

*На правах рукописи*

*Дег' /*

КОЗЛОВ Дмитрий Сергеевич

**ДРОБЛЕНИЕ ПО ТИПУ «ПАРАШЮТ»  
КАК МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ БРЫЗГ  
ПРИ УРАГАННЫХ ВЕТРАХ  
И ЕГО РОЛЬ В ПРОЦЕССАХ ОБМЕНА  
МЕЖДУ ОКЕАНОМ И АТМОСФЕРОЙ**

25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН, г. Нижний Новгород).

Научный руководитель: Троицкая Юлия Игоревна, доктор физико-математических наук, ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (г. Нижний Новгород)

Официальные оппоненты: Кудрявцев Владимир Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Российский государственный гидрометеорологический университет»;  
Глазунов Андрей Васильевич, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение науки «Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука Российской академии наук»


Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук»

Защита состоится «29» ноября 2021 г. в 15-00 часов на заседании диссертационного совета Д 002.069.01 при ИПФ РАН (603950, г. Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, 46).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ИПФ РАН.

Автореферат разослан 20 октября 2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат физико-математических наук



А. И. Малеханов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Изучение процессов переноса импульса, тепла и влаги в атмосферном пограничном слое над морской поверхностью критически значимо в задачах моделирования климата и прогнозирования погоды, в том числе штормовой. В настоящее время во многих приложениях для количественной оценки поступающих в атмосферу потоков используются их параметризации на основе балк-формул [1, 2].

Для ураганных условий на протяжении длительного времени использовалась экстраполяция зависимостей коэффициентов обмена, полученных при умеренных скоростях ветра. Согласно такому подходу коэффициент аэродинамического сопротивления поверхности воды должен расти [1] при скоростях ветра, превышающих 10 м/с. В то же время современные исследования демонстрируют либо тенденцию к насыщению значения коэффициента аэродинамического сопротивления при ураганных скоростях ветра в лабораторных условиях [3], либо немонотонную зависимость при натуральных условиях [4–6]. Подобное аномальное поведение коэффициента аэродинамического сопротивления при экстремальных скоростях ветра было предсказано в [7], где была построена модель тропического циклона, в рамках которой на основе баланса поступающей и диссипирующей в атмосферу энергии была получена оценка максимальной скорости ветра в урагане. В [7] показано, что использование экстраполяции коэффициентов обмена на ураганные ветра приводит к тому, что максимальная скорость ветра в тропическом циклоне ограничивалась бы значениями 30–40 м/с, в то время как наблюдения за реальными ураганами демонстрируют существование более интенсивных тропических циклонов. В заключение [7] автор указывает, что для того чтобы модели тропических циклонов были способны описать развитие и поддержание интенсивных ураганов отношение коэффициента переноса энтальпии к коэффициенту аэродинамического сопротивления должно превышать 0.75. Обеспечить такое значение в действительности может не только снижение коэффициента сопротивления при штормовых скоростях ветра, но и увеличение потока энтальпии. В качестве возможной причины, приводящей к обоим этим эффектам, ряд авторов (см., например, [8–10]) рассматривают морские брызги.

При штормовых значениях скорости ветра обрушение волн приводит к тому, что приподнятый слой атмосферы насыщен каплями. Число брызг резко растет с увеличением скорости ветра [11, 12], поэтому можно ожидать, что при штормовых ветрах их присутствие может привести к радикальным изменениям процессов обмена, происходящих на границе атмосферы и океана. Характерный размер морских капель варьируется от 10 нм до нескольких мкм [13]. Крупные капли с размерами от 10 мкм до единиц миллиметров после вылета с поверхности воды осаждаются под действием силы тяжести в океан,

тем самым осуществляя прямой обмен массой, теплом и импульсом между атмосферой и океаном.

Изучение влияния морских брызг на поступающие в атмосферу потоки имеет более чем 40-летнюю историю, начиная с работ [11, 14–16]. Одним из ключевых моментов необходимых для количественных оценок этих процессов является изучение механизмов, приводящих к уносу капель с поверхности воды. Схожий процесс совместного течения пленки жидкости и высокоскоростного потока газа, часто встречающийся в промышленных устройствах (абсорберах, химические реакторах, парогенераторах), неоднократно исследовался в лабораторных экспериментах [17, 18]. Однако важным фактором, отличающим движение воздуха в атмосфере над морской поверхностью от газожидкостного течения тонких пленок в каналах, служит обрушение крупных ветровых волн. При этом в литературе обсуждается несколько механизмов, которые могут приводить к генерации брызг: 1) разрыв всплывающих подводных пузырей; 2) фрагментация жидких «пальцев»; 3) дробление по типу «парашют».

При обрушении волны происходит захват воздуха, в результате чего образуются подводные пузыри, которые всплывают и лопаются. Кроме того, углубление, оставшееся после лопнувшего пузыря, коллапсирует и образует струю, которая также приводит к появлению капель. Когда скорость ветра достигает порядка 10 м/с, этого становится достаточно для того, чтобы ветер под действием касательного напряжения срывает капли с гребней волн. Одной из первых экспериментальных работ, посвященной изучению генерации таких капель, является статья [19]. В ней сообщается, что в районе гребней обрушающихся волн образуются небольшие выступы воды, которые вытягиваются в жидкие «пальцы» и впоследствии дробятся на отдельные капли. В дополнение к уже указанным источникам капель в недавних лабораторных исследованиях [20] продемонстрировано существование нового механизма генерации брызг – дробление по типу «парашют». Анализ снимков поверхности воды, выполненный в [20], показал, что на гребнях обрушающихся волн появляются некоторые слои жидкости, которые надуваются воздушным потоком и лопаются как пузыри, образуя брызги.

Каждый из указанных механизмов вносит свой вклад в итоговую функцию генерации брызг, которая характеризует распределение капель по размеру, вылетевших в единицу времени с единицы площади. Однако трудности проведения прямых измерений в условиях урагана и недостаточное понимание механизмов образования капель приводят к значительному разбросу значений функции генерации брызг [12, 13] (до шести порядков) и, как следствие, неопределенности при оценке влияния морских брызг на процессы обмена в пограничном слое.

В лабораторном исследовании [21] было показано, что дробление по типу «парашют» является основным источником крупных капель при ураганных скоростях ветра.

Таким образом, возникает необходимость более детального изучения механизма генерации брызг по типу «парашют». В рамках этого исследования необходимо не только получить статистику «парашютов» и оценить количество генерируемых при этом капель, но также изучить факторы, отвечающие за образование «парашютов». Поскольку конечная цель – это количественная оценка вклада капель в процесс обмена импульсом, теплом и влагой между океаном и атмосферой, также требуется изучить изменение параметров капли от момента инъекции до падения обратно в воду.

### **Цели и задачи диссертации**

Целью данной работы является теоретическое исследование изучения особенностей процесса генерации морских брызг при ураганных ветрах и оценка влияния капель на процессы обмена между океаном и атмосферой. При этом особое внимание уделяется изучению фрагментации по типу «парашют», поскольку именно этот механизм образования капель является основным при ураганных скоростях ветра. Для достижения указанных целей были решены следующие задачи:

1. Исследовать механизмы генерации брызг, определить статистические характеристики явлений, приводящих к образованию капель, построить функцию генерации брызг.
2. Изучить временную эволюцию температуры и радиуса одиночной капли.
3. Получить оценки потоков импульса и тепла, обусловленных каплями.
4. Построить теоретическую модель формирования начальных возвышений водной поверхности, инициирующих дробление по типу «парашют».

