парамагнитных центров таллия в кристаллах группы  $\text{b-K}_2\text{SO}_4$ ». 1999 г. Н.р. – В.Г. Степанов.

260. **Мухамедшин И.Р.** «Исследование дефектов кристаллической структуры ВТСП типа  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$  методами ЯКР/ЯМР». 1999 г. Н.р. – М.А. Теплов, А.В. Дуглав.
261. **Рахматуллин А.И.** «Структурные, спектральные и динамические особенности органических соединений и металлокомплексов в растворе, расплаве и твёрдой фазе по данным ЯМР». 1999 г. Н.р. – А.В. Аганов, В.В. Клочков.
262. **Эпель Б.М.** «Исследование релаксации редкоземельных ионов в стёклах методом электронного спинового эха». 1999 г. Н.р. – А.А. Антипин.
263. **Валидов А.А.** «ЭПР-исследование взаимосвязи магнитных свойств со структурными факторами и явлением сверхпроводимости в легированном европием  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_2\text{CuO}_4$ ». 2000 г. Н.р. – В.Е. Катаев.
264. **Ерёмина Р.М.** «Модели магнитных кластеров в  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$ ». 2000 г. Н.к. – М.А. Теплов.
265. **Исхакова А.И.** «Теория спектров и релаксации возбуждений в кристаллах  $\text{CsCdBr}_3$ , активированных редкоземельными ионами». 2000 г. Н.р. – Б.З. Малкин.
266. **Ларионов И.А.** «Зависимость энергетической щели в ВТСП от волнового вектора, температуры и индекса допирования». 2000 г. Н.р. – М.В. Ерёмин.
267. **Урядов А. В.** «Самодиффузия низкомолекулярных жидкостей в цеолите NaX и каолините» 2000 г. Н.Р. – А.И. Маклаков, В.Д. Скирда.
268. **Ильясов Н.А.** «Методы повышения временного разрешения в ЯМР-томографии быстропротекающих процессов в биологических системах». 2001 г. Н.р. – К.М. Салихов.
269. **Кокин С.В.** «Исследование формирования магнитной микроструктуры гексаферритов с изовалентными и неизовалентными замещениями». 2001 г. Н.р. – Ш.Ш. Башкиров.
270. **Сахратов Ю.А.** «Исследование методом ЯКР эффектов неоднородного распределения зарядов в соединениях  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$

- с уровнем допирования вблизи оптимального». 2002 г. Н.р. – М.А. Теплов, н.к. – М.В. Ерёмин.
271. **Цейтлин М.П.** «ЭПР-томография в средах с проводимостью и диэлектрическими потерями». 2002 г. Н.р. – К.М. Салихов.
272. **Январёв Е.А.** «Исследование локального магнитного порядка и спиновых флуктуаций методом ядерного резонансного рассеяния синхротронного излучения». 2002 г. Н.р. – В.В. Самарцев, Е.А. Попов.
273. **Галеев Р.Т.** «Некоторые спектроскопические проявления спиновых корреляций и переноса когерентности в электронном парамагнитном резонансе». 2003 г. Н.р. – К.М. Салихов.
274. **Гафуров М.Р.** «ЭПР примесных ионов  $\text{Er}^{3+}$ ,  $\text{Yb}^{3+}$ ,  $\text{Dy}^{3+}$ ,  $\text{Tb}^{3+}$  и собственных магнитных центров в  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  ( $6 < x < 7$ )». 2003 г. Н.р. – М.А. Теплов, И.Н. Куркин, н.к. – М.В. Ерёмин.
275. **Герасимов К.И.** «Исследование кристаллов гомологического ряда флюорита, активированных ионами трёхвалентного иттербия, методами оптической спектроскопии и магнитного резонанса». 2003 г. Н.р. – М.Л. Фалин.
276. **Каширин Н.В.** «Ядерная магнитная релаксация и самодиффузия молекул ЭББА и МББА в предпереходной (изотропная жидкость-нематик) области». 2003 г. Н.р. – В.Д. Скирда, н.к. – И.В. Овчинников.
277. **Ихаб А.-Л. А.-Л.** «Магнитное упорядочение и электрические свойства ферриманганитов Nd и Sm со структурой перовскита». 2003 г. Н.р. – Ш.Ш. Башкиров.
278. **Фазлижанов И.И.** «Структура и магнитные свойства парамагнитных комплексов примесных восьмикратно координированных ионов меди и титана в кристаллах со структурой флюорита». 2003 г. Н.р. – М.М. Зарипов, В.А. Уланов.
279. **Сагидуллин А.И.** «Самодиффузия дендримеров в растворах». 2004 г. Н.р. – В.Д. Скирда.

