

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Института
океанологии им. П.П. Ширшова
Российской академии наук



д.т.н.

А.В. Соков

2021 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию **Козлова Дмитрия Сергеевича**
«ДРОБЛЕНИЕ ПО ТИПУ «ПАРАШЮТ» КАК МЕХАНИЗМ
ОБРАЗОВАНИЯ БРЫЗГ ПРИ УРАГАННЫХ ВЕТРАХ И ЕГО РОЛЬ В
ПРОЦЕССАХ ОБМЕНА МЕЖДУ ОКЕАНОМ И АТМОСФЕРОЙ»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности
25.00.29 – Физика атмосферы и гидросферы.

Актуальность избранной темы. Уточнение существующих представлений о механизмах взаимодействия океана и атмосферы имеет принципиальное значение для улучшения прогнозирования Земной климатической системы. Несмотря на увеличивающийся объем данных о процессах обмена на границе океан-атмосфера, прогресс в части количественных оценок потоков энергии в последние десятилетия достаточно скромный. Даже при применении наиболее хорошо обоснованных параметризаций мы все еще достаточно далеки от уверенного замыкания теплового баланса на границе океан-атмосфера, а наши оценки потоков кинетической энергии на границе не вяжутся с энергетикой верхнего слоя океана, в первую очередь с процессом перемешивания. Это существенно сдерживает работы по моделированию как динамики океана в рамках моделей циркуляции океана, так и климатических изменений в рамках моделей Земной системы. В этом смысле недостаточный учет процессов взаимодействия, связанных с режимами штормов и, в более широком смысле, учет роли ветрового волнения в процессах взаимодействия, является крайне принципиальным,

поскольку эти процессы трудно измерять инструментально. В этом смысле актуальность работы Д.С.Козлова, нацеленной на понимание механизмов взаимодействия при сильных ветрах, не вызывает сомнений.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 112 наименований. Объем диссертации – 142 страницы.

Основные результаты, полученные в диссертации.

В ходе выполнения работы Д.С.Козловым получено новое решение актуальной научной проблемы – обоснован новый механизм формирования брызг при сильных ветрах в море и оценена его роль в процессах обмена энергии на границе океан-атмосфера на основе лабораторного моделирования и теоретических работ. Среди положений, вынесенных Д. С. Козловым на защиту, отметим следующие:

Показано, что дробление по типу «парашют» является основным механизмом генерации капель, срываемых ветром с гребней волн, при ураганных скоростях ветра.

Получена функция генерации брызг, обусловленных механизмом дробления по типу «парашют», которая позволяет описать распределения капель, согласованных с результатами лабораторных экспериментов и натуральных наблюдений.

Обнаружена немонотонная зависимость коэффициента аэродинамического сопротивления поверхности воды от скорости ветра, возникающая за счет дополнительного потока импульса, связанного с дроблением по типу «парашют», а также стратификации, создаваемой брызгами.

Оценен поток энтальпии, обусловленный каплями, в условиях ураганных ветров (скорость до 45–50 м/с) и показано, что он сравним

по величине с прямым турбулентным потоком энтальпии от поверхности океана.

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

В первой главе Д. С. Козлов приводит обзор исследований, посвященных изучению процессов взаимодействия океана и атмосферы, уделяя особое внимание эффектам, связанным с ролью капель при взаимодействии. Достаточно подробно и с правильными акцентами описана микрофизика формирования капель, в частности процессы, происходящие при всплывании пузырьков воздуха в поверхностном слое и дальнейший разрыв пленки пузырьков. Проведено подробное сопоставление функций генерации морских брызг в зависимости от их размера, а также рассмотрены основные принципы построения термодинамической модели капли и ограничения, накладываемые на анализ процессов в рамках данных моделей. Также проанализированы основные механизмы формирования потоков тепла от капель при их попадании в атмосферу и уменьшении их размеров в ходе испарения.