### **Научная новизна**

В диссертации получены следующие новые научные результаты:

1. Выявлен основной механизм образования брызг, срываемых с гребней волн при ураганных скоростях ветра, – дробление по типу «парашют», подтвержденный публикациями в ведущих профильных журналах. На основе общих принципов статистической физики выявлена зависимость числа событий фрагментации от скорости ветра.
2. Для выявленного механизма построена функция генерации брызг, учитывая, что образование капель при одном событии фрагментации по типу «парашют» обусловлена двумя механизмами: разрывом плёнки купола «парашюта» и дроблением его «ободка», которая хорошо согласуется с имеющимися результатами лабораторных экспериментов и натурных наблюдений о статистике капель при ураганных ветрах.
3. На основе количественных оценок влияния явления дробления по типу «парашют» на обмен импульсом между атмосферой и океаном, а также учёта стратификации приводного слоя атмосферы за счёт присутствия взвешенных

капель предложено объяснение наблюдаемой аномальной зависимости коэффициента аэродинамического сопротивления от скорости ветра.

4. Для брызг, образованных за счёт механизма дробления по типу «парашют», показано, что при параметрах атмосферы и океана, типичных для тропического циклона, при скоростях ветра более 45-50 м/с поток энтальпии от капель по величине сравним с прямым турбулентным потоком энтальпии от поверхности океана.

5. Предложена и исследована гипотеза о том, что формирование начальных возвышений водной поверхности, развитие которых может приводить к дроблению по типу «парашют», обусловлено гидродинамической неустойчивостью ветрового дрейфового течения. Показано, что слабо нелинейное трёхволновое резонансное взаимодействие собственных волн дрейфового течения может приводить к взрывному росту их амплитуд. Полученная зависимость поперечного размера смещения поверхности воды, обусловленного этим взаимодействием, от динамической скорости ветра согласуется с экспериментальными данными о размерах «парашютов».

### **Научная и практическая значимость результатов работы**

Результаты, полученные в работе, могут использоваться при построении моделей взаимодействия океана и атмосферы при ураганных скоростях ветра. Предложенные в диссертации параметрические зависимости коэффициентов сопротивления морской поверхности и переноса энтальпии от скорости ветра могут применяться в численных моделях тропических циклонов и прогнозировании погоды. Разработанная уточнённая модель временной эволюции параметров одиночной капли может выступать в качестве замены предшествующей, поскольку оценки потоков скрытого и явного тепла, полученные на ее основе, лучше согласуются с результатом численного моделирования исходных уравнений, чем при использовании предыдущей модели. Кроме того проведенный анализ уравнений микрофизики капли может рассматриваться в качестве первого этапа при изучении процесса кристаллизации жидких частиц, который часто встречается в промышленности (производство лекарств, снежная пушка) и в природных условиях (северные широты). Трёхволновое резонансное взаимодействие, описанное в рамках диссертации, на данный момент является единственной разработанной гипотезой, объясняющей процесс образования начальных возмущений поверхности воды, из которых формируются «парашюты».

### **Достоверность полученных результатов**

Полученные результаты обладают высокой степенью достоверности, поскольку большая часть работы представляет собой теоретическое исследование, основанное на воспроизводимых экспериментальных данных. Характерные величины потоков массы, импульса и тепла, которые были найдены в

рамках этой работы, находятся в согласии с данными лабораторных и натуральных измерений других исследований. По результатам, представленным в диссертации, опубликовано ряд статей в ведущих отечественных и зарубежных журналах. Основные положения диссертации неоднократно докладывались на международных и всероссийских конференциях, обсуждались на семинарах в ИПФ РАН.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Дробление по типу «парашют» является основным механизмом генерации капель, срывааемых ветром с гребней волн, при ураганных скоростях ветра.

2. Полученная функция генерации брызг, обусловленных механизмом дробления по типу «парашют», позволяет описать распределения капель, полученные на основе лабораторных экспериментов и натуральных наблюдений при ураганных скоростях ветра.

3. Дополнительный поток импульса, связанный с событиями дробления по типу «парашют», а также учёт стратификации, создаваемой брызгами, приводит к немонотонной зависимости коэффициента аэродинамического сопротивления поверхности воды от скорости ветра.

4. Для условий, характерных для тропического циклона, поток энтальпии, обусловленный каплями, при скоростях ветра 45–50 м/с по величине сравним с прямым турбулентным потоком энтальпии от поверхности океана.

5. Слабо нелинейное резонансное трёхволновое взаимодействие возмущений дрейфового течения может рассматриваться в качестве механизма формирования начальных возмущений водной поверхности, развитие которых приводит к дроблению по типу «парашют».

### **Апробация результатов работы**

Диссертационная работа выполнена в Институте прикладной физики РАН. Результаты диссертации были использованы в рамках грантов РФФИ, проектов РНФ и Минобрнауки России, гранта Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС».

Основные положения и результаты работы докладывались:

- на международных конференциях: European Geosciences Union General Assembly (2016, 2018, 2019, 2020 и 2021 гг.).
- на российских конференциях: 26-я Нижегородской сессии молодых ученых (секция «Физика»), 25-я Нижегородской сессии молодых ученых (секция «Физика»), 24-я Нижегородской сессии молодых ученых (секция «Физика»), XXXII Всероссийской школе-семинаре «Волновые явления: физика и применения» имени А.П. Сухорукова (секция «Гидродинамические волны и течения»).
- на семинарах и конкурсах ИПФ РАН.

## Личный вклад автора

Все приведенные в диссертации результаты получены либо автором, либо при его непосредственном участии. Автор диссертации принимал активное участие в обработке видеозаписей высокоскоростной съёмки поверхности воды. Программное обеспечение для расчета временной эволюции параметров капель, получения и численного решения системы уравнений, описывающей трёхволновое резонансное взаимодействие возмущений ветрового дрейфового течения в воде, было разработано автором.

## Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, цитируемой литературы и списка работ автора по теме работы. Объём диссертации составляет 142 страницы, включая 62 рисунка. Список литературы содержит 112 источников.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **Введении** обосновывается актуальность работы, формулируются её цели, кратко излагается содержание диссертации.

В **Главе 1** приведен обзор исследований, посвященных изучению процессов взаимодействия океана и атмосферы, причем особое внимание уделяется эффектам, связанным с каплями.

В **разделе 1.2** подробно описаны механизмы генерации капель, а также дано определение функции генерации брызг. В **разделе 1.3** обсуждаются детали эволюции капли морской воды, попавшей в атмосферу, и приведён пример характерной динамики её радиуса и температуры. В **разделе 1.4** описана концепция «вернувшихся» капель, в рамках которой на основе сохранения энтальпии в столбе, включающем в себя верхний слой жидкости и нижний слой атмосферы, было показано, что за счёт эффектов, связанных с брызгами, энтальпия атмосферы растёт, причём основной вклад вносят крупные капли.

