

ОТЗЫВ

официального оппонента Зубарева Николая Михайловича
на диссертационную работу Короткевича Александра Олеговича
*«Моделирование нелинейных волн в задачах теоретической
физики»*, представленную на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук по специальности
1.3.3 – «Теоретическая физика»

Диссертационная работа А.О. Короткевича посвящена теоретическому исследованию ряда научных проблем, касающихся волновых явлений в различных средах. Объединяющей основой работы является использование методов теории нелинейных волн. Рассматриваемые автором задачи включают взаимодействие электромагнитных волн в плазме, процессы в нелинейной оптике, математическое описание волн Стокса, а также вопросы применимости кинетического описания для волновых систем. В ходе исследования получены фундаментальные результаты в области моделирования предельных волн Стокса и волновой турбулентности.

Актуальность работы обусловлена рядом нерешенных вопросов, в частности, необходимостью выявления границ применимости кинетической теории капиллярно-гравитационных волн на поверхности воды. Ключевые результаты работы связаны с анализом особенностей этой теории при моделировании волновой турбулентности на дискретных сетках с учетом влияния конечного масштаба исследуемой системы.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы и 4 приложений. Полный объем диссертации составляет 370 страниц, включая 143 рисунка и 3 таблицы. Список литературы содержит 368 наименований.

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, приведен обзор литературы по изучаемой проблеме, сформулированы цель и задачи работы, а также показаны научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В **первой главе** рассматриваются базовые подходы к моделированию нелинейных волн, позволяющие эффективно решать прикладные физические задачи. В разделе 1.1 исследуется проблема обеспечения связи с гиперзвуковым летательным аппаратом, находящимся в плотных слоях атмосферы и

окруженным плазменной оболочкой. Описание нелинейного взаимодействия электромагнитных волн в плазме строится на последовательном решении линейных задач. Этот подход реализуется благодаря существенному различию в амплитудах волн, что позволяет применить приближение их слабого взаимного влияния. Раздел 1.2 посвящен проблеме одновременного распространения двух магнитостатических спиновых волн в тонкой ферромагнитной пленке железо-иттриевого граната (ЖИГ), намагниченной до насыщения. Одинокшная поверхностная магнитостатическая спиновая волна в ЖИГ модуляционно устойчива. Однако в экспериментах при одновременном возбуждении двух близких по частоте волн обнаруживается модуляционная неустойчивость, обусловленная эффектом фазовой кросс-модуляции. Автором разрабатывается соответствующая теоретическая модель.

Во второй главе используется приближение огибающей, являющееся одним из стандартных подходов в моделировании нелинейных волн. В разделах 2.1–2.2 рассматривается распространение света в метаматериалах с отрицательным показателем преломления. Современные метаматериалы высокочувствительны как к поляризации излучения, так и к его частоте. Для одного типа поляризации или частоты выполняется условие резонанса для внутренней структуры метаматериала и, в результате, теоретически может реализовываться отрицательный показатель преломления, в то время как для других параметров резонанс нарушается, и эффективный показатель преломления среды остается положительным. Таким образом, в среде возникают две взаимодействующие волны, распространяющиеся в противоположных направлениях. Данная ситуация исследована для двух задач: модели Максвелла-Даффинга в брэгговской решетке с нелинейностью и модели Максвелла-Блоха в активной среде с Λ -конфигурацией уровней. В первом случае аналитически получена и численно исследована уединенная волна, а во втором – численно изучены решения, соответствующие различным режимам распространения импульсов, включая эффекты, схожие с самоиндуцированной прозрачностью и остановкой света. В разделе 2.3 рассматривается вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна в плазме, характерной для установок лазерного управляемого термоядерного синтеза. Численно подтверждена дополнительная ветвь так называемой коллективной неустойчивости, продемонстрирован ее пороговый характер и хорошее соответствие аналитического значения порога результатам численного эксперимента.

