

На правах рукописи

САДЫКОВ Алмаз Фаритович

**МАГНИТНЫЕ СТРУКТУРЫ НИЗКОРАЗМЕРНЫХ
СОЕДИНЕНИЙ LiCu_2O_2 И NaCu_2O_2**

01.04.11 – физика магнитных явлений

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Екатеринбург – 2017

Работа выполнена в лаборатории кинетических явлений Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук (ИФМ УрО РАН).

Научный руководитель:

Пискунов Юрий Владимирович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории кинетических явлений ФГБУН Института физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург.

Официальные оппоненты:

Гиппиус Андрей Андреевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики низких температур и сверхпроводимости Физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», г. Москва.

Денисова Татьяна Александровна, доктор химических наук, главный научный сотрудник, ученый секретарь Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института химии твердого тела Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург.

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Казанский (Приволжский) федеральный университет", г. Казань.

Защита состоится «2» февраля 2018 г. в 11:00 часов на заседании диссертационного совета Д 004.003.01 при ФГБУН Института физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН по адресу: 620108, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФМ УрО РАН и на сайте www.imp.uran.ru

Автореферат разослан « » декабря 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физико-математических наук

Чарикова Татьяна Борисовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Соединения LiCu_2O_2 (LCO) и NaCu_2O_2 (NCO) являются фрустрированными квазидвумерными магнетиками, в которых имеет место конкуренция ферро (ФМ) - и антиферромагнитных (АФ) обменных взаимодействий между, соответственно, ближайшими и следующими за ближайшими спинами в цепочке CuO_2 . Ниже критической температуры $T_N = 23$ К (LCO), $T_N = 12$ К (NCO) в данных соединениях наблюдается переход в магнитоупорядоченное состояние с несоизмеримой неколлинеарной магнитной структурой. В LCO этот переход сопровождается возникновением спонтанной макроскопической электрической поляризации, \mathbf{P} , при этом величина и направление вектора \mathbf{P} зависят от внешнего магнитного поля. Низкоразмерный магнетик NaCu_2O_2 является соединением, изоструктурным мультиферроику LiCu_2O_2 , но, в отличие от него, не становится сегнетоэлектриком ниже T_N . Причина этого до сих пор неизвестна. На сегодняшний день имеется несколько микроскопических теорий, объясняющих возникновение (или отсутствие) сегнетомагнетизма в соединениях со спиральной магнитной структурой. Они дают различные предсказания относительно взаимосвязи между пространственной ориентацией спиновой спирали, наличием или отсутствием дефектов замещения в системе и направлением электрической поляризации. Поэтому для экспериментальной проверки имеющихся теоретических моделей сегнетомагнетизма крайне важно знать реальную пространственную ориентацию планарных спиновых спиралей в кристалле и ее эволюцию в зависимости от величины и направления внешнего магнитного поля.

Несмотря на большое количество экспериментальных и теоретических работ, посвященных исследованию магнитных и электрических свойств купратов LiCu_2O_2 и NaCu_2O_2 , детальная картина магнитной структуры в основном состоянии этих оксидов все еще остается невыясненной. В частности, не определена точная

пространственная ориентация спиновых спиралей и направление их закручивания в магнитно-неэквивалентных спиновых цепочках элементарной ячейки LCO/NCО.

Результаты ЯМР/ЯКР экспериментов, изложенные в настоящей работе, позволяют дополнить полученную дифракционными методами информацию о взаимосвязи электронных магнитных моментов в LCO/NCО. Изучение формы линии ЯМР, сдвига резонансной частоты этой линии позволяет определить тип магнитной структуры в веществе. Релаксационные измерения, в свою очередь, зондируют низкочастотные ($0 - 10^8$ Гц) движения в исследуемом веществе, причем как зарядовые, так и магнитные. Совместный анализ данных по сдвигам и релаксации позволяет уточнить величины локальных магнитных полей в месте расположения ядер, их зависимость от волнового вектора \mathbf{q} , а, следовательно, дает информацию о различных пространственных спиновых корреляциях в системе.

В данной работе, в отличие от ЯМР работ других авторов по LCO/NCО, в качестве зондов был выбран не один сорт ядер, а несколько. Такой подход имеет несомненное преимущество: благодаря совместному и самосогласованному анализу данных, полученных от всех исследуемых ядер-зондов, значительно уменьшается неоднозначность интерпретации результатов ЯМР измерений.

Приведенное выше описание научной проблемы обуславливает актуальность исследования магнитных и электронных свойств изоструктурных соединений LiCu_2O_2 и NaCu_2O_2 .

Актуальность диссертационной работы подтверждается также тем, что исследования по теме диссертации были выполнены в рамках государственного задания ФАНО России по теме “Спин” № 01201463330 при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации (№ МК-1232.2011.2), РФФИ (гранты № 08-02-00029, № 09-02-00310, № 11-02-00354, № 12-02-31814), Уральского отделения РАН (проекты № 6-М, № 11-2-НП-477, № 12-У-2-1025, № 14-2-НП-199), РНФ (грант № 16-12-10514).

Целью работы являлось определение методами ядерной спектроскопии магнитной структуры низкоразмерных купратов LiCu_2O_2 и NaCu_2O_2 в зависимости от величины и направления внешнего магнитного поля.

Задачи настоящей работы состояли в следующем:

1. Определить компоненты тензора градиента электрического поля (ГЭП) в месте расположения ядер $^{63,65}\text{Cu}$, ^7Li и ^{23}Na и значения магнитных моментов ионов меди Cu^{2+} в LiCu_2O_2 и NaCu_2O_2 .

2. Определить спиновый и орбитальный вклады в сдвиги линий ЯМР и магнитную восприимчивость в парамагнитной фазе монокристаллов LiCu_2O_2 и NaCu_2O_2 . Оценить вклады от отдельных ближайших соседних ионов Cu^{2+} в дипольные и наведенные сверхтонкие поля на ядрах ионов Cu^+ , Li^+ и Na^+ .

3. Исследовать особенности низкочастотной спиновой динамики в парамагнитной фазе купратов LiCu_2O_2 и NaCu_2O_2 . Получить информацию об эволюции спиновых флуктуаций вдоль различных осей кристалла в зависимости от температуры.

4. Определить вид магнитной структуры купратов LiCu_2O_2 и NaCu_2O_2 . Выявить ее особенности и подчеркнуть возможные отличия в этих изоструктурных соединениях. Выяснить пространственную ориентацию магнитных моментов в магнитоупорядоченном состоянии LiCu_2O_2 и NaCu_2O_2 в нулевом внешнем магнитном поле.

5. Исследовать влияние сильного внешнего магнитного поля, направленного вдоль различных кристаллографических направлений, на магнитную структуру купратов LiCu_2O_2 и NaCu_2O_2 .

Методология и методы исследования.