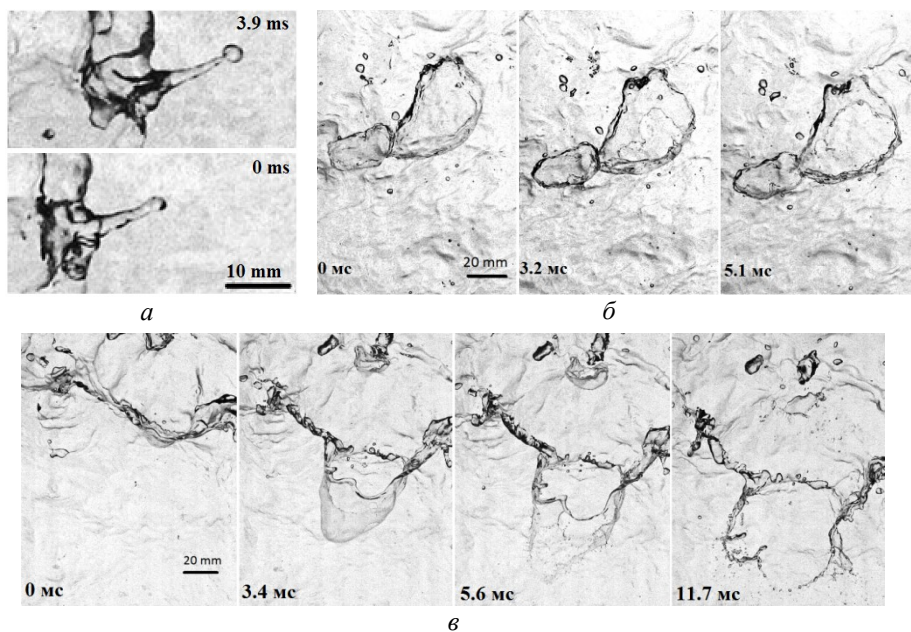
Основные понятия, описывающие процессы переноса, происходящие в приводном пограничном слое атмосферы, представлены в **разделе 1.5**. В **разделе 1.6** приведены результаты как лабораторных, так и натуральных исследований коэффициентов переноса для широкого диапазона скоростей ветра, включая экстремальные. На примере модели тропического циклона, представленной в **разделе 1.7**, показана важность изучения деталей взаимодействия атмосферы и океана при ураганных скоростях ветра. Обсуждение различных эффектов, влияющих на перенос тепла и импульса между водой и воздухом, представлено в **разделе 1.8**.

В заключительном **разделе 1.9** был сделан вывод о направлении необходимых исследований. Ключевым фактором необходимым для количествен-



ных оценок роли капель в процессе взаимодействия атмосферы и океана является функция генерации брызг, описывающая количество капель, которые вылетели с поверхности воды в единицу времени с единицы площади. В то же время экспериментальные данные о статистике капель в разных наблюдениях могут отличаться на шесть порядков. Такая неопределенность связана как с трудностями проведения исследований при ураганных скоростях ветра, так и недостаточным пониманием механизмов их генерации. В связи с этим возникает необходимость лабораторных и теоретических исследований, в первую очередь, направленных на изучение явлений, приводящих к генерации брызг.

**Глава 2** посвящена исследованию механизмов генерации брызг при ураганных скоростях ветра на основе данных лабораторных измерений, проведенных на базе ветро-волнового канала бассейна ИПФ РАН. Описание устройства и характеристик экспериментальной установки представлено в [разделе 2.2](#). В рамках этих экспериментов велась съёмка границы раздела воды и воздуха с двух ракурсов. На основе данных видеосъёмки в [разделе 2.3](#) дана классификация основных явлений, приводящих к генерации капель, при ураганных скоростях ветра (рис. 1): дробление жидких «нитей», разрыв крупных подводных пузырей и дробление по типу «парашют».

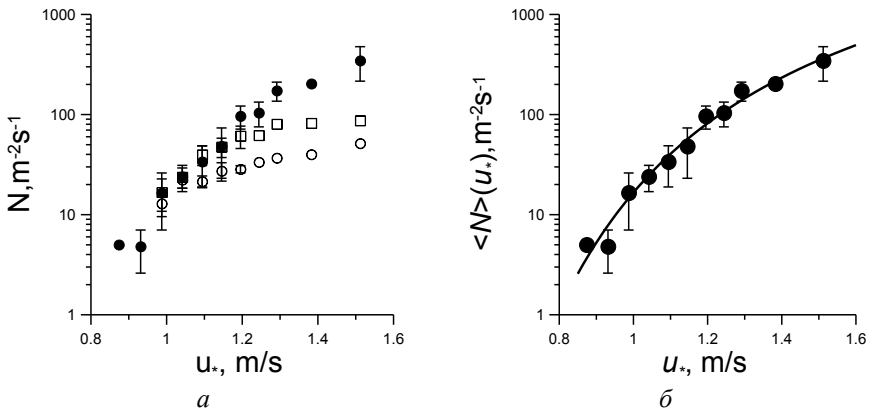


**Рис. 1.** Основные механизмы генерации брызг: *а* – образование и дробление жидкой «нити», *б* – разрыв большого пузыря, *в* – образование и разрыв одиночного «парашюта».  $U_{10}=25$  м/с

С помощью специально разработанного программного обеспечения была проведена обработка кадров видеозаписей и исследована статистика, событий приводящих к генерации брызг. Согласно результатам данного анализа, представленным в разделе 2.4, дробление по типу «парашют» является доминирующим источником крупных брызг при ураганных скоростях ветра (рис. 2, а). На основе общих принципов статистической физики получена зависимость числа событий фрагментации по типу «парашют» от динамической скорости ветра в виде

$$\langle N \rangle (u_*) = N_0 \frac{u_*^2}{U_0^2} \exp(-U_0^2 / u_*^2), \quad (1)$$

где  $u_*$  – динамическая скорость ветра, константы  $N_0 = 3.73 \cdot 10^3 \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$ ,  $U_0 = 2 \text{ м/с}$  определены на основе экспериментальных данных (см. рис. 2, б). Помимо статистики событий дробления по типу «парашют» с помощью полуавтоматической обработки также были получены распределение начального и конечного радиуса «парашютов», скоростей их краев и центров, а также времени их жизни.

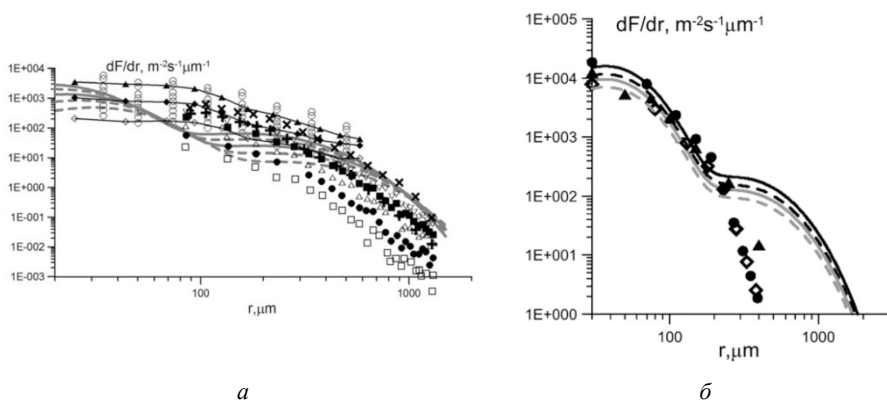


**Рис. 2.** Зависимость удельного числа событий образования брызг от динамической скорости ветра (а) (открытые кружки – разрыв всплывающих пузырей, квадраты – жидкие «нити», заштрихованные кружки – дробление по типу «парашют») и экспериментальные данные о числе событий дробления по типу «парашют» и их аппроксимации (1) – б

Раздел 2.5 посвящен построению функции генерации брызг, образованных в результате дробления по типу «парашют». Для оценки числа капель считалось, что генерация брызг при одном событии фрагментации обусловлена двумя механизмами: разрывом плёнки купола «парашюта» и дроблением его ободка. Распределение капель, образованных при разрыве пленки купола «парашюта», по размеру находилось на основе аналогии этого процесса с ме-

ханизмом генерации брызг за счёт разрывов подводных пузырей, который был детально исследован в [22]. При вычислении количества капель, возникших в результате дробления ободка «парашюта», предполагалось, что ободок является жидкой «нитью» некоторой толщины, определяемой радиусом «парашюта». Дробление жидких «нитей» исследовано в [23]. Итоговая функция генерации брызг представляет собой свёртку распределения «парашютов» по размеру и функции распределения брызг от одного явления. Построенная таким образом функция генерации хорошо согласуется с имеющимися результатами лабораторных экспериментов и натуральных наблюдений о статистике капель при ураганных ветрах (рис. 3).

