

ОТЗЫВ

официального оппонента д.ф.-м.н., академика РАН Кузнецова Евгения Александровича 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

Солитонная турбулентность, являясь частью волновой динамики в разнообразных физических средах, представляет собой важный объект исследований. В последние десятилетия широкое развитие получила теория интегрируемой турбулентности, в частности солитонной турбулентности в виде газа солитонов. Понятие интегрируемой турбулентности было введено В.Е. Захаровым в 2009 году, хотя его работа по кинетическому уравнению для солитонов КДВ была опубликована в 1971 году. Основным объектом интегрируемой турбулентности являются солитоны, несолитонная часть играет менее существенную роль в динамике солитонного газа. Солитонная турбулентность в настоящее время стала реальным объектом наблюдений и экспериментов в гидродинамике, физике плазмы, оптике и радиофизике. Эти исследования стали одними из самых актуальных в физике нелинейных волн. Диссертация Е.Г. Диденкуловой посвящена изучению новых эффектов в теории солитонной турбулентности как для интегрируемых, так и неинтегрируемых моделей. Ее актуальность не вызывает никаких сомнений. Впервые взаимодействия солитонов были рассмотрены с точки зрения статистических моментов, что, несомненно, обосновывает новизну исследований, представленных в диссертации. Особая важность в изучении солитонной турбулентности с практической точки зрения представляется в связи с возможностью образования аномально больших импульсов (так называемых «волн-убийц»). Несмотря на то, что первоначально проблема волн-убийц возникла из наблюдений гигантских морских волн, в настоящее время эта проблема вышла далеко за пределы гидродинамических задач, играет важную роль в турбулентности волн различной природы в плазме, в оптике, в частности в оптических световолоконных линиях связи, твердом теле и астрофизике. Волны-убийцы имеет свое объяснение, как показано в данной диссертации, в рамках солитонной турбулентности для систем КДВ типа. В диссертации демонстрируется принципиальная разница процесса возникновения волн-убийц в интегрируемом и неинтегрируемом солитонных газах. Факт неинтегрируемости приводит к неупругим столкновениям солитонов, в результате чего больший солитон отбирает энергию у слабых солитонов, а излучение волн малой амплитуды играет роль диссипации в отличие от интегрируемых моделей, где солитоны взаимодействуют упруго. Данная диссертация имеет большое теоретическое и практическое значение для

описания волновой турбулентности в океане и в плазме. Среди важнейших результатов следует выделить исследования турбулентности за счет взаимодействия разнополярных солитонов и бризеров в рамках интегрируемых уравнений Гарднера и МКДВ которые, как показано в численных экспериментах, порождают волны-убийцы. Таким же свойством обладают разнополярные солитоны в неинтегрируемых моделях с неаналитической зависимостью, прежде всего в уравнении Шамеля, описывающем распространение волн в плазме. Важное прикладное значение имеют результаты автора по моделированию реальных волн-убийц морского волнения. Так с помощью уравнения КДВ, исходя из данных очевидцев и реанализа ветрового волнения для события 2007 года в заливе Тилламук штата Орегон, продемонстрировано появление волны-убийцы. Наконец необходимо упомянуть о созданном впервые каталоге волн-убийц в Мировом океане в 2005-2021 гг, откуда сделан весьма важный вывод относительно роли модуляционной неустойчивости как механизма, порождающего волны убийцы на глубокой воде.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, обусловлена использованием апробированных теоретических методов и строгостью применяемого математического аппарата. Результаты диссертации доложены на российских и международных конференциях высокого уровня. В своем поколении Екатерина Диденкулова является одним из лидеров в области нелинейных исследований, о чем свидетельствует ее многочисленные публикации в высокорейтинговых журналах. Недавно ей была присуждена премия Европейского геофизического союза для молодых ученых по направлению «Нелинейные процессы в геофизике». Отмечу также, что ее исследования ранее были поддержаны фондами «Династия» и «Базис». Она принимала участие в нескольких грантах РНФ и РФФИ в качестве руководителя и исполнителя.

Диссертационная работа Диденкуловой Е.Г. состоит из Введения, четырех глав, заключения и списка литературы.

Во Введении сформулированы кратко задачи диссертации и ее основные положения.