280. **Сафина А.М.** «Спиновая релаксация и фазовое расслоение в слабодопированных купратах». 2004 г. Н.р. – Б.И. Кочелаев.
281. **Хайрутдинов Б.И.** «Двумерная ЯМР NOESY спектроскопия в конформационно жёстких и подвижных гетероциклах среднего размера». 2004 г. Н.р. – В.В. Клочков.
282. **Шилова Е.В.** «Орбитальный порядок и спиновая кинетика слабодопированных манганитов». 2004 г. Н.р. – Б.И. Кочелаев.
283. **Болтакова Н.В.** «Кристаллическая и магнитная микроструктура редкоземельных железосодержащих перовскитоподобных оксидов». 2005 г. Н.р. – Ш.Ш. Башкиров, Л.Д. Зарипова.
284. **Дулов Е.Н.** «Исследование тонких магнитных плёнок, полученных высокодозной имплантацией ионов железа в кремний». 2005 г. Н.р. – Н.Г. Ивойлов, н.к. – В.Ю. Петухов.
285. **Гарипов Р.Р.** «ЭПР и структура комплексов меди (II) с N, O, P, S – содержащими лигандами». 2005 г. Н.р. – А.В. Аганов., н.к. – А.Л. Конькин, В.Г. Штырлин.
286. **Минкин А.В.** «Форма линии магнитного резонанса в случайно неоднородных сверхпроводниках II рода». 2006 г. Н.р. – С.Л. Царевский.
287. **Юльметов А.Р.** «Структура и магниторезонансные параметры молекулярных систем на основе молекулярной механики, квантовой химии и спектроскопии». 2006 г. Н.р. – Р.М. Аминова, н.к. – А.В. Аганов.
288. **Юричук А.А.** «Когерентная динамика мёссбауэровских спектроскопических переходов в магнитных материалах». 2006 г. Н.р. – Ш.Ш. Башкиров.
289. **Архипов Р.В.** «Самодиффузия в пористых средах при наличии потока диффузанта». 2007 г. Н.р. – В.Д. Скирда.
290. **Гадиев Т.А.** «Двумерная спектроскопия ЯМР NOESY в изучении пространственной структуры мономерных и димерных производных каликс (4) аренов в растворах». 2007 г. Н.р. – В.В. Клочков, н.к. – Ф.Х. Каратаева.

291. **Захаров Д.В.** «Исследование анизотропных обменных взаимодействий в монокристаллах ( $\text{NaV}_2\text{O}_5$  и  $\text{TiOCl}$ ) методом ЭПР». 2007 г. Н.р. – М.В. Ерёмин.
292. **Мутина А.Р.** «Внутренние градиенты магнитного поля в пористых средах: экспериментальное исследование». 2007 г. Н.р. – В.Д. Скирда.
293. **Рудакова М.А.** «Самодиффузия воды в ориентированных липидных бислоях». 2007 г. Н.р. – А.В. Филиппов.
294. **Ванюнин М.В.** «Теоретическое исследование спектров ЭПР и спиновой динамики в кристаллах  $\text{LiYF}_4$ , активированных редкоземельными ионами». 2008 г. Н.р. – Б.З. Малкин.
295. **Клочков А.В.** «Остаточное диполь-дипольное взаимодействие в ЯМР исследованиях пространственного строения олигопептидов». 2008 г. Н.р. – В.Д. Скирда, н.к. – А.В. Аганов.
296. **Савостина Л.И.** «Изучение механизма бимолекулярных реакций с участием фосфорсодержащих соединений методом функционала плотности». 2008 г. Н.р. – Р.М. Аминова.
297. **Усеинов А.Н.** «Эффекты гигантского магнитосопротивления в ферромагнитных наноконтактах». 2008 г. Н.р. – Л.Р. Тагиров.
298. **Юдин А.Н.** «Магнитно-резонансные исследования наноскопических свойств криогенных жидкостей». 2008 г. Н.р. – М.С. Тагиров, н.к. – Д.А. Таюрский.
299. **Андреев А.И.** «Динамическая спиновая восприимчивость модели. Сопоставление с данными по рассеянию нейтронов в  $\text{Pr}_{0.88}\text{LaCe}_{0.12}\text{CuO}_{4-x}$  и  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ ». 2009 г. Н.р. – М.В. Ерёмин.
300. **Кутузов А.С.** «Магнитные свойства и спиновая кинетика Кондорешёток и сверхпроводящих купратов с ионами иттербия». 2009 г. Н.р. – Б.И. Кочелаев.
301. **Салихов Р.И.** «Экспериментальное обнаружение и исследование эффекта спинового экранирования в тонкоплёночных гетероструктурах сверхпроводник/ферромагнетик». 2009 г. Н.р. – И.А. Гарифуллин, н.к. – Л.Р. Тагиров.