В разделе 2.6 приводится заключение ко второй главе, в котором обсуждается возможное влияние крупных капель, образованных при фрагментации ободка «парашюта», на процесс переноса между океаном и атмосферой.



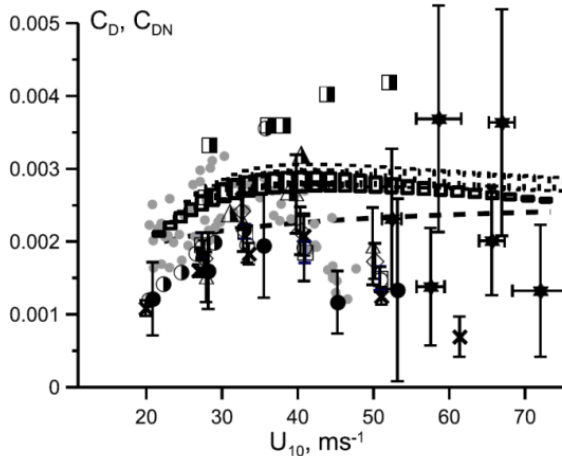
**Рис. 3.** Сравнение функций генерации брызг, образованных при дроблении по типу «парашют», и экспериментальных измерений, проведенных в лабораторных условиях [18, 22–24] (а), в натуральных условиях [27–29] (б). Пунктирные и сплошные линии без символов – функция генерации, построенная в рамках данной диссертации, символы – экспериментальные данные

На основе разработанной функции генерации брызг в **Главе 3** получены оценки потоков, связанных с явлением дробления по типу «парашют». В частности, оценки дополнительного потока импульса, связанного с этим явлением, получены в **разделе 3.2**. Показано, что влияние «парашютов» на аэродинамическое сопротивление определяется вкладом трёх факторов. Первый эффект связан с сопротивлением, которое оказывают купола «парашютов», выступая в качестве препятствий для приповерхностного потока ветра (**параграф 3.2.1**). Второй эффект обусловлен ускорением воздушным потоком капель в процессе их генерации (**параграф 3.2.2**). Помимо указанных факторов также учитывалось влияние устойчивой стратификации приводного слоя атмосферы, обусловленной присутствием взвешенных капель (**параграф 3.2.4**).

Учёт капель приводит к модификации профиля средней скорости, на основе которого было получено выражение для коэффициента аэродинамического сопротивления поверхности воды с учётом стратификации в виде:

$$C_D = \frac{C_{DN}}{\left(1 + \frac{b\rho_w g}{\rho_a u_*^3} \sqrt{C_{DN}} \int_{z_i}^{\infty} \langle sw \rangle dz\right)^2}, \quad (2)$$

где  $C_{DN}$  и  $C_D$  – коэффициенты аэродинамического сопротивления для нейтрально стратифицированного атмосферного пограничного слоя и для случая, когда учитывается стратификация, создаваемая каплями,  $b = 5$  (см. [30]),  $\rho_{w,a}$  – плотность воды и воздуха,  $g$  – ускорение свободного падения,  $\langle sw \rangle$  – поток объёмной концентрации капель. Комбинация этих факторов приводит к не-монотонной зависимости коэффициента аэродинамического сопротивления от скорости ветра (рис. 4).



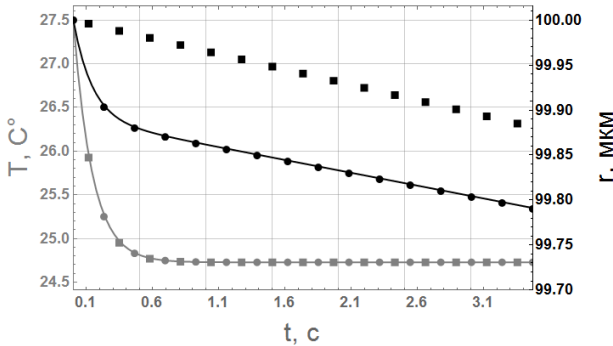
**Рис. 4.** Коэффициент аэродинамического сопротивления поверхности в зависимости от  $U_{10}$ , полученный в рамках указанной модели. Пунктирными рамками показаны оценки  $C_{DN}(U_{10N})$  для случая нейтрально стратифицированного атмосферного пограничного слоя, сплошными рамками показаны оценки  $C_D(U_{10})$  для случая, когда учитывается влияние капель на стратификацию приводного слоя атмосферы. Рамки отображают изменение обратного параметра возраста волнения  $\Omega$  от 2.5 до 3.5. Экспериментальные данные [4, 6, 31, 32] показаны символами. Пунктирная кривая –  $C_D$  из [33]

В разделе 3.3 получены оценки влияния брызг, образованных при фрагментации по типу «парашют», на потоки скрытого, явного тепла и энтальпии в приводном атмосферном пограничном слое. Для этого в параграфе 3.3.1 была разработана усовершенствованная параметризация эволюции параметров капли от времени в следующем виде:

$$T(t) = T_{eq} + T_r e^{-t/\tau_r} + T_f e^{-t/\tau_f}, \quad (3)$$

$$r(t) = r_{eq} + r_r e^{-t/\tau_r} + r_f e^{-t/\tau_f}.$$

где  $T_{eq}$ ,  $r_{eq}$  – равновесные значения радиуса и температуры капли,  $\tau_r$ ,  $\tau_f$  – характерные временные масштабы эволюции радиуса и температуры. Аппроксимация (3) позволяет практически точно описать поведение радиуса и температуры капли, в том числе резкое изменение радиуса, происходящее на начальном этапе (рис. 5). Физически это более интенсивное испарение связано с тем, что капля в начальный момент имеет более высокую температуру, чем после достижения теплового равновесия.



**Рис. 5.** Эволюция радиуса (чёрный цвет) и температуры (серый цвет) капли за время падения  $\tau_f \approx 3.5$  с. Кругами показан результат численного решения уравнений микрофизики капли, квадратами – параметризация Андреаса [34], сплошная линия – параметризация (3), предложенная в настоящей работе. Параметры среды:  $T_w = 27.5$  °C – температуры воды,  $T_a = 25$  °C – температура воздуха,  $RH = 96\%$  – относительная влажность,  $U_{10} = 30$  м/с.

