

*На правах рукописи*



**Куприянова Анастасия Евгеньевна**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРВИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ  
В ПРИПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ МОРЯ**

Специальность 1.6.17 — Океанология

**АВТОРЕФЕРАТ**

Диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Калининград — 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта»

**Научный  
руководитель:**

доктор физико-математических наук, профессор,  
профессор Балтийского федерального университета  
имени Иммануила Канта

**Гриценко Владимир Алексеевич**

**Официальные  
оппоненты:**

**Ингель Лев Ханаанович,**

доктор физико-математических наук, доцент, ведущий  
научный сотрудник Института экспериментальной  
метеорологии Федерального государственного  
бюджетного учреждения «Научно-производственное  
объединение «Тайфун» (Росгидромет)

**Блохина Наталия Сергеевна,**

кандидат физико-математических наук, старший  
научный сотрудник, старший научный сотрудник  
кафедры физики моря и вод суши Физического  
факультета Федерального государственного  
бюджетного образовательного учреждения высшего  
образования «Московский государственный  
университет имени М.В. Ломоносова»

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Российский государственный  
гидрометеорологический университет»

Защита состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г. в \_\_\_ час. \_\_\_ мин. на заседании диссертационного совета 24.1.090.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Института океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук по адресу: Нахимовский проспект, д. 36, г. Москва, 117997

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <http://www.ocean.ru/disser/> Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 года.

Ученый секретарь диссертационного совета  
к.ф.-м.н. *Соловьев Дмитрий Александрович*

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность и степень разработки темы исследования.** Изменение климата на Земле на сегодняшний день рассматривается научным сообществом как одна из глобальных проблем человечества [Лаппо и др., 1990]. Процессы тепло-, массо- и энергообмена на поверхности Мирового океана [Панин, 1985] играют значимую роль в формировании погоды и климата. Известно, что тепломассообмен на границе раздела океан-атмосфера естественным образом дополняется процессами газообмена ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$  и др.) и водяного пара, являющимися факторами формирования климатического равновесия на Земле, а появление на поверхности воды различного рода загрязнений может в разы уменьшать интенсивность газообмена. За счет выхолаживания и осолонения при ледообразовании поверхностных вод в высоких широтах (в морях Ирмингера, Лабрадорском, Уэдделла, Росса) или испарения с поверхности и осолонения в тропиках (Средиземное, Красное, Тиморское моря) происходит формирование тонкого приповерхностного слоя воды с плотностью большей, чем у подстилающих вод [Головин и др., 2011; Гладышев и др., 2016; Stommel, Fedorov, 1967].

Анализ результатов ранее выполненных инструментальных измерений [Морозов и др., 2015] в приповерхностном слое воды в различных акваториях Мирового океана показал наличие флуктуаций плотности (температуры и солености) в этом слое, которые были интерпретированы рядом авторов [Федоров, Гинзбург, 1988] как следствие погружающихся конвективных элементов. Известные результаты лабораторных экспериментов показали, что процесс распространения потока отрицательной плавучести с поверхности моря в глубину происходит в виде погружения случайного ансамбля конвективных элементов.

В дополнение к лабораторным экспериментам развивались аналитическое и численное моделирование конвективных процессов. Для некоторых классов задач были получены полуэмпирические зависимости и оценки изменчивости плотности и динамики конвективного слоя [Скорер, 1980; Джалурия, 1983; Ингель, 2016], которые, используя подходы теории подобия, могли быть перенесены на океанические масштабы. Однако все зависимости и оценки ограничены предположениями о линейной зависимости радиуса конвективных элементов от времени и об осесимметричности их формы, которые лишь частично соответствуют реально

наблюдаемым явлениям. Используемые в современных моделях [Зеленько, Реснянский, 2007] динамики океана методы параметризации механизма вертикального обмена конвективной природы физически неполно оценивают процессы, протекающие в контактных зонах (вода-воздух, вода-лёд). Потому проблема параметризации конвективного перемешивания в крупномасштабных моделях океана, и особенно климатических, по-прежнему важна. Все это позволяет говорить об актуальности рассматриваемых в работе задач.

**Цель работы** заключается в исследовании плотностной структуры и мелкомасштабной динамики приповерхностного слоя моря на начальном этапе конвективных движений при осенне-зимнем выхолаживании с поверхности, изучении изменчивости структуры и процессов перемешивания конвективных элементов при погружении в подстилающие воды методом лабораторного и численного моделирования, изучении процесса осеннего выхолаживания морских вод на примере прибрежной зоны Балтийского моря (у берегов Калининградской области). Для достижения поставленной цели исследования были поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Разработать инфраструктуру выполнения лабораторных экспериментов, включающую процедуры подготовки и подачи растворов, сохранения температурного режима, создания оригинальных входных устройств, которая обеспечит стабильность воспроизведения конвективных элементов. Выполнить обработку данных видеорегистрации процесса погружения конвективных элементов в нижележащие воды.

2. Получить количественные оценки, характеризующие динамику заглубления и перемешивание отдельных конвективных элементов и их ансамбля (конвективного слоя) с окружающей водой.

3. Провести лабораторные эксперименты по формированию конвективных элементов в приповерхностном слое воды при различных величинах начального объема и значения перепада плотности, описать изменчивость их структуры и динамики при погружении в подстилающую воду.

4. Определить необходимые расчетные условия на свободной поверхности жидкости для учета процесса выхолаживания приповерхностного слоя воды в

нелинейной двумерной модели динамики неоднородной по плотности жидкости, а также провести расчеты необходимых характеристик конвективных движений.

5. Проанализировать процесс осеннего выхолаживания воды в Балтийском море у берегов Калининградской области на основе данных измерений термокосы (платформа D-6, Балтийское море) за 2015–2020 гг.