В настоящей диссертации для решения поставленных задач совместно использовались методы ЯМР, ЯКР и магнитометрии, а также компьютерное моделирование и *ab initio* расчеты. Сигналы ЯМР и ЯКР детектировались методом спинового эха. Методика инвертирования и последующего восстановления ядерной намагниченности применялась при измерении времен спин-решеточной релаксации. Магнитная

восприимчивость измерялась вибрационным методом. Компьютерное моделирование ЯМР и ЯКР спектров в магнитоупорядоченной фазе применялось для установления пространственной ориентации магнитных моментов и их значений. Теоретические расчеты параметров ГЭП проводились из первых принципов с помощью программного пакета ABINIT.

В диссертационной работе были получены и выносятся на защиту следующие **новые научные результаты и положения**:

1. Определены компоненты тензора ГЭП в месте расположения ядер $^{63,65}\text{Cu}$, ^7Li и ^{23}Na и значения магнитных моментов ионов меди Cu^{2+} в LiCu_2O_2 и NaCu_2O_2 .

2. Определены спиновый и орбитальный вклады в сдвиги линий ЯМР и магнитную восприимчивость. Сделаны оценки вкладов от отдельных ближайших соседних ионов Cu^{2+} в дипольные и наведенные сверхтонкие поля на ядрах ионов Cu^+ , Li^+ и Na^+ . Выявлена ненулевая степень ковалентности между ионами в LiCu_2O_2 и NaCu_2O_2 . Установлено, что «немагнитные» ионы $\text{Cu}^{+(1+\delta)}$ имеют отличную от нуля дырочную заселенность ($\delta \approx 0.2$) и, следовательно, имеют эффективные магнитные моменты. Данный результат позволяет говорить о возможности реализации в LiCu_2O_2 обменно - индуцированного механизма возникновения спонтанной электрической поляризации.

3. В парамагнитной фазе мультиферроика LiCu_2O_2 при понижении температуры в направлении оси c наблюдается значительное подавление спиновых флуктуаций, связанное с развитием 2D корреляций ближнего порядка в плоскостях, содержащих Cu^{2+} ионы. Максимум анизотропии флуктуаций достигается при $T \approx 150$ К. Дальнейшее охлаждение LiCu_2O_2 до $T \approx T_N$ восстанавливает изотропию флуктуаций в системе, что указывает на отсутствие, вблизи, но выше T_N , некоторой выделенной кристаллографической плоскости, более других предпочтительной для возникновения в ней планарного геликоидального магнитного порядка. В купрате NaCu_2O_2 спектр спиновых флуктуаций остается изотропным во всем диапазоне температур.

4. Установлена пространственная ориентация спиновых спиралей в LiCu_2O_2 и NaCu_2O_2 в отсутствие внешнего магнитного поля и в поле $H_0 = 94 \text{ кЭ} / H_0 = 92.8 \text{ кЭ}$, направленным вдоль той или иной оси кристалла. Выяснено, что спиновые спирали в данных соединениях не лежат ни в одной из кристаллографических плоскостей ab , bc или ac . Плоскости спиралей параллельны только в цепочках, составляющих бислой $-\text{O}-\text{Cu}^{2+}-\text{O}-\text{M}-$ и $-\text{M}-\text{O}-\text{Cu}^{2+}-\text{O}-$. Направления закручивания магнитных моментов в этих цепочках в NaCu_2O_2 – противоположны, а в LiCu_2O_2 – совпадают.

5. Внешнее магнитное поле $H_0 = 94 \text{ кЭ} / H_0 = 92.8 \text{ кЭ}$, направленное вдоль оси c кристалла, практически не изменяет пространственной ориентации спиновых спиралей в цепочках Cu^{2+} , имеющей место при $H_0 = 0$, а направленное вдоль осей a и b , поворачивает плоскости спиновых спиралей, стремясь сориентировать их нормаль n вдоль внешнего магнитного поля.

Научная и практическая значимость работы.

1. Данные об электронной и магнитной структуре магнетиков LiCu_2O_2 и NaCu_2O_2 , а также о спиновой динамике в этих соединениях, полученные в настоящей работе дополняют и развивают современные представления о таком важном классе объектов, как низкоразмерные купраты, содержащие цепочки спинов $S = 1/2$.

2. Полученные в работе сведения о конкретной пространственной ориентации спиновых спиралей в LiCu_2O_2 и NaCu_2O_2 в зависимости от величины и направления внешнего магнитного поля, о направлении закручивания магнитных моментов в Cu^{2+}O_2 цепочках, о слабом магнетизме ионов Cu^+ могут быть использованы при построении теоретических моделей сегнетомагнетизма в низкоразмерных геликоидальных магнетиках.

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением широко апробированных методов записи спектров ядерного магнитного резонанса и измерения параметров магнитной релаксации, хорошей воспроизводимостью результатов, надежной

аттестацией образцов, корректностью обработки экспериментальных данных.

Личный вклад автора. Автор совместно с научным руководителем участвовал в обсуждении цели и задач исследования. Результаты, изложенные в работе, получены автором совместно с сотрудниками лаборатории кинетических явлений Института физики металлов УрО РАН, сотрудниками ведущих научных центров России (РНИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Московский технологический университет – МИРЭА, г. Москва, Институт физических проблем им. П. Л. Капицы РАН, г. Москва).

Автором лично выполнены все ЯМР/ЯКР измерения, представленные в данной работе: запись спектров ЯМР в парамагнитной и магнитоупорядоченной фазах монокристаллов LiCu_2O_2 и NaCu_2O_2 , измерения температурных зависимостей сдвигов линий ЯМР, скоростей спин-решеточной релаксации. Автором лично проведена обработка, анализ и систематизация, полученного массива экспериментальных данных, промоделирован большой набор спектров ЯМР и ЯКР. Автор принимал непосредственное участие в модернизации компьютерной программы симуляции спектров, автор участвовал в получении и обсуждении результатов, изложенных в диссертации, в формулировке ее основных положений и выводов, в опубликовании полученных результатов. Материал диссертации неоднократно докладывался автором лично на международных и отечественных конференциях в виде устных и стендовых докладов.

Апробация результатов. Результаты настоящей работы были представлены на следующих конференциях: XXXV, XXXVI совещание по физике низких температур (НТ-35, НТ-36) (Россия, Черноголовка, 2009, Санкт-Петербург, 2012); XII, XIII, XVII International youth scientific school “Actual problems of magnetic resonance and its applications” (Россия, Казань, 2009, 2010, 2014); Юбилейная X, XI, XII Всероссийская молодёжная школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС-10, СПФКС-11, СПФКС-12) (Россия,

Екатеринбург, 2009, 2010, 2011); IV Euro-Asian Symposium “Trends in MAGnetism”: Nanospintronics (EASTMAG-2010) (Россия, Екатеринбург, 2010); International Symposium and Summer School “Nuclear Magnetic Resonance in Condensed Matter” 9th Meeting “NMR in Heterogeneous Systems ” (Россия, Санкт-Петербург, 2012), Научная сессия Института физики металлов УрО РАН (Россия, Екатеринбург, 2013, 2015), Moscow International Symposium on Magnetism (Россия, Москва, 2017).

Соответствие паспорту специальности. Содержание диссертации соответствует пункту 2 “Экспериментальные исследования магнитных свойств и состояний веществ различными методами, установление взаимосвязи этих свойств и состояний с химическим составом и структурным состоянием, выявление закономерностей их изменения под влиянием различных внешних воздействий” паспорта специальности 01.04.11 – физика магнитных явлений.

