

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки
ИНСТИТУТ СПЕКТРОСКОПИИ
Российской академии наук
(ИСАН)

ул. Физическая, д. 5, г. Троицк, Москва, 108840
Тел.: 8 (495) 851-05-79, тел./факс: 8 (495) 851-08-86
e-mail: isan@isan.troitsk.ru www.isan.troitsk.ru

24.11.2025 № 1/221-01-1255/208

на № _____ от _____



ОТЗЫВ

ведущей организации – Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт спектроскопии Российской академии наук (ИСАН)
на диссертацию Диденкуловой Екатерины Геннадьевны «**Солитонная турбулентность и аномально большие волны в системах, описываемых уравнениями типа Кортевега-де Вриза**», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по научной специальности 1.3.4. – Радиофизика

Диссертационная работа Диденкуловой Е.Г. посвящена исследованию солитонной турбулентности и волн-убийц в нелинейных слабодиспергирующих средах, описываемых уравнением типа Кортевега-де Вриза. Хотя термин «солитонная турбулентность» возник еще в 70-х годах в работе В.Е. Захарова, бум исследований пришелся на последнее десятилетие. Появилось большое число наблюдений случайных ансамблей солитонов в разнообразных средах (вода, плазма, электрические цепи), и проведены специальные лабораторные эксперименты, позволившие установить основные статистические характеристики солитонного газа. За эти же годы выполнен обширный цикл теоретических работ по солитонной турбулентности в интегрируемых системах (в первую очередь в рамках нелинейного уравнения Шредингера), так что солитонную турбулентность стали называть интегрируемой турбулентностью. В рамках этих моделей находятся аналитические решения, описывающие аномально большие волны малой длины, которые стали математическим образом волн-убийц (бризеры Перегринна, Кузнецова-Ма, Ахмедиева). Ясно, однако, что интегрируемые модели возникают в низших порядках теории возмущений по нелинейности и дисперсии, которые не всегда точно описывают реальные волновые процессы в реальных средах. Поэтому необходимо исследование аналогичных процессов в более общих, неинтегрируемых системах, чему и посвящена рассматриваемая диссертация. Именно поэтому тема диссертации и полученные результаты являются актуальными и важными для разнообразных радиофизических приложений.

Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения, а также списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 255 страниц и включает 189 рисунков и 235 библиографических ссылок.

Во Введении дан краткий обзор литературы по теме диссертации и обоснована ее актуальность, сформулирована цель исследования и определен круг решаемых задач, обосновано соответствие содержания диссертации научной специальности, приведены методы исследования и степень достоверности результатов, отмечены научная новизна результатов и выводов, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, приведены выносимые на защиту положения.

Глава 1 посвящена исследованию динамики ансамблей солитонов и бризеров с применением к так называемой солитонной/бризерной турбулентности и проблеме волн-убийц в интегрируемом солитонном газе. Исследования выполнены в рамках уравнения Гарднера, которое объединяет уравнение Кортевега – де Вриза и модифицированное уравнение Кортевега – де Вриза. Двухсолитонные взаимодействия анализируются как элементарный акт солитонной турбулентности. Рассчитаны статистические характеристики мультисолитонных и мультибризерных полей. Показано, при каких условиях возможно появление аномально больших импульсов в солитонном/бризерном газе.

В **Главе 2** проводится исследование динамики солитонов в рамках неинтегрируемых версий уравнений типа КдВ. Показано, что в разнополярном газе в результате перехода части энергии от меньших солитонов к большим усредненный эксцесс (т.е. мера остроконечности солитона) растет с течением времени, в то время как в интегрируемых моделях он выходит на стационарный уровень. В результате в разнополярном неинтегрируемом газе возможно возникновение так называемого солитона-чемпиона. Найдены ограниченные рациональные решения уравнений типа Гарднера, когда нелинейное слагаемое представимо в виде суммы нескольких слагаемых с произвольными степенями порядка, кинки, пирамидальные и столбообразные солитоны. Получено точное решение и исследована динамика волн знакопеременной формы в рамках уравнения Хопфа с неаналитической скоростью распространения, содержащей модуль функции при переходе через нуль.