**Научная новизна.** В рамках выполненных исследований впервые:

- удалось выделить два режима осеннего выхолаживания прибрежных вод в подрайоне Юго-Восточной Балтики (у берегов Куршской косы) на основе многолетних инструментальных измерений ( $\Delta t = 1$  минута): типичный (медианная скорость выхолаживания воды:  $0,06 < dT/dt < 0,15$  °C/сутки) и аномальный (скорость выхолаживания воды:  $dT/dt > 0,2$  °C/сутки);
- показана нелинейность начального этапа погружения конвективных элементов (отдельных и в составе ансамбля) на основе анализа результатов лабораторных и численных экспериментов;
- обнаружен эффект переслоенности в поле плотности первичного элемента свободной конвекции при его взаимодействии с окружающей водой;
- разработаны оригинальные входные устройства для формирования в приповерхностном слое воды как отдельных конвективных элементов, так и их ансамбля (конвективного слоя);
- предложена геометрическая модель для единообразия измерения линейных масштабов конвективных элементов в гидрлотке.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Методами лабораторного и численного моделирования показано, что заглупление плотностного фронта конвективного слоя имеет три стадии с различным изменением вертикальной скорости: быстрый рост до максимального значения на начальном этапе (при котором число Фруда  $0 < Fr < 1,1$ ), движение с быстро убывающей скоростью погружения ( $1,1 < Fr < 0,44$ ) и продолжительное по времени погружение с медленно убывающей скоростью ( $0,44 < Fr < 0,1$ ).

2. Обнаружено, что бароклинный механизм порождения завихренности в условиях начала свободной конвекции в зоне контакта вод погружающегося конвективного элемента и окружающей его воды является основным

структурообразующим механизмом динамики конвективных элементов при их смещении с окружающей водой.

3. Комплексный анализ результатов моделирования подтвердил, что динамика конвективных движений носит ламинарный характер. Выявлено, что наблюдающиеся при инструментальных измерениях флуктуации температуры или электропроводности в работах различных авторов порождаются пространственно-временной хаотизацией этих полей за счет случайности зарождения и погружения конвективных элементов, а также за счет эффекта переслоенности при взаимодействии вод элементов с окружающей водой.

4. Впервые установлено, что в условиях сильного шторма возможно аномальное выхолаживание поверхностных вод, определяемое совместным действием ветро-волнового и конвективного перемешивания: скорость выхолаживания воды  $dT/dt \approx 0,9 \text{ }^\circ\text{C/сутки}$  за период шторма (~5 дней); перепад температур на границе раздела воздух-вода (14 и 18  $^\circ\text{C}$ , соответственно) составлял 4  $^\circ\text{C}$  на начало шторма и приближался к нулю по его окончанию с температурой воды и воздуха 7  $^\circ\text{C}$ .

**Степень достоверности научных результатов** обеспечивается тем, что: результаты исследования, полученные в лабораторных экспериментах, физически не противоречивы; применяемые методики проведения лабораторных экспериментов показали регулярную повторяемость экспериментальных течений; методики, примененные в обработке массивов данных, прошли успешную валидацию с результатами других авторов; динамические параметры (скорость погружения, изменчивость линейных размеров) конвективных элементов получены путем прямых измерений с использованием фотоаппаратуры с высоким пространственным разрешением; использовалась ранее апробированная численная модель и стандартные методы статистической обработки временных рядов; временные ряды температуры морской воды с платформы D-6 использовались в работах другими исследователями.

**Теоретическая и практическая значимость.** Полученные в работе результаты дополнили представления о начальном этапе развития свободной конвекции в море. Обнаруженная нелинейность погружения конвективных элементов показала неполноту ранее имевшихся представлений. Разработанные подходы проведения лабораторных экспериментов могут быть использованы для планирования экспериментов при изучении конвективных процессов в воде. Результаты

лабораторных экспериментов и расчетов могут найти свое применение в решении задач параметризации процессов выхолаживания воды с поверхности в крупномасштабных численных моделях циркуляции океана и атмосферы, а также в алгоритмах реконструкции температуры поверхности океана при дистанционных измерениях. Анализ долгопериодного измерения температуры прибрежных вод Балтийского моря у Куршской косы показал существование двух различных режимов выхолаживания — типичного и аномального, что может быть использовано в прогнозировании гидрологических характеристик морских вод региона.

**Методология и методы исследования.** Данная работа основана на использовании методологии механики сплошной среды при постановке и интерпретации лабораторных и численных экспериментов. Численные методы использовались как вспомогательные средства, которые позволяли выполнять интерпретацию течений, полученных в лабораторных условиях.

**Личный вклад автора.** А.Е. Куприянова принимала личное участие во всех этапах выполнения исследования, включая лабораторные эксперименты. Лично автором: выполнена видеорегистрация процесса формирования и эволюции плотностной неоднородности в приповерхностном слое воды гидрлотка на цифровые камеры; проведена компьютерная обработка массивов экспериментальных данных по эволюции плотностной неоднородности с различным по величине перепадом плотности; оценены горизонтальные и вертикальные масштабы размеров конвективных элементов при помощи разработанной геометрической модели; сопоставлены результаты экспериментов по формированию отдельных конвективных элементов и их ансамбля (конвективного слоя) в поверхностном слое воды; выполнено планирование численных экспериментов, включая формулировку требований к расчетным условиям на границах модельного пространства. Автором совместно с научным руководителем выполнено: планирование и подготовка экспериментов в гидрлотке; численные расчеты на нелинейной двумерной модели динамики неоднородной по плотности жидкости; сравнительный анализ результатов лабораторных и численных экспериментов с уже известными результатами; подготовка временных рядов с термокосы на платформе D-6 (Балтийское море), их анализ и интерпретация. Соискателем совместно с соавторами обеспечивалась подготовка полученных результатов к публикации в статьях в рецензируемых научных

изданиях, а также в тезисах устных докладов автора на всероссийских и международных конференциях.