Публикации по результатам работы. Результаты, представленные в данной диссертации, изложены в 5 статьях в рецензируемых журналах, включённых в Перечень ВАК и индексируемых в Web of Science [A1 – A5]. Результаты работы были представлены на 13 российских и международных конференциях [A6 – A18].

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы, содержащего 94 наименования. Полный объем работы составляет 137 страниц, включая 5 таблиц и 43 рисунка.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обосновывается актуальность исследуемой проблемы, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, описаны научная новизна, практическая ценность и положения, выносимые на защиту. Также приводятся сведения о публикациях и апробации работы на конференциях различного уровня.

В первой главе дано представление о кристаллической и магнитной структурах исследуемых соединений, а также о состоянии и проблемах экспериментальных и теоретических исследований сегнетомагнетизма в

спиральных магнетиках, при этом особое внимание уделено работам по магнитному резонансу.

Во второй главе приведено описание условий приготовления образцов, методов и результатов их аттестации, особенностей их использования при измерениях. В этой главе также описываются используемое в данной работе оборудование, методы регистрации спектров ЯМР и измерения времен спин-решеточной релаксации.

В третьей главе показана схема расчетов частот и интенсивностей резонансных линий, а также возможности и интерфейс программы, используемой при моделировании ЯМР спектров. В этой же главе дано описание модели пространственной ориентации магнитных моментов, используемой при симуляции полученных в магнитоупорядоченном состоянии экспериментальных данных.

В четвертой главе приводятся результаты ЯМР/ЯКР исследований монокристаллов LiCu_2O_2 и NaCu_2O_2 в области парамагнитного состояния этих соединений. Первые несколько разделов посвящены изучению статических характеристик данных объектов: градиентов электрических полей (ГЭП) в месте расположения ядер $^{63,65}\text{Cu}$, ^7Li , ^{23}Na , сдвигов линий ЯМР, сверхтонких магнитных полей.

Кристаллическую структуру LCO/NCO можно представить как последовательное чередование вдоль оси c кристалла слоев: $-\text{Cu}^+-$, $-\text{O}-\text{Cu}^{2+}-\text{O}-\text{Li}(\text{Na})-$ и $-\text{Li}(\text{Na})-\text{O}-\text{Cu}^{2+}-\text{O}-$. Фрагмент элементарной ячейки кристаллов $\text{L}(\text{N})\text{CO}$, демонстрирующий ближайшее окружение ионов Cu^+ и $\text{Li}^+(\text{Na}^+)$, представлен на рисунке 1. Все ядра, используемые в данной работе в качестве ЯМР-зондов, имеют спин $I = 3/2$ и некубическое зарядовое окружение. Это позволило из анализа ориентационной зависимости спектров ЯМР $^{63,65}\text{Cu}$, ^7Li и ^{23}Na определить компоненты тензора ГЭП (выраженные через квадрупольные частоты $^k\nu_Q^i$ ($k = 7, 23, 63, 65, i = x, y, z$)) в месте расположения этих ядер, а также направления главных осей системы координат ГЭП относительно осей кристалла. ГЭП на ядрах меди как в LCO, так и в NCO обладает аксиальной симметрией:

${}^{63}v_Q^y \cong {}^{63}v_Q^x = 13.58(1)$ МГц, ${}^{63}v_Q^z = 27.16(1)$ МГц, (LCO);
 ${}^{63}v_Q^y \cong {}^{63}v_Q^x = 14.30(1)$ МГц, ${}^{63}v_Q^z = 28.59(1)$ МГц (NCO); $\mathbf{z} \parallel \mathbf{c}$,
 $\mathbf{y} \parallel \mathbf{b}$, $\mathbf{x} \parallel \mathbf{a}$. Соответствующие значения для ядер лития и натрия:
 ${}^7v_Q^z = 50(1)$ кГц, ${}^7v_Q^y = 28(1)$ кГц, ${}^7v_Q^x = 22(1)$ кГц, при этом ось \mathbf{z}
 ГЭП лежит в плоскости ac , составляя с осью \mathbf{c} угол 10° , а ось \mathbf{x}
 направлена вдоль оси \mathbf{b} ; ${}^{23}v_Q^z = 1.377(5)$ МГц, ${}^{23}v_Q^y = 1.123(5)$ МГц,
 ${}^{23}v_Q^x = 0.254(5)$ МГц, $\mathbf{z} \parallel \mathbf{a}$,
 $\mathbf{y} \parallel \mathbf{c}$, $\mathbf{x} \parallel \mathbf{b}$. Интересно отметить, что ГЭП на ядрах лития близок
 к аксиальной симметрии, и направление \mathbf{z} почти
 параллельно оси \mathbf{c} . В тоже время, ГЭП на ядрах натрия
 менее симметричен, и его \mathbf{z}
 компонента направлена вдоль
 оси \mathbf{a} . С понижением
 температуры все ${}^k v_Q^i$ монотонно
 возрастают, выходя на
 насыщение вблизи $T = 50$ К. Рост квадрупольных частот в интервале
 температур $T = (T_N \div 300)$ К не превышает 1 %.

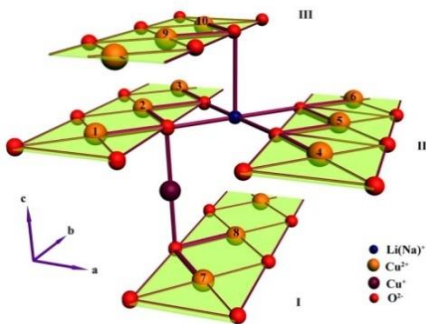


Рис. 1. Фрагмент кристаллической
 структуры $\text{LiCu}_2\text{O}_2/\text{NaCu}_2\text{O}_2$,
 демонстрирующий ближайшее
 окружение ионов Cu^+ и $\text{Li}^+(\text{Na}^+)$.

В работе представлены температурные зависимости магнитных
 сдвигов ${}^k K_\alpha$ в области парамагнитного состояния оксидов LCO и NCO,
 полученные для трех различных ориентаций кристаллов во внешнем
 магнитном поле $\mathbf{H}_0 \parallel \mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}$. Для области $T > 100$ К поведение сдвигов
 удовлетворительно описывается зависимостью в форме закона Кюри-
 Вейса. Температурные зависимости сдвигов в точности повторяют
 изменение с температурой магнитной восприимчивости в LCO и NCO.
 Данное утверждение проиллюстрировано на рисунке 2 в виде так
 называемых $K - \chi$ диаграмм Джаккарينو – Клогстона, построенных для
 всех исследуемых в данной работе ядер при трех различных ориентациях
 кристаллов во внешнем магнитном поле $\mathbf{H}_0 \parallel \mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}$.

