

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 004.003.01 НА БАЗЕ  
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ  
НАУКИ ИНСТИТУТА ФИЗИКИ МЕТАЛЛОВ ИМЕНИ М.Н. МИХЕЕВА  
УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
(ИФМ УрО РАН) ФЕДЕРАЛЬНОГО АГЕНСТВА НАУЧНЫХ  
ОРГАНИЗАЦИЙ ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ  
СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 02.02.2018, №1

О присуждении САДЫКОВУ Алмазу Фаритовичу, гражданину России,  
ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Магнитные структуры низкоразмерных соединений  $\text{LiCu}_2\text{O}_2$  и  $\text{NaCu}_2\text{O}_2$ » по специальности 01.04.11 – физика магнитных явлений принята к защите 17.11.2017, протокол № 20 диссертационным советом Д004.003.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институте физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской Академии наук (ИФМ УрО РАН), Федеральное агентство научных организаций, 620137, Екатеринбург, ул.С.Ковалевской,18, приказы Минобрнауки РФ № 714/нк от 02.11.2012 и № 188/нк от 26.02.2015.

Соискатель Садыков Алмаз Фаритович, 1986 года рождения, в 2009 году окончил Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уральский государственный технический университет-УПИ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по специальности «Физика», освоил программу подготовки научно-педагогических кадров в очной аспирантуре при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской Академии наук, год

окончания аспирантуры 2012, работает в должности научного сотрудника в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Института физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, Федеральное агентство научных организаций.

Диссертация выполнена в лаборатории кинетических явлений Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, Федеральное агентство научных организаций.

Научный руководитель – кандидат физико-математических наук Пискунов Юрий Владимирович, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, лаборатория кинетических явлений, старший научный сотрудник.

Официальные оппоненты:

1. Гиппиус Андрей Андреевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики низких температур и сверхпроводимости Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»
2. Денисова Татьяна Александровна, доктор химических наук, ученый секретарь Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института химии твердого тела Уральского отделения Российской академии наук

дали положительные отзывы о диссертации.

Ведущая организация Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Казанский (Приволжский) федеральный университет" в своем положительном заключении, подписанном Ереминым Михаилом Васильевичем, доктором физико-математических наук, профессором, Дуглавом Александром Васильевичем, кандидатом физико-математических наук, доцентом,

Тагировым Муратом Салиховичем, доктором физико-математических наук, профессором, заведующим кафедрой квантовой электроники и радиоспектроскопии, указала, что диссертационная работа Садыкова А.Ф. посвящена изучению «соединений  $\text{LiCu}_2\text{O}_2$ ,  $\text{NaCu}_2\text{O}_2$ , которые являются прекрасными объектами для исследования природы магнитоупорядоченных состояний с несоизмеримыми с периодом кристаллической решетки спиральными спиновыми структурами. Диссертационная работа выполнена на актуальную тему. Результаты новы и достоверны. По общему мнению членов кафедры, диссертация удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 – физика магнитных явлений.».

Соискатель имеет 37 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации 18 работ, из них статей, опубликованных в рецензируемых российских и зарубежных научных изданиях - 5, тезисов докладов в материалах всероссийских и международных конференций – 13. Общий объем научных изданий 10.2 печатных листов. Автором получены экспериментальные данные о пространственной ориентации магнитных моментов при наличии и отсутствии внешнего магнитного поля и спиновых флуктуациях, а также определены параметры градиента электрического поля в месте расположения ядер немагнитных ионов, спиновый и орбитальный вклады в сдвиги линий ядерного магнитного резонанса и магнитную восприимчивость, оценены вклады от отдельных ближайших соседних магнитоактивных ионов в дипольные и наведенные сверхтонкие поля на ядрах немагнитных ионов в  $\text{LiCu}_2\text{O}_2$  и  $\text{NaCu}_2\text{O}_2$ . Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Исследование спиральной магнитной структуры квазиодномерного мультиферроика  $\text{LiCu}_2\text{O}_2$  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. Кумагай // Письма в ЖЭТФ. – 2010. – Т.92, Вып.8. – С. 580 – 584.