**Апробация работы.** Результаты диссертационного исследования были представлены 10 ноября 2023 г. и 19 апреля 2024 г. на заседании Ученого Совета Физического направления Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, на международных и российских научных конференциях (11 устных и 4 стендовых докладов): V, VI и VII Всероссийской научной конференции молодых ученых — «КИМО», Калининград, 2020, Москва, 2021 и Санкт-Петербург, 2023 гг.; Шестой, седьмой и восьмой международной научной конференции-школе молодых ученых, «Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах», Москва, 2020–2022 гг.; IV и V Юбилейной Всероссийской конференции «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития» имени Л.Н. Карлина и II Конференции «Авиационная и спутниковая метеорология 2021», Санкт-Петербург, 2020–2021 гг.; XI Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU-2022)», Москва, 2022; 13-ой и 14-ой международной конференции-школе молодых ученых, «Волны и вихри в сложных средах», Москва, 2022–2023 гг.; Всероссийской конференции с международным участием «XXIX Береговая конференция: Натурные и теоретические исследования – в практику берегопользования», Калининград, 2022 г.; X Международном Балтийском морском форуме, Калининград, 2022 г.; XVIII Международной научно-технической конференции, «Современные методы и средства океанологических исследований (МСОИ)», Москва, 2023 г.; I Всероссийской научно-практической конференции, «Гидрометеорология и физика атмосферы: современные достижения и тенденции развития», Санкт-Петербург, 2023 г. Ряд задач исследования были решены при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-27-00150, исполнитель), <https://rscf.ru/project/23-27-00150/>).

**Публикации.** По теме диссертационного исследования опубликованы 22 работы, в том числе 5 статей в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК, 1 статья в монографии, 3 статьи в сборниках трудов конференций, 13 тезисов докладов на российских и международных научных конференциях.

**Благодарности.** Автор благодарит научного руководителя д.ф.-м.н. профессора Гриценко Владимира Алексеевича за постановку задачи, помощь в работе и



замечания, выражает признательность заведующей Лаборатории физики моря, д.ф.-м.н. Чубаренко Ирине Петровне за помощь и ценные советы в работе, искренне признателен заведующему Лабораторией экспериментальной физики океана, д.ф.-м.н. Зацепину Андрею Георгиевичу за обсуждение результатов исследования. Российскому научному фонду – за поддержку проекта по теме, близкой к диссертационному исследованию (проект № 23-27-00150, <https://rscf.ru/project/23-27-00150/>).

**Структура и объем диссертации.** Диссертационное исследование состоит из Введения, 3-х глав и Заключения. В работе содержится 63 иллюстрации и 4 таблицы. В работе цитируется 169 источников. Общий объем диссертации составляет 135 страниц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** сформулированы и обоснованы актуальность, научная новизна и практическая значимость исследования, а также сформулированы его основная цель, конкретные задачи и положения, выносимые на защиту, личный вклад автора и апробация полученных результатов.

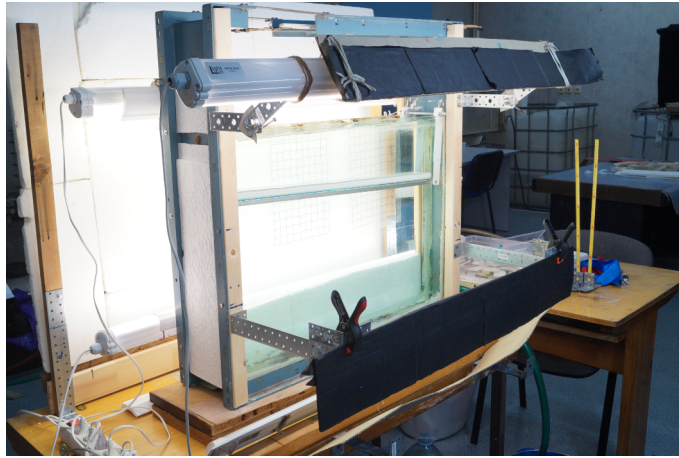
В **Главе 1** приводится обзор современного состояния исследований термогравитационной конвекции и конвективного перемешивания в приповерхностном слое моря, выбраны основные направления диссертационного исследования. В **разделе 1.1** даны описания натуральных примеров существования приповерхностной конвекции в некоторых акваториях Мирового океана, свидетельствующие о распространенности и многообразии явления. При повествовании обращалось внимание на разнообразие физических механизмов (охлаждение, испарение, осадки, льдообразование) возникновения приповерхностной конвекции в океане. В **разделе 1.2** приводится краткий обзор результатов ранее выполненных лабораторных и численных исследований свободной конвекции в приповерхностном слое воды. Описаны результаты лабораторных экспериментов различных авторов, в которых акцентировалось внимание на основных чертах естественной конвекции: структура, линейные размеры и масштабы времени, перемешивание, характерные значения безразмерных параметров (числа Релея, Нуссельта, Рейнольдса, Прандтля), изменчивость перепада плотности ( $\Delta\rho$ ) и другие параметры процесса. Лабораторные исследования показали, что процесс

проникновения потока отрицательной плавучести с поверхности в глубину происходит в виде погружения случайного ансамбля конвективных элементов. Трудности проведения инструментальных измерений в контактной зоне вода–воздух привели к фрагментарности описания изменчивости термической структуры и динамики приповерхностного слоя при выхолаживании воды с поверхности. Ранее выполненные исследования позволили описать структуру и динамику неоднородной по плотности жидкости в вертикальной плоскости, исходя из предположений о линейной зависимости радиуса конвективных элементов от времени и осесимметричности их формы. Однако в данной постановке конвективные процессы лишь частично соответствуют реально наблюдаемым явлениям. Используемые в настоящее время методы параметризации механизма вертикального обмена в океанических моделях могут приводить к недооценке динамических процессов, протекающих в прибрежной части или у ледяного покрова.

**В завершающей части Главы 1** сделаны выводы, обосновывающие постановку задачи и выбранных подходов (лабораторный и численный эксперимент) к их решению. Была также сформулирована последовательность этапов в изучении свободной конвекции: исследование особенностей структуры и динамики отдельных конвективных элементов; исследование структуры и динамики слоя воды, охваченного конвективными движениями; анализ процесса осеннего выхолаживания прибрежных вод Балтийского моря в окрестности платформы D-6; изучение особенностей вдольсклоновых движений конвективных элементов.

