



DOI [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18\(4\)-1](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18(4)-1)

EDN <https://elibrary.ru/cyrcyk>

УДК 532.51; 532.54

© A. A. Родионов, Р. Е. Ванкевич\*, А. А. Лобанов, Н. Н. Шпилев, 2025

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36

\*rvankevich@mail.ru

**Моделирование конвективных вихревых структур на склоне: от зарождения  
и распространения в стратифицированной среде до взаимодействия с внутренними волнами.  
Физический эксперимент в термостратифицированном бассейне**

Статья поступила в редакцию 04.09.2025, после доработки 01.12.2025, принятая в печать 05.12.2025

**Аннотация**

В термостратифицированном бассейне СПбФ ИО РАН исследуется уединённое гравитационное течение над наклонным дном. В рамках приближенного к реальным природным условиям лабораторного эксперимента проведены предварительные исследования сложных, нелинейных процессов взаимодействия придонного плотностного течения, стратификации и внутренних волн. Рассматривается полный жизненный цикл образующихся вихревых структур: от зарождения на склоне, развития и распространения в стратифицированной среде до их взаимодействия с полем внутренних волн. В ходе экспериментов получены эмпирические данные для верификации негидростатической модели с пространственным разрешением, позволяющим явным образом воспроизводить отдельные конвективные струи и вихри.

**Ключевые слова:** лабораторный бассейн, склоновая конвекция, внутренние волны, методы визуализации течений

© A. A. Rodionov, R. Ye. Vankevich\*, A. A. Lobanov, N. N. Shpilev, 2025

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, 36 Nakhimovsky Prospekt, Moscow 117997, Russia

\*rvankevich@mail.ru

**Modeling of convective vortex structures on a slope: from generation and propagation  
in a stratified medium to interaction with internal waves. Experiment in laboratory tank**

Received 04.09.2025, Revised 01.12.2025, Accepted 05.12.2025

**Abstract**

A solitary gravitational current over an inclined bottom is being investigated in the thermostratified laboratory tank of the SPb IO RAS. In the framework of a laboratory experiment close to real natural conditions, preliminary studies of complex, nonlinear processes of interaction of the bottom density flow, stratification and internal waves were carried out. The full life cycle of the formed vortex structures is considered: from their origin on a slope, development and propagation in a stratified environment, to their interaction with the field of internal waves. During the experiments, empirical data were obtained to verify a non-hydrostatic model with a spatial resolution that allows explicit reproduction of individual convective jets and vortices.

**Keywords:** laboratory tank, slope convection, internal waves, current visualization methods

---

**Ссылка для цитирования:** Родионов А.А., Ванкевич Р.Е., Лобанов А.А., Шпилев Н.Н. Моделирование конвективных вихревых структур на склоне: от зарождения и распространения в стратифицированной среде до взаимодействия с внутренними волнами. Физический эксперимент в термостратифицированном бассейне // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2025. Т. 18, № 4. С. 8–19. EDN CYRCYK. [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18\(4\)-1](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18(4)-1)

**For citation:** Rodionov A.A., Vankevich R.Ye., Lobanov A.A., Shpilev N.N. Modeling of convective vortex structures on a slope: from generation and propagation in a stratified medium to interaction with internal waves. Experiment in laboratory tank. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2025;18(4):8–19. [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18\(4\)-1](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18(4)-1)

## 1. Введение

Современные климатические прогнозы содержат значительную неопределенность, связанную с параметризацией ряда явно неразрешаемых крупной расчетной сеткой мелкомасштабных физических процессов, таких как субмезомасштабные турбулентные вихри или конвективные потоки в прибрежных зонах океана. Одна из распространенных процедур калибровки параметризаций заключается в изменении параметров эмпирическим путем таким образом, чтобы климатическая модель воспроизводила климат 20-го века [1], в течение которого доступны глобальные наблюдения. Откалиброванная на основе исторических данных модель затем может использоваться для экстраполяции в будущее. Более рациональный подход к параметризации таких «подсеточных» процессов заключается в выводе законов масштабирования, которые связывают суммарный эффект таких процессов с переменными, разрешаемыми моделями общей циркуляции океана. Затем законы масштабирования проверяются либо натурными наблюдениями [2, 3], либо лабораторными экспериментами [4, 5], либо результатами моделирования с высоким разрешением, позволяющим явным образом разрешать крупные вихри [6–9].

Натурные наблюдения из-за логистических сложностей и высокой стоимости проведения множества полевых экспериментов не могут в полной мере служить исчерпывающим источником данных для параметризации подсеточных процессов (Large Eddy Simulation, LES). Лабораторные установки также имеют свои ограничения из-за времени и трудозатрат, необходимых для настройки лабораторного оборудования. Если учесть также значительные требования к вычислительным ресурсам и необходимость тонкой донастройки LES моделей, то можно констатировать, что современные параметризации редко тестируются в широком диапазоне возможных сценариев, снижая точность прогнозов особенно в региональном и локальном масштабах. Вместе с тем для прибрежных регионов важна именно региональная и локальная информация для принятия более эффективных решений и планирования морской деятельности.

Для преодоления описанных ограничений авторы предлагают комбинированный подход, предлагающий совместное использование LES и лабораторного моделирования для разработки различных типов параметризаций: автоматическая калибровка параметров с использованием Бейсовых подходов [10] или обучение нейросетей. Как правило, для оценки оптимальных значений параметров и проверки их применимости в различных сценариях необходимо провести большое количество симуляций LES. За последние несколько лет вычислительные ограничения стали гораздо менее строгими благодаря сочетанию новых компьютерных архитектур, таких как графические процессоры (GPU) и новых языков программирования, использующих преимущества этих архитектур (например, Julia) [11], и усовершенствованных алгоритмов моделирования крупных вихрей (LES) [12, 13]. Современные вычислительные ресурсы открыли возможность запуска библиотек симуляций LES для изучения широкого спектра возможных сценариев, при этом LES модель должна быть тщательно верифицирована на результатах «опорных» лабораторных экспериментов, предлагающих исчерпывающий набор 4-х мерных пространственно-временных массивов с достаточной степенью детализации параметризуемого явления. Желательно также, чтобы код модели был сформулирован в терминах геофизических потоков, а не вычислительной гидродинамики в целях масштабирования лабораторного эксперимента на объекты реального океана.