2. Магнитная структура низкоразмерного мультиферроика  $\text{LiCu}_2\text{O}_2$ : исследование методами ЯМР  $^{63,65}\text{Cu}$ ,  $^7\text{Li}$ . / 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.

3. Магнитная структура низкоразмерного магнетика  $\text{NaCu}_2\text{O}_2$ : исследования методами ЯМР  $^{63,65}\text{Cu}$ ,  $^{23}\text{Na}$  / 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.

4. ЯМР-исследование парамагнитного состояния низкоразмерных магнетиков  $\text{LiCu}_2\text{O}_2$  и  $\text{NaCu}_2\text{O}_2$  / 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.

5. Спиновая динамика в низкоразмерных геликоидальных магнетиках  $\text{LiCu}_2\text{O}_2$  и  $\text{NaCu}_2\text{O}_2$  / 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.

На диссертацию и автореферат поступило 7 отзывов. Все отзывы положительные. В них отмечается актуальность темы диссертационной работы, научная новизна полученных результатов, их теоретическая и практическая значимость. Отзывы без замечаний поступили: от Матухина Вадима Леонидовича, доктора физ.-мат. наук, профессора, заведующего кафедрой физики ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань; от Николаева Евгения Григорьевича, кандидата физ.-мат. наук, старшего научного сотрудника «Институт физических проблем им. П.Л. Капицы» РАН, г. Москва; от Мухамедшина Ирека Рафкатовича, кандидата физ.-мат. наук, доцента кафедры общей физики Института физики ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», г. Казань.; от Лапиной Ольги Борисовны, доктора хим. наук,

руководителя группы ЯМР спектроскопии в твердом теле ФГБУН «Институт катализа им. Г.К. Борескова» СО РАН, г. Новосибирск.

Замечания содержатся в следующих отзывах:

1. От Никифорова Анатолия Елеферьевича, доктора физ.-мат. наук, профессора, главного научного сотрудника ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург.

Замечания: 1) На рис.5 используется цветовая дифференциация условных обозначений. Но печатный вариант является черно-белым, и различить по цвету используемые обозначения не представляется возможным. 2) В списке “Публикации по теме диссертации” в ссылке А14 допущена ошибка: год проведения конференции указан 2014, в действительности она состоялась в 2010 году. 3) В списке “Публикации по теме диссертации” в ссылке А15 в названии конференции допущена ошибка: “Nuckear Magnetic...”.

2. От Чукина Андрея Владимировича, кандидата физ.-мат. наук, доцента кафедры теоретической физики и прикладной математики ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург.

Замечание: 1) В качестве замечания можно отметить отсутствие сравнения результатов, изложенных в настоящей работе с данными, полученными дифракционными методами.

3. От Мирмельштейна Алексея Владиславовича, доктора физ.-мат. наук, главного научного сотрудника отделения экспериментальной физики ФГУП «Российский Федеральный ядерный центр- Всероссийский НИИ технической физики им. академика Е.И. Забабахина», г. Снежинск.