С помощью параметризации (3) в [параграфе 3.3.2](#) на основе уравнения теплового баланса капли было получено выражение, описывающее количество энтальпии, которое поступает в атмосферу от одиночной капли за её жизненный цикл, в виде

$$Q_K = c_w \{ m_0 (T_w - T_{eq}) + m(\tau_f) (T_{eq} - T(\tau_f)) \}, \quad (4)$$

где  $Q_K$  – количество энтальпии от одной капли;  $c_w$  – удельная теплоёмкость воды;  $m_0$ ,  $m(\tau_f)$  – начальная и конечная массы капли;  $T_w$  и  $T(\tau_f)$  – начальная и конечная температуры капли;  $T_{eq}$  – равновесное значение температуры.

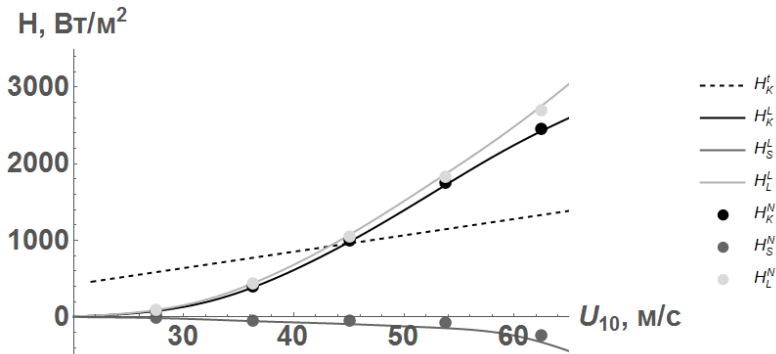
Скрытая теплота, которую передаёт одиночная капля атмосфере вследствие испарения, находилось как

$$Q_L = L_v (m_0 - m(\tau_f)), \quad (5)$$

где  $L_v$  – удельная теплота парообразования воды. Поскольку энтальпия равна сумме скрытого и явного тепла, количество явного тепла находилось как

$$Q_S = Q_K - Q_L. \quad (6)$$

Для оценки общих потоков от всех капель необходимо вклад от одной капли умножить на функцию генерации брызг и проинтегрировать по всем радиусам. Зависимость интегральных потоков тепла от скорости ветра показана на рис. 6. В параграфе 3.3.3 для условий, характерных для тропического циклона, показано, что поток энтальпии, связанный с каплями, в основном определяется потоком скрытого тепла, а поток явного тепла мал и является отрицательной величиной. Также было показано, что при скоростях ветра более 45-50 м/с поток энтальпии от капель может превышать турбулентный поток от поверхности океана.



**Рис. 6.** Зависимости интегральных потоков тепла от капель, образованных при дроблении по типу «парашют», от скорости ветра  $U_{10}$ . Кружками показаны оценки, полученные на основе численного решения уравнений микрофизики капли, сплошными линиями — на основе предложенной модели (3). Чёрный цвет обозначает поток энтальпии, светло-серый — поток скрытого тепла, тёмно-серый — поток явного тепла. Пунктирная чёрная кривая — турбулентный поток энтальпии от поверхности океана. Параметры среды:  $T_w = 27.5$  °C,  $T_a = 25$  °C,  $RH = 96\%$ .

**Глава 4** посвящена изучению механизма образования начального возмущения поверхности воды, развитие которого может приводить к дроблению по типу «парашют».

В этой главе предложена и исследована гипотеза о том, что формирование возвышений поверхности воды, инициирующих фрагментацию по типу «парашют», обусловлено неустойчивостью ветрового дрейфового течения вследствие нелинейного резонансного взаимодействия триплета волн, одна из которых распространяется вдоль потока, а две другие — под одинаковым углом по обе стороны от основного течения (см. рис. 7, а).

В разделе 4.2 для модельного профиля скорости (рис. 7, б), учитывающего течение в воде и воздухе, получено дисперсионное соотношение для волн, распространяющихся под произвольным углом к потоку, в следующем виде:

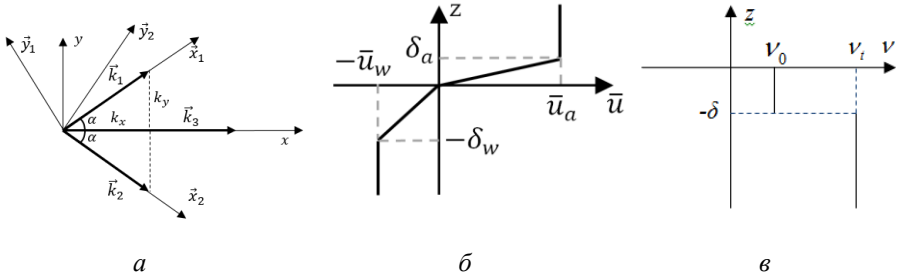
$$D_w(\omega_j, k_j, \alpha_j) + \lambda D_a(\omega_j, k_j, \alpha_j) = 0, \quad (7)$$

где

$$D_w(\omega_j, k_j, \alpha_j) = \omega_j^2 \frac{\cos \alpha_j \cosh k_j - (\omega_j + k_j \cos \alpha_j) e^{k_j}}{\cos \alpha_j \sinh k_j - (\omega_j + k_j \cos \alpha_j) e^{k_j}} + \omega_j \cos \alpha_j - (G + \Sigma k_j^2) k_j;$$

$$D_a(\omega_j, k_j, \alpha_j) = \omega_j^2 \frac{\cos \alpha_j \cosh(k_j \sqrt{\lambda} \mu) + \sqrt{\lambda} \mu (\sqrt{\lambda} \omega_j - k_j \cos \alpha_j) e^{k_j \sqrt{\lambda} \mu}}{\cos \alpha_j \sinh(k_j \sqrt{\lambda} \mu) + \sqrt{\lambda} \mu (\sqrt{\lambda} \omega_j - k_j \cos \alpha_j) e^{k_j \sqrt{\lambda} \mu}} - \frac{1}{\lambda \mu} \omega_j \cos \alpha_j + G k_j;$$

$\omega_j, k_j, \alpha_j$  – частота, волновое число и угол распространения  $j$ -й волны;  
 $\lambda = \rho_a / \rho_w$ ;  $\mu = \nu_a / \nu_w$  – отношение вязкости воздуха к вязкости воды;  
 $G, \Sigma$  – безразмерные ускорение свободного падения и коэффициент поверхностного натяжения.

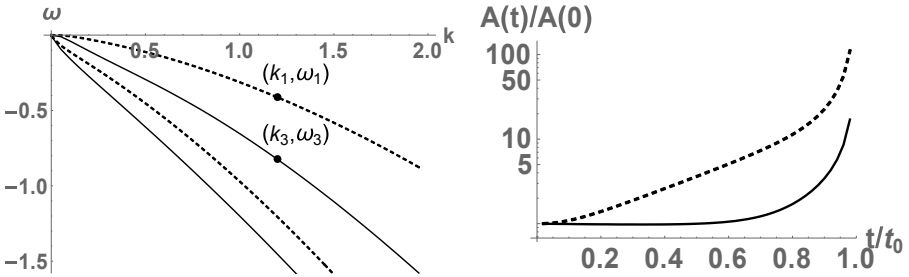


**Рис. 7.** Схема расположения волновых векторов в триplete волн (а), б – профиль основного течения, в – профиль эффективной вязкости

Анализ дисперсионного соотношения (7), проведенный в [разделе 4.3](#), показал возможность выполнения условий трёхволнового синхронизма для волн на скачке завихренности в воде. Установлено, что ветровой поток не оказывает существенного влияния на выbranную моду, поэтому в дальнейших рассуждениях рассматривалось лишь дрейфовое течение, которое считалось двухслойным. Упрощенная постановка задачи позволила рассмотреть более универсальную модель, учитывающую влияние вязкости. При этом считалось, что профиль эффективной вязкости является кусочно-постоянной функцией (рис. 7, в). Пример выполнения условий трёхволнового синхронизма для волн на скачке завихренности в профиле дрейфового течения показан на рис. 8.