302. **Аринин В.В.** «Эффекты когерентности и контролируемой квантовой интерференции в спектрах резонансной флуоресценции мёссбауэровского излучения». 2010 г. Н.р. – Ш.Ш. Башкиров.
303. **Гайнов Р.Р.** «Исследование особенностей электронного строения медьсодержащих халькогенидов методами ЯКР и ЯМР». 2010 г. Н.р. – А.В. Дуглав, н.к. – И.Н. Пеньков.
304. **Платова Т.А.** «Исследование упорядочения кристаллической структуры кобальтатов методом ЯКР». 2010 г. Н.р. – И.Р. Мухамедшин.
305. **Савинков А.В.** «Исследование методом ЯМР/ЯКР неоднородного распределения зарядов и спинов в плоскости  $\text{CuO}_2$  купратных оксидов типа 123». 2010 г. Н.р. – А.В. Дуглав.
306. **Шкаликов Н.В.** «Исследование тяжёлых нефтей и их компонент методом ЯМР». 2010 г. Н.р. – В.Д. Скирда.
307. **Бадрутдинов А.О.** «Квантовый транспорт в вертикальных двойных квантовых точках на основе арсенида галлия при сверхнизких температурах». 2011 г. Н.р. – Д.А. Таюрский.
308. **Байбеков Э.И.** «Резонансные эффекты в динамике и релаксации парамагнитных центров в кристаллах». 2011 г. Н.р. – Б.З. Малкин.
309. **Кузьмин В.В.** «Исследование  $^3\text{He}$  в аэрогелях методом ЯМР». 2011 г. Н.р. – М.С. Тагиров.
310. **Авдеев М.В.** «Транспортные свойства слоистых гетероструктур ферромагнетик/сверхпроводник во внешнем магнитном поле». 2012 г. Н.р. – С.Л. Царевский, Ю.Н. Прошин.
311. **Вишина А.А.** «Спиновые возбуждения и ЭПР сильно-коррелированных систем: купраты  $\text{Y}_{1-y}\text{Yb}_y\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$  и Кондорешётки  $\text{YbRh}_2\text{Si}_2$ ». 2012 г. Н.р. – Б.И. Кочелаев.
312. **Халиуллина А.В.** «Состояние и подвижность некоторых белков в условиях агрегации». 2012 г. Н.р. – А.В. Филиппов.
313. **Алакшин Е.М.** «Синтез наноразмерных кристаллических порошков  $\text{PrF}_3$  и исследование их магнитных свойств». 2013 г. Н.р. – М.С. Тагиров.

314. **Ачкеев А.А.** «Исследование природы ферромагнетизма в диоксиде титана ( $\text{TiO}_2$ ), имплантированном ионами переходной группы железа». 2013 г. Н.р. – Л.Р. Тагиров, н.к. – Р.И. Хайбуллин.
315. **Газизулин Р.Р.** «Исследование антиферромагнетизма  $\text{CsMnF}_3$  методами магнитного резонанса». 2013 г. Н.р. – М.С. Тагиров.
316. **Галиуллина Л.Ф.** «Исследование структуры компонентов атеросклеротической бляшки методами магнитного резонанса». 2013 г. Н.р. – Н.И. Силкин, А.В. Аганов.
317. **Гизатуллин Б.И.** «Особенности молекулярной подвижности и фазовых переходов жидкостей адсорбированных на поверхности пористых стекол Vucor». 2013 г. Н.р. – Г.Г. Пименов.
318. **Ефимов С.В.** «Пространственное строение биологически активных пептидов в растворах и в комплексе с модельной мембраной по данным двумерных методов спектроскопии ЯМР». 2013 г. Н.р. – В.В. Клочков.
319. **Лысогорский Ю.В.** «Гидродинамика квантовых жидкостей в нанопористых средах». 2013 г. Н.р. – Д.А. Таюрский.
320. **Мунавиров Б.В.** «Влияние липидного состава и присутствия полимеров на латеральную диффузию и состояние липидов в модельных биомембранах». 2013 г. Н.р. – А.В. Филиппов.
321. **Орлова А.Ю.** «Исследование сурьмасодержащих халькогенидов  $\text{Ag}_5\text{SbS}_4$  и  $\text{CuPbSbS}_3$  методом ЯКР». 2013 г. Н.р. – А.В. Дуглав.
322. **Усачёв К.С.** «Пространственное строение амилоидогенных  $A_\beta$  пептидов и их комплексов с модельными мембранами в растворах методами спектроскопии ЯМР». 2013 г. Н.р. – В.В. Клочков.
323. **Блохин Д.С.** «Пространственное строение олигопептидов в растворе и в комплексе с моделью поверхности биологической мембраны по данным методов спектроскопии ЯМР». 2014 г. Н.р. – В.В. Клочков.