Замечания: 1) В качестве скорее вопроса, чем замечания, хотелось бы отметить следующее. В четвертой главе диссертации, посвященной ЯМР/ЯКР исследованию парамагнитного состояния кристаллов  $\text{LiCuO}_2$  и  $\text{NaCuO}_2$ , автор, в частности, отмечает (последний абзац стр 13 - первый абзац стр 14 автореферата), что возможную роль примесных центров, наличие которых необходимо для возникновения спонтанной электрической поляризации в  $\text{LiCuO}_2$ , могут играть 3d дырки на позициях ионов  $\text{Cu}^+$ . Из текста автореферата не ясно, в чем, в таком случае, состоит различие между  $\text{LiCuO}_2$  и  $\text{NaCuO}_2$ , первый из которых является сегнетоэлектриком, а второй - нет. Далее, в пятой главе, автор обсуждает уже отмеченный выше чрезвычайно интересный результат о различии спиральных магнитных структур в этих изоструктурных соединениях, в частности утверждается, что направления закручивания магнитных моментов в цепочках бислоя в  $\text{NaCuO}_2$  противоположны, а в  $\text{LiCuO}_2$  - совпадают. Возникает вопрос: не связано ли с этим обстоятельством различие в сегнетоэлектрических свойствах этих двух изоструктурных соединений? Или, другими словами, эти отличия, магнитных структур и сегнетоэлектрических свойств, не обусловлены ли одними и теми же физическими причинами? В автореферате этот вопрос никак не затронут. 2) Второе замечание носит редакционный характер. Обращает на себя внимание качество рисунков 1, 2 и 4, на которых трудно что-либо разглядеть, даже пользуясь увеличительным стеклом.

Выбор официальных оппонентов доктора физ.-мат. наук, профессора А.А. Гиппиуса и доктора хим. наук Т.А. Денисовой и ведущей организации обосновывается публикациями оппонентов, тематикой структурного подразделения ведущей организации и публикациями доктора физ.-мат. наук, профессора М.В. Еремина, кандидата физ.-мат. наук, доцента А.В. Дуглава, доктора физ.-мат. наук, профессора М.С. Тагирова, относящимися к сфере исследований, которым посвящена диссертация.

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:**

1. *Определены* компоненты тензора градиента электрического поля в месте расположения ядер  $^{63,65}\text{Cu}$ ,  $^7\text{Li}$  и  $^{23}\text{Na}$  и значения магнитных моментов ионов меди  $\text{Cu}^{2+}$  в  $\text{LiCu}_2\text{O}_2$  и  $\text{NaCu}_2\text{O}_2$ .
2. *Определены* спиновый и орбитальный вклады в сдвиги ЯМР и магнитную восприимчивость.
3. *Сделаны оценки* вкладов от отдельных ближайших соседних ионов  $\text{Cu}^{2+}$  в дипольные и наведенные сверхтонкие поля на ядрах ионов  $\text{Cu}^+$ ,  $\text{Li}^+$  и  $\text{Na}^+$ .
4. *Выявлена* ненулевая степень ковалентности между ионами в  $\text{LiCu}_2\text{O}_2$  и  $\text{NaCu}_2\text{O}_2$ . Установлено, что «немагнитные» ионы  $\text{Cu}^{+(1+\delta)}$  имеют отличную от нуля дырочную заселенность ( $\delta \approx 0.2$ ) и, следовательно, имеют магнитные моменты. Данный результат позволяет говорить о возможности реализации в  $\text{LiCu}_2\text{O}_2$  обменно - индуцированного механизма возникновения спонтанной электрической поляризации.
5. *Установлено*, что в парамагнитной фазе мультиферроика  $\text{LiCu}_2\text{O}_2$  при понижении температуры в направлении оси  $c$  наблюдается значительное подавление спиновых флуктуаций, связанное с развитием двумерных корреляций ближнего порядка в плоскостях, содержащих  $\text{Cu}^{2+}$  моменты. Установлено, что максимум анизотропии флуктуаций достигается при  $T \approx 150$  К, при дальнейшем охлаждении  $\text{LiCu}_2\text{O}_2$  до  $T \approx T_N = 24$  К анизотропия флуктуаций исчезает. В случае купрата  $\text{NaCu}_2\text{O}_2$  спектр спиновых флуктуаций остается изотропным во всем диапазоне температур.

6. *Установлена* пространственная ориентация спиновых спиралей в  $\text{LiCu}_2\text{O}_2$  и  $\text{NaCu}_2\text{O}_2$  в отсутствии внешнего магнитного поля и в полях  $H_0 = 94$  кЭ и 92.8 кЭ, соответственно. Обнаружено, 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  $\text{NaCu}_2\text{O}_2$  – противоположны, а в  $\text{LiCu}_2\text{O}_2$  – совпадают.