Обзор параметризаций потоков тепла и зависимости коэффициентов обмена от скорости ветра (раздел 1.6) в целом изложен концептуально верно, однако удивляет отсутствие в рамках данного обзора анализа параметризаций семейства COARE, которые являются стандартными в настоящее время при расчете турбулентных потоков энергии на границе океан-атмосфера. Анализ роли потоков энтальпии в динамике тропических циклонов с одной стороны является избыточным в контексте диссертации, а с другой очень ограниченным, поскольку автором не рассмотрен весь энергетический жизненный цикл тропических циклонов, что впрочем, и не требовалось в рамках данной работы. В целом обзор показывает

достаточно хорошее владение автором предмета и его глубоких знаний в области изучаемой проблемы.

Во второй главе работы описаны лабораторные эксперименты в Большом Термостратифицированном Бассейне (БТСБ) ИПФ РАН, на основе которых были классифицированы явления образования капель и построена функция генерации для наиболее эффективного механизма образования капель, а именно, явления дробления по типу «парашют». Лабораторная установка сконструирована с использованием ряда изящных и нестандартных решений, в частности перед входом в канал дополнительно установлена расширяюще-сужающая секция для выравнивания потока и уменьшения уровня турбулентных флуктуаций, кроме того, остроумно решена проблема устранения скосов потока и размельчения крупных вихрей. Видео регистрация выполняется с помощью высокоскоростной цифровой видеокамеры NAC Memrecam NH-3 с двух ракурсов при различной скорости съемки сбоку и сверху, что позволяет оптимально визуализировать само явление образования парашюта.

Данные видеосъемки позволили выделить три типа явлений на поверхности воды, развитие которых приводит к образованию брызг: дробление жидких «пальцев», разрыв крупных подводных пузырей и дробление по типу «парашют». Процесс дробления пузырьков с образованием парашюта описан с большой детальностью, даны все параметры каждого этапа процесса, включая образование начального возмущения, последующий рост возмущения, деформацию и образование парусообразной структуры и собственно образования парашюта. Для событий образования парашюта приведены все необходимые статистические характеристики, что позволило построить функции их распределения в зависимости от соотношения радиусов в момент образования и в момент разрыва пленки купола.

Полученные функции генерации брызг, образованных при дроблении по типу «парашют», были сопоставлены с лабораторными данными других исследований, что позволило количественно оценить отклонения предложенных зависимостей для размеров капель в сторону некоторого увеличения их размера, чему дано вполне разумное объяснение. Важным результатом главы стало построение функции генерации брызг, образованных в результате дробления по типу «парашют». В целом надо подчеркнуть высокий уровень не только проведения самих экспериментов, но их физической интерпретации, продемонстрированный автором.

В **третьей главе** анализируется вклад явления дробления по типу парашют в формировании потоков энергии на границе океан-атмосфера. Дана оценка влияния данного явления на аэродинамическое сопротивление, включающее сопротивление купола, ускорение капель и влияние стратификации. Опять же надо отметить детальность, с которой проанализированы данные процессы. Была обнаружена немонотонная зависимость коэффициента аэродинамического сопротивления поверхности воды от скорости ветра, ранее подтвержденная наблюдениями. Далее было оценено влияние брызг, образованных при фрагментации по типу «парашют», на потоки скрытого и явного тепла в приводном слое. Это потребовало разработки дополнительных параметризаций поведения геометрических и термодинамических характеристик капли во времени, которые были применены для расчета потоков. Проведены оценки вклада капель в расчет суммарного потока энтальпии в приводном слое. Полученные зависимости от скорости ветра в целом похожи на зависимости Андреаса, опубликованные в 2008 г.

В **заключительной четвертой главе** рассматриваются механизмы генерации возмущений поверхности, являющиеся своеобразными предвестниками явления дробления по типу «парашют». В качестве рабочей гипотезы рассматривается возможность формирования начальных возвышений за счет гидродинамической неустойчивости ветрового

дрейфового течения. Для обоснования рассмотрена слабо-нелинейная стадия неустойчивости в форме резонансного трёхволнового взаимодействия и показано, что триплеты возмущений при определенном соотношении направлений волн триплета формируют рост амплитуд и приводят к начальной стадии дробления по типу «парашют». Хотя концепция в целом непротиворечива, надо отметить недостаточность доказательств ее достоверности в рамках проведенных исследований. На это указывает и сам автор.