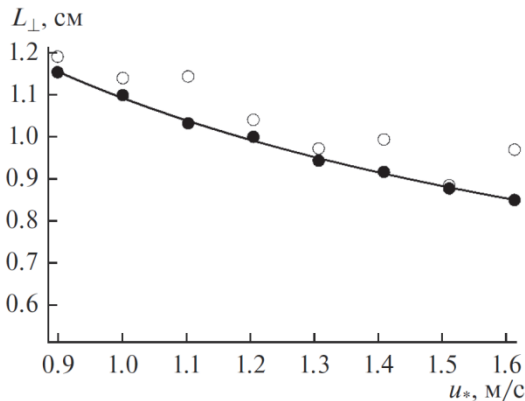
[Раздел 4.4](#) посвящен выводу трёхволновых уравнений с учётом взаимодействия внутри критического слоя, нелинейности уравнений движения и граничных условий. В [разделе 4.5](#) на основе численного решения полученной системы уравнений, показано амплитуды возмущений могут расти взрывным образом (рис. 9). Анализ дисперсионного соотношения показал, что для лю-

бого значения скорости существует некоторый диапазон углов распространения, при которых выполняются условия трехволнового синхронизма. Как следствие, спектр неустойчивых возмущений является широкополосным. По характеристикам этого спектра была получена зависимость от динамической скорости ветра поперечного размера смещения поверхности воды, соответствующего этим возмущениям, которая согласуется с экспериментальными данными о размерах «парашютов» (рис. 10).



**Рис. 8.** Дисперсионные кривые для чисто дрейфового течения с учётом вязкости: сплошные кривые соответствуют продольной волне, пунктирные кривые – косо́й волне. Резонансные частоты и волновые числа:  $k=k_3=1.2$ ,  $\omega=-0.41-0.06i$ ,  $\omega_3=-0.82-0.07i$ . Внешние параметры:  $u_*=1.1$  м/с,  $\delta_w=0.8$  мм,  $\nu_w=0.01$  см<sup>2</sup>/с,  $\nu_t=12\nu_w$ ,  $\alpha=60^\circ$ .

**Рис. 9.** Характерная зависимость амплитуд возмущения от времени. Сплошная линия соответствует амплитуде продольной волны, пунктирная линия – амплитуде косо́й волны.  $t_0$  – время развития неустойчивости. Параметры те же, что указаны на рис. 8



**Рис. 10.** Поперечный масштаб «парашютов»: чёрные кружки – оценка, полученная в рамках настоящей диссертации, линия – её аппроксимация, пустые кружки – экспериментальные данные о среднем начальном радиусе событий дробления по типу «парашют»



В **Заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. На основе данных лабораторных экспериментов были классифицированы события на поверхности воды, обдуваемой высокоскоростным воздушным потоком, приводящие к образованию брызг. Показано, что доминирующим источником брызг, срываемых с гребней волн, при ураганных скоростях ветра является механизм аналогичный дроблению по типу «парашют» жидких капель и струй в газовых потоках. На основе общих принципов статистической физики получена зависимость числа событий фрагментации по типу «парашют» от скорости ветра.

2. Построена функция генерации брызг, обусловленных механизмом дробления по типу «парашют». Использована модель, учитывающая, что генерация брызг при одном событии фрагментации обусловлена двумя механизмами: разрывом плёнки купола «парашюта» и дроблением его «ободка». Для количественных оценок статистики капель от одного события дробления по типу «парашют» использовалась аналогия между процессами разрыва купола «парашюта» и подводного пузыря, а также сходство между фрагментацией его «ободка» и дроблением жидкой «нити». Построенная функция генерации хорошо согласуется с имеющимися результатами лабораторных экспериментов и натуральных наблюдений о статистике капель при ураганных ветрах.

3. Получены количественные оценки влияния явления дробления по типу «парашют» на обмен импульсом между атмосферой и океаном, который определяется вкладом двух факторов: сопротивления, оказываемого куполами «парашютов» как препятствиями, и ускорения воздушным потоком капель в процессе их генерации. Их комбинация, а также учёт стратификации приводного слоя атмосферы за счёт присутствия взвешенных капель приводят к немонотонной зависимости коэффициента аэродинамического сопротивления от скорости ветра.

4. На основе анализа уравнения баланса тепла капли во влажной атмосфере показано, что поток энтальпии от капли в атмосферу равен количеству тепла, отдаваемого каплей вследствие её охлаждения от температуры воды до температуры влажного термометра. Получены оценки потока энтальпии, связанного с брызгами, для характерных условий тропического циклона. Показано, что при скоростях ветра более 45–50 м/с поток энтальпии от капель по величине сравним с прямым турбулентным потоком энтальпии от поверхности океана.

5. Предложена и исследована гипотеза о том, что формирование начальных возвышений водной поверхности, развитие которых может приводить к дроблению по типу «парашют», обусловлено гидродинамической неустойчивостью ветрового дрейфового течения. Определены параметры, при

которых слабо нелинейное трёхволновое резонансное взаимодействие собственных волн дрейфового течения, приводит к взрывному росту их амплитуд. Получена зависимость поперечного размера смещения поверхности воды, обусловленного этим взаимодействием, от динамической скорости ветра, которая согласуется с экспериментальными данными о размерах «парашютов».

## СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Large W.G., Pond S. Open Ocean Momentum Flux Measurements in Moderate to Strong Winds // *J. Phys. Oceanogr.* 1981. Vol. 11. P. 324–336.
2. Large W.G., Pond S. Sensible and Latent Heat Flux Measurements over the Ocean // *J. Phys. Oceanogr.* 1982. Vol. 12. P. 464–482.
3. Troitskaya Y.I. et al. Laboratory and theoretical modeling of air-sea momentum transfer under severe wind conditions // *J. Geophys. Res. Ocean.* 2012. Vol. 117, № 6. P. 1–13.
4. Powell M.D., Vickery P.J., Reinhold T.A. Reduced drag coefficient for high wind speeds in tropical cyclones // *Nature.* 2003. Vol. 422, № 6929. P. 279–283.
5. Donelan M.A. et al. On the limiting aerodynamic roughness of the ocean in very strong winds // *Geophys. Res. Lett.* 2004. Vol. 31, № 18. P. L18306, 1–5.
6. Jarosz E. et al. Bottom-up Determination of Air-Sea Momentum Exchange under a Major Tropical Cyclone // *Science.* 2007. Vol. 315. P. 1707–1709.
7. Emanuel K.A. Sensitivity of tropical cyclones to surface exchange coefficients and a revised steady-state model incorporating eye dynamics // *J. Atmos. Sci.* 1995. Vol. 52. P. 3969–3976.
8. Andreas E.L., Emanuel K.A. Effects of sea spray on tropical cyclone intensity // *J. Atmos. Sci.* 2001. Vol. 58, № 24. P. 3741–3751.
9. Bao J.W. et al. Parameterizations of sea-spray impact on the air-sea momentum and heat fluxes // *Mon. Weather Rev.* 2011. Vol. 139, № 12. P. 3781–3797.
10. Bianco L. et al. Impact of Sea-Spray on the Atmospheric Surface Layer // *Boundary-Layer Meteorol.* 2011. Vol. 140, № 3. P. 361–381.
11. Andreas E.L. et al. The spray contribution to net evaporation from the sea: A review of recent progress // *Boundary-Layer Meteorol.* 1995. Vol. 72, № 1–2. P. 3–52.
12. Andreas E.L. A review of the sea spray generation function for the open ocean // *Atmos. Interact.* 2002. Vol. 1. P. 1–46.
13. Veron F. Ocean Spray // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2015. Vol. 47, № 1. P. 507–538.
14. Bortkovskii R.S. On the mechanism of interaction between the ocean and the atmosphere during a storm // *Fluid Mech. Sov. Res.* 1973. Vol. 2. P. 87–94.
15. Andreas E.L. Thermal and size evolution of sea spray droplets // *CRREL Rep.* 89–11. Hanover, 1989. Vol. 43–44. 37 p.