7. Показано, что внешнее магнитное поле, направленное вдоль оси **c** кристалла, практически не изменяет пространственной ориентации спиновых спиралей в цепочках  $\text{Cu}^{2+}$ , а поле, направленное вдоль осей **a** и **b**, поворачивает плоскости спиновых спиралей и ориентирует их нормаль **n** вдоль внешнего магнитного поля.

**Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:**

полученные данные об электронной и магнитной структуре магнетиков  $\text{LiCu}_2\text{O}_2$  и  $\text{NaCu}_2\text{O}_2$ , а также о спиновой динамике в этих соединениях дополняют и развиваются современные представления о таком важном классе объектов, как низкоразмерные купраты, содержащие цепочки спинов  $S=1/2$ , и могут быть использованы при построении теоретических моделей сегнетомагнетизма в низкоразмерных геликоидальных магнетиках.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:**

полученные в работе сведения о конкретной пространственной ориентации спиновых спиралей в  $\text{LiCu}_2\text{O}_2$  и  $\text{NaCu}_2\text{O}_2$  в зависимости от величины и направления внешнего магнитного поля, о направлении закручивания магнитных моментов в  $\text{Cu}^{2+}\text{O}_2$  цепочках, о слабом магнетизме ионов  $\text{Cu}^+$  могут быть использованы при исследованиях и разработке новых магнитоэлектрических материалов.

**Оценка достоверности результатов исследования выявила:**

- экспериментальные результаты, полученные с помощью различных широко апробированных методик, с использованием надежно аттестованных образцов, хорошо воспроизводимы; экспериментальные данные корректно обработаны; имеется совпадение ряда результатов измерений с данными, полученными другими исследователями.

- выводы работы не имеют принципиальных расхождений с имеющимися экспериментальными и теоретическими данными других исследователей;

- теоретические результаты моделирования данных ЯМР не противоречат современным научным представлениям о магнитных свойствах низкоразмерных систем с геликоидальным магнитным порядком.

**Личный вклад соискателя** состоит в участии в обсуждении цели и задач исследования, в получении и обсуждении результатов, изложенных в диссертации, в формулировке ее основных положений и выводов, в модернизации компьютерной программы симуляции спектров, в

опубликовании полученных результатов. Автором лично выполнены все ЯМР/ЯКР измерения, представленные в диссертационной работе: запись спектров ЯМР в парамагнитной и магнитоупорядоченной фазах монокристаллов  $\text{LiCu}_2\text{O}_2$  и  $\text{NaCu}_2\text{O}_2$ , измерения температурных зависимостей сдвигов ЯМР, скоростей спин-решеточной релаксации. Автором лично проведена обработка, анализ и систематизация, полученного массива экспериментальных данных, промоделирован большой набор спектров ЯМР и ЯКР. Материал диссертации неоднократно докладывался автором лично на международных и отечественных конференциях в виде устных и стеновых докладов.

Диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, в которой содержится решение актуальной научной задачи установления типа магнитного упорядочения и верификации теоретических моделей сегнетомагнетизма в спиральных магнетиках  $\text{LiCu}_2\text{O}_2$  и  $\text{NaCu}_2\text{O}_2$ , и соответствует критериям «Положения о присуждении ученых степеней» в редакции, утвержденной Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 с изменениями от 21.04.2016 г. № 335.

На заседании 02.02.2018 года диссертационный совет принял решение присудить Садыкову Алмазу Фаритовичу ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 18 человек, из них 5 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации 01.04.11 – Физика магнитных явлений, 6 докторов наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния, 7 докторов наук по специальности 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов, участвовавших в заседании, из 21 человека, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту – нет, проголосовали: за – 18, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель диссертационного совета,  
доктор физ.-мат. наук, академик РАН

В.В. Устинов

Ученый секретарь диссертационного совета,  
доктор физ.-мат. наук

Т.Б. Чарикова

6 февраля 2018 г.