Для апробации предложенного подхода в качестве пилотного объекта исследования выбран процесс склоновой конвекции. Выбор объекта исследования в первую очередь обоснован накопленной исследователями обширной теоретической и экспериментальной базами. Из всех разновидностей горизонтального конвективного водообмена именно опусканию более плотных вод вдоль подводных склонов удалено наибольшее внимание, всеобъемлющий обзор численных и лабораторных экспериментов приведен в монографии Чубаренко И.П. [14]. Следует выделить работы Зацепина А.Г. [15, 16] по горизонтальной конвекции над наклонным дном как закладывающих фундамент для целого направления в физической океанологии. Они объясняют ключевые механизмы формирования придонных потоков и фронтов, которые наблюдаются в реальном океане. Большой объем лабораторных исследований проведен Греченко В.А. Ключевая идея его подхода — использование хорошо контролируемых лабораторных экспериментов для проверки теоретических моделей и численных моделей, что позволяет выделить чистые физические эффекты, которые в природных условиях часто скрыты сложным переплетением различных факторов [17, 18]. Суммируя опубликованные материалы, можно заключить, что наличие рельефа в виде наклонного дна принципиально меняет динамику вертикальных конвективных потоков, создавая асимметрию, которая приводит к формированию специфических придонных течений. В отличие от изотропного обрушения (как в классической конвекции) наклон дна придает движению направленный характер. Плотная вода собирается в узкую, интенсивную придонную струю, которая течет поперек изобат (линий равной глубины), взаимодействуя с окружающей средой. В ходе

данного взаимодействия струя теряет импульс и массу, что при определенной интенсивности потока приводит к интенсивному вихреобразованию, а при достижении слоев близкой плотности — к формированию динамической неустойчивости, отрыву от склона и меандрированию в горизонтальном направлении. Визуализация течений во многих лабораторных экспериментах показала, что плотная вода не просто опускается вертикально вниз, а организуется в выделенную струю, текущую вдоль склона. Были измерены скорость струи, ее толщина и зависимость этих параметров от угла наклона, скорости охлаждения и вращения системы.

В выполненных исследованиях отмечается ряд ограничений: лабораторные работы проводились в лотке или небольшом по размеру бассейне, преобладала линейная или двухслойная стратификация, что приводит к значительным упрощающим допущениям при последующем численном моделировании, особенно при параметризации турбулентности.

Это обуславливает необходимость продолжения исследований в крупномасштабном термостратифицированном бассейне СПбФ ИО РАН, в котором можно создать устойчивую, многослойную стратификацию, имитирующую реальные условия в океане. Это критически важно, так как стратификация напрямую определяет плавучесть, частоту Брента-Вайсяля и, следовательно, динамические характеристики конвективных элементов (плюмов, термов). В лотке объем жидкости мал, что приводит к относительно быстрой диффузии и разрушению стратификации. Создать и поддерживать устойчивый градиент плотности в небольшом объеме сложно, и он часто является приближенным или неоднородным. Кроме того, в крупномасштабном термостратифицированном бассейне можно исследовать нестационарные трехмерные процессы вдали от стенок, что позволяет снизить влияние паразитных потоков и искажений, вызванных трением о боковые стенки и углы, и позволяет восстановить трехмерную картину неустойчивого течения в «бесконечном» пространстве.

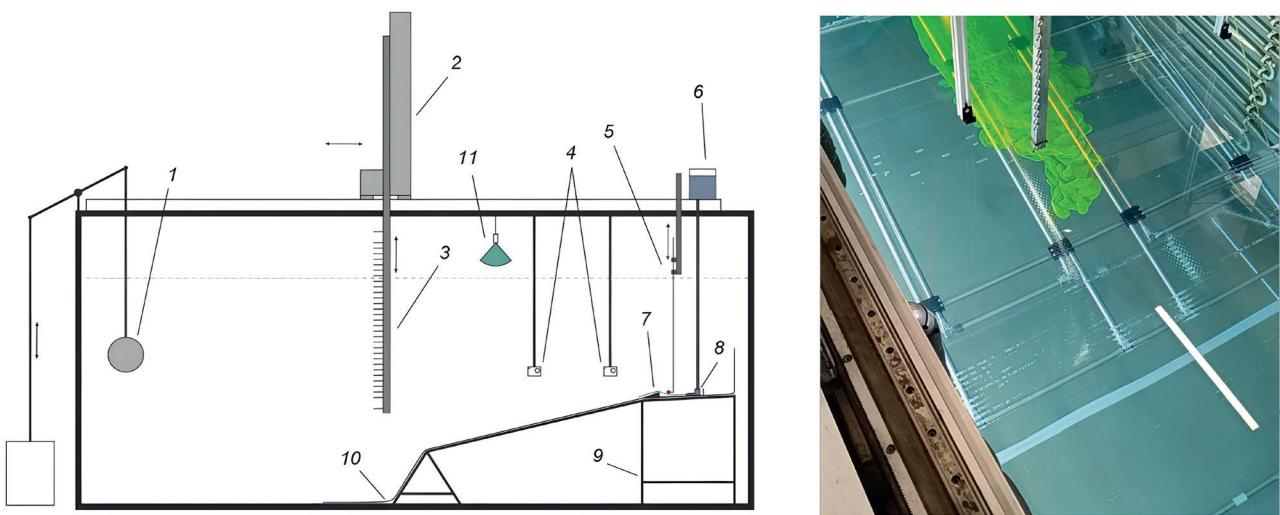
Аппарат для численного моделирования также требует усложнения общепринятых подходов. Хорошо известно, что, если плотная жидкость находится над более легкой, возникает гравитационная нестабильность, что приводит к вертикальному перемешиванию. Это вертикальное перемешивание происходит из-за присущей ему трехмерной мелкомасштабной свободной конвекции с масштабами длины  $O(0,1\text{ м})$ , которая не может быть разрешена с помощью глобальных моделей океана, так как расстояние между вертикальными узлами сетки в них равно  $O(1\text{ м})$ , а расстояние между горизонтальными узлами —  $O(10\text{ км})$ , и, следовательно, вертикальное перемешивание должно быть параметризованным. Если перемешивание не будет реализовано численно, модель создаст статически неустойчивый водяной столб. В качестве простой, физически обоснованной базовой параметризации часто выбирают конвективную подстройку [19]. Это позволяет разрешить большую часть потока, но не весь его объем. Конвективная подстройка — это простая параметризация, которая отражает это перемешивание с помощью большой вертикальной диффузии, если вертикальные градиенты плавучести подразумевают статическую нестабильность. Данный подход может фиксировать вертикальную структуру пограничного слоя, за исключением области захвата у его основания, поскольку он не пытается учитывать процессы захвата. В то же время, во многих работах [20–23] формирование самых мощных и холодных промежуточных слоев однозначно связывается с конвективными процессами, связанными с обширными и пологими шельфами. При наличии наклонного дна параметризации усложняются, но при этом теряют свою простоту и физичность. При расчетах глубины проникновения вертикальной конвекции в морях без учета горизонтального транспорта практически все применяющиеся методы (Зубова, Цикунова, Белинского, Булгакова, метод «теплового баланса») дают более или менее оправданные результаты только для центральных районов морей и мягких зим, но не позволяют точно рассчитать глубину проникновения конвекции в прибрежных районах [14].