324. **Кутьин Ю.С.** «Природа и структура ряда примесных центров в по данным высокочастотной спектроскопии ЭПР/ДЭЯР». 2014 г. Н.р. – С.Б. Орлинский.
325. **Романова И.В.** «Экспериментальное и теоретическое исследование магнитных свойств монокристаллов тетрафторидов лития-редких земель  $\text{LiLaF}_4$  ( $\text{Ln}=\text{Tb}, \text{Ho}, \text{Dy}, \text{Tm}$ )». 2014 г. Н.р. – М.С. Тагиров, н.к. – Б.З. Малкин.
326. **Биктагиров Т.Б.** «ЭПР/ДЭЯР – спектроскопия биосовместимых материалов на основе наноразмерного гидроксиапатита». 2015 г. Н.р. – Г.В. Мамин.
327. **Володин М.А.** «Исследование динамики сложных углеводородных систем методами высокочастотного ЭПР». 2015 г. Н.р. – С.Б. Орлинский.
328. **Ирисова И.А.** «Исследование механоактивированного легирования порошков фторидов со структурой флюорита редкоземельными ионами». 2015 г. Н.р. – Д.А. Таюрский, Р.В. Юсупов.
329. **Рахматуллин И.З.** «Пространственное строение и внутримолекулярная подвижность некоторых биологически активных веществ (производные пиридоксина, статины) по данным методов ЯМР спектроскопии». 2016 г. Н.р. – В.В. Клочков.
330. **Файзуллин М.А.** «Исследование анизотропных обменных взаимодействий в монокристаллах  $\text{Cs}_2\text{CuCl}_4$  и  $(2,3\text{-dmpyH})_2\text{CuBr}_4$  методом ЭПР». 2016 г. Н.р. – М.В. Ерёмин.
331. **Бейсенгулов Н.Р.** «Квазиодномерная система электронов на поверхности жидкого гелия в мезоскопических устройствах». 2017 г. Н.р. – Д.А. Таюрский.
332. **Малахов М.А.** «К теории спаривания носителей тока в купратах». 2017 г. Н.р. – М.В. Ерёмин.
333. **Петрова А.В.** «Ab initio исследования индуцированных давлением структурных фазовых переходов в двойных фторидах редких земель». 2017 г. Н.р. – Д.А. Таюрский.

334. **Сюняев Д.А.** «Температурная зависимость лондоновской глубины проникновения в купратных ВТСП». 2017 г. Н.р. – М.В. Ерёмин.
335. **Явкин Б.В.** «Исследование азотных и поверхностных парамагнитных центров в алмазах методами ЭПР и двойных резонансов». 2017 г. Н.р. – С.Б. Орлинский.
336. **Батулин Р.Г.** «Оптическая спектроскопия атомов и ионов бария в сверхтекучем  $^4\text{He}$ ». 2019 г. Н.р. – Д.А. Таюрский.
337. **Гильмутдинов И.Ф.** «Синтез и исследование транспортных свойств кристаллов натриевых кобальтатов  $\text{Na}_x\text{CoO}_2$ ». 2019 г. Н.р. – И.Р. Мухамедшин.
338. **Иванов Д.С.** «Структурно-динамические свойства нефти и факторы, определяющие её реологические характеристики». 2019 г. Н.р. – В.Д. Скирда.
339. **Киямов А.Г.** «Экспериментальные и теоретические исследования халькогенидов железа с пониженной размерностью». 2019 г. Н.р. – Д.А. Таюрский, н.к. – Ф.Г. Вагизов.
340. **Колосова О.А.** «Исследование пространственной структуры антимикробных пептидов-протегринов (PG-2 – PG-5) в растворе с мицеллами методами спектроскопии ЯМР высокого разрешения». 2019 г. Н.р. – В.В. Клочков, н.к. – К.С. Усачёв.
341. **Коноплева Л.В.** «Оптимизация методов аксональной трактографии по данным диффузионно-взвешенной магнитно-резонансной томографии». 2019 г. Н.р. – К.А. Ильясов
342. **Мамедов Д.В.** «Магнитные свойства тонких плёнок мультиферроиков». 2019 г. Н.р. – Р.М. Ерёмина.
343. **Мельникова Д.Л.** «Трансляционная подвижность и особенности надмолекулярной организации белков с внутренней неупорядоченной структурой на примере  $\alpha$ - и  $\kappa$ -казеинов». 2019 г. Н.р. – В.Д. Скирда.
344. **Сафин Т.Р.** «Динамика спиновых систем в антиферромагнетике  $\text{MnCO}_3$  и ферримагнитных плёнках  $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  в условиях радио-

частотной накачки». 2019 г. Н.р. 2012 г. 2012 г. – М.С. Тагиров, Ю.М. Буньков.

345. **Сахин В.О.** «Особенности локальных магнитных моментов в топологических изоляторах на основе халькогенидов висмута». 2019 г. Н.р. – Г.Б. Тейтельбаум.

