



**Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации**

*федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования*

**«Алтайский государственный
технический университет
им. И.И. Ползунова» (АлтГТУ)**

пр-т Ленина, 46, г. Барнаул, 656038

Телефон: (3852) 29-07-10

Факс: (3852) 36-78-64

E-mail: politeh@altgtu.ru

<http://www.altgtu.ru>

ОКПО 02067824

ОГРН 1022201517854

ИНН/КПП 2224017710/222401001

03.09.2025 № 1120-122-1684

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по научной и
инновационной работе
ФГБОУ ВО «Алтайский
государственный технический
университет им. И.И. Ползунова»
андр Анатолевич

2025 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Наумова Евгения Константиновича
«Делокализованные нелинейные колебательные моды и дискретные бризеры в
квадратных решетках», представленную на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук по специальности
1.3.8 – Физика конденсированного состояния

Феномен локализации колебательной энергии в нелинейных решетках, открытый Долговым, изучается уже на протяжении четырех десятилетий. Для существования локализованных колебаний большой амплитуды, получивших название дискретных бризеров (далее ДБ), необходимыми являются два условия – дискретность среды и нелинейность связи между частицами. Эти условия выполнены для многих физических объектов, в том числе для кристаллов. ДБ в кристаллах изучают поскольку они могут осуществлять транспорт энергии по кристаллической решетке на частотах выше фононного спектра. Также при ДБ способствуют преодолению потенциальных барьеров образования или миграции дефектов кристаллической решетки. ДБ напрямую связаны с делокализованными нелинейными колебательными модами (ДНКМ), теория которых была разработана Чечиным и Сахненко. Именно на основе анализа ДНКМ можно сделать выводы о возможности существования ДБ в рассматриваемой решетке.

Одобрено ИИНСМ
№ 42
от 05.09.2025

Важным аспектом физики кристаллов является явление передачи энергии нелинейной решетке от частиц, колеблющихся с достаточно высокой амплитудой на частотах за пределами фононного спектра (так называемое явление супратрансмиссии). В данном явлении также просматривается роль ДБ, поскольку именно они осуществляют передачу подводимой извне энергии кристаллу.

Вышесказанное говорит об **актуальности** работы Е.К. Наумова, целью которой является изучение ДНКМ и разработка численных методов возбуждения стационарных и движущихся ДБ, в том числе, по механизму супратрансмиссии, в квадратной решетке с потенциалом β -ФПУЦ.

Структура и основное содержание работы

Диссертация Е.К. Наумова состоит из введения, четырех глав, заключения и списка из 167 источников литературы. Общий объем диссертации составляет 101 страницу машинописного текста, включая 23 рисунка и 1 таблицу.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы и представлена степень ее разработанности, приведены цель и задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методология исследований, степень достоверности и апробация результатов, а также основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен обзор работ по нелинейным эффектам, определяющим важные свойства решеток. В обзор входит описание эффекта дальнего действия, который необходимо учитывать для ионных и металлических межатомных связей, дано определение эффекта супратрансмиссии. Также представлены однокомпонентные ДНКМ квадратной решетки, на базе которых проводилось исследование. Описывается математическая модель, которую автор применял в своих исследованиях, в частности, представлены гамильтониан и уравнения движения частиц квадратной решетки с дальним действием. Параметры математической модели выбраны с учетом физики реальных кристаллов, а именно, принимается, что жесткость связей убывает с расстоянием.

Во второй главе выполнен численный анализ свойств ДНКМ в квадратной решетке с дальнедействующими взаимодействиями, приводятся расчёты дисперсионных соотношений, из которых ясно, что из 16-и только 5 ДНКМ могут иметь частоту выше фононного спектра, а именно ДНКМ 1, 6, 7, 9 и 16. Именно они рассматриваются далее для нахождения новых ДБ в квадратной решетке.

В третьей главе формулируется математическая модель, позволяющая численно исследовать эффект передачи энергии решетке при помощи ДБ (эффект супратрансмиссии). Передача энергии квадратной решетке

осуществляется либо от пары, либо от ряда колеблющихся атомов. Выявлено, что ДБ могут испускаться при внешнем воздействии на частоте внутри фононного спектра близко к его верхней границе. Описано два режима испускания ДБ – квазипериодический и хаотический.