В третьей главе моделируются волны на поверхности глубокой двумерной несжимаемой жидкости, течение которой полагается потенциальным. Двумерность позволяет использовать аппарат теории функций комплексного переменного, включая конформные отображения, и работать в рамках полных уравнений, тождественных уравнению Эйлера. Впервые конформные отображения для задач двумерной гидродинамики использовал еще Стокс, исследовавший, в частности, периодическую волну, распространяющуюся с постоянной скоростью без изменения формы и получившую его имя. Именно вычислению высокоточных решений для волн Стокса и исследованию их на предмет линейной устойчивости относительно супергармонических возмущений и посвящена данная глава диссертации. Используя вычисленные волны, автору удалось уточнить крутизну предельной волны Стокса, при которой происходит формирование особенности (с углом в 120 градусов) на гребне. Впервые удалось подробно исследовать вторую ветвь супергармонической неустойчивости волны Стокса, а также обнаружить и описать третью ветвь неустойчивости. Продемонстрирован механизм появления новых ветвей неустойчивости как движение чисто мнимых собственных значений (инкрементов неустойчивости) в комплексной плоскости к началу координат и их выход на действительную ось. Используя вычисленные инкременты неустойчивости, автор предложил универсальные феноменологические зависимости, применимые для всех ветвей супергармонической неустойчивости волны Стокса в двух предельных случаях: вблизи порога появления ветви и вдали от него.

В четвертой главе исследуется описание волн на поверхности глубокой трехмерной жидкости в рамках слабонелинейного подхода. Здесь также рассматривается потенциальное течение несжимаемой среды, однако в более общем случае трехмерной жидкости приходится использовать разложение по малой средней крутизне. Раздел 4.1 посвящен рассмотрению одного из примеров четырехволнового резонансного процесса, универсального для всех изотропных систем, — неустойчивости стоячей волны, задаваемой двумя плоскими волнами с противоположными волновыми векторами. В работе численно исследована и аналитически показана неустойчивость стоячей волны как для чисто капиллярных, так и для чисто гравитационных волн. В разделе 4.2 исследуется влияние сильного длинноволнового фона (конденсата) на поведение системы. В частности, изучено его воздействие на эффективный дисперсионный закон гравитационных волн. Установлено, как меняется ширина

линии в области прямого каскада при наличии конденсата в трех случаях: при его частичном подавлении, после того, как подавлен только конденсат, и после подавления и конденсата, и обратного каскада. В разделе 4.3 через прямое численное моделирование исследовалась зависимость затухания волнового спектра от крутизны (меры нелинейности) при смещении в область длинных волн. При исследовании динамики сдвига спектрального пика в область больших масштабов, представленном в разделе 4.4, автором был обнаружен новый режим волновой турбулентности в конечных системах – мезоскопическая турбулентность, являющаяся промежуточным состоянием между режимом дискретных волн с динамически заблокированным нелинейным обменом и режимом, хорошо описываемым кинетическим уравнением Хассельманна для гравитационных волн.

В пятой главе применяется статистическое описание нелинейных процессов в волновых системах в рамках кинетического уравнения и исследуются границы его применимости. В разделе 5.1 рассматривается случай одномерного дефокусирующего нелинейного уравнения Шредингера пятой степени, где нелинейный процесс является шестиволновым. Автору удалось аналитически вывести критерии применимости описания волнового поля непрерывным кинетическим уравнением для волн и численно продемонстрировать разницу в поведении системы в рамках динамического и кинетического подходов вблизи порога. Попытка прямого сравнения моделирования гравитационных волн в динамических уравнениях и кинетическом уравнении Хассельманна предпринята в разделе 5.2. В разделе 5.3 для верификации уравнения Хассельманна реализован не прямой подход через проверку существования решений кинетического уравнения – а именно спектров Колмогорова-Захарова – при моделировании в рамках динамических уравнений. Раздел 5.4 завершает пятую главу. В нем в рамках динамических уравнений произведено моделирование изотропной турбулентности гравитационных волн с формированием обратного каскада в широком динамическом диапазоне, позволяющем определить степенной характер спектра и вычислить саму степень. В присутствии конденсата автором открыт новый универсальный спектр обратного каскада, отличающийся от спектра Колмогорова-Захарова. Для его объяснения развито теоретическое описание взаимодействия длинноволнового фона и обратного каскада в рамках кинетического уравнения Хассельманна, а также получено новое решение, соответствующее их нелокальному взаимодействию.