Выборка по диссертациям, выполненным с использованием методов радиоспектроскопии в период 1945–2006 гг., сделана по данным из архива профессора Н.Н. Непримерова, которые в расширенном варианте (по всем методам и областям применения) были приведены в коллективной монографии [8]. Данные за последующий период были составлены по материалам, любезно предоставленным профессором М.В. Ереминым – секретарем диссертационного совета Института физики КФУ, и иных источников.

## Наследие

Казанская школа радиоспектроскопии, как и Казанская химическая школа, занимает особое место в общественно-научной жизни Казани и Республики Татарстан, в которой активное участие принимает и российское, и международное научное сообщество. Это отражено в комплексе мероприятий, связанных с открытием в магнитного резонанса.

Вначале 1990-х гг. был создан музей Е.К. Завойского по инициативе М.А. Теплова, А.В. Аганова, М.С. Тагирова и Н.И. Силкина. Создатель и хранитель музея И.И. Силкин. Музей входит в систему музеев КФУ.

Учреждены Премии им. Е.К. Завойского:

– Международная премия имени Е.К. Завойского учреждена в 1991 г. по инициативе профессора К.М. Салихова после консультаций с международным сообществом ЭПР. В настоящее время эта премия получила поддержку Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского, Казанского (Приволжского) федерального университета, Правительства Республики Татарстан и издательства Шпрингер, Вена – Нью-Йорк. Премия получила признание Амперовского Общества, Международного Общества ЭПР (ЭСР) и Президиума РАН. Она получила высокую международную оценку как значительная премия за научные достижения в области магнитного резонанса.

Премия присуждается ежегодно за выдающийся вклад в применения или развитие электронного парамагнитного резонанса в любой области науки. Лауреат избирается международным комитетом. Лекция лауреата о своей работе публикуется в журнале “Applied Magnetic Resonance”. Церемония вручения премии проходит в Казани, где лауреат и его(ее) супруга(супруг) являются почетными гостями Правительства Республики Татарстан.

– Казанская премия им. Е.К. Завойского среди молодых ученых «За работы в области физики и ее приложений» с 1998 г. Инициаторы – мэр г. Казани К.Ш. Исхаков и декан физического факультета КГУ А.В. Аганов. Учредители: Казанский государственный (федеральный) университет, КФТИ КазНЦ РАН, Администрация г. Казани. Зам. председателя Оргкомитета (и экспертного совета) по присуждению премии А.В. Аганов, ученый секретарь М.С. Тагиров.

Проводятся регулярные конференции:

Ежегодная Международная конференция “Modern Development of Magnetic Resonance”. Сопредседатели Оргкомитета А.А. Калачев и К.М. Салихов.

С 1997 г. по настоящее время проводятся ежегодные вначале региональные, затем Российские, а далее Международные молодежные Школы “Actual Problems of Magnetic Resonance and its Application”. Ректор Школы М.С. Тагиров, проректор В.А. Жихарев.

Всероссийские конференции «Новые достижения в структурных исследованиях» с участием зарубежных ученых (апрель 1985, 1990, 1995, 2000, 2005, 2011, 2015 гг.). Казань, Казанский государственный (федеральный) университет.

С 1994 года проводится ежегодно Всероссийская конференция «Структура и динамика молекулярных систем», организованная Казанским государственным университетом, Марийским государственным техническим университетом, Институтом физической химии РАН (Москва), а также Институтом физики молекул и кристаллов УНЦ РАН (Уфа) и МП «Магнитный резонанс» (Казань).

Проведены крупные международные встречи, посвященные юбилейным датам, связанным с открытием магнитного резонанса:

1969 г. Юбилейная всесоюзная конференция, посвященная 25-летию открытия ЭПР. Почётный председатель оргкомитета Е.К. Завойский. Июнь, Казань. КГУ–КФТИ.

1984 г. Всесоюзная конференция по магнитному резонансу в конденсированных средах, посвященная 40-летию открытия ЭПР.

Июнь, Казань, КГУ–КФТИ. Председатель оргкомитета М.М. Зарипов, зампредседателя М.А. Теплов.

1994 г. XXVIIth Congress AMPERE “Magnetic Resonance and Related Phenomena”, Август, Казань. Председатель оргкомитета К.М. Салихов. КФТИ–КГУ.

2007 г. Комплекс мероприятий, посвященных году Е.К. Завойского:

- Международная конференция “Modern Developments in Magnetic Resonance Imaging and Spectroscopy in Medicine” and ESMRMB lectures on MR “MR physics for basic scientists“, Июль 02–05, 2007, Казань, Россия. Председатель оргкомитета А.В. Ильясов.
- Международный симпозиум “Quantum Fluids and Solids” QFS-2007, Казань, Август 01–06, 2007, КГУ–ИФП им. П.Л. Капицы (РАН, г. Москва). Председатель оргкомитета М.С. Тагиров, председатель программного комитета Д.А. Таюрский.
- 3 Международный симпозиум “EASTMAG–2007. Magnetism on a Nanoscale”, 23–26 августа, 2007. Председатель оргкомитета Л.Р. Тагиров.
- Форум «Неделя Завойского», посвященный 100-летию со дня рождения. 24–29 сентября, г. Казань, КГУ–КФТИ. Председатель форума М.Х. Салахов, зам. председателя А.В. Аганов. В рамках этого форума проведен комплекс мероприятий: Международная конференция, XI Международная молодежная научная школа “Actual problems of magnetic resonance and its application” (Ректор Школы М.С. Тагиров, проректор В.А. Жихарев), мастер-классы по современным методам магнитного резонанса (фирма «Брукер»), Международная выставка оборудования. Церемонии вручения премий им. Е.К. Завойского.