Очевидно, что процесс склоновой конвекции должен быть детально воспроизведен с помощью тщательно верифицированной на серии лабораторных экспериментов негидростатической локальной модели, способной явным образом воспроизводить конвективные вихри для последующей параметризации и включения в региональные/глобальные симуляции.

## **2. Модификация лабораторного бассейна**

Термостратифицированный бассейн Санкт-Петербургского филиала Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН [24] отличается расширенными возможностями по созданию сложных термических стратификаций, приближенных к наблюдаемым в реальном океане. Для воспроизведения элементов процессов, связанных с конвекцией над наклонным дном, предложен ряд модификаций, описанный ниже.

Конструкция наклонного фальшдна состоит из металлического каркаса и листового материала, положенного на него. Каркас собран из нержавеющей трубы диаметром 25 мм с толщиной стенки 1 мм с помощью кронштейнов системы фиксации Joker и специально разработанных элементов крепежа, напечатанных



**Рис. 1.** Схема гидрофизического бассейна и его оборудования: 1 — волнопродуктор плунжерного типа, 2 — тележка с 3-осевым координатным устройством, 3 — измерительная штанга координатного устройства, 4 — подводные видеокамеры, 5 — вертикальное зондирующее устройство, 6 — рабочая ёмкость с подкрашенным раствором, 7 — лоток, 8 — диффузор, 9 — каркас фальш-дна, 10 — листовой материал, 11 — лазерный нож

**Fig. 1.** Diagram of the hydrophysical basin and its equipment: 1 — plunger type wave generator, 2 — trolley with 3-axis coordinate device, 3 — measuring rod of the coordinate device, 4 — underwater video cameras, 5 — vertical sounding device, 6 — working container with tinted solution, 7 — tray, 8 — diffuser, 9 — false bottom frame, 10 — sheet material, 11 — laser knife

с помощью FDM технологии. В совокупности эта гибридная система фиксации позволяет оперативно менять характеристики пространственной рамы. Каркас состоит из трех частей: первая часть — конструкция, формирующая жёсткое пологое фальшдно с высотой нижней части, равной 1010 мм от дна, наклоном  $1,45^\circ$  и протяженностью 1400 мм; вторая часть — наклонная часть фальшдна, имитирующая шельф, представляющая собой телескопическую конструкцию переменной длины с вариацией углов в диапазоне от 9 до 15 градусов; третья часть — нижняя опора постоянной высоты, равной 600 мм. В качестве листового материала используется сотовый поликарбонат толщиной 8 мм, уложенный ребрами жесткости поперек склона. В части, имитирующей шельф, соты поликарбоната разрезаны вдоль ребер через одно для обеспечения изменения угла наклона без слива бассейна. Изменение угла осуществляется через тросовые тяги, соединенные с третьей частью конструкции.

Поскольку эксперимент учитывает трехмерное распространение потока, желательно выделять рабочую плоскость в потоке для большей простоты интерпретации с помощью КМОП камер. Выделение рабочей плоскости осуществлялась с помощью лазерного ножа.

В качестве КМОП камер использовались две экши камеры SJCAM SJ8 Pro с сенсором IMX377, линзой  $170^\circ A+7G$  (2 асферические линзы), диафрагмой F/2.8. Данная оптическая система представляет собой широкоугольный объектив по типу «рыбий глаз» со значительным искажением. Для компенсации искажений, вызванных объективом, применялась калибровка камер в подводном положении при помощи калибровочной мишени (по типу шахматная доска). Расчёт калибровочных коэффициентов и их применение производился в программе proDAD Defishr. Также после установки камеры в рабочую плоскость лазерного ножа помещался объект с характерным линейным размером для учета перспективного искажения и анизотропии горизонтального и вертикального масштабов и оценки характерных линейных масштабов наблюдаемого явления, поскольку установка масштабной сетки в рабочей плоскости невозможна ввиду создания нежелательных возмущений (установка масштабной сетки в задней части бассейна была бы бесполезной ввиду сильного перспективного и масштабного искажения). В последующих экспериментах следует перейти к использованию объективов с малым искажением (с фокусным расстоянием 35–50 мм) и системой камер для получения панорамной картины с малыми искажениями.

В качестве лазерного ножа использовался полупроводниковый лазер малой мощности (менее 100 мВт) со специальной цилиндрической линзой, установленный над водой на координатном устройстве таким образом, чтобы засвечивал весь склон, и проходил через продольное вертикальное сечение гидрофизического бассейна.

Визуализация потока производилась с помощью предварительно подкрашенного объёма воды в рабочей ёмкости объёмом 10 л и заданной температурой с применением флуоресцеина в концентрации ~0,8 г/л. Из рабочей ёмкости вода поступала через теплоизолированную трубку с регулируемой запорной арматурой для контроля потока в плоский диффузор, стоящий в лотке шириной 100 мм и высотой 50 мм. Один конец лотка заглушен, а другой имеет прямоугольную призму высотой вертикального катета в 25 мм. Размещение лотка происходило на первой части конструкции в непосредственной близости от второй части.

Применение красителя даёт ярко зелёный оттенок, практически не меняющий вязкость и плотность воды. Отличительной особенностью флуоресцеина является флюресценция при облучении рабочего раствора светом с длиной волны в диапазоне 465–490 нм. Данная особенность позволяет получать контрастные снимки в свете лазерного ножа при выключенном внешнем освещении.

При фиксации высоты возмущений учитывались описанные выше корректировки по масштабам и положению относительно оптического центра. Нижняя точка (опорная) выбиралась из кадра до создания потока, верхняя точка выбиралась как граница флюресценции потока (в ярком, часто желтоватом оттенке из-за пика светимости флуоресцеина в 520 нм). Текущая серия экспериментов также показала, что в перспективе лучше снизить концентрацию красителя, поскольку происходит слишком большое рассеивание света от лазерного ножа на верхней границе.

Основная задача исследования — получить детальный массив эмпирических данных для верификации негидростатической модели с пространственным разрешением, позволяющим явным образом воспроизвести отдельные конвективные струи и вихри.

Для выполнения поставленной задачи было принято решение на данном этапе упростить сложный процесс формирования горизонтальной конвекции над наклонным дном за счет выхолаживания жидкости с поверхности до детального рассмотрения сценариев движения плотной струи вдоль склона, сформированной за счет локального источника отрицательной плавучести, расположенного у кромки шельфа.

### 3. Результаты

В качестве варьируемого параметра выбран расход жидкости с фиксированным перепадом температуры  $\Delta T$  по отношению к температуре воды в бассейне на горизонте источника. Охлажденная подкрашенная жидкость подавалась с помощью специального устройства — диффузора внутри лотка с ограничителем потока на конце (позиции 7, 8 на рис. 1). Положение питающего резервуара 6 выбиралось таким образом, чтобы создаваемый перепад давления расходовался на преодоление гидравлического сопротивления трубок и противодавления столба жидкости в точке истечения для минимизации турбулентности. После переполнения лотка струя только под действием гравитационных сил устремлялась вниз по склону. Таким образом, воспроизводились течения с числами Рейнольдса из диапазона 35–500. Значения определены из соотношения:  $Re = uL/v$ , где  $u$  — скорость течения,  $L$  — характерный масштаб, (для течения по склону в качестве характерной длины обычно выбирают толщину потока ( $h$ )),  $v$  — коэффициент кинематической вязкости.