В общем случае магнитный сдвиг линии ЯМР можно записать в виде двух вкладов: орбитального K_{orb} и спинового K_s , связанных соответственно с орбитальными и спиновыми степенями свободы:

$${}^k K_\alpha(T) = {}^k K_{s,\alpha}(T) + {}^k K_{orb,\alpha} = \frac{1}{N_A \mu_B} \left(({}^k H_{tr,\alpha} + {}^k H_{dip,\alpha}^{out}) \chi_s(T) + {}^k H_{orb,\alpha} {}^k \chi_{orb,\alpha} \right), \quad (1)$$

где ${}^k H_{dip,\alpha}^{out}$ и ${}^k H_{tr,\alpha}$, ${}^k H_{orb,\alpha}$ – дипольные, наведенные и орбитальные сверхтонкие поля (СТП), $\chi_s(T)$ и ${}^k \chi_{orb,\alpha}$ – спиновое и орбитальное слагаемые однородной магнитной восприимчивости χ_α , N_A – число Авагадро, μ_B – магнетон Бора. Аппроксимируя зависимости на рис. 2 прямыми линиями, и рассчитав дипольные поля ${}^k H_{dip,\alpha}^{out}$, мы определили наведенные СТП ${}^k H_{tr,\alpha}$, орбитальные вклады в сдвиг линии ЯМР ${}^k K_{orb,\alpha}$ и вклады χ_s , χ_{orb} в полную магнитную восприимчивость χ_α . Результаты представлены в таблице 1. Анализ природы полей ${}^k H_{tr,\alpha}$, их величины, знака и анизотропии выявил достаточно высокую степень ковалентности между ионами в LiCu_2O_2 и NaCu_2O_2 . Обнаружено, что степени

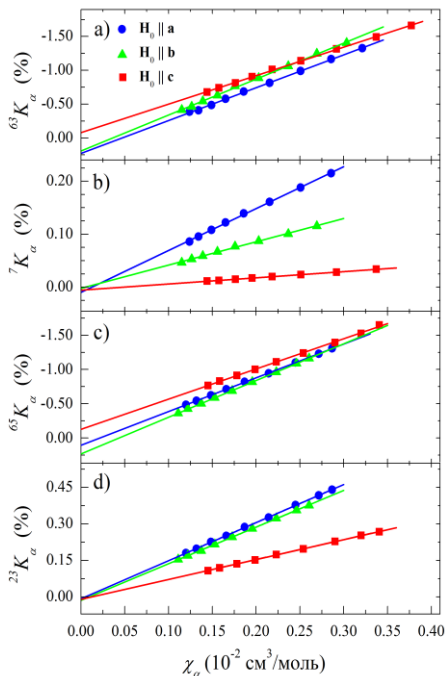


Рис. 2. Параметрические зависимости ${}^k K_\alpha(T)$ от $\chi_\alpha(T)$ для ${}^{63}\text{Cu}$ (a), ${}^7\text{Li}$ (b) в LiCu_2O_2 (S2) и ${}^{65}\text{Cu}$ (c) и ${}^{23}\text{Na}$ (d) в NaCu_2O_2 при трёх различных ориентациях кристаллов во внешнем магнитном поле $\mathbf{H}_0 \parallel \mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}$, аппроксимированные прямыми линиями.

окисления ионов лития, натрия и меди составляют соответственно +0.95, +0.93 и +1.2. Дырки на ионах меди заселяют $3d_{3z^2-r^2}$ и $3d_{x^2-y^2}$ орбитали. Наличие слабого магнетизма в цепочках $\text{Cu}^{+1.2}$ заставляет по-новому взглянуть на модель возникновения электрической поляризации **P** в LCO, предложенной в работах Москвина и др.¹

Таблица 1. Спиновый и орбитальный вклады в сдвиги линии ЯМР и магнитную восприимчивость, дипольные и наведенные сверхтонкие поля для ядер $^{63,65}\text{Cu}$, ^7Li и ^{23}Na . Погрешность определения данных величин не превышала 5 %.

		H_{hf} , кЭ/μВ	K_{orb} , ppm	H_{dip}^{out} , кЭ/μВ	$H_{tr} = H_{hf} - H_{dip}^{out}$, кЭ/μВ	$\chi_{orb,\alpha}^*$ 10^{-4} , см ³ /моль
LiCu ₂ O ₂	⁶³ Cu	H₀ a	-26.4	1653	-0.42	-25.98
		H₀ b	-27.5	1670	-0.43	-27.07
		H₀ c	-22.5	-2775	0.85	-23.35
	⁷ Li	H₀ a	4.35	0	1.30	3.05
		H₀ b	2.08	0	-0.75	2.83
		H₀ c	1.09	0	-0.55	1.64
NaCu ₂ O ₂	⁶⁵ Cu	H₀ a	-27.5	1653	-0.24	-27.26
		H₀ b	-29.9	1670	-0.32	-29.58
		H₀ c	-24.6	-2775	0.56	-25.16
	²³ Na	H₀ a	8.41	-263	0.91	7.50
		H₀ b	8.17	44	-0.64	8.81
		H₀ c	5.11	185	-0.27	5.38

Возможно, для возникновения **P** вовсе не обязательно наличие примесных Cu^{2+} ионов в цепочке немагнитной меди. Роль таких примесных центров могут играть 3d дырки на позициях Cu^+ ионов.

¹ Moskvin, A. S. Nonrelativistic multiferrocity in the nonstoichiometric spin-1/2 spiral-chain cuprate LiCu₂O₂ / A. S. Moskvin, Y. D. Panov, S.-L. Drechsler // Phys. Rev. B. – 2009. – Vol. 79, Iss. 10. – P. 104112.

Действительно, эффективные магнитные моменты на ионах Cu^+ участвуют в обменных взаимодействиях с моментами ионов Cu^{2+} в соседних цепочках Cu^{2+}O . Эти взаимодействия могут приводить к возникновению спонтанной электрической поляризации в кристалле посредством обменно - индуцированного механизма.

Последний раздел посвящен исследованию низкочастотной спиновой динамики в LiCu_2O_2 и NaCu_2O_2 . Для этого были получены температурные зависимости скорости, ${}^k T_{1,\alpha}^{-1}$ ($k = 7, 23, 63, 65$; $\alpha = a, b, c$), и анизотропии, ${}^k R_\beta^\alpha = {}^k T_{1,\alpha}^{-1}/{}^k T_{1,\beta}^{-1}$, спин-решеточной релаксации (СРР) на различных ядрах LCO/NCO при разных ориентациях монокристаллов во внешнем магнитном поле. Анизотропия СРР в свою очередь определяет отношение мнимых частей обобщенной магнитной восприимчивости при волновом векторе несоизмеримой магнитной структуры $\mathbf{Q}_{\text{HM}} \chi_c''(\mathbf{Q}_{\text{HM}}, \omega_n)$ и $\chi_{ab}''(\mathbf{Q}_{\text{HM}}, \omega_n)$:

$$\frac{\chi_c''(\mathbf{Q}_{\text{HM}}, \omega_n)}{\chi_{ab}''(\mathbf{Q}_{\text{HM}}, \omega_n)} = ({}^k R_c^a + {}^k R_c^b - 1) \frac{({}^k H_{hf,a}^1)^2 + ({}^k H_{hf,b}^1)^2}{2({}^k H_{hf,c}^1)^2}, \quad (2)$$