В **заключении** диссертации сформулированы основные результаты работы. **Приложения** содержат описание технических подробностей вычислений, а также промежуточные результаты.

Диссертация написана грамотно, хорошим научным языком. Автореферат диссертации верно отражает ее основное содержание.

С точки зрения оппонента, наиболее важными результатами, определяющими **научную новизну** и высокую **теоретическую значимость** диссертационной работы, являются:

1. Получение высокоточных решений для волн Стокса при значениях крутизны, приближающихся к параметрам предельной волны. Необходимость проведения таких расчетов с экстремально высокой точностью убедительно обоснована демонстрацией ветвей супергармонической неустойчивости волн Стокса, критические значения крутизны которых с ростом номера асимптотически приближаются к предельному значению.
2. Выявление и демонстрация оригинального сценария «кольцевой» неустойчивости стоячих волн, которая всегда реализуется в изотропных системах вследствие четырехволновых резонансных взаимодействий.
3. Выделение мезоскопического режима волновой турбулентности и анализ его особенностей, а также демонстрация для такого режима влияния длинноволнового фона (конденсата) на закон дисперсии гравитационных волн.

Все результаты, выносимые автором на защиту, являются **новыми**. В случаях, когда они развивают и обобщают результаты, полученные ранее другими авторами, в тексте проводится сопоставление с ними и даются необходимые ссылки. Основные положения диссертации опубликованы в ведущих международных (например, *Phys. Rev. Lett.*, *J. Fluid Mech.*, *JOSA B*, *J. Appl. Phys.*) и российских журналах (например, *Письма в ЖЭТФ*, *ЖЭТФ*, *Квантовая электроника*). В большей части работ по теме диссертации ее автор является либо единственным, либо первым в списке соавторов, что наглядно подчеркивает его определяющий личный вклад. Список публикаций включает две работы, выполненные без соавторов и опубликованные в *Phys. Rev. Lett.* – одном из самых авторитетных научных изданий в области физики, что служит

весомым аргументом в поддержку утверждения о высокой научной значимости исследования.

Практическая значимость работы заключается в возможности применения полученных результатов для интерпретации экспериментальных данных, оптимизации постановки новых физических экспериментов, а также для совершенствования прогностических моделей ветрового волнения. Развитые методы имеют важное значение для описания динамики слабонелинейных волн в различных средах. Сформированный автором теоретический задел стимулирует дальнейшие исследования в области теории волновой турбулентности и ее прикладных аспектов. В тех случаях, когда экспериментальные данные уже доступны, сопоставление демонстрирует их хорошее согласие с предложенной теорией. В остальных ситуациях предсказанные эффекты позволяют детально спланировать новые экспериментальные исследования, направленные на разрешение открытых вопросов физики нелинейных волн.

Достоверность полученных результатов обеспечивается как контролем точности использованных численных и аналитических методов, так и сравнением с результатами работ других авторов, а также с данными натурных и численных экспериментов. Результаты исследования прошли широкую научную апробацию на более чем 50 международных и российских конференциях и симпозиумах, где автор выступал в том числе с приглашенными докладами.

Вместе с тем, по материалам диссертационного исследования имеется ряд **замечаний**:

1. На стр. 160 и 161 при переходе от формулы (4.13) к ключевым уравнениям движения (4.19) не приведено обоснование, почему опускается кубически нелинейный член с множителем σ . Представляется, что он может играть существенную роль на масштабе $k^2 \sim g/\sigma$.
2. В работе отсутствует прямое сопоставление динамического и кинетического описания турбулентности гравитационных волн при аналогичных начальных распределениях спектральных плотностей. Учитывая высокую вычислительную ресурсоемкость подобных расчетов, в качестве продуктивного приближения можно было бы использовать модельную двумерную среду с законом дисперсии,

соответствующим гравитационным волнам, и максимально упрощенной нелинейностью. В связи с этим выбор модели дефокусирующего шестиволнового нелинейного уравнения Шредингера (6ВНУШ) для подобного сопоставления видится не вполне обоснованным.