При различных значениях числа  $Re$  потока плавучести удается воспроизвести принципиально разные режимы гравитационного течения от близкого к ламинарному до неустойчивого течения с интенсивным образованием вихрей. Число Ричардсона ( $Ri$ ) является ключевым параметром для анализа устойчивости стратифицированных течений, к которым как раз и относятся гравитационные плотностные течения. Если число Рейнольдса характеризует переход между ламинарным и турбулентным режимом, то число Ричардсона характеризует баланс между стабилизирующими силами плавучести и дестабилизирующими силами сдвига скорости. Оно определяет: будет ли стратификация (разность плотностей) подавлять или усиливать турбулентность и перемешивание? Для модели двухслойной жидкости (плотный слой течет под менее плотным) часто используется объемное число Ричардсона (Bulk Richardson Number). Оно аппроксимирует непрерывные градиенты разностями конечной толщины. Это именно тот случай, который чаще всего применяется для гравитационных течений по склону.

$$Ri_b = \frac{g'h}{u^2},$$

где  $g'$  — редуцированное ускорение свободного падения [м/с<sup>2</sup>].

Расчеты числа Ричардсона по глубине бассейна приведены на рис. 2. Склон занимает промежуток глубин 600–1000 мм. Известно, что при  $Ri > 0,25$  стратификация подавляет турбулентность, поток устойчив, а при  $Ri < 0,25$  — сдвиг преобладает, стратификация разрушается, возникает турбулентность и конвекция.

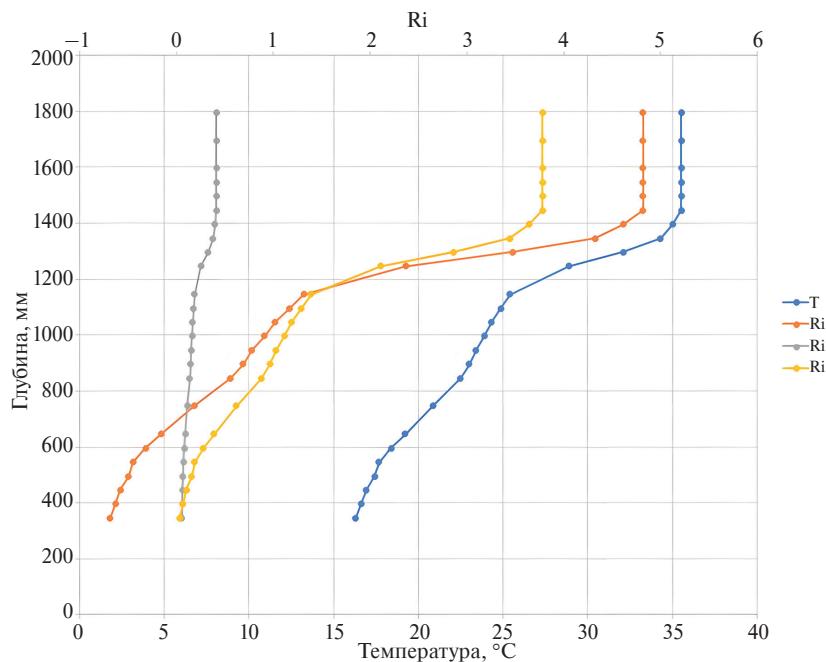


Рис. 2. Распределение значений числа Ричардсона по трем режимам истечения температурной стратификации бассейна

Fig. 2. Distribution of the Richardson number values according to the 3 flow modes of the temperature stratification of the basin

В ходе экспериментов исследован широкий диапазон изменчивости регулирующих параметров, позволяющий воспроизводить различные режимы течений, с отрывом потока и без, на основе четкой визуализации отдельных вихревых образований и их размеров. Исследованные режимы течений представлены на рис. 2. Во всех случаях рассматривается единая, однородная по горизонтали, термическая стратификация бассейна (синий профиль на рис. 2). Три других кривых на рис. 2 характеризуют исследованные режимы течения для разных чисел Ричардсона.

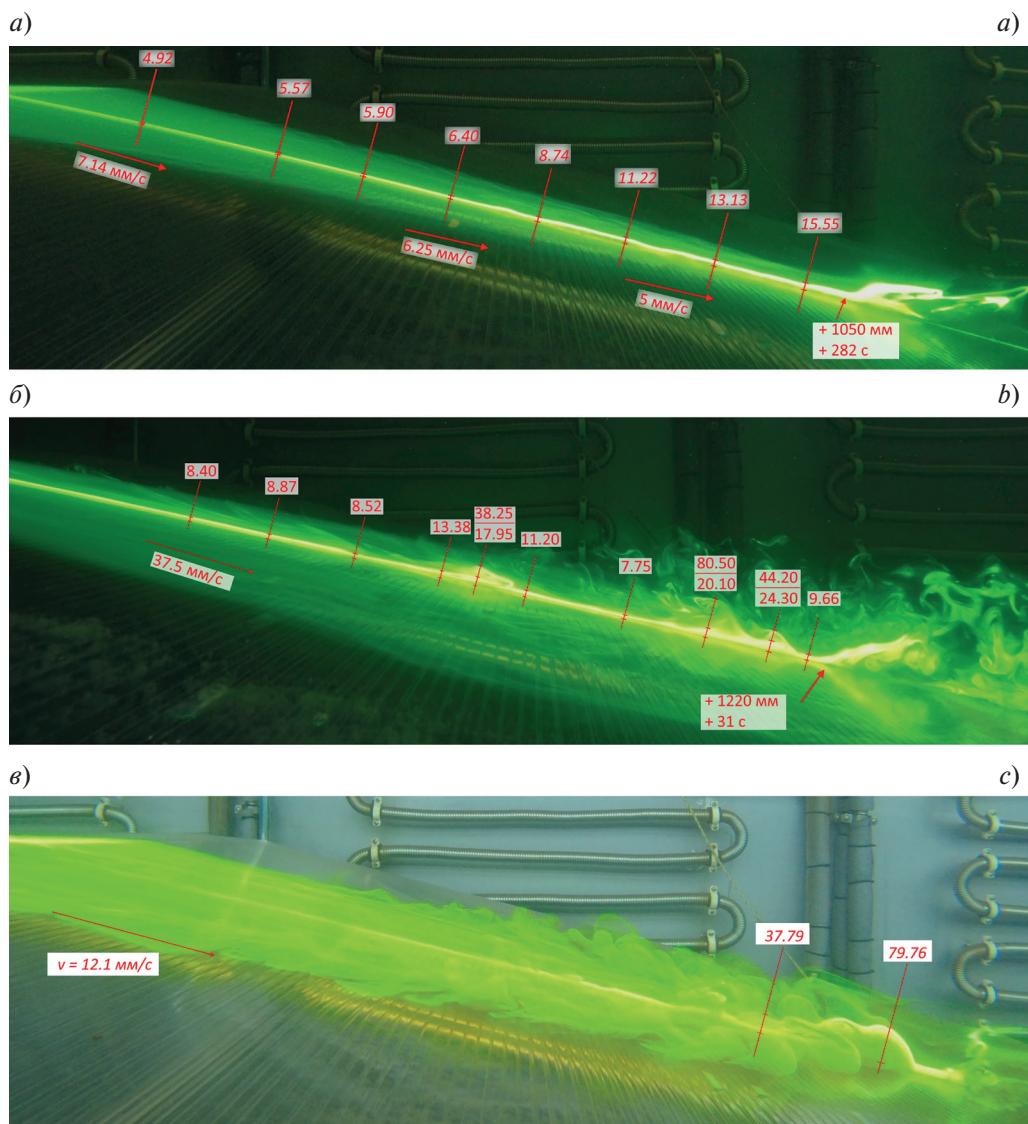
Легко видеть изменчивость характеристик устойчивости течения от эксперимента к эксперименту. Визуализация структуры течения с помощью лазерного ножа и пассивного трассера в вертикальной плоскости приведена на рис. 3. Горизонтальная структура потока представлена на рис. 4.