где ${}^k H_{hf,\alpha}^1$ – суммарное (дипольное и наведенное) СТП, создаваемое на ядре k одним ближайшим ионом Cu^{2+} . Восприимчивость $\chi_\alpha''(\mathbf{q}, \omega_n)$ характеризует плотность магнитных флуктуаций с волновым вектором \mathbf{q} и частотой ЯМР ω_n в направлении α . Если спины флуктуируют изотропно, анизотропия восприимчивости $\chi_\alpha''(\mathbf{q}, \omega)$ для любого \mathbf{q} определяется анизотропией g -фактора для магнитного момента Cu^{2+} :

$$\frac{\chi_\alpha''(\mathbf{q}, \omega)}{\chi_\beta''(\mathbf{q}, \omega)} = \left(\frac{g_\alpha}{g_\beta}\right)^2 = \text{const} \quad (\alpha = a, b, c). \quad (3)$$

В этом случае для LCO(NCO) имеем: $\frac{\chi_c''(\mathbf{q}, \omega)}{\chi_a''(\mathbf{q}, \omega)} = \frac{\chi_c''(\mathbf{q}, \omega)}{\chi_b''(\mathbf{q}, \omega)} \equiv \frac{\chi_c''(\mathbf{q}, \omega)}{\chi_{ab}''(\mathbf{q}, \omega)} = 1.21(1.01)$.

На рис. 3 представлена температурная зависимость отношения $\frac{\chi_c''(\mathbf{Q}_{\text{HM}})}{\chi_{ab}''(\mathbf{Q}_{\text{HM}})}$. Видно, что в мультиферроике LCO при комнатной температуре спиновые флуктуации изотропны. При понижении температуры наблюдается значительное подавление спиновых флуктуаций в

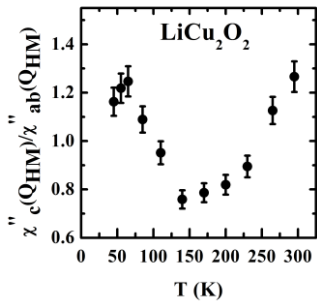


Рис. 3. T -зависимость отношения $\frac{\chi'_c(Q_{HM})}{\chi'_{ab}(Q_{HM})}$.

направлении оси **c**, что, по-видимому, связано с развитием 2D корреляций ближнего порядка в плоскостях, содержащих Cu^{2+} моменты.

Максимум ослабления таких флуктуаций достигается при $T \approx 150$ К. Дальнейшее охлаждение LCO до $T \approx T_N$ восстанавливает изотропию флуктуаций в системе, что косвенно указывает на отсутствие, вблизи, но выше T_N , какой-то выделенной кристаллографической плоскости, явно

более других предпочтительной для возникновения в ней дальнего геликоидального магнитного порядка. В купрате NCO спектр спиновых флуктуаций остается изотропным во всем диапазоне температур.

Пятая глава посвящена исследованию магнитной структуры низкоразмерных купратов LiCu_2O_2 и NaCu_2O_2 в зависимости от величины и направления внешнего магнитного поля.

На рис. 4 представлены спектры ЯМР $^{63,65}\text{Cu}$, ^7Li и ^{23}Na в магнитоупорядоченной фазе монокристаллического (S2) и двойникового (S1) кристаллов LiCu_2O_2 при ориентации внешнего магнитного поля $\mathbf{H}_0 \parallel \mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}$. В результате анализа спектров, записанных во внешнем магнитном поле в магнитоупорядоченном состоянии, было выяснено, что они могут быть удовлетворительно описаны в предположении преобразования каждой из представленных на рисунке 4 узких линий (парамагнитная фаза) в характерную двугорбую (или четырехгорбую в случае ^7Li) спектральную линию. Такое расщепление спектров при переходе в упорядоченное магнитное состояние может являться признаком того, что эффективное локальное поле $\mathbf{h}_{\text{loc}}(\mathbf{R})$ в месте расположения ионов Cu^+ , Li^+ , Na^+ индуцируется несоизмеримой магнитной структурой.

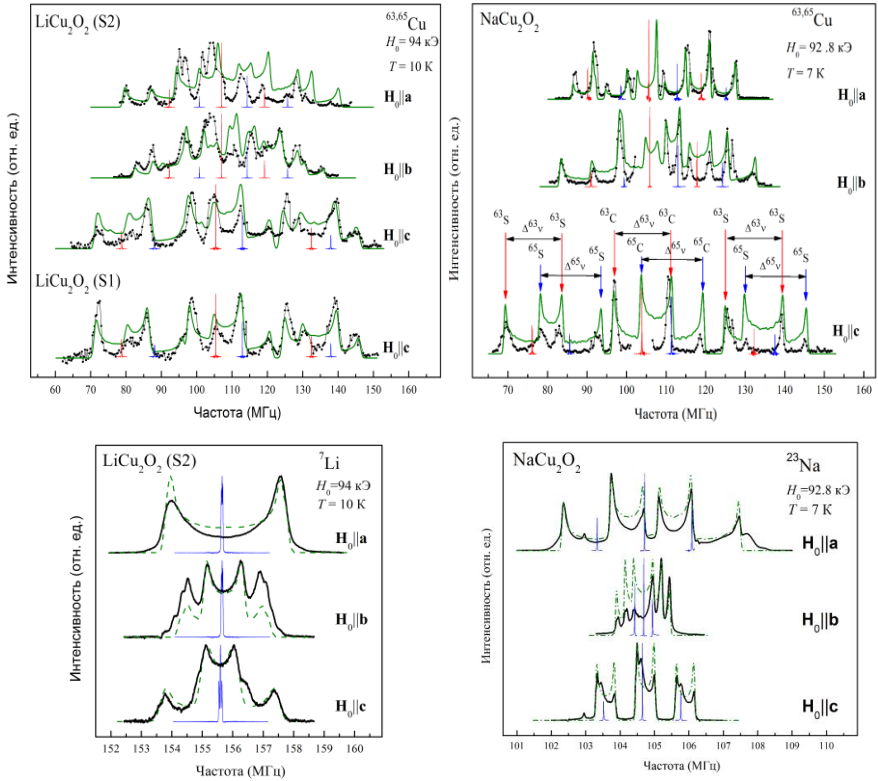


Рис. 4. ЯМР спектры $^{63,65}\text{Cu}$, ^7Li и ^{23}Na в магнитоупорядоченной фазе монокристаллов LiCu_2O_2 (S2), LiCu_2O_2 (S1) и NaCu_2O_2 при ориентации внешнего магнитного поля $\mathbf{H}_0 \parallel \mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}$ (•). Узкие спектральные пики на рисунке соответствуют ЯМР спектрам при комнатной температуре. Сплошные (в случае $^{63,65}\text{Cu}$) и штриховые (в случае ^7Li и ^{23}Na) линии представляют собой результат компьютерного моделирования спектров в модели планарной спиновой спирали в Cu^{2+} -О цепочках.

