

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Яковлева Ильи Александровича «Фазовая характеристика коррелированных систем с топологически-защищенными магнитными структурами при помощи методов машинного обучения и теории структурной сложности», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

**Актуальность темы исследования.** В современной науке практически ежедневно появляются новые работы по магнитным системам с нетривиальными структурными и электронными свойствами, которые необходимо разумно систематизировать, поэтому представленная диссертация И.А. Яковлева чрезвычайно актуальна. Её характерной чертой является использование самых современных тенденций в мировой науке, таких как методы машинного обучения, позволяющие обеспечивать объективность фазовой характеристики магнитных систем. С другой стороны, эта диссертация показывает высочайший уровень исследований магнетизма, традиционно присущий екатеринбургской школе. Магнитные системы имеют важные практические применения, а в ближайшее время ожидаются совершенно новые области использования топологически-защищенных магнитных структур, в том числе квантовых, что сделает подобные исследования ещё более актуальными и востребованными.

В тексте диссертационной работы, которая состоит из введения, четырёх глав с подробным изложением важнейших из полученных автором результатов и заключения с выводами, ясно обозначен вклад самого диссертанта. Во введении обсуждается актуальность проведённых в рамках диссертационной работы исследований, формулируются цели и задачи работы, определяются объекты и методы исследований. Обосновывается научная новизна и практическая значимость полученных автором

результатов, представлены защищаемые научные положения. Описывается структура и содержание работы.

В первой главе представлен математический аппарат используемых теорий магнетизма, магнитной динамики и методов машинного обучения. Такой профессиональный обзор очень важен для данной диссертации, так как используемые в ней методы машинного обучения ещё недостаточно известны в физическом научном сообществе. Кроме того, обзор демонстрирует высокую квалификацию и несомненную компетентность автора в этой области науки, как в её математическом аппарате, так и в практических приложениях, чем и обеспечивается достоверность и новизна полученных в последующих трёх главах научных результатов.

Вторая глава посвящена построению низкотемпературных фазовых диаграмм магнитных систем, в которых возможны топологически устойчивые объекты, скирмионы, бимероны и т.п. Особое внимание уделено поиску оптимального представления чистых и смешанных спиновых конфигураций для двумерных и трёхмерных магнитных систем.

В третьей главе приведены результаты применения разработанных в диссертации архитектур нейронных сетей, а также других методов машинного обучения, для анализа сложных магнитных фаз в двумерных и трёхмерных магнитных системах с различными кристаллическими решётками.

Наиболее интересной и дискуссионной представляется четвёртая глава, посвящённая нетривиальному понятию структурной сложности, её количественной оценке и практическому использованию для анализа фазовых переходов в сложных магнитных системах. Она даёт новые возможные направления развития данных исследований, часть из которых уже реализована.

По содержанию работы, особенно главы 4, у меня есть вопросы и замечания, которые не снижают ценности её основных результатов.

- 1) В разделе 2.3 в качестве одного из достоинств подхода, основанного на визуализации профилей намагниченности, выдвигается возможность разделения состояний спиновых спиралей и парамагнетика (рисунок 2.10). В нем же указывается, что предложенный подход слабо чувствителен к геометрии кристаллической решетки (рисунок 2.15). Чем вызвана низкая точность классификации данных состояний при помощи нейронной сети, приведенная в таблице 3.1?
- 2) Предложенная в разделе 3.2 нейронная сеть оперирует магнитными состояниями, стабилизированными в системе  $48 \times 48$  атомов. Можно ли с помощью такой архитектуры проводить анализ решеток большего размера, необходимых для моделирования параметров гамильтониана, соответствующих реальным соединениям, в которых наблюдаются магнитные скирмионы?
- 3) В разделе 4.2 предлагается существенное упрощение выражения (4.2) для вычисления структурной сложности. Уточняется, что оно справедливо лишь при используемой схеме обработки паттернов, основанной на усреднении. При этом в итоговой формуле (4.3) отсутствует вклад от перекрытия между различными масштабами, лежащий в основе определения процедуры. Рассматривались ли другие способы перенормировки паттернов, для которых справедливо исходное выражение и, если да, в чем их недостатки по сравнению с предложенным алгоритмом?
- 4) В разделе 4.3 приводится тестирование предложенного алгоритма вычисления структурной сложности на примере изображений. Не вполне очевидно, как согласуются между собой числовые значения, полученные для природных ландшафтов и каменных стен на рисунке 4.3.
- 5) В подразделе 4.4.2 обсуждаются результаты анализа системы с треугольной кристаллической решеткой при помощи структурной сложности. По какому алгоритму происходит обработка системы?

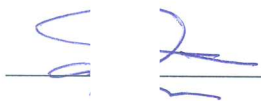
**Заключение по работе.** Диссертация И.А. Яковлева представляет собой законченный научный труд, соответствующий специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния. Соискатель является автором пяти работ, которые в полной мере отражают основное содержание и результаты диссертации и опубликованы в высокорейтинговых международных журналах. Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации надёжно обоснованы как с экспериментальной, так и с теоретической точки зрения, достоверность и научная новизна результатов не вызывает сомнений. Работа отвечает требованиям пункта 9 Положения о присуждении учёных степеней в УрФУ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Яковлев Илья Александрович, несомненно, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент:

Дмитриенко Владимир Евгеньевич,  
доктор физико-математических наук,  
ФГБУ «Национальный исследовательский центр»  
«Курчатовский институт», главный научный сотрудник  
лаборатории теоретических исследований отдела  
кристаллофизики отделения «Институт кристаллографии  
им. А.В. Шубникова» Курчатовского комплекса  
кристаллографии и фотоники (КККиФ).

Адрес: 119333, г. Москва, Ленинский проспект, д. 59.

Телефон: +7 (499) 135-63-11, e-mail: dmitrien@crys.ras.ru



Дмитриенко В.Е.

«13» мая 2024 г.

Подпись Дмитриенко В.Е. заверяю  
Главный учёный секретарь  
НИЦ «Курчатовский институт»



Борисов К.Е.