Вид и характер 3-мерного распределения концентрации пассивного трассера свидетельствует о том, что в условиях эксперимента недопустимо представление придонной струи в виде плоскопараллельного, горизонтально однородного течения, обычно применяемого при анализе плотностных потоков на склоне.

Очевидно, что отрыв водной массы придонного течения от склона дна происходит благодаря действию сил плавучести. Однако существенный трехмерный импульс, передаваемый опускающимися конвективными потоками, приводит к тому, что они преодолевают уровень нейтральной плавучести (условно, глубину перемешанного слоя), «проникая» в стабильно стратифицированную область ниже слоя нейтральной плавучести и образуя нестабильное горизонтальное течение. В целом понятное поведение более легкого, чем придонный, слоя воды обретает хорошо различимую структуру и последовательность фаз событий (рис. 5).

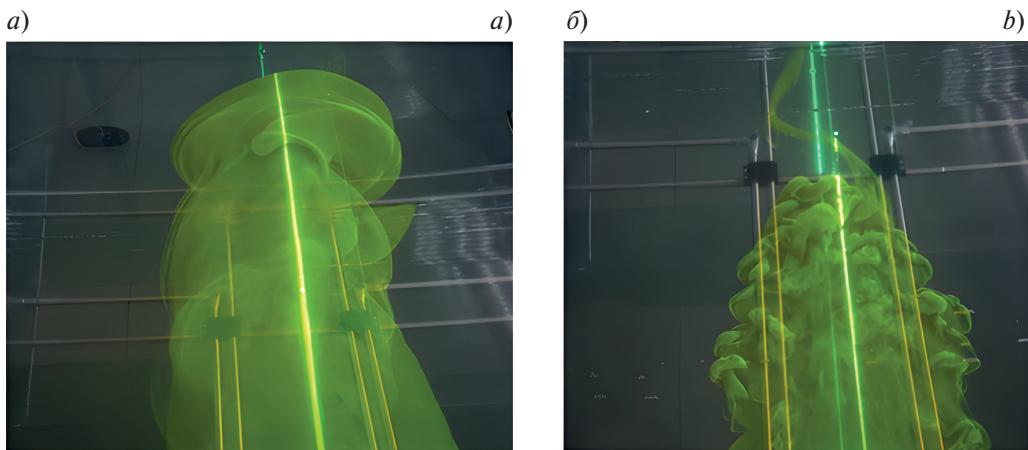
Течение, порождаемое при отрыве струи от склона, при распространении в толще вод совершают колебательные движения около горизонта своей плотности. Естественно предположить, что данный процесс сопровождается генерацией локальных внутренних волн, которые, в свою очередь, влияют на режим течения выше по склону.

Устойчивость описанных процессов в условиях естественного водоема при наличии фоновой циркуляции и внутренних волн представляет собой отдельный предмет исследования. В рамках описываемого эксперимента проведена первичная оценка возможности визуализации процессов при взаимодействии цуга внутренних волн и склонового течения. В качестве генератора волнения был задействован волнопродуктор плунжерного типа (см. рис. 1). Стратификация бассейна была приближена к естественной (см. синий профиль на рис. 2). Волнопродуктор совершил один оборот с частотой, соответствующей частоте Вяйсяля-Брента — 0,01 рад/с. Можно ожидать, что усиление турбулентности и смешения — это главный



**Рис. 3.** Границные режимы воспроизведенных диапазонов  $Re$  и  $Ri$ : а —  $Re = 35$ ,  $Ri1$ ; б —  $Re = 500$ ,  $Ri2$ ; в —  $Re = 300$ ,  $Ri3$  и визуализация трехмерного потока

**Fig. 3.** Boundary modes of the reproduced  $Re$  and  $Ri$  ranges: a —  $Re = 35$ ,  $Ri1$ ; b —  $Re = 500$ ,  $Ri2$ ; c —  $Re = 300$ ,  $Ri3$  and visualization of the three-dimensional flow



**Рис. 4.** Общая структура струи при наблюдении в плане: а —  $Re = 150$ ; б —  $Re = 300$

**Fig. 4.** The general structure of the jet: upside-down view of a —  $Re = 150$ ; b —  $Re = 300$

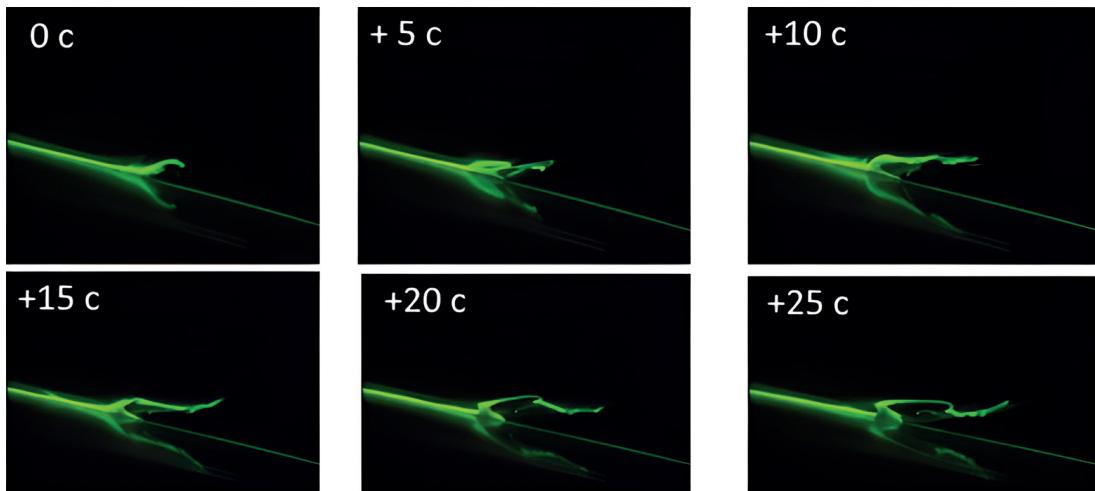


Рис. 5. Неустойчивость интрузионного течения

Fig. 5. Instability of the intrusive flow

результат взаимодействия. Однако лабораторные эксперименты выявили ряд сопутствующих процессов, раскрывающих особенности тепломассопереноса и формирования тонкой структуры в зоне взаимодействия плотностного течения и внутренних волн.