Открытие «Недели Е.К.Завойского». В президиуме слева направо: В. Любиц (Польша), чл.-корр. РАН К.М. Салихов, Вице-президент АНТ А.Л. Абдуллин, Вице-премьер правительства РТ Р.Ф. Муратов, ректор КГУ М.Х. Салахов, мэр г. Казани И.Р. Метшин, акад. РАН К.А. Валиев, декан физфака КГУ проф. А.В. Аганов, проф. Г.Х. Гризингер (Германия), проф. КГУ М.С. Тагиров

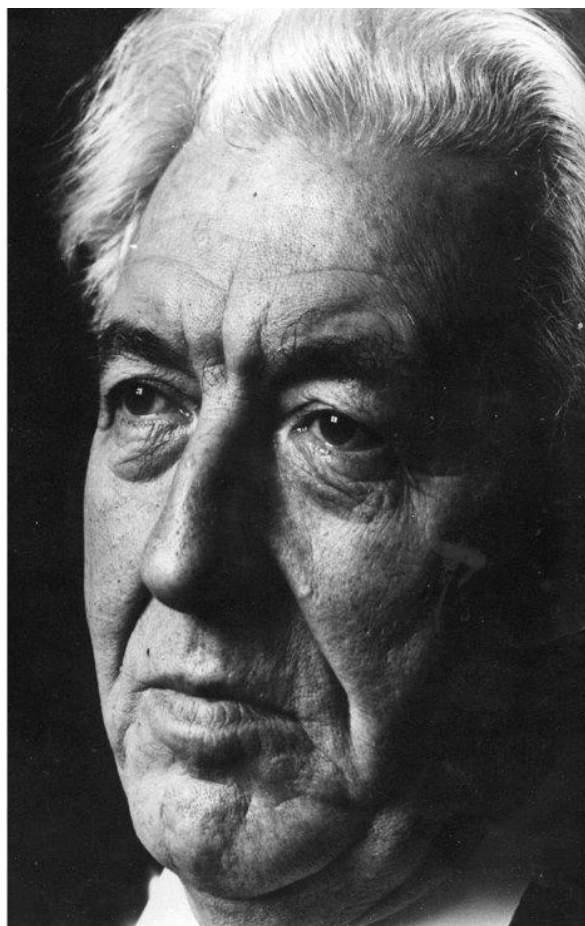
2011 г. Международная научная конференция “Resonances in Condensed Matter” (ALT100, к 100-летию С.А. Альтшулера). 21–25 июня, Казань. КГУ–КФТИ. Председатель оргкомитета Б.И. Кочелаев, председатель локального комитета М.С. Тагиров, Ученый секретарь А.В. Дуглав.

Казанский (Приволжский) федеральный университет  
Институт физики  
Кафедра теоретической физики  
Кафедра магнитной радиоспектроскопии и квантовой электроники  
Научно-исследовательская лаборатория им. С.А. Альтшулера

Юбилейный магнитный семинар  
**Семён Александрович  
Альтшулер**  
(1911-1983)  
60-летие открытия  
акустического парамагнитного  
резонанса

13 февраля 2013 г., 15.00,  
ауд. 110 (Институт физики КФУ)

Воспоминаниями о С.А. Альтшулере,  
о событиях и исследованиях того времени  
поделятся проф. Кочелаев Б.И.,  
проф. Голенищев-Кутузов В.А.,  
доцент Дуглав А.В., доцент Ларионов А.Л.  
Вход свободный



2019 г. Международная конференция “Magnetic resonance: current state and future perspectives (EPR-75)”. С 23 по 27 сентября, г. Казань, КФУ–КФТИ. Сопредседатели оргкомитета Д.А. Таюрский и А.А. Калачев, зампреда М.С. Тагиров, председатели программного комитета С.И. Никитин и К.М. Салихов, председатель локального комитета Е.М. Алакшин, Ученый секретарь А.В. Дуглав. XXI Международная молодежная научная Школа “Actual problems of magnetic resonance and its application”. Ректор Школы М.С. Тагиров.

В последнее десятилетие кроме регулярных, проведены ряд научных встреч. Некоторые из них представлены ниже.

