

УТВЕРЖДАЮ

Скол

та науки и технологий
ик РАН, профессор

Ю.Г. Горбунова

2026 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Автономной некоммерческой образовательной организации высшего образования «Сколковский институт науки и технологий»

Диссертация «Моделирование нелинейных волн в задачах теоретической физики» Короткевича Александра Олеговича подготовлена в Центре инженерной физики Сколковского института науки и технологий.

В период подготовки диссертации соискатель Короткевич Александр Олегович работал в Сколковском институте науки и технологий в должности профессора.

В 1999 году Короткевич Александр Олегович с отличием окончил Московский физико-технический институт (государственный университет) по специальности «прикладные математика и физика» с получением диплома специалиста (квалификация: «инженер-физик»).

В 2003 году защитил диссертацию «Численное моделирование слабой турбулентности поверхностных волн» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 «Теоретическая физика» в диссертационном совете Д 002.207.01 Института теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН.

По итогам обсуждения диссертации «Моделирование нелинейных волн в задачах теоретической физики» принято следующее заключение:

Актуальность темы.

Распространение волн является одним из самых часто наблюдаемых феноменов в физике. В большинстве реалистичных моделей поведение волны является нелинейным. Нелинейность в задаче одновременно делает её и более сложной, и более богатой в смысле наблюдаемых физических явлений. При всей широте применения теории нелинейных волн к физическим явлениям математический аппарат и используемые модели зачастую являются

сходными. Во многих приложениях можно использовать приближение слабой нелинейности, когда нелинейные процессы являются относительно малой поправкой на фоне линейного поведения. Слабонелинейное детерминистское описание волнового поля в большинстве случаев опирается на стандартный набор методов, в частности, на приближение огибающей (особенно часто в оптике, магнитных явлениях и физике плазмы), гамильтонов формализм, разложение на плоские волны. В специальных случаях могут использоваться методы теории солитонов. Для статистического описания волнового поля одним из стандартных подходов является использование кинетического уравнения для волн и основанной на нём теории волновой турбулентности, которая должна являться частью любого современного учебника по физической кинетике. Применение классического аппарата методов теории конденсированного состояния и статистической физики приводит к прямым аналогиям между классическими и квантовыми системами в теории конденсированного состояния вещества и появлению таких терминов, как «мезоскопическая турбулентность» для описания специфического поведения классических неравновесных нелинейных систем, описывающих волновую турбулентность.

В данной работе стандартные методы теории нелинейных волн применяются к нелинейным волновым явлениям в различных средах. А именно, к задачам классической теории поля в рамках электродинамики классических и квантовых сред, к задачам физической кинетики, к задачам теории конденсированного состояния в области классических жидкостей, неравновесных систем и волновой турбулентности. Все эти направления исследований **соответствуют паспорту специальности 1.3.3 «Теоретическая физика»**. На примерах работ автора демонстрируется общность подходов, несмотря на существенно разную физику в решаемых задачах. Модели, используемые для описания нелинейных волн в различных средах, имеют общие черты и общие методы решения как аналитические, так и численные. В теории нелинейных волн, в силу сложности аналитического аппарата, особенно выпукло проявляется эффективность связки численных методов решения, дающих дополнительную интуицию и информацию о задаче с последующим аналитическим объяснением явлений, наблюдаемых в численном или натурном эксперименте.

Цели и задачи.

Целью данной диссертации являлось исследование распространения нелинейных волн в различных средах с последующим применением полученных результатов к фундаментальным, прикладным и инженерным задачам.

Для достижения этой цели были сформулированы и решены следующие **конкретные задачи**:

- Исследовать аналитически и численно эффективность нелинейного взаимодействия электромагнитных волн в плазме, окружающей гиперзвуковой аппарат при входе в плотные слои атмосферы.
- Построить модель одновременного распространения двух поверхностных магнитостатических спиновых волн в железо-иттриевом гранате.
- Провести исследование распространения световых импульсов в оптических средах (брэгговской решётке с нелинейным взаимодействием в рамках модели Максвелла-Даффинга и в активной среде с Λ -конфигурацией уровней в рамках модели Максвелла-Блоха) с обобщением на распространение света в противоположных направлениях, что является характерным для метаматериалов.
- Выполнить исследование влияния рассеяния Мандельштамма-Бриллюэна на распространение мощного лазерного излучения в плазме на примере условий характерных для установки лазерного термоядерного синтеза National Ignition Facility (NIF) в Ливерморской национальной лаборатории (США).
- Исследовать нелинейные периодические решения уравнений двумерной гидродинамики для волн на поверхности несжимаемой идеальной жидкости, обусловленных гравитацией, известных как волны Стокса.
- Исследовать распространение гравитационных и капиллярных волн на поверхности трёхмерной жидкости в приближении слабой нелинейности путём численного моделирования.
- Изучить особенности моделирования гравитационных волн на дискретной сетке волновых векторов, обусловленной конечностью системы.
- Исследовать влияние упомянутых выше особенностей на физические параметры описания волнового поля, к примеру, на дисперсионный закон.
- Рассмотреть механизмы взаимодействия волн и их влияние на нелинейные процессы, в частности, процессы затухания волнового спектра и сдвига спектрального максимума в длинноволновую область.
- В рамках статистического подхода к описанию волнового поля исследовать границы применимости кинетического уравнения аналитически и численно, для чего провести прямое сравнение с описанием в рамках изначальных динамических уравнений.
- Провести численное моделирование формирования прямого и обратного каскадов турбулентности гравитационных волн в рамках модели с накачкой и сравнить результаты с соответствующими решениями Колмогорова-Захарова.