Турбулентность возникает в каждом из рассматриваемых процессов по отдельности (гравитационное стекание + накат внутренних волн на склон). При наложении друг на друга их энергии не просто складываются, а умножаются. Накатывающая внутренняя волна деформирует и разрушает четкую границу между плотным придонным потоком и более легкой окружающей водой. Это резко усиливает вовлечение — процесс подмешивания окружающей воды в плотный поток. При этом само течение ввиду значительного градиента плотности оказывает стабилизирующий эффект на внутренние волны значительной амплитуды, препятствуя опрокидыванию фронта и обрушению (рис. 6).

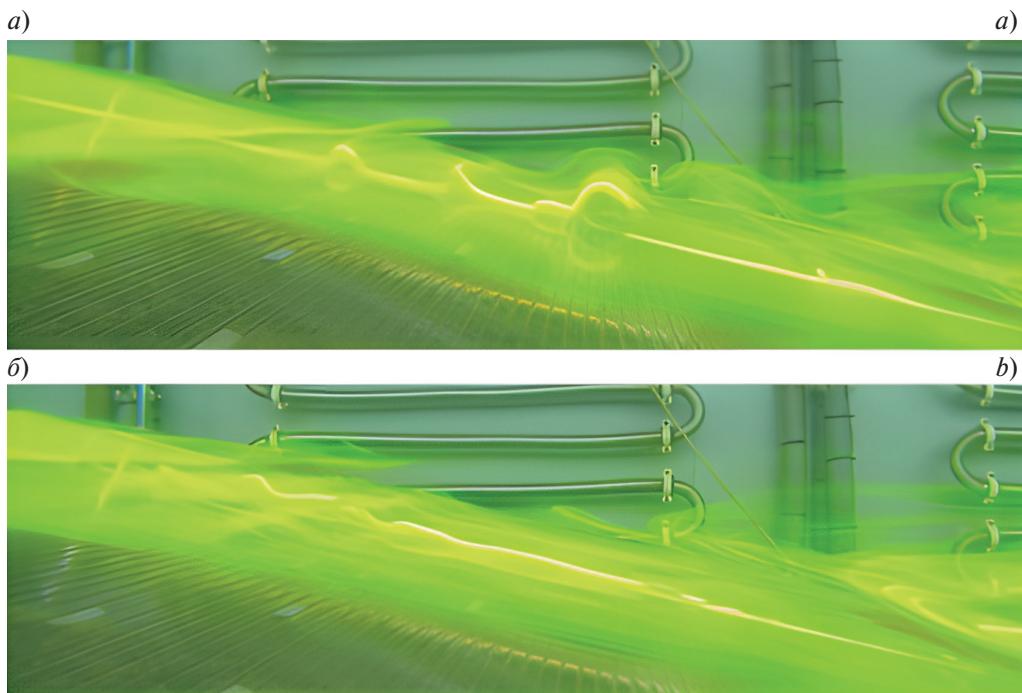


Рис. 6. Сравнение характеристик ВВ при различной интенсивности придонного плотностного течения: а — течение практически отсутствует; б — присутствует развитый конвективный поток

Fig. 6. Comparison of explosive characteristics at different intensities of near-bottom density flow:  
a — practically absent; b — a developed convective flow

Нелинейное взаимодействие вихревых структур (как ВВ, так и конвективных) создает эффективное напряжение, которое может генерировать устойчивые остаточные течения вдоль склона. Плотный конвективный поток под действием волн может разбиваться на отдельные вихри и струи. Это разрушает его когерентность и создает тонкую структуру в зоне формирования плотностной интрузии в точке отрыва плотной струи от склона (рис. 7). Тонкая структура здесь проявляется в виде сложной трехмерной мозаики вихрей и слоистых интрузий, которые являются прямым следствием динамического стекания тяжелой воды и ее взаимодействия внутренней волной.



Рис. 7. Визуализация тонкой структуры сформированной взаимодействием внутренней волны и склонового течения

Fig. 7. Visualization of the fine structure formed by the interaction of an internal wave and a slope current

#### 4. Выводы

1. В рамках приближенного к реальным природным условиям лабораторного эксперимента проведены предварительные исследования сложных, нелинейных процессов взаимодействия придонного плотностного течения, стратификации и внутренних волн.

2. Проведенные эксперименты в бассейне позволяют наблюдать полный жизненный цикл конвективных структур: от зарождения на склоне, развития и распространения в стратифицированной среде до их взаимодействия друг с другом и диссипации. В большом объеме эти структуры успевают развиться в нелинейном режиме.

3. Отработан метод визуализации тонкой структуры, сформированной взаимодействием внутренней волны и склонового течения. Классический метод лазерно-индукционной флуоресценции (LIF) предусматривает использование светофильтра на регистрирующей КМОП камере для отделения возбуждающего лазерного излучения от флуоресценции красителя, который возбуждается лазерным светом со смещением длины волны относительно источника света. В данной работе светофильтр не используется — регистрируется смешанный сигнал возбуждения и флуоресценции, тем не менее качественная визуализация потока однозначно выделяется на фоне засветки лазерного ножа. Поскольку рабочая область была обширной, упрощение приборной части является компромиссным шагом, дающим упрощенную, но эффективную визуализацию динамики жидкости.

4. Выявлены крупномасштабные структуры, такие как конвективные кластеры, фронты и вихри, которые формируются в результате коллективного взаимодействия множества отдельных конвективных элементов. Это позволяет исследовать процессы скейлинга — влияния мелкомасштабной конвекции на крупномасштабное течение.

5. Ключевая особенность рассматриваемого взаимодействия склонового течения и внутренних волн — это взаимное усиление и трансформация. Для склоновой конвекции: взаимодействие с внутренними волнами является одним из факторов, определяющим ее конечные свойства (скорость, степень разбавления, глубина проникновения).