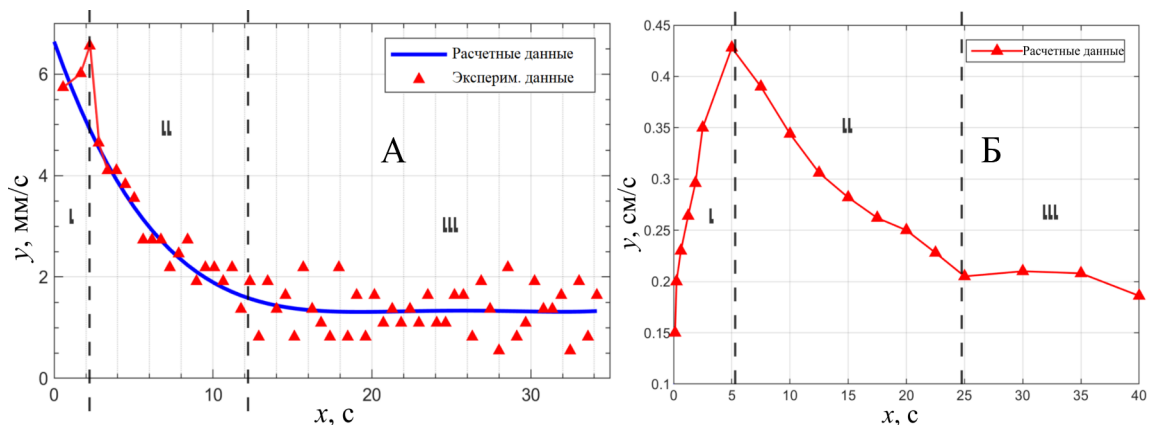
Во **второй главе** изложены результаты лабораторного и численного моделирования структуры и динамики отдельных конвективных элементов и их ансамбля (конвективного слоя) при их погружении. В **разделе 2.1** приводится описание лабораторной установки (гидролоток, рис. 1), оригинальных входных устройств для создания исследуемых объектов, которые позволили добиться повторяемости объектов исследования, методики проведения экспериментов, а также описание нелинейной двумерной модели неоднородной по плотности жидкости [Kupriyanova, Gritsenko, 2023]. В **разделе 2.2** описаны общие черты эволюции первичных элементов (малых объемов воды с избыточной плотностью) свободной конвекции при их погружении в подстилающую однородную по плотности воду. В результате лабораторных и численных экспериментов были описаны этапы

трансформации конвективных элементов и проведен анализ динамики их погружения. Диапазоны скорости погружения оказались в пределах от 0,5 и до 8 мм/с.



**Рисунок 1** — Общий вид гидролотка с системой освещения. На задней стенке закреплена калибровочная сетка 2×2 см

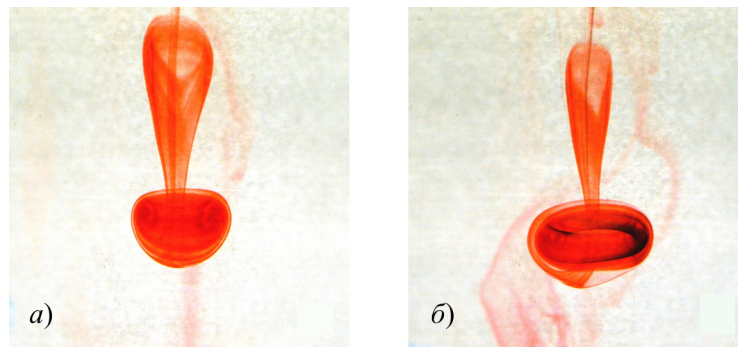
Показано, что процесс погружения конвективных элементов на начальном этапе носит нелинейный характер (рис. 2) и его развитие во времени может быть подразделено на три этапа: начальный рост вертикальной скорости погружения (самый быстрый по времени), заметное уменьшение скорости, малое по величине и продолжительное по времени уменьшение скорости.



**Рисунок 2** — Графики зависимости вертикальной скорости от времени погружения одного из конвективных элементов на основании: А — данных из лабораторного эксперимента, Б — численного эксперимента [Kupriyanova, Gritsenko, 2023]

Расчетные течения продемонстрировали скорости погружения в пределах наблюдаемых оценок в лабораторной экспериментах (первые см/с). Изменения

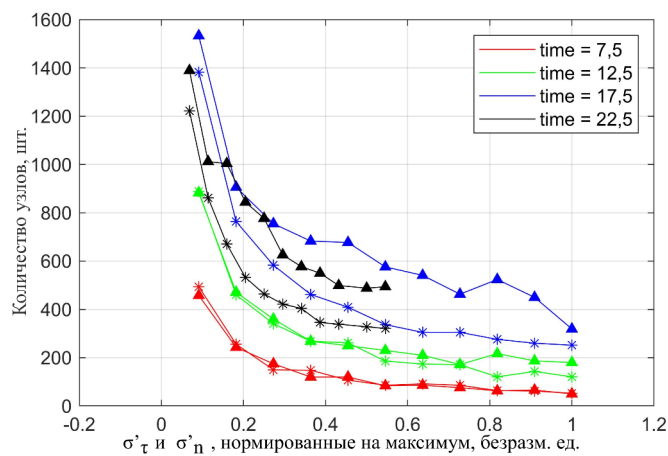
вертикальной скорости погружения конвективных элементов в лабораторных и численных экспериментах показали хорошее качественное согласие. Предложено обоснование скачка скорости на начальном этапе погружения с помощью анализа полей расчетных течений. В разделе 2.3 изложены результаты изучения эволюции плотностной структуры первичных элементов конвекции в процессе их погружения. Результаты лабораторных экспериментов показали (рис. 3), что при погружении отдельного конвективного элемента происходит его смешение с окружающей водой. В результате работы механизма завихренности бароклинной природы происходит спиралевидный захват окружающей пресной воды внутрь конвективного элемента, что приводит к хаотизации его поля плотности.