В рамках работы было впервые:

Проведено численное моделирование и аналитическая оценка эффективности генерации волны на разностной частоте в неоднородной плазме, окружающей гиперзвуковое тело при входе в плотные слои атмосферы.

Выведены и исследованы уравнения, описывающие одновременное распространение двух магнитостатических спиновых волн в железо-иттриевом гранате.

Исследовано численно и аналитически распространение световых импульсов в брэгговской решётке с нелинейным взаимодействием в рамках модели Максвелла-Даффинга с обобщением на распространение света в противоположных направлениях.

Исследовано численно распространение световых импульсов в активной среде с Λ -конфигурацией уровней в рамках модели Максвелла-Блоха с обобщением на распространение света в противоположных направлениях.

Проведено массивное численное моделирование неустойчивости, ассоциированной с рассеянием Мандельштамма-Бриллюэна, с накоплением ансамбля реализаций. Продемонстрирована численно новая коллективная мода неустойчивости и исследовано её взаимодействие с известной модой, получаемой из приближения случайной фазы.

Вычислена с высокой точностью и опубликована для научного сообщества библиотека Стоксовых волн на поверхности глубокой жидкости.

Исследована супергармоническая неустойчивость волн Стокса. Детально исследована вторая и впервые достигнута третья ветви неустойчивости. На основании полученных данных предложены универсальные зависимости инкрементов супергармонической неустойчивости всех ветвей вблизи порога появления и вдали от него.

Исследована численно и аналитически кольцевая неустойчивость стоячих волн на поверхности жидкости.

Промоделировано и исследовано одновременное формирование прямого и обратного каскадов турбулентности гравитационных волн на поверхности трёхмерной жидкости в рамках изначальных слабонелинейных динамических уравнений. Изучено взаимное влияние этих каскадов.

Обнаружено образование сильного длинноволнового фона (конденсата) для гравитационных волн в конечных системах.

Изучено влияние конденсата на дисперсионное соотношение и спектры прямого и обратного каскада гравитационных волн на поверхности жидкости.

В рамках динамических уравнений исследована динамика волнового спектра гравитационных волн при сдвиге его пика в область длинных волн.

Полученные данные применены для верификации некоторых моделей затухания зыби.

В рамках одномерного шестиволнового нелинейного уравнения Шрёдингера исследована применимость соответствующего кинетического уравнения для описания динамики статистики волнового поля.

Практическая ценность данной диссертационной работы подтверждается тем, что полученные в ней результаты и развитые методы имеют значительное прикладное значение и важны для фундаментальной науки в применении к описанию динамики слабо нелинейных волн в различных средах. Сформированный теоретический задел является хорошей отправной точкой для дальнейших исследований и стимулирует развитие теории нелинейных волн и её приложений, таких как теория волновой турбулентности, предсказание ветрового волнения и других.

Полученные результаты или могут быть применены для анализа и объяснения экспериментальных данных, или служат мотивацией для новых экспериментов. В ряде случаев такие экспериментальные данные уже доступны, и сравнение показывает хорошее согласие теории и эксперимента. В остальных случаях предсказанные эффекты позволяют спланировать новые эксперименты, потенциально проясняющие ряд неразрешённых вопросов современной теории нелинейных волн.

Достоверность полученных результатов и обоснованность выводов 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. Результаты проведенной работы легли в основу более чем 30 научных публикаций, входящих в международные базы данных Web of Science/Scopus и список ВАК (К1).

