

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

академика РАН, доктора физико-математических наук

Розанова Николая Николаевича

на диссертационную работу Короткевича Александра Олеговича  
«Моделирование нелинейных волн в задачах теоретической физики»,  
представленной на соискание учёной степени доктора физико-  
математических наук по специальности 1.3.3 — Теоретическая физика

Диссертация А. О. Короткевича «Моделирование нелинейных волн в задачах теоретической физики», представленная на соискание учёной степени доктора физико-математических наук, представляет собой завершённое научно-квалификационное исследование, в котором на основании комплекса выполненных автором самостоятельных исследований развит и обоснован ряд положений, совокупность которых можно квалифицировать как существенное научное достижение в области теоретической физики. В работе аппарат теории нелинейных волн, ставший к настоящему времени классическим, применяется к широкому классу нелинейных волновых явлений, возникающих в средах различной физической природы: в задачах классической теории поля – в рамках электродинамики классических и квантовых сред, в задачах физической кинетики, а также в задачах теории конденсированного состояния, охватывающих классические жидкости, неравновесные системы и волновую турбулентность. Указанные направления исследований полностью отвечают **паспорту специальности 1.3.3 «Теоретическая физика»**. Автором на конкретных примерах из собственных работ убедительно продемонстрирована общность развиваемого подхода, несмотря на существенное различие физической природы рассматриваемых задач. Используемые для описания нелинейных волн модели обладают глубоким внутренним сходством, а применяемые методы решения – как аналитические, так и численные – в равной мере эффективно работают как в фундаментальных, так и в прикладных постановках. Полученные в диссертации результаты и развитые методы обладают значительной прикладной ценностью и представляют существенный интерес для фундаментальной науки в части описания динамики слабо нелинейных волновых процессов в различных средах. Сформированный автором теоретический задел является надёжной основой для дальнейших исследований и стимулирует развитие теории нелинейных волн и её приложений, в том числе теории волновой турбулентности и прогнозирования ветрового волнения. Совокупность изложенного выше со всей очевидностью свидетельствует о высокой **актуальности** темы диссертации.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка цитируемой литературы и четырёх приложений. Полный

объём составляет 370 страниц машинописного текста, включая 143 рисунка и 3 таблицы. Список литературы содержит 368 наименований.

Во **введении** всесторонне обоснована актуальность проводимых исследований, дан подробный критический обзор литературы по изучаемой проблеме, чётко сформулирована цель и поставлены конкретные задачи работы, а также раскрыты научная новизна и практическая значимость выполненных исследований.

**Первая глава** посвящена изложению простейших подходов к моделированию нелинейных волн, которые, несмотря на свою простоту, позволяют эффективно решать ряд актуальных практически важных задач. В разделе 1.1 рассматривается задача о связи с гиперзвуковым летательным аппаратом, окружённым плазменным облаком, при входе в плотные слои атмосферы. Нелинейное взаимодействие электромагнитных волн в плазме моделируется посредством последовательного решения линейных задач; это оказывается возможным благодаря существенному различию амплитуд взаимодействующих волн и, следовательно, малости их взаимного влияния. В разделе 1.2 исследуется задача об одновременном распространении двух магнитостатических спиновых волн в тонкой ферромагнитной плёнке железо-иттриевого граната (ЖИГ), намагниченной до насыщения. Известно, что одиночная поверхностная магнитостатическая спиновая волна в ЖИГ модуляционно устойчива. Однако, как показали эксперименты, при одновременном распространении двух таких волн на близких частотах наблюдается модуляционная неустойчивость, обусловленная эффектом фазовой кросс-модуляции. Построению теории этого явления для поверхностных магнитостатических спиновых волн и посвящён данный раздел.