**Рисунок 3** — Погружение двух конвективных элементов при начальном объеме  $\sim 2$  мл и  $\Delta\rho = 0,0001$  г/см<sup>3</sup> [Куприянова, Гриценко, 2023а]

Расчет градиентов поля плотности вдоль и поперек линий тока показал переслоенность в поле плотности внутри конвективных элементов на начальных этапах погружения. На рисунке 4 по вертикальной оси — количество узлов расчетной сетки (от 80 до 1533), соответствующей десяти интервалам значений градиентов плотности вдоль (треугольники) и поперек (звездочки) линий тока, по горизонтальной оси — нормированные на максимум значения градиентов плотности. Момент безразмерного времени  $\text{time} = i \cdot \Delta t$ , где  $i$  — итерационный шаг,  $\Delta t = 0,5 \cdot \Delta x^2$  — шаг по времени,  $\Delta x = \Delta z = 0,05$  — величины безразмерной пространственной дискретизации. На графике отмечается наличие узлов с большими значениями градиента плотности, количество которых растет со временем от 50 до 600 шт при значении расчетного времени  $\text{time} = 7,5$  и  $17,5$ , соответственно. На более поздних стадиях ( $\text{time} = 22,5$ ) погружения их количество сокращается под действием молекулярной диффузии.

Для квазивертикальных и квазигоризонтальных участков течения были получены оценки критерия сдвиговой неустойчивости (чисел Рейнольдса и Ричардсона). Числа Рейнольдса оказались малы (первые единицы), что позволило говорить о ламинарном характере исследуемого течения. Значения чисел Ричардсона показали потенциальную устойчивость для большей по пространству части стратифицированного по плотности течения. Таким образом, наблюдаемые в инструментальных и лабораторных измерениях флуктуации плотности различных авторов могут возникать в результате эффекта переслоенности плотности внутри отдельных конвективных элементов при их смешении с окружающей водой.



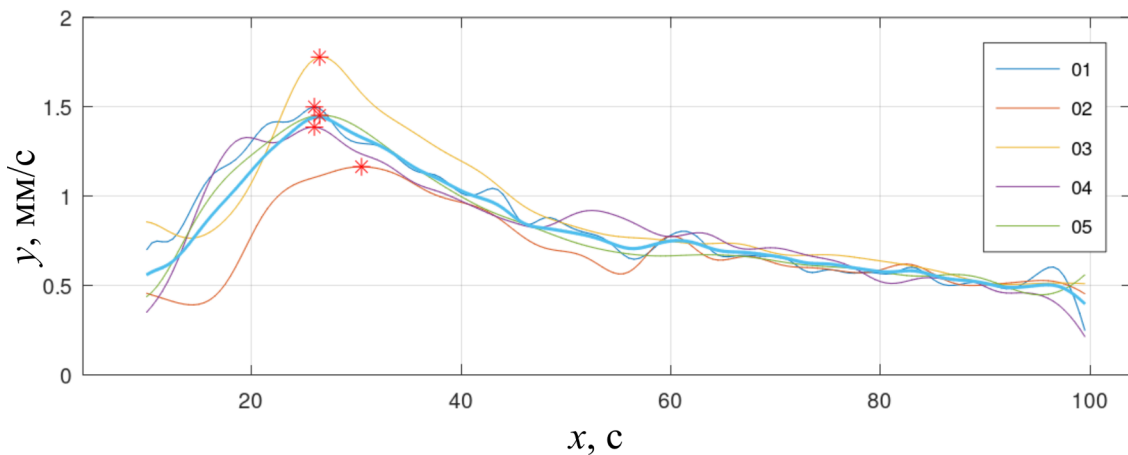
**Рисунок 4** — Гистограмма распределения значений градиентов поля плотности для четырех фаз погружения элемента [Куприянова, Гриценко, 2023а]

**Раздел 2.4** посвящен изучению поведения ансамбля погружающихся конвективных элементов (конвективного слоя) как аналога естественной конвекции в океане. Приводится краткий обзор результатов лабораторных и численных экспериментов по изучению такого рода процессов. Как и для случая отдельных конвективных элементов, оказалось, что каждый элемент из ансамбля погружается по схеме [Kupriyanova, Gritsenko, 2023] с тремя скоростными режимами (см. рис. 5).

Для получения оценок динамики конвективного слоя была разработана геометрическая модель, которая позволила единообразно выполнять измерения вертикальных и горизонтальных размеров конвективных элементов. Основным параметром, влияющим на изменение вертикальной скорости, оказалась начальная толщина конвективного слоя. Прямые измерения в гидрлотке подтвердили

значимость начальной толщины слоя в интенсификации конвективных движений [Тернер, 1977].

Для описания эволюции пограничного слоя с гидростатически неустойчивым распределением плотности в модели [Волкова, Гриценко, 2019] на верхней границе модельного пространства использовалось условие твердой крышки со скольжением. Учет потока отрицательной плавучести задавался в пяти верхних расчетных слоях, где плотность задавалась линейным профилем со случайной малой (в 4–5 знаке) добавкой плотности на каждом из узлов.



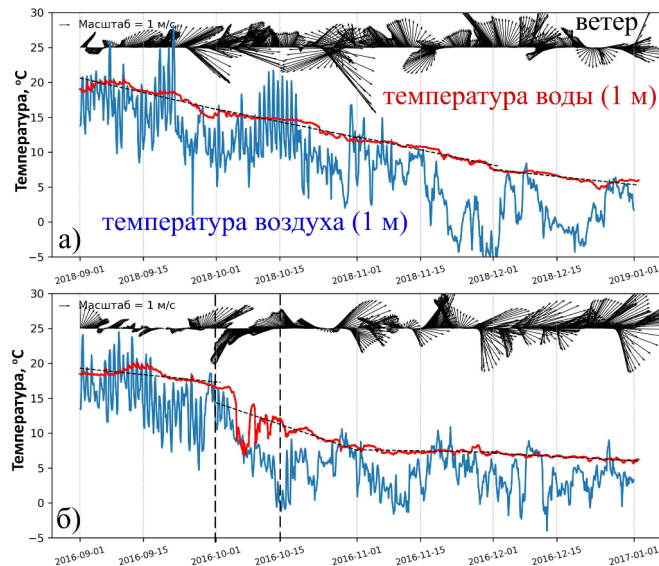
**Рисунок 5** — График вертикальной скорости в каждый момент времени для конвективных элементов из ансамбля (синяя жирная линия – скорость погружения ансамбля)

Модельные расчеты показали качественно близкую картину к наблюдаемому процессу в лотке. Расчеты скорости погружения на модели проводились по данным значений глубины средней плотности фронта ансамбля конвективных элементов. Полученные показатели скорости оказались близкими к наблюдаемым в лабораторных экспериментах.