Глава 3 посвящена определению условий безотражательного распространения волн в сильно неоднородных средах. В частности, изучается динамика длинных поверхностных гравитационных волн в так называемых самосогласованных водных каналах. При учете как слабой нелинейности, так и дисперсии выведено обобщенное уравнение КдВ с переменными коэффициентами и изучена трансформация солитонов в канале со скачкообразным изменением глубины. Исследованы условия безотражательного распространения волн в двумерных и трехмерных МГД структурах.

Глава 4 посвящена приложениям теории нелинейных волн к поверхностным и внутренним гравитационным волнам. Составлен объединенный каталог волны-убийц, произошедших в Мировом океане с 2005 по 2021 гг. Исследована применимость уравнений Уизема, Кортевега-де Вриза и Бенджамина-Бона-Махони (ББМ) для описания вариаций донного давления. Показано, что наилучшие результаты дает уравнение ББМ, которое и использовано для расчета образа волны-убийцы в вариациях донного давления. Рассмотрена динамика ансамбля солитонов внутренних гравитационных волн на шельфе Австралии. Отмечается, что в процессе эволюции солитоны объединяются в импульсы сложной формы, в результате чего количество импульсов может заметно сокращаться вдоль трассы. Развита аналитическая модель генерации внутренних волн при эксплозивном извержении подводного вулкана, основанная на так называемом параметрическом подходе Ле Меоте, когда процессы, происходящие в ближней зоне, параметризуются эквивалентными начальными условиями в виде смещения столба жидкости.

В **Заключении** приведены краткие выводы, сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Научная новизна работы, на наш взгляд, состоит в: i) развитии теории солитонной и бризерной турбулентности в системах, описываемых уравнениями типа КдВ (не только интегрируемых); ii) представлении нового механизма образования волн-убийц в неинтегрируемой солитонной турбулентности; iii) получении ранее неизвестных условий на неоднородные среды, где возможно безотражательное распространение волн; iv) в составлении объединенной базы данных наблюдений волн-убийц в Мировом океане и анализе условий их возникновения.

Все результаты и положения, выносимые на защиту, являются оригинальными. Они изложены в 33 статьях, опубликованных в ведущих российских и зарубежных журналах, индексируемых в научных базах Web of Science и Scopus, в том числе 12 статей в журналах с квартилем Q1. **Обоснованность и достоверность** научных результатов, а также сформулированных в ней научных положений и выводов подтверждается согласием с имеющимися физическими представлениями и рядом экспериментальных данных. Часть результатов автора позднее была подтверждена в работах других авторов. На статьи автора имеются многочисленные ссылки в литературе. Особо отметим, что исследования автора поддерживались многочисленными грантами РФФИ, РНФ и стипендиями фондов «Династия» и «Базис». Полученные в диссертации результаты были представлены на ведущих всероссийских и международных конференциях.

Положения, выносимые на защиту, сформулированы на основе результатов диссертационной работы. Результаты каждого положения подробно описаны в диссертации и автореферате, а также статьях автора.

Главная значимость диссертационной работы, на наш взгляд, состоит в представлении новых эффектов в теории турбулентности и случайных процессов, а именно, солитонной турбулентности. Солитонная турбулентность является новым объектом в радиофизике, теория которого активно развивается в последнее десятилетие. Здесь в качестве частиц выступают солитоны, поведение которых эквивалентно частицам (в интегрируемых системах сохраняются при взаимодействии, упругое соударение; в неинтегрируемых имеют большое время жизни и квазиупругое соударение). В диссертации развиты аналитические и численные методы исследования формирования аномально больших волн (волн-убийц) в нелинейных волновых полях, где доминирующую роль играют уединенные волны (солитоны). Полученные характеристики солитонной/бризерной турбулентности расширяют представления о роли нелинейных явлений в теории волновой турбулентности и частоте встречаемости волн-убийц в различных радиофизических приложениях: астрофизика, динамика атмосферы и океана, оптические волноводы, плазма и электрические цепи. Всё вышесказанное подтверждает **практическую значимость** результатов.