16. Ling S.C., Kao T.W. Parameterization of the moisture and heat transfer process over the ocean under whitecap sea states // *J. Phys. Oceanogr.* 1976. Vol. 6. P. 306–315.
17. Кутателадзе С.С., Стырикович М.А. Гидродинамика газожидкостных систем. Москва: Энергия, 1976. 296 p.
18. Azzopardi B.J. Disturbance wave frequencies, velocities and spacing in vertical annular two-phase flow // *Nucl. Eng. Des.* 1986. Vol. 92, № 2. P. 121–133.
19. Koga M. Direct production of droplets from breaking wind-waves –its observation by a multi-colored overlapping exposure photographing technique // *Tellus.* 1981. Vol. 33, № 6. P. 552–563.
20. Veron F. et al. Sea spray spume droplet production in high wind speeds // *Geophys. Res. Lett.* 2012. Vol. 39, № 16. P. 1–5.
21. Troitskaya Y. et al. Bag-breakup fragmentation as the dominant mechanism of sea-spray production in high winds // *Sci. Rep.* Springer US, 2017. Vol. 7, № 1. P. 1–4.
22. Lhuissier H., Villermaux E. Bursting bubble aerosols // *J. Fluid Mech.* 2012. Vol. 696, № November 2011. P. 5–44.
23. Marmottant P.H., Villermaux E. On spray formation // *J. Fluid Mech.* 2004. Vol. 498, № 498. P. 73–111.
24. Iida N., Toba Y., Chaen M. A new expression for the production rate of sea water droplets on the sea surface // *J. Ocean.* 1992. Vol. 48. P. 439–460.
25. Ortiz-Suslow D.G. et al. Sea spray generation in very high winds // *J. Atmos. Sci.* 2016. Vol. 73, № 10. P. 3975–3995.
26. Fairall C.W. et al. Investigation of the physical scaling of sea spray spume droplet production // *J. Geophys. Res.* 2009. Vol. 114. P. 10001.
27. Andreas E.L. A new sea spray generation function for wind speeds up to 32 m/s // *J. Phys. Oceanogr.* 1998. Vol. 28, № 11. P. 2175–2184.
28. Fairall C.W., Kepert J.D., Holland G.J. The effect of sea spray on surface energy transports over the ocean // *Glob. Atmos. Ocean Syst.* 1994. Vol. 2, № January. P. 121–142.
29. Zhao D. et al. New sea spray generation function for spume droplets // *J. Geophys. Res. Ocean.* 2006. Vol. 111, № 2.
30. Kudryavtsev V.N. On the effect of sea drops on the atmospheric boundary layer // *J. Geophys. Res. Ocean.* 2006. Vol. 111, № 7. P. 1–18.
31. Bell M.M., Montgomery M.T., Emanuel K.A. Air-sea enthalpy and momentum exchange at major hurricane wind speeds observed during CBLAST // *J. Atmos. Sci.* 2012. Vol. 69, № 11. P. 3197–3222.
32. Richter D.H., Bohac R., Stern D.P. An assessment of the flux profile method for determining air-sea momentum and enthalpy fluxes from dropsonde data in tropical cyclones // *J. Atmos. Sci.* 2016. Vol. 73, № 7. P. 2665–2682.
33. Foreman R.J., Emeis S. Revisiting the definition of the drag coefficient in the marine atmospheric boundary layer // *J. Phys. Oceanogr.* 2010. Vol. 40, № 10. P. 2325–2332.

34. Andreas E.L. Sea spray and the turbulent air-sea heat fluxes // J. Geophys. Res. 1992. Vol. 97, № C7. P. 11429–11441.

### СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Troitskaya, Y., Kandaurov, A., Ermakova, O., Kozlov, D., Sergeev, D., and Zilitinkevich, S. Bag-breakup fragmentation as the dominant mechanism of sea-spray production in high winds // Sci. Rep. – 2017. – V. 7, № 1. – P. 1–4.

2. Troitskaya, Y., Kandaurov, A., Ermakova, O., Kozlov, D., Sergeev, D., and Zilitinkevich, S. The «bag breakup» spume droplet generation mechanism at high winds. Part I: Spray generation function // J. Phys. Oceanogr. – 2018. – V. 48, № 9. – P. 2168–2188.

3. Troitskaya, Y., Druzhinin, O., Kozlov, D., and Zilitinkevich, S. The «bag breakup» spume droplet generation mechanism at high winds. Part II: Contribution to momentum and enthalpy transfer // J. Phys. Oceanogr. – 2018. – V. 48, № 9. – P. 2189–2207.

4. Троицкая. Ю. И., Ермакова. О. С., Кандауров. А. А., Козлов. Д. С., Сергеев. Д. А., Зилитинкевич. С. С. Дробление типа «парашют» - механизм генерации морских брызг при сильных и ураганных ветрах // Доклады Академии Наук. – 2017. – Т. 2. – С. 226–232.

5. Троицкая. Ю. И., Ермакова. О. С., Кандауров. А. А., Козлов. Д. С., Сергеев. Д. А., Зилитинкевич. С. С. Немонотонная зависимость коэффициента сопротивления поверхности океана от скорости ураганного ветра - эффект генерации брызг за счёт дробления типа “парашют” // Доклады Академии Наук. – 2017. – Т. 3. – С. 357–362.

6. Троицкая. Ю. И., Дружинин. О. А., Ермакова. О. С., Кандауров. А. А., Козлов. Д. С., Сергеев. Д. А. Исследование механизмов генерации морских брызг при сильных ветрах и их роли в механике и термодинамике ураганов // Океанологические исследования. – 2019. – Т. 7, № 3. – С. 164–187.

7. Козлов. Д. С., Троицкая. Ю. И. О роли взрывного взаимодействия трех поверхностных волн в начальной стадии образования брызг при сильных ветрах // Известия РАН. Физика Атмосферы и Океана. – 2021. – Т. 57., № 2. – С. 199–211.

8. Kozlov, D. and Troitskaya, Y.: Explosive interaction of gravity-capillary triads as the initial stage of “bag-breakup” droplet generation mechanism at high winds, EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-11302, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-11302>, 2021.