**Выводы по Главе 2.** В лабораторных экспериментах зарегистрирован скачок вертикальной скорости погружения первичного элемента свободной конвекции на начальном этапе (на 4–9 секунде), затем происходит быстрое уменьшение скорости и дальнейшее медленное и продолжительное убывание скорости. Максимальное и среднее значения скорости погружения отдельных конвективных элементов составляют, соответственно, 6,5 мм/с и ~1,8 мм/с при перепаде плотности  $10^{-4}$  г/см<sup>3</sup> и объеме 2 мл. При увеличении объема на 1 мл (т. е. общий объем – 3 мл) средняя

скорость погружения элемента увеличивается в 1,5 раза. Вертикальная скорость погружения конвективного слоя при его начальной толщине 3–5 мм — до 1,5 мм/с. В лабораторных экспериментах хорошо различимы высокоградиентные слои в поле плотности конвективного элемента, а малые скорости погружения элемента (первые мм/с) подтверждают ламинарный характер движения воды.

**Глава 3** посвящена анализу процесса осеннего выхолаживания вод в прибрежной зоне Балтийского моря. В лабораторных и численных экспериментах рассмотрен случай, когда формирующиеся в приповерхностном слое воды первичные элементы свободной конвекции могут достигать склона дна и начинать движение по нему. В **разделе 3.1** приводятся результаты анализа данных натурных наблюдений в Балтийском море за 2015–2020 гг. (рис. 6), полученных при помощи датчиков термоксы с платформы D-6, расположенной в 22,5 км от берега Куршской косы. Дополнительно были использованы спутниковые данные ТПО (Meteor-A), метеостанции в Пионерском и данные реанализа (NOAA). Анализ всего объема данных позволил выделить существование двух режимов выхолаживания: типичный и аномальный.

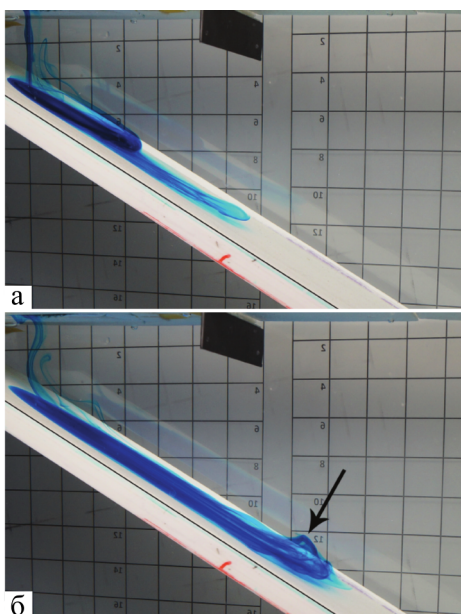


**Рисунок 6** — Изменение температуры воздуха (синий цвет), воды (красный цвет), силы и направления ветра (черные стрелки) для типичного (2018, а) и аномального (2016, б) режимов выхолаживания приповерхностного слоя прибрежных вод Юго-Восточной Балтики [Куприянова и др., 2023]

В период с сентября по декабрь в 2017–2019 гг. метеоусловия способствовали охлаждению всей толщи воды с медианной скоростью выхолаживания воды:



$0,06 < dT/dt < 0,15$  °C/сутки. Такой характер охлаждения воды был классифицирован как типичный. В 2016 г. при штормовых условиях был обнаружен короткий период времени (с 5 октября по 9 октября) со скачкообразным изменением температуры воды с 17 до 7 °C, изменением температуры воздуха с 20 до -2 °C, медианной скоростью выхолаживания воды  $dT/dt \approx 0,9$  °C/сутки за период шторма. Такой режим выхолаживания был определен как аномальный (на рис. 6 выделен вертикальными пунктирными линиями), природа которого определяется сочетанием ветро-волнового и конвективного перемешивания в штормовых условиях. На рисунке 6 приведены графики изменения температуры воды и воздуха и линии месячных трендов (пунктирные линии) в изменении температуры воды для периодов с сентября по январь. В **разделе 3.2** лабораторные эксперименты со склоном дна показали, что при последовательном формировании у поверхности конвективных элементов с перепадом плотности, соответствующим условиям Балтийского моря, они достигают склона дна. Выделены этапы движения конвективных элементов по склону дна и их объединение в единый объект, продолжающий движение по склону дна (рис. 7).



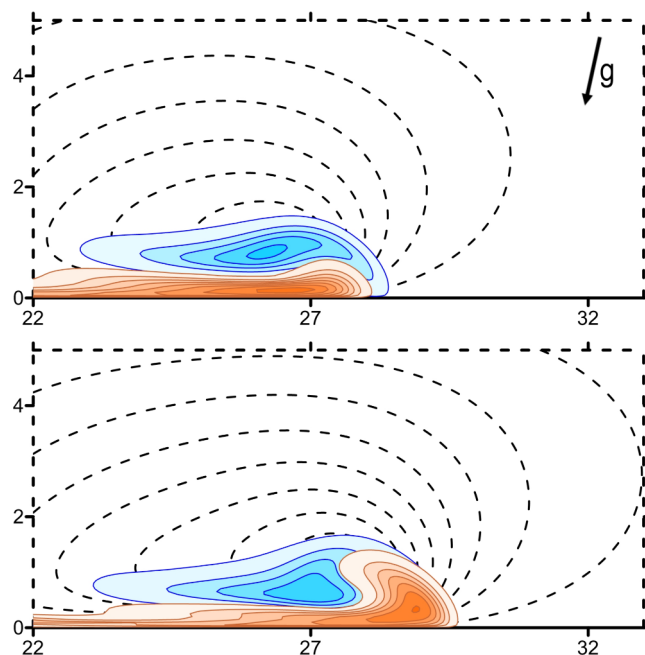
**Рисунок 7** — Достижение конвективными элементами склона дна и их объединение в единый объект [Куприянова, Гриценко, 2021a, рис. 6]

Приведены результаты наблюдения за особенностями динамики части объемов конвективных элементов при их движении вверх по склону дна (рис. 8) с малым углом наклона ( $4^\circ$ ), что близко к морфологии отмелей берегов Балтийского моря.