Для выявления деталей магнитной структуры спектры ЯМР были промоделированы в модели планарной спирали. Направление магнитных моментов ионов меди Cu^{2+} $\boldsymbol{\mu}_{m,i,j,k} = \mu \mathbf{e}_{m,i,j,k}$ задавалось

единичным вектором $\mathbf{e}_{m,i,j,k}$, компоненты которого выражаются следующим образом:

$$\begin{aligned} e_{m,i,j,k}^a &= -\cos \psi_m \cos \theta_m \sin \varphi_{m,i,j,k} - \sin \psi_m \cos \varphi_{m,i,j,k}, \\ e_{m,i,j,k}^b &= -\sin \psi_m \cos \theta_m \sin \varphi_{m,i,j,k} + \cos \psi_m \cos \varphi_{m,i,j,k}, \\ e_{m,i,j,k}^c &= \sin \theta_m \sin \varphi_{m,i,j,k}. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь θ_m , ψ_m , $\varphi_{m,i,j,k}$ – углы Эйлера, $m = \text{I, II, III, IV}$ – номер плоскости в элементарной ячейке. Углы $\varphi_{m,i,j,k}$ могут быть выражены через волновой вектор магнитной структуры $\mathbf{q} = (\pi/a, 0.174 \times 2\pi/b, 0)$ (LCO) и $\mathbf{q} = (\pi/a, 0.228 \times 2\pi/b, 0)$ (NCO) и начальные фазы ϕ_m следующим образом: $\varphi_{m,i,j,k} = \mathbf{q} \cdot (ia, jb, kc) + \phi_m$. Анализ экспериментальных спектров и учет симметрии кристаллов позволил уменьшить число возможных варьируемых параметров до 4-х. Моделирование спектров проводилось с помощью программы, численно рассчитывающей резонансные частоты и соответствующие им вероятности переходов. Результаты моделирования представлены в таблице 2. В соответствии с данными, приведенными в таблице 2, картина магнитной структуры в NCO и LCO и ее эволюция во внешнем магнитном поле представляются следующими. В случае NCO в нулевом внешнем магнитном поле спиновые спирали внутри бислоя (II-III) лежат в одной плоскости, но имеют противоположные направления закручивания магнитных моментов, то же самое имеет место и в бислое (I-IV) (рис. 5(i)). В случае LCO во всех слоях $m = \text{I, II, III, IV}$ плоскости спиновых спиралей параллельны, направление закручивания спиновых спиралей одинаковое (рис. 5(ii)). При охлаждении образцов во внешнем магнитном поле, направленном вдоль оси кристалла \mathbf{c} , магнитные структуры соединений практически не изменяются. Магнитные поля \mathbf{H}_0 , направленные вдоль оси \mathbf{a} , поворачивают плоскости спиновых спиралей в цепочках, стремясь сориентировать нормаль \mathbf{n} плоскости спиновой спирали вдоль или против направления поля. При этом в LCO параллельность друг другу спиновых плоскостей сохраняется только внутри бислоев (II-III) и (I-IV).

Таблица 2. Значения параметров моделирования спектров ЯМР LiCu_2O_2 и NaCu_2O_2 . θ_m, ψ_m – углы Эйлера, задающие направление нормали плоскости спиновой спирали, $\Delta\phi_{m+1,m}$ – разности фаз магнитных моментов в цепочках $m+1$ и m , $h_{\text{loc},1}$ – локальное магнитное поле, создаваемое на ядрах ионов Cu^+ одним ближайшим магнитным моментом μ иона Cu^{2+} .

		LiCu_2O_2			NaCu_2O_2		
	m	θ_m , град.	ψ_m , град.	$\Delta\phi_{32}$, град.	θ_m , град.	ψ_m , град.	$\Delta\phi_{32}$, град.
$\mathbf{H}_0 = 0$	1	-32(1)	-45(1)	-	150(1)	-45(1)	-
	2	-32(1)			-150(1)		
	3	-32(1)			30(1)		
	4	-32(1)			-30(1)		
$\mathbf{H}_0 \parallel \mathbf{c}$	1	-29(1)	-45(1)	-33(2)	145(1)	-45(1)	52(2)
	2	-29(1)			-145(1)		
	3	-29(1)			35(1)		
	4	-29(1)			-35(1)		
$\mathbf{H}_0 \parallel \mathbf{a}$	1	-20(1)	0(1)	45(2)	102(1)	180(1)	-30(2)
	2	20(1)			-102(1)		
	3	20(1)			78(1)		
	4	-20(1)			-78(1)		
$\mathbf{H}_0 \parallel \mathbf{b}$	1	-60(1)	80(1)	145(2)	128(1)	-90(1)	-112(2)
	2	-60(1)	-80(1)		-128(1)		
	3	-60(1)	-80(1)		52(1)		
	4	-60(1)	80(1)		-52(1)		
$ h_{\text{loc},1} $, кЭ		5.3(2)			5.3(1)		
μ , μB		1.1(1)			0.59(3)		
$\Delta\phi_{21}$, град.		90(1)			-90(1)		
$\Delta\phi_{43}$, град.		90(1)			-90(1)		

Направления закручивания спиралей в бислоях: в NCO – противоположное, в LCO – в одном направлении (рис. 5). Подобное стремление к перпендикулярному относительно магнитного поля расположению спиновых плоскостей наблюдается и при охлаждении

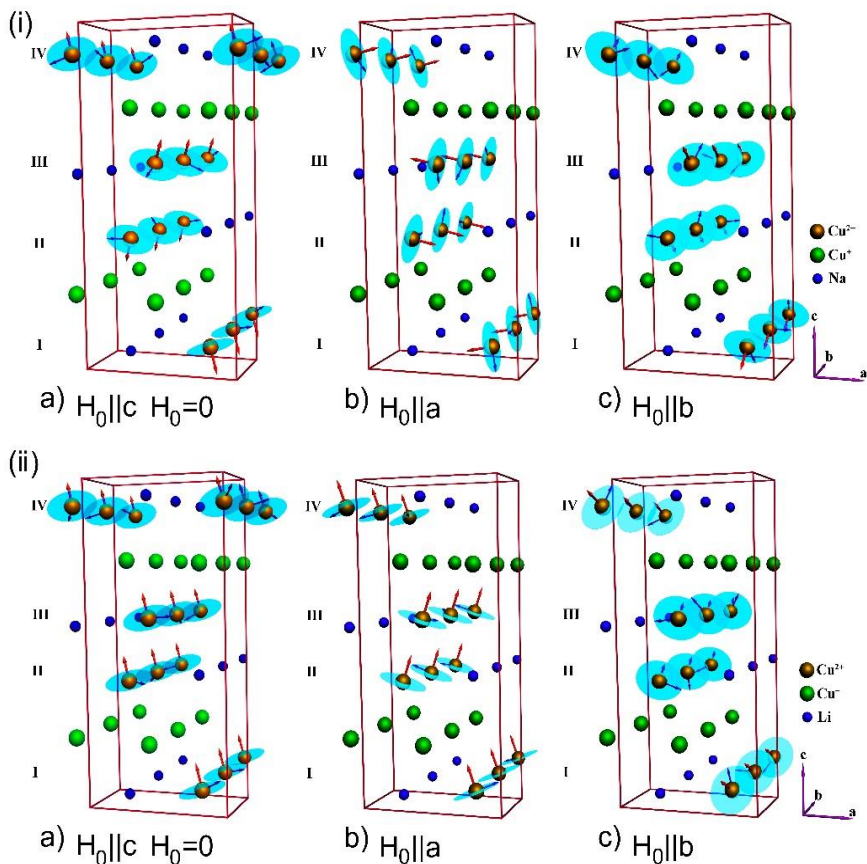


Рис. 5. Пространственная ориентация планарных спиновых спиралей в $\text{Cu}^{2+}\text{-O}$ цепочках слоев $m = \text{I, II, III, IV}$ в нулевом (a) и во внешнем магнитном поле $H_0 = 92.8$ кЭ, направленном вдоль осей кристалла c (a), a (b) и b (c) в случае NaCu_2O_2 (i) и $H_0 = 94$ кЭ в случае LiCu_2O_2 (ii). Магнитные моменты Cu^{2+} условно показаны синими стрелками, плоскости их поляризации – голубыми кругами, нормали к плоскостям поляризации – красными стрелками.