6. Получен подробный набор 4-мерных данных для верификации негидростатической модели, явным образом разрешающей основную часть конвективного движения. Моделирование крупных вихрей (LES) с использованием тонкой трехмерной сетки призвано улучшить наше понимание закономерностей распространения плотностного течения вдоль континентального склона.

7. Открытым остается вопрос о том, сохранится ли устойчивость наблюданной структуры течений в масштабах реального океана. Исследования устойчивости придонных течений под влиянием сил Кориолиса и сдвиговых течений будет проведено при масштабировании численной модели на реальные объекты океана.

### Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИО РАН (тема № FMWE-2024-0029).

### Funding

The research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for IO RAS (theme № FMWE-2024-0029).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

### Литература

1. Hourdin F., Mauritzen T., Gettelman A., et al. The Art and Science of Climate Model Tuning // Bulletin of the American Meteorological Society. 2017. Vol. 98, Iss. 3. P. 589–602. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00135.1>
2. Large W.G., McWilliams J.C., Doney S.C. Oceanic vertical mixing: A review and a model with a nonlocal boundary layer parameterization // Reviews of Geophysics. 1994. Vol. 32, No. 4. P. 363–403. EDN XXLPSW. <https://doi.org/10.1029/94RG01872>
3. Price J.F., Weller R.A., Pinkel R. Diurnal cycling: Observations and models of the upper ocean response to diurnal heating, cooling, and wind mixing // Journal of Geophysical Research. 1986. Vol. 91, No. C7. P. 8411–8427. <https://doi.org/10.1029/JC091iC07p08411>
4. Cenedese C., Marshall J., Whitehead J.A. A laboratory model of thermocline depth and exchange fluxes across circum-polar fronts // Journal of Physical Oceanography. 2004. Vol. 34, No. 3 P. 656–667. <https://doi.org/10.1175/2508.1>
5. Deardorff J.W., Willis G.E., Stockton B.H. Laboratory studies of the entrainment zone of a convectively mixed layer // Journal of Fluid Mechanics. 1980. Vol. 100, No. 1. P. 41–64. <https://doi.org/10.1017/S0022112080001000>
6. Harcourt R.R. An improved second-moment closure model of Langmuir turbulence // Journal of Physical Oceanography. 2015. Vol. 45, No. 1. P. 84–103. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-14-0046.1>
7. Li Q., Fox-Kemper B. Assessing the effects of Langmuir turbulence on the entrainment buoyancy flux in the ocean surface boundary layer // Journal of Physical Oceanography. 2017. Vol. 47, No. 12. P. 2863–2886. EDN YESYMP. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-17-0085.1>
8. Reichl B.G., Wang D., Hara T., Ginis I., Kukulka T. Langmuir turbulence parameterization in tropical cyclone conditions // Journal of Physical Oceanography. 2016. Vol. 46, No. 3. P. 863–886. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-15-0106.1>
9. Wang D., Large W.G., McWilliams J.C. Large-eddy simulation of the equatorial ocean boundary layer: Diurnal cycling, eddy viscosity, and horizontal rotation // Journal of Geophysical Research: Oceans. 1996. Vol. 101, No. C2. P. 3649–3662. <https://doi.org/10.1029/95JC03441>
10. Souza A.N., Wagner G.L., Ramadhan A., et al. Uncertainty quantification of ocean parameterizations: Application to the K-Profile-Parameterization for penetrative convection // Journal of Advances in Modeling Earth Systems. 2020. Vol. 12, No. 12. P. e2020MS002108. EDN SMUZJH. <https://doi.org/10.1029/2020MS002108>
11. Besard T., Foket C., De Sutter B. Effective extensible programming: Unleashing Julia on GPUs // IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems. 2019. Vol. 30, No. 4. P. 827–841. <https://doi.org/10.1109/TPDS.2018.2872064>

12. Sullivan P.P., Patton E.G. The effect of mesh resolution on convective boundary layer statistics and structures generated by large-eddy simulation // *Journal of the Atmospheric Sciences*. 2011. Vol. 68, No. 10. P. 2395–2415. EDN YVOUWN. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-10-05010.1>
13. Verstappen R. How much eddy dissipation is needed to counterbalance the nonlinear production of small, unresolved scales in a large-eddy simulation of turbulence? // *Computers & Fluids*. 2018. Vol. 176. P. 276–284. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2016.12.016>
14. Чубаренко И.П. Горизонтальная конвекция над подводными склонами. Калининград: Терра Балтика, 2010. 256 с. EDN UBCINF
15. Зацепин А.Г., Гриценко В.А., Кременецкий В.В., Поярков С.Г., Строганов О.Ю. Лабораторное и численное исследование процесса распространения плотностного течения по склону дна // *Океанология*. 2005. Т. 45, № 1. С. 5–15. EDN HRVYRN
16. Зацепин А.Г., Костяной А.Г., Семенов А.В. Лабораторное исследование осесимметричного плотностного течения на наклонном дне во вращающейся жидкости // *Океанология*. 1996. Т. 36, № 3. С. 339–346.
17. Гриценко В.А., Юрова А.А. О распространении придонного гравитационного течения по крутому склону дна // *Океанология*. 1997. Т. 37, № 1. С. 44–49. EDN LECAJD
18. Гриценко В.А., Юрова А.А. Об основных фазах отрыва придонного гравитационного течения от склона дна // *Океанология*. 1999. Т. 39, № 2. С. 187–191.
19. Frank W.M., Molinari J. Convective Adjustment // Emanuel, K.A., Raymond, D.J. (eds) *The Representation of Cumulus Convection in Numerical Models*. Meteorological Monographs. American Meteorological Society, Boston, MA, 1993. [https://doi.org/10.1007/978-1-935704-13-3\\_8](https://doi.org/10.1007/978-1-935704-13-3_8)
20. Владимирцев Ю.А., Косарев А.Н. Некоторые особенности конвективного перемешивания в Чёрном и Каспийском морях // *Океанология*. 1963. Т. 3, № 6. С. 979–985.
21. Владимирцев Ю.А., Шипилов В.М. Конвективное перемешивание в различных природных условиях: Черное и Азовское моря. В книге: Конвективное перемешивание в море. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1977. 236 с.
22. Титов В.Б. Зоны формирования и объемы вод холодного промежуточного слоя в Чёрном море с учетом супровности зим // *Метеорология и гидрология*. 2006. № 6. С. 62–68. EDN KUHNLN
23. Andrie C., Merlivat L. Tritium in the western Mediterranean Sea during 1981 Phycemed cruise // *Deep-Sea Research*. 1988. Vol. 35, No. 2. P. 247–267. [https://doi.org/10.1016/0198-0149\(88\)90039-8](https://doi.org/10.1016/0198-0149(88)90039-8)
24. Родионов А.А., Ванкевич Р.Е., Лобанов А.А., Глитко О.В., Шпилёв Н.Н. Термостратифицированный бассейн Санкт-Петербургского филиала Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН для моделирования гидрофизических процессов // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2024. Т. 17, № 4. С. 90–99. EDN TIKUEH. [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2024.17\(4\)-7](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2024.17(4)-7)