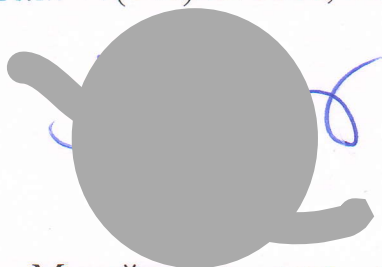
3. В разделе 5.2 при сопоставлении детерминистских и статистических моделей отождествляются спектральные плотности N_k и n_k используемых волновых функций. Данные величины отличаются слагаемыми порядка μ^2 (здесь μ – крутизна, стр. 237). Автор указывает, что различия между N_k и n_k практически отсутствуют при характерной крутизне ~ 0.1 , в то время как численные расчеты проводились в том числе и при существенно больших значениях крутизны, что требует дополнительного комментария.
4. В тексте исследования (основные результаты и положения, выносимые на защиту) используется формулировка, определяющая область реализации мезоскопической турбулентности как «состояние между почти линейными волнами и режимом, хорошо описываемым кинетическим уравнением для гравитационных волн». Такое определение представляется не вполне удачным, поскольку может возникнуть неверное впечатление, будто «почти» линейность волн обусловлена их малой амплитудой (крутизной) как первопричиной, тогда как в действительности она связана с нереализуемостью резонансных условий для большей части гармоник.
5. В диссертации встречается ряд редакционных неточностей и погрешностей, характерных для работ столь крупного объема. К ним можно отнести: отдельные фразы с неочевидным смысловым акцентом (например, начинающаяся с «В данном разделе...» фраза на стр. 222); дублирование теоретических рассуждений и уравнений (в частности, стационарных решений кинетического уравнения на стр. 262 и 180); сбой в нумерации формул на стр. 219-230, затрудняющий навигацию по ссылкам на ключевое уравнение 6ВНУШ; использование символа Δ в различных физических смыслах в пределах стр. 209; опечатки (например, дефокусирующее уравнение 6ВНУШ на стр. 222 названо фокусирующим); а также отсутствие расшифровки к правой градиентной шкале на рис. 4.23.

Отмеченные недостатки не снижают общей высокой оценки диссертационной работы.

Общее заключение. Диссертация А.О. Короткевича «Моделирование нелинейных волн в задачах теоретической физики» является самостоятельной, завершенной научно-квалификационной работой, в которой разработаны новые теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как крупное научное достижение. Ее содержание полностью соответствует паспорту специальности 1.3.3 – «теоретическая физика». Диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к докторским диссертациям. Она соответствует критериям, определенным в п. 9–11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842 (ред. от 18.07.2026), а ее автор, Александр Олегович Короткевич, безусловно заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.3 – «теоретическая физика».

Официальный оппонент,

чл.-корр. РАН, доктор физ.-мат. наук (01.04.02 – теоретическая физика, 2003г.),
главный научный сотрудник ФГБУН Институт электрофизики Уральского
отделения Российской академии наук (ИЭФ УрО РАН), 620016, г. Екатеринбург,
ул. Амундсена, д. 106, тел.: +7(343)2678660, e-mail: nick@ier.uran.ru



Николай Михайлович Зубарев
04.09.2026 г.

Я, Зубарев Николай Михайлович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

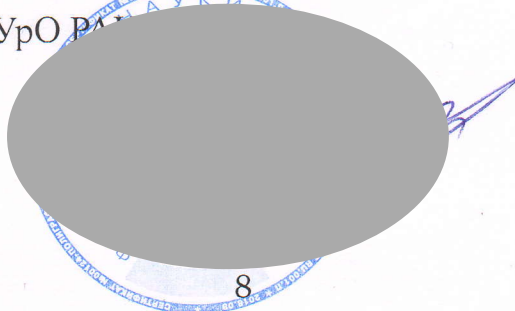


Николай Михайлович Зубарев
04.09.2026 г.

Подпись Н.М. Зубарева заверяю,

Ученый секретарь ИЭФ УрО РАН

кандидат физ.-мат. наук



Е.Е. Кокорина
04.09.2026 г.