Первая глава диссертации, на мой взгляд, является центральной. Она посвящена изучению солитонной турбулентности в рамках интегрируемых уравнений КДВ типа, имеющего приложения к разнообразным физическим системам от волн на воде до нелинейно-оптических солитонов и солитонов в бозе-эйнштейновском конденсате. Определено влияние полярности солитонов на характеристики интегрируемого солитонного газа. Рассмотрено взаимодействие солитонов с точки зрения статистических моментов волнового поля. Для уравнения Гарднера показано, что при взаимодействии однополярных солитонов асимметрия и эксцесс убывают, а при взаимодействии разнополярных солитонов – возрастают. Аналитически и численно исследованы как столкновения солитонов и бризеров, так и их поведение в больших

ансамблях однополярных и разнополярных солитонов. Проведен анализ движение «медленного» солитона в решетке больших солитонов и в солитонном газе; найдены критерии, когда малый солитон может двигаться со скоростью меньшей скорости длинных волн. Рассмотрена динамика смешанных солитонно-бризерных ансамблей, в частности, для целей выделения из статистических данных волн-убийц. Наиболее интересными, на мой взгляд, представляют результаты по турбулентности газа бризеров в рамках модифицированного уравнения КДВ. Выясняется, что при столкновении бризеров, имеющих сравнимые амплитуды, появление волн-убийц является типичным событием. С другой стороны, несмотря на новизну этих исследований, они не лишены небольших недостатков. Если солитоны в интегрируемых системах, как правило, являются главными объектами и определяются одним полюсом коэффициента прохождения в методе обратной задачи рассеяния, то МКДВ бризеры задаются одновременно двумя полюсами в плоскости спектрального параметра. Факт их устойчивости в диссертации нигде не обсуждается. Именно этого не хватает в этой главе. Бризеры обладают нулевой массой и весьма похожи на волны из непрерывного спектра и по этой причине оказываются менее устойчивыми при наложении внешнего шума.

Вторая глава посвящена исследованию эффектов, рассмотренных в первой главе, но в рамках принципиально неинтегрируемых методом обратной задачи рассеяния уравнений. На примере уравнения Шамеля с неаналитической нелинейностью показано, что поведение солитонного газа, состоящего из солитонов одной полярности, близко к поведению соответствующего солитонного газа для интегрируемого уравнения МКДВ. Принципиальное различие заключается во взаимодействии солитонов разной полярности, когда большой солитон отбирает энергию у слабых солитонов, а излучение волн малой амплитуды играет роль диссипации. В результате может «выжить» только один большой солитон (так называемый «солитон-чемпион»). Также в неинтегрируемом разнополярном солитонном газе усредненный эксцесс (четвертый момент) не выходит со временем на стационарное значение, а продолжает рост во времени, демонстрируя эффект передачи энергии между солитонами и возникновения излучения. В этой главе следует выделить несколько интересных фактов. Во-первых, найден элегантный способ нахождения стационарных локализованных решений в уравнении КДВ типа с двумя степенными нелинейностями. Эти решения колоколо-образного типа, зависящие от трех параметров: амплитуды, ширины и степени. Все эти параметры связаны с уравнением движения. Решения такого типа также найдены для неаналитической зависимости нелинейности, в частности, для обобщения уравнения Шамеля. Хотелось бы отметить находку диссертации по изучению влияния шума, зависящего только от времени, в уравнении Бенджамина-Оно. Выяснялось, что простой заменой оно сводится к «невозмущенному» уравнению Бенджамина-Оно (БО), формально не содержащему шум. Это позволяет

продвинуться существенно в исследовании турбулентных состояний в этом случае, в частности продемонстрировать разрушение и затухание солитонов под действием внешней случайной силы. Удивляет, почему не исследован аналогичный вопрос для уравнения КДВ, хотя легко видеть, что данный анзац для уравнения БО применим непосредственно к КДВ. В заключении этой главы рассмотрен важный вопрос об опрокидывании в системах гидродинамического типа с неаналитической зависимостью нелинейности в пренебрежении дисперсии, в частности для уравнения типа Хопфа и уравнения Шамеля. Показано, что градиентная катастрофа — формирование бесконечного градиента, возникает сразу в двух местах. К недостаткам данной главы следует отнести отсутствие обсуждения физических ограничений при моделировании турбулентности для уравнения Шамеля с точки зрения плазменных исследований; это касается физического смысла величины u в этом уравнении.