Во **второй главе** используется один из стандартных подходов к моделированию нелинейных волн – приближение огибающей. В разделах 2.1-2.2 рассматривается распространение света в метаматериалах с отрицательным показателем преломления. Как известно, современные метаматериалы обладают высокой чувствительностью к поляризации и частоте излучения: для одной поляризации или частоты условие резонанса внутренней структуры метаматериала выполняется, и теоретически может реализоваться отрицательный показатель преломления, тогда как для другой – условие резонанса нарушается, и эффективный показатель преломления остаётся положительным. Тем самым в среде формируются две взаимодействующие волны, распространяющиеся в противоположных направлениях. Указанная ситуация рассматривается на примере двух моделей: модели Максвелла-Даффинга для брэгговской решётки с нелинейностью и модели Максвелла-Блоха для активной среды с  $\Lambda$ -конфигурацией уровней. В первом случае аналитически получено и численно исследовано уединённое волновое решение; во втором – численно изучены режимы распространения импульсов, в том числе эффекты, аналогичные самоиндуцированной

прозрачности и остановке света. В разделе 2.3 рассматривается вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна в плазме, представляющее интерес для установок лазерного управляемого термоядерного синтеза. Численно подтверждена дополнительная ветвь так называемой коллективной неустойчивости, отчётливо показан её пороговый характер и продемонстрировано хорошее согласие аналитической оценки порога с результатами численного эксперимента.

В **третьей главе** рассматривается подход к моделированию волн на поверхности потенциального течения глубокой двумерной несжимаемой жидкости. Двумерный характер задачи позволяет в полной мере использовать аппарат теории функций комплексного переменного, включая метод конформных отображений, и работать в рамках полных уравнений, аналогичных уравнению Эйлера. Как известно, конформные отображения в задачах двумерной гидродинамики впервые применил Стокс, исследовавший, в частности, периодическую волну, распространяющуюся с постоянной скоростью без изменения формы и получившую впоследствии его имя. Именно вычислению высокоточных решений волн Стокса и исследованию их линейной устойчивости по отношению к супергармоническим возмущениям и посвящена настоящая глава. На основе вычисленных волн удалось уточнить значение крутизны предельной волны Стокса, при которой на гребне формируется особенность – угол  $120^\circ$ . Впервые проведено детальное исследование второй ветви супергармонической неустойчивости волны Стокса, а также достигнута и изучена третья ветвь неустойчивости. Раскрыт механизм возникновения новых ветвей неустойчивости, состоящий в перемещении чисто мнимых собственных значений (инкрементов неустойчивости) в комплексной плоскости к началу координат с последующим выходом на действительную ось. На основе вычисленных инкрементов предложены универсальные феноменологические зависимости, справедливые для всех ветвей супергармонической неустойчивости волны Стокса в двух предельных случаях – вблизи порога возникновения ветви и вдали от него.

В **четвёртой главе** используется и исследуется описание волн на поверхности глубокой трёхмерной жидкости в рамках слабонелинейного подхода. Как и ранее, рассматривается потенциальное течение несжимаемой глубокой жидкости, однако в более общем случае трёхмерной задачи возникает необходимость в разложении по малому параметру – средней крутизне. Раздел 4.1 посвящён рассмотрению одного из примеров четырёхволнового резонансного процесса, универсального для изотропных систем, – неустойчивости стоячей волны, образованной двумя плоскими волнами с противоположными волновыми векторами. Неустойчивость стоячей волны исследована численно и доказана аналитически как для чисто капиллярных, так и для чисто гравитационных волн. В разделе 4.2 изучается влияние сильного длинноволнового фона (конденсата) на поведение системы. Исследовано воздействие конденсата на эффективный дисперсионный закон

гравитационных волн. Установлено, каким образом изменяется ширина линии в области прямого каскада при наличии конденсата, а также после подавления конденсата и после совместного подавления конденсата и обратного каскада. В разделе 4.3 методом прямого численного моделирования исследована зависимость затухания волнового спектра от крутизны (меры нелинейности) при смещении спектра в длинноволновую область. При изучении динамики сдвига спектрального пика в область больших масштабов (раздел 4.4) автором обнаружен новый режим волновой турбулентности в конечных системах – мезоскопическая турбулентность, представляющая собой промежуточное состояние между преимущественно линейным волновым режимом и режимом, адекватно описываемым кинетическим уравнением Хассельманна для гравитационных волн.