2001 г. Международный рабочий семинар “Modern Development of Magnetic Resonance Imaging and Spectroscopy. Basic Physics and Applications in Medicine and Biology”, 11–13 июня, г. Казань. Сопредседатели оргкомитета А.В. Аганов, Ю. Хенниг. (университет г. Фрайбурга. Германия).

2014 г. Международная конференция “Magnetic resonance: fundamental research and pioneering applications (MR-70)”, 23–27 июня, г. Казань, КГУ–КФТИ. Сопредседатели конференции А.В. Аганов и К.М. Салихов, председатель оргкомитета и председатель локального комитета М.С. Тагиров.

2015 г. МРТ–25: 4-я Международная научная конференция «Достижения магнитно-резонансной томографии и спектроскопии в медицине» (2015 г.). “Modern Development in Magnetic Resonance Imaging and Spectroscopy in Medicine”. Председатель оргкомитета А.В. Ильясов (АНТ), председатель программного комитета Ю. Хенниг (Германия). 16–18 июня. Казань. АНТ, КФУ, РКБ–2.

2015 г. XXXVII Совещание по физике низких температур (НТ–37). С 29 июня по 3 июля, Казань, КФУ–Институт физических проблем им. П.Л. Капицы (РАН, г. Москва), АНТ. Зам. председателя М.С. Тагиров и Д.А. Таюрский. Председатель локального комитета А.В. Клочков, ученый секретарь А.В. Дуглав.

2016 г. Международный симпозиум “Magnetic Resonance: from Fundamental Research to Practical Application”. С 21 по 23 апреля КГУ. Председатель оргкомитета А.В. Аганов, председатель локального комитета В.В. Клочков, Ученый секретарь Л.Ф. Галиуллина.

Издается Электронный журнал “Magnetic Resonance in Solids. Electronic Journal” (MRSej). Организован в 1996 г. по инициативе Б.И. Кочелаева и Ю.Н. Прошина на базе КГУ. Учредитель – Казанский государственный университет, при поддержке Международного общества магнитного резонанса (ISMAR). Журнал зарегистрирован Комитетом Российской Федерации по печати (протокол № 015140 от: 2 августа 1996 г.). Первая статья появилась в 1997 году, а первыми главными редакторами журнала стали Жан Дженер (Университет Брюсселя, Бельгия), Борис Кочелаев (КГУ), Раймонд Орбах (Университет Калифорнии, Риверсайд, США).

Редколлегия начального периода: Детлеф Бринкманн (Университет Цюриха, Швейцария), Андрей Боровик-Романов (Институт физических проблем РАН, Москва), Юрий Буньков (CNRS, Гренобль,

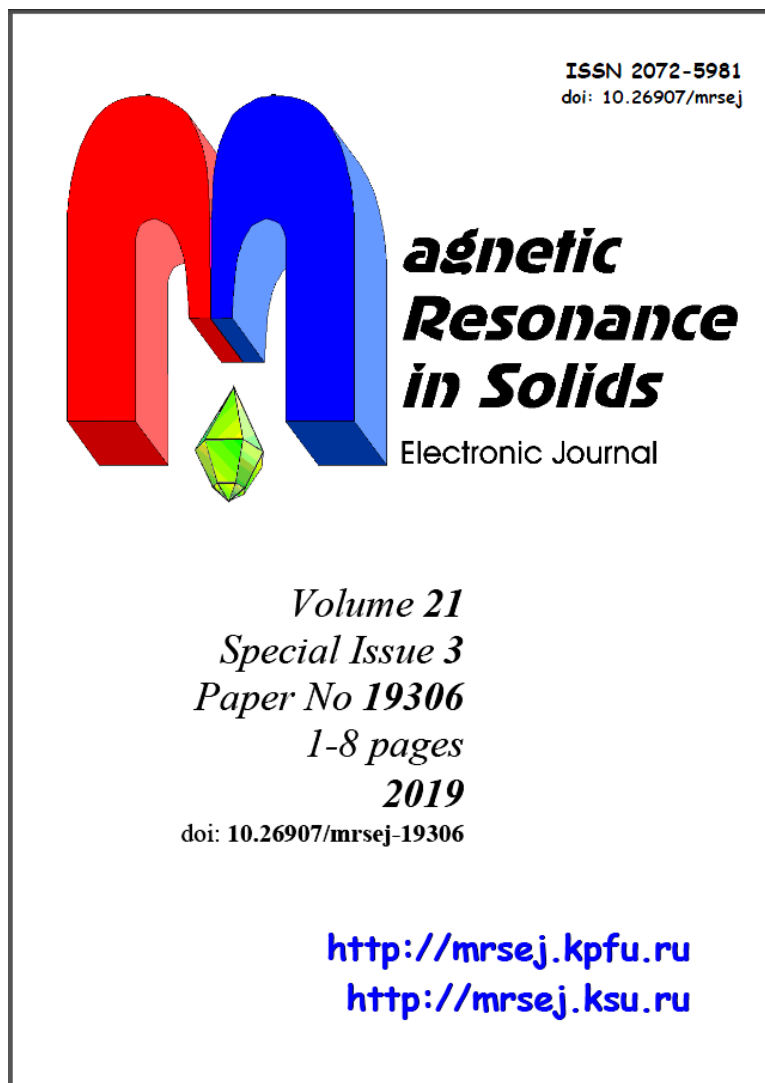
Франция), Джон Драмхеллер (Государственный университет Монтаны, Бозман, США), Михаил Еремин (КГУ), Ёсио Китаока (Университет Осаки, Япония), Борис Малкин (КГУ), Михаил Теплов (КГУ), Харухико Сузуки (Университет Канадзавы, Япония). В настоящее время в редколлегию вошли Мурат Тагиров (КФУ), Дмитрий Таюрский (КФУ) и Валентин Жихарев (КХТИ, ныне КНИТУ–КХТИ).