В **третьей главе** найдены условия безотражательного распространения волн в сильно неоднородных средах. Выведено обобщенное КДВ уравнение для волн в самосогласованном водном канале переменного сечения, параметры которого могут значительно меняться с расстоянием. Исследован процесс возникновения вторичных солитонов в зоне резкого изменения сечения канала. Получен новый класс бегущих радиально симметричных волн в среде с переменной по радиусу скоростью распространения волны, когда скорость звука меняется с радиусом линейно или почти линейно. Найдены бегущие МГД-волны в сильно неоднородной плазме с магнитным полем, где возможно значительное усиление волновой энергии, и определены условия на характеристики плазмы, допускающие существования безотражательных волн.

Четвертая глава посвящена приложениям развитой теории к наблюдениям поверхностных и внутренних гравитационных волн в океане. Важное прикладное значение имеют результаты автора по моделированию реальных волн-убийц морского волнения. Так с помощью уравнения КДВ, исходя из данных очевидцев и реанализа ветрового волнения для события 2007 года в заливе Тилламук штата Орегон, продемонстрировано появление волны-убийцы. Наконец необходимо упомянуть о созданном впервые каталоге волн-убийц в Мировом океане в 2005-2021 гг, откуда сделан весьма важный вывод относительно роли модуляционной неустойчивости как механизма, порождающего волны убийцы на глубокой воде.

Выполнен расчет вариаций донного давления, вызванных прохождением волны-убийцы на морской поверхности, в рамках асимптотических моделей КДВ и Бенджамина – Бони – Махони (ББМ), т. е. для мелкой воды. Показано, что флуктуации донного давления для ББМ модели с точки зрения обнаружения волн-убийц более адекватна по сравнению с моделью КДВ. Рассмотрена динамика ансамбля солитонов внутренних гравитационных волн на реальном шельфе в Австралии и вблизи мыла Шмидта, Приморский край. Для этого, исходя из

экспериментальных данных, найдены параметры уравнения Гарднера и исследованы статистические характеристики волновых полей. Найдены асимметрия и эксцесс и их усредненные по 50 реализациям значения. Показано уменьшение с расстоянием этих величин до 20% для трассы порядка 200 км, демонстрирующее значительное преобладание доли больших волн над короткими с ростом расстояния, пройденного ансамблем. В заключении этой главы представлена аналитическая модель генерации внутренних волн в двухслойном океане при эксплозивном извержении подводного вулкана. Показано, что головной цуг волнового поля имеет по сравнению с другими цугами наибольшую амплитуду. Аналогичные выводы сделаны для внутренних волн вулканического происхождения в океане с постоянной частотой плавучести

О замечаниях. К сказанным выше замечаниям следует отнести также некоторое число опечаток и грамматических неточностей. Например, во Введении геофизика названа физической средой. Если говорить в целом, то диссертация содержит небольшое (допустимое) количество опечаток, в отличии от автореферата, где их побольше, особенно это относится к знакам препинания.

На мой взгляд, полученные в диссертации результаты являются новыми и хорошо обоснованными. Тематика и содержание диссертации полностью соответствуют специальности 1.3.4. – Радиофизика. Работы в виде 33 статей, составившие содержание диссертации, опубликованы в ведущих физических журналах. Среди наиболее важных следует выделить результаты диссертации по изучению генерации волн-убийц солитонной турбулентностью для уравнений Гарднера и МКДВ и их практическому применению к внутренним волнам в океане. Автореферат правильно и полностью отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа Е.Г. Диденкуловой «Солитонная турбулентность и аномально большие волны в системах, описываемых уравнениями типа Кортевега-де Вриза» соответствует всем требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям согласно пп. 9 – 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013г., а ее автор, Диденкулова Екатерина Геннадьевна, несомненно заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.4 Радиофизика.

Кузнецов Евгений Александрович

доктор физико-математических наук по специальности

01.04.02 - теоретическая и математическая физика,

академик РАН,

главный научный сотрудник

Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН (ФИАН)
Почтовый адрес: 119991 Москва, Ленинский проспект, д.53
Телефон: +7 (499) 132-68-18
Адрес электронной почты: kuznetso@itp.ac.ru

 / Е.А. Кузнецов /
(подпись) (расшифровка подписи)

Подпись Е.А. Кузнецова

ЗАВЕРЯЮ

Ученый секретарь ФИАН

к.ф.-м.н.

Дата 13.02.2026г.

ПОДПИСЬ ЗАВЕРЯЮ
Ученый секретарь Колобов А.В.



20 г.