В **пятой главе** применяется статистическое описание нелинейных процессов в волновых системах на основе кинетического уравнения и исследуются границы его применимости. В разделе 5.1 рассматривается случай одномерного дефокусирующего нелинейного уравнения Шрёдингера (НУШ) пятой степени, в котором нелинейный процесс носит шестиволновой характер. Автору удалось показать верность аналитически выведенных критериев применимости описания волнового поля непрерывным кинетическим уравнением посредством сравнения результатов численного моделирования в рамках динамического и кинетического уравнений и продемонстрировать расхождение решений за порогом применимости. Прямое сравнение результатов моделирования гравитационных волн в рамках динамических уравнений и кинетического уравнения Хассельманна предпринято в разделе 5.2. В разделе 5.3 для верификации уравнения Хассельманна используется непрямой подход, состоящий в проверке существования решений кинетического уравнения – спектров Колмогорова-Захарова – при моделировании в рамках полных динамических уравнений. Раздел 5.4 завершает главу. В нём в рамках динамических уравнений выполнено моделирование изотропной турбулентности гравитационных волн с формированием обратного каскада в широком динамическом диапазоне, что позволило определить степенной характер спектра и вычислить показатель степени. В присутствии конденсата автором открыт новый универсальный спектр обратного каскада, отличающийся от классического спектра Колмогорова-Захарова. Для его объяснения в рамках кинетического уравнения Хассельманна развито описание взаимодействия конденсата и обратного каскада и получено новое решение, отвечающее нелокальному взаимодействию конденсата и обратного каскада.

В **заключении** сформулированы основные результаты работы. **Приложения** содержат технические детали вычислений и вспомогательные результаты.

Все основные результаты, выносимые на защиту, являются **новыми**. В тех случаях, когда они развивают и обобщают результаты, ранее полученные

другими авторами, в тексте проведено тщательное сопоставление с предшествующими работами и даны необходимые ссылки, что одновременно служит дополнительным подтверждением **достоверности** представленных результатов. Результаты опубликованы в ведущих международных журналах (Physical Review Letters, Journal of Fluid Mechanics, JOSA B, Journal of Applied Physics и др.) и ведущих отечественных журналах (Письма в ЖЭТФ, ЖЭТФ, «Квантовая электроника» и др.), строгое рецензирование в которых обеспечивает достоверность и научную новизну публикуемых результатов. Среди работ по теме диссертации имеются две публикации, выполненные автором единолично и опубликованные в Physical Review Letters — одним из наиболее авторитетных научных журналов мира. В 14 из 20 работ по теме диссертации автор является единственным либо первым в списке соавторов, что свидетельствует о его определяющем личном вкладе и является веским аргументом в пользу высокой **научной значимости** исследования.

**Практическая значимость** работы подтверждается применением полученных результатов для интерпретации экспериментальных данных, выработкой предложений по совершенствованию постановки экспериментов, демонстрацией реализуемости новых теоретических подходов для прикладных задач и формулированием рекомендаций по внесению изменений в модели прогнозирования ветрового волнения. Полученные результаты и развитые методы обладают значительной прикладной ценностью и существенны для фундаментальной науки в части описания динамики слабо нелинейных волновых процессов в различных средах. Сформированный теоретический задел является надёжной отправной точкой для дальнейших исследований и стимулирует развитие теории нелинейных волн и её приложений, в том числе теории волновой турбулентности и прогнозирования ветрового волнения.

Полученные результаты либо могут быть непосредственно применены для анализа и интерпретации экспериментальных данных, либо служат мотивацией для постановки новых экспериментов. В ряде случаев необходимые экспериментальные данные уже имеются, и проведённое сравнение демонстрирует хорошее согласие теории с экспериментом. В остальных случаях предсказанные эффекты открывают возможность планирования новых экспериментов, способных прояснить ряд нерешённых вопросов современной теории нелинейных волн.

Достоверность полученных результатов обеспечивается тщательным контролем точности использованных численных и аналитических методов, а также сопоставлением с результатами работ других авторов и данными натурных и численных экспериментов. Результаты исследования прошли широкую научную апробацию: автор выступил с докладами более чем на 50 международных российских и зарубежных конференциях и симпозиумах, в том числе с приглашёнными докладами.

По мнению оппонента, наиболее значимые и глубокие результаты в главах 1 и 2 следующие:

- Предложено решение важной проблемы временного пропадания радиосвязи с космическими аппаратами, подкрепленное результатами оценок и численным моделированием.