Фоторегистрация последовательных этапов погружения конвективных элементов и модельные расчеты позволили выделить основные этапы их движения на мелководье: погружение первого элемента (синий, рис. 8) и второго элемента (красный, рис. 8) до склона, движение их вод вниз и частично вверх по нему; вытеснение от дна первого элемента; их вихревое движение и обрушение совместных вод элементов на склон дна. В зоне контакта двух конвективных элементов также наблюдалась переслоенность их вод.

**Выводы по Главе 3.** Анализ многолетних измерений в Балтийском море за 2015–2020 гг. позволил выделить типичный и аномальный режимы выхолаживания прибрежных вод. Лабораторные и численные эксперименты со склоном дна показали возможность достижения конвективными элементами склона дна и формирования вдольсклонового плотностного течения. Выявлены особенности структуры и динамики взаимодействующих между собой конвективных элементов на склоне дна при их движении как вниз, так и вверх по склону.



**Рисунок 8** — Взаимодействие конвективных элементов, двигающихся вверх по склону дна

[Куприянова, Гриценко, 2022a]

В **Заключении** приведены основные результаты диссертационной работы:

1. Разработана инфраструктура выполнения лабораторных экспериментов — оригинальные входные устройства, процедуры подготовки и подачи рабочих

растворов, вариативные подсветка и видеорегистрация, — которая обеспечивает стабильность и повторяемость формирования конвективных элементов в приповерхностном слое воды.

2. Вертикальная скорость погружения отдельных конвективных элементов (начальным объемом до 3 мл) с перепадом плотности, характерным для морских условий ( $10^{-4}$  г/см<sup>3</sup>), достигает первых см/с. Скорость погружения плотностного фронта конвективного слоя (с начальной толщиной до 5 мм) при перепаде плотности ( $10^{-4}$  г/см<sup>3</sup>) объемом около 3 мл достигает первых мм/с. При этом максимальные зафиксированные значения числа Рейнольдса для отдельных конвективных элементов — 70.

3. Анализ полученных оценок критерия сдвиговой неустойчивости (чисел Ричардсона и Рейнольдса) конвективных движений в условиях начала свободной конвекции и отсутствия мелкомасштабной фоновой турбулентности позволил предположить, что наблюдаемые флуктуации плотности в инструментальных измерениях морской воды возникают в результате доминирования адвективно-вращательного взаимопроникновения воды конвективного элемента и окружающей его воды над процессом молекулярной диффузии.

4. Малые скорости заглубления плотностного фронта конвективного слоя и длительное сохранение высокоградиентных слоев в зоне контакта конвективного элемента с окружающей средой подтверждают ламинарный характер течений, возникающих в лабораторных экспериментах.

5. Определены необходимые расчетные условия на свободной поверхности жидкости для учета процесса выхолаживания приповерхностного слоя воды в нелинейной двумерной модели неоднородной по плотности жидкости: условие твердой крышки со скольжением жидкости на свободной поверхности, линейное распределение добавочной плотности для верхних слоев расчетной сетки, случайная добавка плотности в 4–5 знака для каждого расчетного узла в этих слоях. Проведены расчеты: поля завихренности, функции тока, добавочной плотности, градиенты поля плотности вдоль/поперек линий тока, градиенты поля давления, модуль вертикальной и горизонтальной скорости.

6. При формировании вдольсклонового движения конвективных элементов оказалось, что следующий по времени запуска элемент с тем же начальным объемом и перепадом плотности при движении по склону дна всегда догоняет предыдущий.

7. Анализ результатов лабораторных экспериментов и модельных расчетов по взаимодействию части вод конвективных элементов, движущихся вверх по склону дна, показал наличие этапа «обрушения» воды элементов. Данный этап может увеличивать степень динамического смешения конвективных элементов с окружающей водой и способствовать более быстрому выхолаживанию прибрежных морских вод по сравнению с открытой частью моря.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Статьи, опубликованные в изданиях из перечня ВАК:*

1. **Куприянова А.Е.**, Гриценко В.А. Бароклинный фактор в смешении воды погружающегося термика с окружающей его водой // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2023. Т. 16. № 4. С. 8–17. doi: 10.59887/2073-6673.2023.16(4)-1

2. **Куприянова А.Е.**, Гриценко В.А. Падение пятен солёной воды на наклонное дно в окружении пресной: динамика и структурные особенности распространения плотностного фронта вверх по склону // *Океанологические исследования*. 2022. Т. 50. № 2. С. 106–124. doi: 10.29006/1564-2291.JOR-2022.50(2).5

3. **Куприянова А.Е.**, Гриценко В.А., Килесо А.В., Коробченкова К.Д. О типичном и аномальном режимах выхолаживания морских вод в прибрежной зоне Куршской косы // *Гидрометеорология и экология*. 2023. № 73. С. 666–683. doi: 10.33933/2713-3001-2023-73-666-683

4. **Куприянова А.Е.**, Гриценко В.А. Лабораторное и численное исследование особенностей процесса выхолаживания воды с поверхности в прибрежных водах // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2021. Т. 57. № 4. С. 484–494. doi: 10.31857/S0002351521040076

5. **Куприянова А.Е.**, Гриценко В.А. Особенности плотностной структуры импульсных вдольсклоновых течений конвективной природы // *Процессы в геосредах*. 2021. № 4 (30). С. 1383–1392.