9. Troitskaya, Y., Kandaurov, A., Sergeev, D., Ermakova, O., Kozlov, D., Vdovin, M., and Druzhinin, O.: Microphysics of the air-sea coupling at high winds and its role in the dynamics and thermodynamics of severe sea storms, EGU General Assembly 2020, Online, 4–8 May 2020, EGU2020-7149, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-7149>, 2020

10. Kandaurov, A., Troitskaya, Y., Sergeev, D., and Kozlov, D.: Whitecap coverage measurements in laboratory modeling of wind-wave interaction, EGU General Assembly 2020, Online, 4–8 May 2020, EGU2020-15621, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-15621>, 2020
11. Kozlov, D. and Troitskaya, Y.: Non-linear resonant instability of short surface waves as the first stage “bag-breakup” process at the air-sea interface at high winds , EGU General Assembly 2020, Online, 4–8 May 2020, EGU2020-7591, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-7591>, 2020
12. Kozlov, D. and Troitskaya, Y.: Explosive three-wave interaction of short surface waves as the origin of " bag-breakup" fragmentation of the air-sea interface under high wind conditions., Geophysical Research Abstracts, Vol. 21, EGU2019-7908, Vienne, Austria, April 7–12, (2019).
13. Troitskaya, Y., Kandaurov, A., Ermakova, O., Kozlov, D., Sergeev, D., Bopp, M., and Zilitinkevich, S.: The synergetic effect of foam at the water surface and spray in the marine atmospheric boundary layer on air-sea fluxes at high winds., Geophysical Research Abstracts, Vol. 21 , EGU2019-6055-1, Vienne, Austria, April 7–12, (2019).
14. Troitskaya, Y., Kandaurov, A., Sergeev, D., Ermakova, O., Vdovin, M., Kozlov, D., Zilitinkevich, S, и Druzhinin, O.: Sea Spray at High Winds: Mechanisms of Production and Role in Heat Transfer and Surface Drag at High Winds. 22nd Conference on Atmospheric and Oceanic Fluid Dynamics, (2019)
15. Troitskaya, Y., Kandaurov, A., Ermakova, O., Kozlov, D., Sergeev, D., and Zilitinkevich, S.: Sea spray at high winds: mechanisms of production and role in heat transfer and surface drag., Geophysical Research Abstracts, Vol. 20, EGU2018-12400-1, Vienne, Austria, April 8–13, (2018).
16. Kandaurov, A., Troitskaya, Y., Balandina, G., Ermakova, O., Kozlov, D., Sergeev, D., and Zotova, A.: Laboratory investigation of separate bag-breakup event during sea-spray production at hurricane winds., Geophysical Research Abstracts, Vol. 20, EGU2018-8719, Vienne, Austria, April 8–13, (2018).
17. Sergeev, D., Troitskaya, Y., Kandaurov, A., Vdovin, M., Kozlov, D., Ermakova, O., and Zotova, A.: On effect of sea-spray and foam to the aerodynamic resistance of the water surface at high winds., Geophysical Research Abstracts, Vol. 20, EGU2018-5224, Vienne, Austria, April 8–13, (2018).
18. Troitskaya, Y., Sergeev, D., Kandaurov, A., Vdovin, M., Kozlov, D., Ermakova, O., Zotova, A., and Zilitinkevich, S.: The Effects of Sea-Spray and Foam on Aerodynamic Resistance of Water Surface in Strong Winds. 23rd Symposium on Boundary Layers and Turbulence/21st Conference on Air-Sea Interaction, (2018).
19. Troitskaya, Y., Kandaurov, A., Ermakova, O., Kozlov, D., Sergeev, D., and Zilitinkevich, S.: Investigation and classification of spume droplets production mechanisms at hurricane winds., Geophysical Research Abstracts, Vol. 18, EGU2016-8315, Vienne, Austria, April 17–22, (2016).

20. Troitskaya, Y., Kandaurov, A., Ermakova, O., Kozlov, D., Sergeev, D., and Zilitinkevich, S.: Sea spray production by bag breakup mode of fragmentation of the air-water interface at strong and hurricane wind., *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 18, EGU2016-5970, Vienne, Austria, April 17–22, (2016).

21. Troitskaya, Y., Zilitinkevich, S., Kandaurov, A., Ermakova, O., Kozlov, D., and Sergeev, D.: Bag-breakup control of surface drag in hurricanes., *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 18, EGU2016-8101, Vienne, Austria, April 17–22, (2016).

22. Козлов Д.С., Троицкая Ю.И, Взрывное взаимодействие трёх поверхностных волн как причина образования начальной стадии явления дробления по типу «парашют» // 25-я сессия молодых учёных, online, 10-11 ноября, (2020), с. 232–235.

23. Козлов Д.С., Троицкая Ю.И, Дробление типа «парашют» как механизм образования брызг при ураганных ветрах // 24-я сессия молодых учёных, Нижегородская область, Россия, 21-22 мая, (2019), с. 94–95.

## ОГЛАВЛЕНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

### **Введение**

### **Глава 1. Исследования процессов переноса импульса и энтальпии в приводном пограничном слое атмосферы и влияния морских брызг на эти процессы**

- 1.1 Введение
- 1.2 Механизмы образования морских капель и функция генерации брызг
- 1.3 Динамика и термодинамика одиночной капли морской воды в приповерхностном слое атмосферы
- 1.4 Потоки тепла, поступающие в атмосферу от капель
- 1.5 Параметризация процессов переноса
- 1.6 Экспериментальные данные о зависимостях коэффициентов переноса от скорости ветра
- 1.7 Роль потоков энтальпии и импульса в динамике тропического циклона
- 1.8 Эффекты, оказывающие воздействие на процессы переноса между океаном и атмосферой, при ураганных ветрах
- 1.9 Заключение

### **Глава 2. Исследование механизмов генерации брызг при ураганных скоростях ветра в лабораторных условиях**

- 2.1 Введение
- 2.2 Описание экспериментальной установки и методов исследования
- 2.3 Классификация явлений, приводящих к образованию капель
- 2.4 Статистика локальных событий, отвечающих за образование капель
- 2.5 Построение функции генерации брызг, образованных при дроблении «парашютов»
- 2.6 Заключение

### **Глава 3. Изучение потоков, связанных с явлением дробления по типу «парашют»**

- 3.1 Введение
- 3.2 Поток импульса
- 3.3 Потоки скрытого, явного тепла и энтальпии

### **Глава 4. Роль взрывного взаимодействия трех поверхностных волн в образовании «парашютов»**

- 4.1 Введение
- 4.2 Линейное дисперсионное соотношение для волновых возмущений в системе ветрового и дрейфового течений
- 4.3 Трёхволновое взаимодействие с учётом нелинейности граничных условий и вязкости в критическом слое
- 4.4 Сравнение решения модельной задачи и экспериментальных данных
- 4.5 Заключение

### **Заключение**

КОЗЛОВ Дмитрий Сергеевич

**ДРОБЛЕНИЕ ПО ТИПУ «ПАРАШЮТ»  
КАК МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ БРЫЗГ  
ПРИ УРАГАННЫХ ВЕТРАХ  
И ЕГО РОЛЬ В ПРОЦЕССАХ ОБМЕНА  
МЕЖДУ ОКЕАНОМ И АТМОСФЕРОЙ**

Автореферат

Подписано к печати 20.09.2021 г.  
Формат  $60 \times 90 \frac{1}{16}$ . Усл. печ. л. 1,5.  
Тираж 100 экз. Заказ № 44(2021).

Отпечатано в типографии Института прикладной физики РАН  
603950, г. Н. Новгород, ул. Ульянова 46