Материалы диссертации опубликованы автором и достаточно полно отражены в следующих работах:

1. A.O. Korotkevich, A.C. Newell, and V.E. Zakharov, *Communication through plasma sheaths*, J. Appl. Phys., 102, 8, 083305 (2007)
[DOI: 10.1063/1.2794856](https://doi.org/10.1063/1.2794856)
2. A.O. Korotkevich, S.A. Nikitov, *Cross-phase modulation of surface magnetostatic spin waves*, JETP, 89, 6, 1114-1119 (1999)
3. A.I. Maimistov, I.R. Gabitov, and A.O. Korotkevich, *Coherent propagation of the optical pulse in a plasmonic Bragg grating* (Russian version), Quantum Electronics, 37, 6, 549-553 (2007)
[DOI: 10.1070/QE2007v037n06ABEH013468](https://doi.org/10.1070/QE2007v037n06ABEH013468)

4. I.R. Gabitov, A.O. Korotkevich, A.I. Maimistov, and J.B. McMahon, *Solitary waves in plasmonic Bragg gratings*, Appl. Phys. A, 89, 277-281 (2007)
DOI: [10.1007/s00339-007-4102-x](https://doi.org/10.1007/s00339-007-4102-x)
5. A.O. Korotkevich, K.E. Rasmussen, G. Kovačič, V. Roytburd, A.I. Maimistov, I.R. Gabitov, *Optical pulse dynamics in active metamaterials with positive and negative refractive index*, JOSA B, 30, 4, 1077-1084 (2013)
DOI: [10.1364/JOSAB.30.001077](https://doi.org/10.1364/JOSAB.30.001077)
6. A.O. Korotkevich, P.M. Lushnikov, and H.A. Rose, *Beyond the random phase approximation: Stimulated Brillouin backscatter for finite laser coherence times*, Phys. of Plasmas 22, 012107 (2015)
DOI: [10.1063/1.4906057](https://doi.org/10.1063/1.4906057)
7. S.A. Dyachenko, P.M. Lushnikov, and A.O. Korotkevich, *Branch cuts of Stokes wave on deep water. Part I: Numerical solution and Padé approximation*, Studies in Applied Mathematics 137 (4), 419-472 (2016).
DOI: [10.1111/sapm.12128](https://doi.org/10.1111/sapm.12128)
8. A.O. Korotkevich, P.M. Lushnikov, A.A. Semenova, and S.A. Dyachenko, *Superharmonic Instability of Stokes Waves*, Studies in Applied Mathematics, 150, 1, 119-134 (2023).
DOI: [10.1111/sapm.12535](https://doi.org/10.1111/sapm.12535)
9. A.O. Korotkevich, A.I. Dyachenko, and V.E. Zakharov, *Numerical simulation of surface waves instability on a homogeneous grid*, Physica D: Nonlinear Phenomena 321, 51-66 (2016).
10. A.O. Korotkevich, *Direct numerical experiment on measurement of the dispersion relation for gravity waves in the presence of the condensate*, JETP Letters, 97, 3, 126-130 (2013)
DOI: [10.1134/S0021364013030053](https://doi.org/10.1134/S0021364013030053)
11. A.O. Korotkevich and V.E. Zakharov, *Evaluation of a spectral line width for the Phillips spectrum by means of numerical simulation*, Nonlin. Processes in Geophysics 22, 325-335 (2015)
DOI: [10.5194/npg-22-325-2015](https://doi.org/10.5194/npg-22-325-2015)
12. A.O. Korotkevich, A.O. Prokofiev, and V.E. Zakharov *On Dissipation rate of ocean waves due to white capping*, JETP Letters, 109, 5, 309-315 (2019)
DOI: [10.1134/S0021364019050035](https://doi.org/10.1134/S0021364019050035)
13. V.E. Zakharov, A.O. Korotkevich, A.N. Pushkarev and A.I. Dyachenko, *Mesosopic wave turbulence*, JETP Lett., 82, 8, 487-491 (2005).
14. J.W. Banks, T. Buckmaster, A.O. Korotkevich, G. Kovačič, and J. Shatah, *Direct Verification of the Kinetic Description of Wave Turbulence for Finite-Size Systems Dominated by Interactions among Groups of Six Waves*, Phys. Rev. Lett., 129, 034101 (2022)
DOI: [10.1103/PhysRevLett.129.034101](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.129.034101)
15. A.O. Korotkevich, *Simultaneous numerical simulation of direct and inverse cascades in wave turbulence*, Phys. Rev. Lett., 101, 7, 074504 (2008)
DOI: [10.1103/PhysRevLett.101.074504](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.101.074504)

16. A.O. Korotkevich, *Influence of the condensate and inverse cascade on the direct cascade in wave turbulence*, Math. Comp. Simul., 82, 7, 1228-1238 (2012)
DOI: 10.1016/j.matcom.2010.07.009
17. V.E. Zakharov, A.O. Korotkevich, A.N. Pushkarev, and D. Resio, *Coexistence of weak and strong wave turbulence in a swell propagation*, Phys. Rev. Lett., 99, 16, 164501 (2007)
DOI: 10.1103/PhysRevLett.99.164501
18. A.O. Korotkevich, A.N. Pushkarev, D. Resio, and V.E. Zakharov, *Numerical verification of the weak turbulent model for swell evolution*, Eur. J. Mech. B/Fluids, 27, 4, 361-387 (2008)
DOI: 10.1016/j.euromechflu.2007.08.004
19. A.O. Korotkevich, *Inverse Cascade Spectrum of Gravity Waves in the Presence of a Condensate: A Direct Numerical Simulation*, Phys. Rev. Lett., 130, 264002 (2023)
DOI: 10.1103/PhysRevLett.130.264002
20. A.O. Korotkevich, S.V. Nazarenko, Y. Pan, and Jalal Shatah, *Non-local gravity wave turbulence in presence of condensate*, J. Fluid Mech., 992, A1 (2024)
DOI: 10.1017/jfm.2024.423