кристаллов в поле при $\mathbf{H}_0 \parallel \mathbf{b}$ ниже температур магнитного перехода. При этом, в случае NCO, проекции нормали \mathbf{n} на плоскость ab в каждом

слое m лежат вдоль оси \mathbf{b} , а, в случае LCO, отклонены от этой оси на ~ 10 градусов. Взаимная ориентация спиновых плоскостей в бислоях и направления закручивания в них аналогичны случаю $\mathbf{H}_0 \parallel \mathbf{a}$ (рис. 5).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. В результате моделирования экспериментальных спектров ЯМР/ЯКР $^{63,65}\text{Cu}$, ^7Li и ^{23}Na , записанных выше и ниже T_N при различных ориентациях кристалла во внешнем магнитном поле, были определены компоненты тензора ГЭП в месте расположения исследуемых ядер и значения электронных магнитных моментов ионов меди Cu^{2+} в LiCu_2O_2 и NaCu_2O_2 .

2. Впервые методами ЯМР/ЯКР выполнено комплексное исследование монокристаллов LiCu_2O_2 и NaCu_2O_2 в области парамагнитного состояния. Определены спиновый и орбитальный вклады в сдвиги линий ЯМР и магнитную восприимчивость. Сделаны оценки вкладов от отдельных ближайших соседних ионов Cu^{2+} в дипольные и наведенные сверхтонкие поля на ядрах ионов Cu^+ , Li^+ и Na^+ . Анализ природы этих полей позволил выявить ненулевую степень ковалентности между ионами в LiCu_2O_2 и NaCu_2O_2 . Кроме того, установлено, что «немагнитные» ионы $\text{Cu}^{+(1+\delta)}$ имеют отличную от нуля дырочную заселенность ($\delta \approx 0.2$) 3d-орбитали и, следовательно, имеют эффективные магнитные моменты. Данный результат позволяет говорить о возможности реализации в LiCu_2O_2 обменно - индуцированного механизма возникновения спонтанной электрической поляризации.

3. Обнаружено, что в парамагнитной фазе мультиферроика LiCu_2O_2 наблюдается значительное подавление спиновых флуктуаций в направлении оси c при понижении температуры. Анализ температурной зависимости анизотропии спин-решеточной релаксации позволил заключить, что данное подавление связано с развитием 2D корреляций ближнего порядка в плоскостях кристалла, содержащих Cu^{2+} ионы.

Максимум анизотропии флуктуаций достигается при $T \approx 150$ К. Дальнейшее охлаждение LiCu_2O_2 до $T \approx T_N$ восстанавливает изотропию флуктуаций в системе, что указывает на отсутствие, вблизи, но выше T_N , некоторой выделенной кристаллографической плоскости, явно более других предпочтительной для возникновения в ней планарного геликоидального магнитного порядка. В купрате NaCu_2O_2 спектр спиновых флуктуаций остается изотропным во всем диапазоне температур.

4. Методами ЯМР выполнено комплексное исследование магнитной структуры квазидвумерных магнетиков LiCu_2O_2 и NaCu_2O_2 . Все спектры ЯМР ядер, входящих в состав LiCu_2O_2 и NaCu_2O_2 , были удовлетворительно описаны в единой модели планарной спиральной магнитной структуры. Установлена пространственная ориентация спиновых спиралей в LiCu_2O_2 и NaCu_2O_2 в отсутствие внешнего магнитного поля и в поле $H_0 = 94$ кЭ / $H_0 = 92.8$ кЭ, направленным вдоль той или иной оси кристалла. Выяснено, что спиновые спирали в данных соединениях не лежат ни в одной из кристаллографических плоскостей ab , bc или ac . Плоскости спиралей параллельны только в цепочках, образующих бислой: $-\text{O}-\text{Cu}^{2+}-\text{O}-\text{M}-$ и $-\text{M}-\text{O}-\text{Cu}^{2+}-\text{O}-$. Направления закручивания магнитных моментов в этих цепочках в NaCu_2O_2 – противоположны, а в LiCu_2O_2 – совпадают.

5. Внешнее магнитное поле $H_0 = 94$ кЭ / $H_0 = 92.8$ кЭ, направленное вдоль оси **c** кристалла, практически не изменяет пространственной ориентации спиновых спиралей в цепочках Cu^{2+} , имеющей место при $H_0 = 0$, а направленное вдоль осей **a** и **b**, поворачивает плоскости спиновых спиралей, стремясь сориентировать их нормаль **n** вдоль внешнего магнитного поля.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

A1. Исследование спиральной магнитной структуры квазиодномерного мультиферроика LiCu_2O_2 методами ЯМР $^{63,65}\text{Cu}$ / А.Ф.

Садыков, А.П. Геращенко, Ю.В. Пискунов, В.В. Оглобличев, А.Л. Бузлуков, С.В. Верховский, А.Ю. Якубовский, К. Кумагаи // Письма в ЖЭТФ. – 2010. – Т.92, Вып.8. – С. 580 – 584.

А2. Магнитная структура низкоразмерного мультиферроика LiCu_2O_2 : исследование методами ЯМР $^{63,65}\text{Cu}$, ^7Li . / А.Ф. Садыков, А.П. Геращенко, Ю.В. Пискунов, В.В. Оглобличев, А.Г. Смольников, С.В. Верховский, А.Ю. Якубовский, Э.А. Тищенко, А.А. Буш // Журнал экспериментальной и теоретической физики. — 2012. — Т.142, Вып.4 — С. 753 – 760.

А3. Магнитная структура низкоразмерного магнетика NaCu_2O_2 : исследования методами ЯМР $^{63,65}\text{Cu}$, ^{23}Na / А.Ф. Садыков, А.П. Геращенко, Ю.В. Пискунов, В.В. Оглобличев, А.Г. Смольников, С.В. Верховский, А.Л. Бузлуков, И.Ю. Арапова, Y. Furukawa, А.Ю. Якубовский, А.А. Буш // Журнал экспериментальной и теоретической физики. — 2014. — Т.146, Вып.5 — С. 990—1001.