В четвертой главе проводится возбуждение ДБ, покоящихся или движущихся в пространстве кристаллической решетки, и анализ их свойств. Получение движущихся ДБ в квадратной решетке решает задачу, поставленную Бурлаковым в 1991 г. Эта задача решена путем наложения функции локализации на ДНКМ со смещением центра ДБ из высокосимметричного решеточного положения. В результате, ДБ показывает тенденцию возвращения в высокосимметричное положение, и этого начального импульса хватает для запуска движения ДБ вдоль плотноупакованного ряда частиц.

В заключении диссертационной работы представлены основные выводы, а также приводятся рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.

Научная новизна работы

Среди новых результатов, полученных автором, можно отметить следующее:

- доказано, что учет дальнего действия приводит к возможности существования ДБ, которые невозможны в решетке с короткодействующими взаимодействиями;

- при изучении явления супратрансмиссии показано, что если частота внешнего воздействия лежит в фононном спектре у его верхней границы, а амплитуда воздействия достаточно велика, то энергия передается решетке не фононами, как считалось ранее, а движущимися дискретными бризерами.

- решена задача Бурлакова, поставленная им в 1991 году, а именно, получены движущиеся ДБ в квадратной решетке.

Достоверность результатов гарантирована использованием строгих математических методов анализа систем линейных и нелинейных уравнений движения атомов решетки, известных и апробированных ранее численных методов, согласованием полученных результатов с данными, имеющимися в литературе.

Теоретическая и практическая значимость заключается в изучении дальнедействующего потенциала β -ФПУЦ для квадратной решетки. Результатом таких исследований стало обнаружение новых типов ДБ, которые не реализуются в решетке с короткодействующими взаимодействиями. Также данная работа вносит вклад в исследование транспорта энергии в нелинейных решетках движущимися ДБ, которые наблюдались автором при изучении эффекта супратрансмиссии, а также были получены применением функции локализации к ДНКМ со сдвигом центра локализации из высокосимметричного

положения решетки.

Диссертация является самостоятельной работой, обобщившей результаты, полученные автором лично или при его непосредственном участии.

Содержание диссертационной работы соответствует п. 1, 2 и 7 паспорта специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния (физико-математические науки).

Автореферат полностью отражает содержание диссертации и соответствует ее положениям.

Результаты исследований опубликованы в 6 работах и прошли рецензирование в редакциях ведущих журналов, рекомендованных ВАК, 5 из них проиндексированы в международных базах данных Scopus и/или Web of Science, 3 из которых относятся к журналам квартала Q1.

По диссертационной работе имеются следующие замечания:

1. В разделе 2.2 определяются АЧХ ДНКМ в приближении кубической нелинейности. Автор использует для решения уравнения с кубической нелинейностью известный анзац с учетом третьей гармоники, что позволяет получить лишь приближенное решение. Однако известно, что подобное уравнение может быть решено точно в терминах эллиптических функций Якоби. Следует указать, почему не были выписаны эти точные решения.

2. В главе 3, на рисунке 3.4 представлен анализ критических частот в зависимости от сдвига фазы φ вынужденных колебаний пары частиц, однако не представлено описание как именно сдвиг фазы φ влияет на значение критической частоты.

3. Автор утверждает, что эффекты, описанные им на примере двумерной решетки, могут наблюдаться в трехмерных моделях. Следовало бы развить эту мысль и дать аргументы в пользу данного утверждения.

4. Во второй и четвертой главах рассматривается квадратная решетка с дальнодействием, однако эффект супратрансмиссии в третьей главе изучается без учета дальнодействия. С чем связана такая непоследовательность?

Указанные замечания не снижают ценности результатов, полученных Е.К. Наумовым.

Заключение: Диссертация Е.К. Наумова «Делокализованные нелинейные колебательные моды и дискретные бризеры в квадратных решетках» является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержатся новые научно обоснованные сведения, связанные с изучением свойств ДНКМ и возбуждением стационарных и движущихся ДБ в квадратных решетках. Результаты имеют высокую значимость для развития нелинейной динамики решетки и физики конденсированного состояния.

По своей актуальности, новизне, научной и практической значимости,