По существу работы у нас есть несколько комментариев.

1. Случайные начальные поля солитонного газа задаются в диссертации суперпозицией солитонов, находящихся на значительном расстоянии друг от друга (редкий солитонный газ). А можно ли исследовать плотный солитонный газ, для которого уже делаются попытки вывода кинетического уравнения (El & Kamchatnov, 2005)? Какие здесь возникают принципиальные трудности?
2. Было бы интересно выполнить серию численных экспериментов по распаду начального импульса на солитоны и по дисперсионным ударным волнам в неинтегрируемых моделях. Здесь также наблюдается некоторых неинтегрируемых моделей к интегрируемым, что согласуется с результатами, полученными в диссертации.
3. В первых двух главах сравнивается динамика и статистика солитонного газа в рамках интегрируемых и неинтегрируемых моделей, описываемых уравнениями типа Кортевега-де Вриза. В качестве интегрируемой модели рассмотрено уравнение Гарднера (которое, по сути, объединяет уравнения КдВ и мКдВ), поэтому очевидно, что в рамках этих моделей эффекты должны быть схожими. А вот неинтегрируемая модель взята только одна – уравнение Шамеля. Хотелось бы понять, насколько сделанные выводы справедливы для неинтегрируемых моделей типа КдВ с другими нелинейностями?
4. В тексте диссертации имеется небольшое количество опечаток. Например, в словах «приводят» (после формулы 3.2.43), «перемены» (перед формулой 3.2.44), «совпадает и уравнением Кортевега-де Вриза» (перед 3.2.42), должно быть «приводит», «переменные», «совпадает с».

5. Актуальность исследований подтверждается многочисленными публикациями других авторов. Мы бы особо отметили публикации: Suret, P., Randoux, S., Gelash, A., Agafontsev, D., Doyon, B., & El, G. (2024). Soliton gas: Theory, numerics, and experiments. *Physical Review E*, 109(6), 061001 и Ablowitz, M. J., Cole, J. T., El, G. A., Hoefer, M. A., & Luo, X. (2023). Soliton–mean field interaction in Korteweg–de Vries dispersive hydrodynamics. *Studies in Applied Mathematics*, 151(3), 795–856, на которые стоило бы сослаться в диссертации.

Заключение

Наша оценка диссертационной работы и ее значимости положительная. Тематика и содержание диссертации полностью соответствуют Паспорту научной специальности 1.3.4 Радиофизика (наименование отрасли науки - физико-математические). Основные результаты работы опубликованы в 33 статьях в рецензируемых научных журналах. Автореферат полностью отвечает содержанию диссертации, представленным в ней результатам, выводам и положениям, выносимым на защиту.

Диссертационная работа Диденкуловой Екатерины Геннадьевны «Солитонная турбулентность и аномально большие волны в системах, описываемых уравнениями типа Кортевега-де Вриза» представляет собой законченное научное исследование и удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям, а ее автор, Диденкулова Екатерина Геннадьевна, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.4 Радиофизика.

Результаты диссертации были заслушаны, отзыв на диссертацию обсуждён и одобрен на расширенном семинаре Теоретического отдела ИСАН 12.11.2025.

Отзыв составил:

И.о. заведующего Теоретическим отделом ИСАН, главный научный сотрудник,
д.ф.-м.н. по специальности 01.04.02 (теоретическая физика)

Тел.: 8(495)851-02-38

kamch@isan.troitsk.ru

А.М. Камчатнов



«25» 11 2025г.

Подпись Камчатнова А.М. заверяю.

Учёный секретарь ИСАН,

к.ф.-м.н.

Р.Р. Кильдиярова

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт спектроскопии Российской академии наук (ИСАН)

Адрес: 108840 Россия, г. Москва, г. Троицк, ул. Физическая, дом 5.

Web: <https://isan.troitsk.ru/>

Тел.: +7 (495) 851-0579 E-mail: isan@isan.troitsk.ru