- Обоснован новый механизм развития неустойчивости при распространении интенсивного лазерного излучения в плазме в условиях, характерных для установок лазерного термоядерного синтеза.

Не менее важные результаты получены в главах 3 – 5, посвященных решению актуальных проблем гидродинамики. Это в полной мере подтверждает высокую **теоретическую и практическую значимость** диссертационной работы в целом.

К **недостаткам работы** можно отнести следующее:

- В диссертации не видно обоснования пониженной геометрической размерности некоторых задач. Так, в разделе 1.1 постулируется независимость решения от декартовой координаты  $x$ , хотя эта координата не выделена по параметрам от координаты  $y$ .

- В разделе 2.1 при переходе от уравнения Дуффинга (последнего уравнения на стр. 72) к (2.3.3) опущен член с затуханием, что обосновывается короткой длительностью импульса. Однако в отсутствие затухания представляющий поляризацию среды осциллятор Дуффинга, будучи за время иницирующего импульса возбужден, раскачивается после этого неограниченно долго. Это приведет и к неограниченной длительности вторичного излучения (известный эффект «звона среды»). Даже если импульс подобран так, что осциллятор в конце его останавливается (уединенная волна), такой эффект проявляется при анализе устойчивости решений, поскольку ограничение исходно малых возмущений происходит за счет затухания. Возможно, это обстоятельство проявилось при численном моделировании в «горячих точках», показанных на рис. 2.6.

Не ясно, что такое «характерное время потерь» на стр. 62.

На стр. 63 в трех формулах интегралов Фурье поставлены не те дифференциалы.

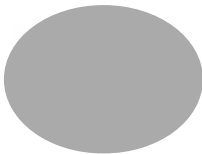
Эти замечания не влияют на общую положительную оценку работы, которая выполнена на высоком научном уровне. Научные положения и результаты диссертации аргументированы и обоснованы. Основные результаты диссертации опубликованы в 20 научных работах в ведущих рецензируемых зарубежных (включая Physical Review Letters, Journal of Fluid Mechanics, Studies of Applied Mathematics и д.р.) и отечественных (Письма в ЖЭТФ, ЖЭТФ, Квантовая электроника) журналах, доложены на крупных

международных и российских конференциях с международным участием. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа А.О. Короткевича является научно-квалификационной работой, которую можно квалифицировать как существенное научное достижение, демонстрирующее общность применённых методов теории нелинейных волн, что является важным для развития современной теоретической физики. Диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к докторским диссертациям. Диссертация соответствует критериям, определенным в п. 9-11, 13-14 «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842 (ред. от 18.07.2026). Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.3.3 – «теоретическая физики» (по физико-математическим наукам). Таким образом, Александр Олегович Короткевич заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.3 – теоретическая физика.

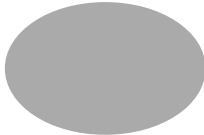
Официальный оппонент,

академик РАН, доктор физ.-мат. наук (01.04.05 – оптика, 1983 г.), главный научный сотрудник Отделения физики плазмы, атомной физики и астрофизики ФГБУН Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26., тел.: +7 (812) 297-2245, e-mail: Nnrosanov@mail.ioffe.ru.

 Николай Николаевич Розанов

18.09.2026 г.

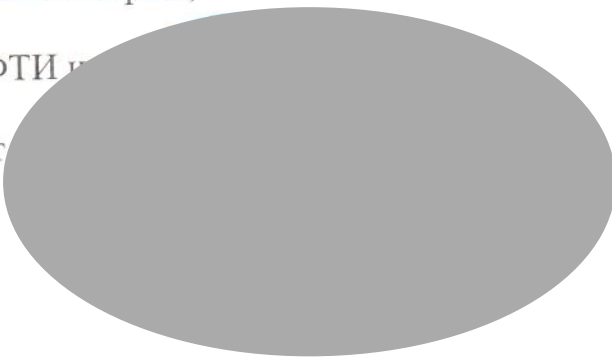
Я, Розанов Николай Николаевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Николай Николаевич Розанов 

18.09.2026 г.

Подпись Н.Н. Розанова заверяю,

Ученый секретарь ФТИ и

канд. физ.-мат 

 М.И. Патров,  
18.09.2026 г.