## References

1. Hourdin F, Mauritzen T, Gettelman A, et al. The Art and Science of Climate Model Tuning. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2017;98(3):589–602. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00135.1>
2. Large WG, McWilliams JC, Doney SC. Oceanic vertical mixing: A review and a model with a nonlocal boundary layer parameterization. *Reviews of Geophysics*. 1994;32(4):363–403. <https://doi.org/10.1029/94RG01872>
3. Price JF, Weller RA, Pinkel R. Diurnal cycling: Observations and models of the upper ocean response to diurnal heating, cooling, and wind mixing. *Journal of Geophysical Research*. 1986;91(C7):8411–8427. <https://doi.org/10.1029/JC091iC07p08411>
4. Cenedese C, Marshall J, Whitehead JA. A laboratory model of thermocline depth and exchange fluxes across circumpolar fronts. *Journal of Physical Oceanography*. 2004;34(3):656–667. <https://doi.org/10.1175/2508.1>
5. Deardorff JW, Willis GE, Stockton BH. Laboratory studies of the entrainment zone of a convectively mixed layer. *Journal of Fluid Mechanics*. 1980;100(1):41–64. <https://doi.org/10.1017/S0022112080001000>
6. Harcourt RR. An improved second-moment closure model of Langmuir turbulence. *Journal of Physical Oceanography*. 2015;45(1):84–103. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-14-0046.1>
7. Li Q, Fox-Kemper B. Assessing the effects of Langmuir turbulence on the entrainment buoyancy flux in the ocean surface boundary layer. *Journal of Physical Oceanography*. 2017;47(12):2863–2886. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-17-0085.1>
8. Reichl BG, Wang D, Hara T, Ginis I, Kukulka T. Langmuir turbulence parameterization in tropical cyclone conditions. *Journal of Physical Oceanography*. 2016;46(3):863–886. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-15-0106.1>
9. Wang D, Large WG, McWilliams JC. Large-eddy simulation of the equatorial ocean boundary layer: Diurnal cycling, eddy viscosity, and horizontal rotation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1996;101(C2):3649–3662. <https://doi.org/10.1029/95JC03441>

10. Souza AN, Wagner GL, Ramadhan A., et al. Uncertainty quantification of ocean parameterizations: Application to the K-Profile-Parameterization for penetrative convection. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. 2020;12(12): e2020MS002108. <https://doi.org/10.1029/2020MS002108>
11. Besard T, Foket C, De Sutter B. Effective extensible programming: Unleashing Julia on GPUs. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*. 2019;30(4):827–841. <https://doi.org/10.1109/TPDS.2018.2872064>
12. Sullivan PP, Patton EG. The effect of mesh resolution on convective boundary layer statistics and structures generated by large-eddy simulation. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 2011;68(10):2395–2415. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-10-05010.1>
13. Verstappen R. How much eddy dissipation is needed to counterbalance the nonlinear production of small, unresolved scales in a large-eddy simulation of turbulence? *Computers & Fluids*. 2018;176:276–284. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2016.12.016>
14. Chubarenko IP. Horizontal convection over submarine slopes. Kaliningrad: Terra Baltika, 2010. 256 p.
15. Zatsepin AG, Gritsenko VA, Kremenetskii VV, Poyarkov SG, Stroganov OYu. Laboratory and numerical study of gravity currents over a sloping bottom. *Oceanology*. 2005;45(1):1–10.
16. Zatsepin AG, Kostyanoy AG, Semenov AV. Laboratory study of axisymmetric density flow on an inclined bottom in a rotating fluid. *Oceanology*. 1996;36(3): 339–346. (In Russ).
17. Gritsenko VA., Yurova AA. On the propagation of the bottom gravity current front over a steep slope. *Oceanology*. 1997;37(1):40–45.
18. Gritsenko VA, Yurova AA. On the main phases of the separation of the bottom gravity current from the bottom slope. *Oceanology*. 1999;39(2):187–191. (In Russ).
19. Frank WM, Molinari J. Convective Adjustment. In: Emanuel, K.A., Raymond, D.J. (eds) The Representation of Cumulus Convection in Numerical Models. Meteorological Monographs. American Meteorological Society, Boston, MA. 1993. [https://doi.org/10.1007/978-1-935704-13-3\\_8](https://doi.org/10.1007/978-1-935704-13-3_8)
20. Vladimirtsev Yu A., Kosarev AN. Some features of convective mixing in the Black and Caspian Seas. *Oceanology*. 1963;3(6):979–985. (In Russ).
21. Vladimirtsev YuA, Shipilov VM. Convective mixing in different natural conditions: The Black and Azov Seas. In the book: Convective Mixing in the Sea. M.: Moscow University Press, 1977. 236 p. (In Russ).
22. Titov VB. Formation zones and water volume of the cold intermediate layer in the Black Sea in relation to winter severity. *Meteorology and Hydrology*. 2006;6:62–68. (In Russ).
23. Andrie C, Merlivat L. Tritium in the western Mediterranean Sea during 1981 Phycemed cruise. *Deep-Sea Research*. 1988;35(2):247–267. [https://doi.org/10.1016/0198-0149\(88\)90039-8](https://doi.org/10.1016/0198-0149(88)90039-8)
24. Rodionov AA, Vankevich RY, Lobanov AA, Glitko OV, Shpilev NN. Thermally stratified water tank of St. Petersburg Branch of Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences for modeling hydrophysical processes. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2024;17(4):90–99. [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2024.17\(4\)-7](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2024.17(4)-7) (In Russ).

## Об авторах

**РОДИОНОВ Анатолий Александрович**, член-корреспондент РАН, профессор, руководитель научного направления «Фундаментальная и прикладная гидрофизика» ИО РАН, ORCID: 0000-0002-2377-5621, Scopus AuthorID: 56223713100, WoS ResearcherID: AAT-6466-2021, SPIN-код (РИНЦ): 5277-4598, e-mail: rodionov.aa@spb.ocean.ru

**ВАНКЕВИЧ Роман Евгеньевич**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник СПбФ ИО РАН, ORCID: 0000-0002-3891-3396, Scopus AuthorID: 25642198100, WoS ResearcherID: M-3215-2013, SPIN-код (РИНЦ): 2295-6136, e-mail: rvankevich@mail.ru

**ЛОБАНОВ Андрей Александрович**, директор СПбФ ИО РАН, доктор технических наук, ORCID: 0009-0006-9064-1849, SPIN-код (РИНЦ): 1030-8262, e-mail: lobanov.aa@spb.ocean.ru

**ШПИЛЕВ Николай Николаевич**, научный сотрудник СПбФ ИО РАН, ORCID: 0000-0003-3638-3253, SPIN-код (РИНЦ): 9945-2125, e-mail: nn.shpilev@gmail.com