Исполнительный редактор (Executive editor) Юрий Николаевич Прошин (КГУ).

Сайт журнала располагается на серверах КФУ (<http://mrsej.kpfu.ru/>). Из аннотации журнала, приведенной на его сайте: «MRSej – рецензируемый электронный журнал, публикующий статьи, отвечающие самым высоким стандартам научного качества в области фундаментальных исследований магнитного резонанса в твердых телах и связанных с ними явлениях. MRSej является бесплатным, как для авторов, так и для читателей. Статьи в журнале публикуются только на английском языке. Все обмены информацией происходят через Интернет. MRSej – журнал открытого доступа (an open access journal is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License), т.е. весь контент находится в свободном доступе и для пользователей бесплатен». В 2006 году журнал попал в eLibrary – российский научный индекс (РИНЦ – RusIndexSC), в 2012 году журнал включен в базу данных Scopus, а 2017 г. – в Web of Science (Core Collection). Журналу присвоен международный код ISSN 2072–5981. С 2019 г. каждой статье присваивается цифровой идентификатор объекта индекс (doi), журнальный DOI: 10.26907/mrsej.

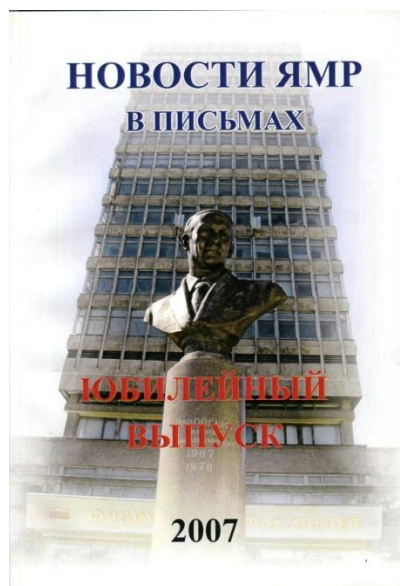
В электронных базах данных журнал числится как “Magnetic Resonance in Solids”, и на октябрь 2019 г. статьи журнала индексируются и реферируются Web of Science (индексация с 2015 г.), Scopus (индексация с 2012 г.), Google Scholar, Crossref, DOAJ, ROAD, SiteFactor, SCImago Journal & Country Rank, Trove (Национальная библиотека Австралии), Easy Find (Технион, Израильский технологический институт) и др.

С 2006 г. на сайтах eLIBRARY(RusIndexSC) и CyberLeninka кроме рефератов и индексирования журнала дублируется и полное содержание журнала, включая файлы статей.



С 1990 г. издается печатный орган Ассоциации спектроскопистов ЯМР СССР (ныне РФ и СНГ) – Бюллетень «Новости ЯМР в письмах» (гл. редактор А.В. Аганов). В первые годы перестройки это давало возможность издавать статьи, которые можно было использовать при защите диссертаций. Издание прекратило существование в 2009 году, поскольку необходимость в экспресс-публикациях отпала.





С 1996 года по заслушанным докладам Всероссийской конференции «Структура и динамика молекулярных систем» публикуются материалы конференций в виде сборников статей (гл. редактор В.Д. Скирда). В настоящее время публикация материалов прекращена, поскольку необходимость в них также отпала.





Международная конференция “Magnetic resonance: current state and future perspectives (EPR-75)”.  
23–27 сентября 2019 г., Казань





Всесоюзная конференция по магнитному резонансу в конденсированных средах, посвящённая 40-летию открытия ЭПР. Казань, 1984 г.



*Научное издание*

**Аганов Альберт Вартанович**  
**Ларионов Александр Леонидович**

**К 75-ЛЕТИЮ ОТКРЫТИЯ**  
**МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА (ЭПР)**

**Страницы истории. Развитие радиоспектроскопии**  
**в Казанском университете**

Подписано в печать  
Тираж 500 экз.