А4. ЯМР-исследование парамагнитного состояния низкоразмерных магнетиков LiCu_2O_2 и NaCu_2O_2 / А.Ф. Садыков, Ю.В. Пискунов, А.П. Геращенко, В.В. Оглобличев, А.Г. Смольников, С.В. Верховский, И.Ю. Арапова, З.Н. Волкова, К.Н. Михалев, А.А. Буш // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2017. – Т.151, Вып.2. – С. 335 – 345.

А5. Спиновая динамика в низкоразмерных геликоидальных магнетиках LiCu_2O_2 и NaCu_2O_2 / А.Ф. Садыков, Ю.В. Пискунов, А.П. Геращенко, В.В. Оглобличев, А.Г. Смольников, И.Ю. Арапова, З.Н. Волкова, А.А. Буш // Письма в ЖЭТФ. – 2017. – Т.151, Вып.11. – С. 685 – 690.

А6. $^{63,65}\text{Cu}$ ЯМР/ЯКР исследование геликоидальной магнитной структуры мультиферроика LiCu_2O_2 / А.Ф. Садыков, Ю.В. Пискунов, А.П. Геращенко, В.В. Оглобличев, А.Л. Бузлуков, К.Н. Михалев, С.В. Верховский // Тезисы докладов XXXV Сессии по физике низких температур (НТ-35). – М.: Граница, 2009. – С. 146 – 147.

А7. Геликоидальный магнетизм LiCu_2O_2 / А.Ф. Садыков, А.П. Геращенко, Ю.В. Пискунов, В.В. Оглобличев // Тезисы докладов XXXVI Международной конференции «Совещание по физике низких температур». – С.–Петербург: ФТИ им. А.Ф. Иоффе. – 2012. – С. 102.

A8. ^{63,65}Cu NMR study of the magnetic structure in the multiferroic LiCu₂O₂ / A.F. Sadykov, Yu.V. Piskunov, A.P. Gerashenko, V.V. Ogloblichev, A.L. Buzlukov, K.N. Mikhalev, S.V. Verkhovskii // Proceedings of XII International young scientist school «Actual problems of magnetic resonance and its applications». – Kazan: Kazan State University. – 2009. – P. 126 – 128.

A9. Magnetic structure in the multiferroic LiCu₂O₂: ^{63,65}Cu and ⁷Li NMR studies / A.F. Sadykov, Y.V. Piskunov, A.P. Gerashenko, V.V. Ogloblichev, A.L. Buzlukov, K.N. Mikhalev, S.V. Verkhovskii // Proceedings of XIII International Youth Scientific School «Actual Problems of Magnetic Resonance and its Application». – Kazan: Kazan Federal University. – 2010. – P. 100 – 102.

A10. The features of the magnetic properties of low-dimensional isostructural cuprates NaCu₂O₂ and LiCu₂O₂ investigated by NMR/ A.F. Sadykov, V.V. Piskunov, A.P. Gerashenko, V.V. Ogloblichev, A.G. Smolnikov, A.A. Bush // Proceedings of XVII International Youth Scientific School «Actual problems of magnetic resonance and its application». – Kazan: Kazan University. – 2014. – P. 93 – 95.

A11. ^{63,65}Cu ЯМР/ЯКР исследование несоизмеримого геликоидального магнитного порядка в мультиферроике LiCu₂O₂ / А.Ф. Садыков, Ю.В. Пискунов, А.П. Геращенко, В.В. Оглобличев, А.Л. Бузлуков, К.Н. Михалев, С.В. Верховский // Тезисы докладов X (Юбилейной) Молодёжной школы-семинара по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС-10). – Екатеринбург: ИФМ УрО РАН. – 2009. – С. 43 – 44.

A12. Исследование магнитной структуры мультиферроика LiCu₂O₂ методами ядерного магнитного резонанса / А.Ф. Садыков, Ю.В. Пискунов, А.П. Геращенко, В.В. Оглобличев, А.Л. Бузлуков, К.Н. Михалев, С.В. Верховский // Тезисы докладов XI Всероссийской молодёжной школы-семинара по проблемам физики конденсированного состояния (СПФКС-XI). – Екатеринбург: УрО РАН. – 2010. – С. 129.

A13. Поиск слабого ферромагнетизма в соединении LiCu₂O₂ методами ядерного магнитного резонанса / А.Ф. Садыков, Ю.В. Пискунов, А.П. Геращенко, В.В. Оглобличев, А.Л. Бузлуков, К.Н. Михалев, С.В. Верховский // Тезисы докладов XII Всероссийской молодёжной школы-

семинара по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС-12). – Екатеринбург: ИФМ УрО РАН. – 2011. – С. 95.

A14. Helicoidal magnetic ordering in multiferroic LiCu_2O_2 : $^{63,65}\text{Cu}$ and ^7Li NMR study / A. F. Sadykov, Yu. V. Piskunov, A. P. Gerashchenko, V. V. Ogloblichev, A.L. Buzlukov, K.N. Mikhalev, S.V. Verkhovskii // “IV Euro-Asian Symposium “Trends in MAGnetism: Nanospintronics”, School of young scientist “Spintronics” (EASTMAG 2010): Book of Abstracts, 28 June – 2 July 2010. – Ekaterinburg, Russia, 2014. – P. 349.

A15. Application of NMR technique to definition of magnetic structure LiCu_2O_2 / A.F. Sadykov, A.P. Gerashchenko, Yu.V. Piskunov, V.V. Ogloblichev, A.G. Smolnikov // Proceedings of International Symposium and Summer School «Nuclear Magnetic Resonance in Condensed Matter» (NMRCM 2012), 9-th Meeting «NMR in Heterogeneous Systems». – S.-Petersburg. – 2012. – P. 119.

A16. Магнитная структура низкоразмерного мультиферроика LiCu_2O_2 : исследование методами ЯМР $^{63,65}\text{Cu}$, ^7Li / А.Ф. Садыков, А.П. Герашенко, Ю.В. Пискунов, В.В. Оглобличев, А.Г. Смольников, С.В. Верховский // Тезисы докладов научной сессии ИФМ УрО РАН по итогам 2012 г. – Екатеринбург: ИФМ УрО РАН. – 2013. – С. 68 – 69.

A17. Магнитоупорядоченная фаза низкоразмерного магнетика NaCu_2O_2 : исследования методами ЯМР $^{63,65}\text{Cu}$, ^{23}Na / А.Ф. Садыков, А.П. Герашенко, Ю.В. Пискунов, В.В. Оглобличев, А.Г. Смольников, С.В. Верховский // Тезисы докладов научной сессии ИФМ УрО РАН по итогам 2014 г. – Екатеринбург: ИФМ УрО РАН. – 2015. – С. 92 – 93.

A18. NMR Study of the Paramagnetic State of Low-Dimensional Magnets LiCu_2O_2 and NaCu_2O_2 / A. F. Sadykov, Yu. V. Piskunov, A. P. Gerashchenko, V. V. Ogloblichev, A. G. Smol'nikov, S. V. Verkhovskii, Z. N. Volkova // Moscow International Symposium on Magnetism (MISM): Book of Abstracts, 1 – 5 July 2017. – Moscow, 2017. – P. 301.

Отпечатано на Ризографе ИФМ УрО РАН тир. 100 зак. № 60

Объем 1 печ. л. Формат 60x84 1/16

620108, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18