Замечания по диссертационной работе. Как и всякая хорошая работа, диссертация Д.С. Козлова не лишена недостатков. Опуская неизбежные мелкие и редакционные замечания, остановлюсь на нескольких принципиальных.

Во-первых, надо отметить некоторую оторванность анализа работ по потокам тепла на границе океан-атмосфера, приведенных в первой главе от исследований, проведенных в самой диссертации. В этом смысле обзор в значительной части носит рутинный характер и содержит общеизвестные фрагменты, изложенные с излишней детальностью. В то же время, в обзоре не упомянуты принципиально важные работы последних двух десятилетий, в частности параметризации семейства COARE.

Во-вторых, детально рассмотренный механизм дробления капель по типу парашют является лишь одним из компонентов воздействия брызг на процессы обмена. Интуитивно, он важен, однако неясно какую относительную роль он играет в формировании суммарного эффекта воздействия капель на формирование потоков скрытого и явного тепла. В этом смысле концепция разделения общего потока энтальпии из океана в атмосферу на компоненты, связанные с тем, что автор называет «прямым» потоком и потоком, порождаемым брызгами (уравнения 3.32, 3.33) вызывает некоторые сомнения, тем более в предположении постоянного (в зависимости от ветра) коэффициента обмена для первого компонента.

В-третьих, отметим также некоторую «селективность» в выборе аппроксимирующих зависимостей и связанных с ними предположений, ориентированную на тропические циклоны. Сильные ветра (иногда и не менее сильные) наблюдаются и в средних широтах, при этом там работают другие механизмы, которые, хоть и не исследуются в работе, но могли бы быть упомянуты.

Наконец, как указывалось выше, концепция генерации начального состояния, предложенная в четвертой главе, представляется недостаточно проработанной, особенно в части подтверждения ее экспериментальными данными. Тут, правда, надо сказать, что сделать это достаточно трудно.

Заключение. Работа и автореферат хорошо подготовлены технически. Высказанные замечания не снижают ценности работы и ни в коей мере не ставят под сомнение достоверность и новизну полученных результатов. Д.С. Козлов известен научной общественности по публикациям и публичным выступлениям. Некоторые результаты диссертации могут напрямую использоваться для улучшения моделей динамики атмосферы в части описания процессов в приводном слое при сильных ветрах. Таким образом, нет сомнений в том, что работа Д.С. Козлова полностью соответствует всем требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее содержание соответствует специальности 25.00.29 – Физика атмосферы и гидросферы.

Данная диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как решение **научной проблемы**, имеющей важное социально-экономическое и народно-хозяйственное значение, что соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Козлов Дмитрий Сергеевич заслуживает присуждения ему ученой степени

кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.29 – Физика атмосферы и гидросферы.

Отзыв рассмотрен и утвержден на заседании Ученого совета физического сектора Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института океанологии им.П.П. Ширшова Российской академии наук (протокол № 11 от «10» сентября 2021 г.)

Главный научный сотрудник Лаборатории взаимодействия океана и атмосферы и мониторинга климатических изменений ИО РАН, член-корр. РАН,
профессор, доктор физико-математических наук (специальность 25.00.28 – океанология)
117997, Москва, Нахимовский пр-т, д.36,
Телефон: +7(910)467-98-52
E-mail: gul@sail.msk.ru

Сергей Константинович Гулев

«10» 11 2021г.

Заместитель директора ИОРАН, член-корреспондент РАН, доктор географических наук (специальность 25.00.28 – океанология)
117997, Москва, Нахимовский пр-т, д.36,
Телефон: +7(916)932-64-52
E-mail: peter@ocean.ru

Петр Олегович Завьялов

«10» 11 2021г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт океанологии им.П.П. Ширшова Российской академии наук (ИО РАН)

Россия, 117997, Москва, Нахимовский пр-т, д.36
Телефон: +7(499)124-61-49
Факс: +7(499)124-59-83
E-mail: office@ocean.ru
Сайт: <https://ocean.ru/>

Подписи Гулева С.К. и Завьялова П.О. заверяю,

Ученый секретарь Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института океанологии им.П.П. Ширшова Российской академии наук

« 10 » ноября 2021 г.



[Handwritten signature]

Фалина А.С.