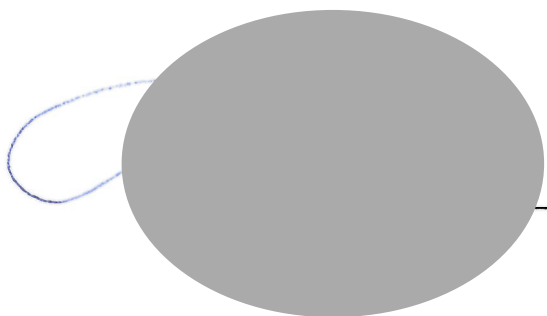
Личный вклад автора в работах с соавторами был одним из определяющих. В 14 работах по теме диссертации автор единственный или первый автор. Во всех работах автор участвовал в анализе результатов.

Основные положения диссертационной работы представлены на международных и российских научных конференциях: «The 8th International Conference on Ferrites (ICF8)» (Киото, Япония, 2000), «Topical Problems of Nonlinear Wave Physics» (Санкт-Петербург – Нижний Новгород, Россия, 2005), «SIAM Conference on Nonlinear Waves and Coherent Structures» (Сиэтл, Вашингтон, США, 2006; Филадельфия, Пеннсилвания, США, 2010; Сиэтл, Вашингтон, США, 2012; Кэмбридж, Великобритания, 2014; Филадельфия, Пеннсилвания, США, 2016; Анахайм, Калифорния, США, 2018; Бремен, Германия, 2022), «Frontiers of Nonlinear Physics» (Нижний Новгород – Саратов – Нижний Новгород, Россия, 2007), «AMS Fall Western Section Meeting» (Альбукерке, Нью-Мексико, США, 2007; Тусон, Аризона, США, 2012), «Solitons, Collapses and Turbulence: Achievements, Developments and Perspectives» (Черноголовка, Россия, 2007, 2009, 2014; Ярославль, Россия, 2019), «IMACS International Conference on Nonlinear Evolution Equations and Wave Phenomena: Computation and Theory» (Афины, Джоржия, США, 2009, 2013, 2015, 2017, 2019, 2022), «International Conference on Numerical Analysis and Applied Mathematics» (Ретимно, Крит, Греция, 2009; Халкидики, Греция, 2011), «AMS Spring Western Section Meeting» (Альбукерке, Нью-Мексико, США, 2010, 2014, 2021), «Frontiers in Nonlinear Waves» (Тусон, Аризона, США, 2010), «Landau Days» (Черноголовка, Россия, 2010, 2011, 2013, 2015, 2022), «International Congress on Industrial and Applied Mathematics» (Ванкувер,

Канада, 2011), научная сессия Совета РАН по нелинейной динамике (Москва, Россия, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2019, 2020, 2021, 2022), «IUGG Conference on Mathematical Geophysics» (Эдинбург, Великобритания, 2012), «Nonlinear Waves in Fluids» (Лафборо, Великобритания, 2012), «Wave Interactions and Turbulence» (Торонто, Канада, 2013), «AIMS Conference on Dynamical Systems, Differential Equations and Applications» (Орландо, Флорида, США, 2016), «Theoretical and Computational Aspects of Nonlinear Surface Waves» (Банфф, Альберта, Канада, 2016), «Joint Mathematics Meetings» (Сан-Диего, Калифорния, США, 2018), «SIAM Conference on Application of Dynamical Systems» (США, 2021), «SIAM Annual Meeting» (онлайн, США, 2021), а также многочисленных семинарах в различных университетах и исследовательских институтах.

Диссертация «Моделирование нелинейных волн в задачах теоретической физики» Короткевича Александра Олеговича является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны положения, которые можно квалифицировать как научные достижения. Таким образом, представленная работа соответствует заявленной специальности и рекомендуется к защите на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.3 – Теоретическая физика.

Заключение принято на расширенном заседании Центра фотоники и фотонных технологий Сколковского института науки и технологий. Присутствовало на заседании 17 чел. Результаты голосования: «за» – 17 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел., протокол № 1 от «24» июля 2024 г.



Председатель научного семинара,
Директор Центра инженерной
физики,
профессор, д.ф.-м.н.
Драчев Владимир Прокопьевич