*Главы в монографиях:*

6. **Kupriyanova A.E.**, Gritsenko V.A. Experimental estimates of the rate of deepening of individual thermals. In: Chaplina, T. (eds) *Processes in GeoMedia—Volume*

VII. Springer Geology. Springer, Singapore. 2023. P. 139–152. doi: 10.1007/978-981-99-6575-5\_13

*Статьи в сборниках трудов конференции:*

7. **Куприянова А.Е.**, Гриценко В.А. Лабораторное и численное моделирование присклоновых конвективных процессов // Труды IV Всероссийской конференции «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития»/MGO 2020 имени Л. Н. Карлина. СПб.: ХИМИЗДАТ, 2020. С. 216–219.

8. **Куприянова А.Е.**, Гриценко В.А. Лабораторное и численное моделирование взаимодействия пятен соленой воды при их погружении в пресной // Сборник трудов V Юбилейной Всероссийской конференции "Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития" имени Л.Н. Карлина – Издательство «Перо», 2021. С. 206–216.

9. **Куприянова А.Е.**, Гриценко В.А. Различные формы проявления неустойчивости конвективной природы в приповерхностном слое моря // Труды XI Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU)-2022» Том II (IV): [сборник]. Тверь: ООО «ПолиПРЕСС». 2022. С. 280–284. ISBN 978-5-6049290-2-5.

*Тезисы докладов на российских и международных научных конференциях:*

10. **Куприянова А.Е.**, Гриценко В.А. Лабораторное и численное моделирование присклоновых конвективных процессов // Комплексные исследования Мирового океана : Материалы V Всероссийской научной конференции молодых ученых, Калининград, 18–22 мая 2020 года. – Калининград: Атлантическое отделение федерального государственного бюджетного учреждения науки "Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук", 2020. С. 104–105.

11. **Куприянова А.Е.**, Гриценко В.А. Численное моделирование взаимодействия пятен соленой воды, распространяющихся по склону дна // Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах : Шестая международная научная конференция-школа молодых ученых, Москва, 21–23 октября 2020 года. Москва: ООО "Принт Про", 2020. С. 137–138.

12. **Куприянова А.Е.**, Гриценко В.А. Изменчивость средних характеристик вдольсклоновых импульсных плотностных течений конвективной природы // Комплексные исследования Мирового океана. Материалы VI Всероссийской научной конференции молодых ученых, г. Москва, 18–24 апреля 2021 г. Москва: Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 2021, С. 110–111. doi:10.29006/978-5-6045110-3-9

13. **Куприянова А.Е.,** Гриценко В.А. Численное и лабораторное моделирование движения пятен соленой воды в двухслойной жидкости // Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах : Седьмая международная научная конференция-школа молодых ученых; 20–22 октября 2021 г., Москва: Материалы конференции. М.: ИПМех РАН, 2021. С. 162–165.

14. **Куприянова А.Е.** Лабораторные и численные эксперименты по выхолаживанию воды с поверхности // Материалы X Международного Балтийского морского форума 26 сентября – 1 октября 2022 года [Электронный ресурс]: в 7 томах. Том 6. «Инновации в профессиональном и дополнительном образовании» Электрон. дан. Калининград: Издательство БГАРФ ФГБОУ ВО «КГТУ», 2022. С. 193–198.

15. **Куприянова А.Е.,** Гриценко В.А. Геометрия поля давления при взаимодействии погружающихся пятен конвективной природы // Волны и вихри в сложных средах: Сборник материалов 13-ой международной конференции - школы молодых ученых, Москва, 30 ноября – 02 декабря 2022 г. Москва: ООО «ИСПО-принт», 2022. С. 151–154.

16. **Куприянова А.Е.,** Гриценко В.А. Особенности строения спутного следа за погружающимся термиком // Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах: Материалы 8-й Международной научной конференции-школы молодых ученых, Москва, 12–14 октября 2022 года. Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Принт Про", 2022. С. 185–186.

17. **Куприянова А.Е.,** Гриценко В.А. Тонкая структура динамики вод при сезонной конвекции // Сборник материалов Всероссийской конференции с международным участием «XXIX Береговая конференция: Натурные и теоретические исследования – в практику берегопользования», Калининград, 18–24 апреля 2022 г. Калининград: Изд-во «БФУ им. И. Канта». 2022. С. 225–227. ISBN 978-5-9971-0709-3.

18. **Куприянова А.Е.,** Гриценко В.А. Экспериментальное изучение динамики объемов с отрицательной плавучестью: количественные характеристики // Комплексные исследования Мирового океана. Материалы VII Всероссийской научной конференции молодых учёных, г. Санкт-Петербург, 15–19 мая 2023 г. Санкт-Петербург: Своё издательство, 2023. С. 105–106. ISBN 978-5-4386-2269-7.

19. **Куприянова А.Е.,** Гриценко В.А. Лабораторные исследования приповерхностной конвекции // Современные методы и средства океанологических исследований (МСОИ-2023): Материалы XVIII международной научно-технической конференции, Москва, 23–25 мая 2023 года / Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН. Том 2. Москва: ИО РАН, 2023. С. 99–102.

20. **Куприянова А.Е.**, Гриценко В.А. О смешении вод погружающегося термика и подстилающих вод // Гидрометеорология и физика атмосферы: современные достижения и тенденции развития: Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 21–23 марта 2023 года. Санкт-Петербург: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2023. С. 263–265.

21. Коробченкова К.Д., **Куприянова А.Е.**, Килесо А.В. Гидрометеорологические условия выхолаживания поверхностных вод юго-восточной части Балтийского моря // Гидрометеорология и физика атмосферы: современные достижения и тенденции развития: Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 21–23 марта 2023 года. Санкт-Петербург: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2023. С. 255–258.

22. **Куприянова А.Е.**, Гриценко В.А. О форме плотностной неустойчивости приповерхностной конвекции // Многофазные системы. 2023. Т. 18. № 4. С. 263–265. doi: 10.21662/mfs2023.4.076