



Возрождение физического моделирования в океанологии: интеграция экспериментальных и вычислительных методов на базе прецизионных лабораторных исследований

А. А. Родионов¹, А. А. Лобанов¹, Р. Е. Ванкевич¹, Н. Н. Шпилев¹, А. Ю. Дворников^{*1}

¹ Институт океанологии им. П. П. Ширшова Российской академии наук, Москва, Российская Федерация

***Контакт:** Антон Юрьевич Дворников, dvornikov.ayu@spb.ocean.ru

Поступило: 24 сентября 2026 г. **Принято:** 15 октября 2026 г. **Опубликовано:** 0 октября 2026 г.

Абстракт: В статье рассматривается возрождение интереса к физическому моделированию в океанологии на новой технологической основе. Показано, что современные вычислительные методы (моделирование крупных вихрей LES, модели на основе нейронных дифференциальных уравнений) требуют детальной верификации на эталонных данных, которые может предоставить только высокоточный лабораторный эксперимент. На примере Уникальной научной установки «Лабораторно-испытательный комплекс» (ЛИК) СПбФ ИО РАН демонстрируется интеграция физического моделирования, цифровых двойников и методов машинного обучения. Описаны результаты экспериментов по конвективным вихревым структурам и генерации вихревых колец в стратифицированной среде. Обосновывается перспективность использования нелокальной гидродинамики и нейросетевых параметризаций для создания нового поколения моделей циркуляции океана.

Ключевые слова: физическое моделирование, океанология, лабораторный эксперимент, моделирование крупных вихрей, цифровые двойники, нейросетевые параметризации, нелокальная гидродинамика

Цитирование: Родионов А. А., Лобанов А. А., Ванкевич Р. Е., Шпилев Н. Н., Дворников А. Ю. Возрождение физического моделирования в океанологии: интеграция экспериментальных и вычислительных методов на базе прецизионных лабораторных исследований // Вестник ОНЗ РАН. — 2026. — Т. 18, № 3. — NZ1005. — <https://doi.org/10.2205/2026NZ000382>

1. Введение: физическое моделирование в эпоху цифровых технологий

Исторически сложилось три равноценных метода исследования океана: натурные наблюдения, теоретические исследования (включая физико-математическое моделирование) и лабораторный физический эксперимент. Каждый из них имеет свои достоинства и ограничения. Натурные данные наиболее достоверны, но дороги, трудновоспроизводимы и часто не позволяют выделить отдельные физические эффекты из-за переплетения множества факторов. Теоретические модели, напротив, позволяют выявить ключевые закономерности, но неизбежно содержат упрощения, особенно при описании турбулентности, перемешивания и нелинейных волновых взаимодействий.

Лабораторное моделирование долгое время занимало промежуточное положение: оно позволяло в контролируемых условиях воспроизводить отдельные процессы, а затем с помощью

теории подобия переносить результаты на натурные масштабы. Однако во второй половине XX века, в связи с бурным развитием вычислительной гидродинамики, физический эксперимент постепенно отошёл на второй план. Появилась иллюзия, что численные модели, особенно с ростом производительности компьютеров, способны полностью заменить сложные и дорогостоящие лабораторные установки.

Практика последних двух десятилетий показала ограниченность численного подхода. Современные вихреразрешающие модели океана (как и метод моделирования крупных вихрей LES) требуют детальной верификации на эталонных данных, которые невозможно получить в численном эксперименте из-за отсутствия замкнутых аналитических решений для большинства турбулентных течений. Мелкомасштабные процессы (масштабом от сантиметров до метров): конвективные ячейки, внутреннее волновое перемешивание, взаимодействие струй со стратификацией остаются за пределами разрешающей способности глобальных моделей и должны параметризоваться. Разработка и калибровка таких параметризаций невозможны без надёжных лабораторных данных. Именно это осознание привело к возрождению интереса к физическому моделированию, но уже на новой технологической основе. Лазерные методы визуализации (велосиметрия изображений частиц, PIV, и лазерно-индуцированная флуоресценция, LIF), цифровые камеры высокого разрешения, автоматизированные системы позиционирования и, что особенно важно, создание цифровых двойников экспериментальных установок позволяют проводить «неинвазивные» измерения с беспрецедентной детальностью. Полученные массивы данных затем используются для верификации и настройки численных моделей.

В последние годы арсенал вычислительных методов пополнился новыми инструментами: нейронными дифференциальными уравнениями, методами машинного обучения и искусственного интеллекта, которые обещают радикально улучшить параметризацию подсеточных процессов в глобальных моделях океана. Однако их эффективность напрямую зависит от объёма и качества эталонных данных, которые может предоставить только физический эксперимент. Именно синергия современных вычислительных подходов (LES, нейродифференциальные модели, методы искусственного интеллекта) и высокоточного лабораторного моделирования открывает путь к созданию нового поколения параметризаций для крупномасштабной океанологии.

Одним из практических воплощений такого комбинированного подхода является Уникальная научная установка «Лабораторно-испытательный комплекс» (ЛИК), созданная в 2021 году в Санкт-Петербургском филиале Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН. В её состав вошли три специализированных бассейна: вращающийся стратифицированный, гидроакустический и гидрофизический (термостратифицированный). Установка изначально проектировалась как платформа для комбинированного подхода: лабораторный эксперимент здесь тесно увязан с цифровой моделью, что позволяет оптимизировать режимы работы оборудования и сокращать число дорогостоящих опытных запусков.

Цель настоящей статьи – показать, что интеграция физического моделирования на уникальных экспериментальных установках с современными вычислительными методами открывает новые возможности для глубокого понимания и параметризации океанических процессов. На примере ЛИК мы демонстрируем, как сочетание высокоточных лабораторных данных, цифровых двойников и современных алгоритмов обработки сигналов позволяет не только верифицировать численные модели, но и создавать эмпирические массивы для обучения нейросетевых параметризаций, что в совокупности формирует основу для нового поколения моделей циркуляции океана.

2. Уникальная научная установка «Лабораторно-испытательный комплекс»

Основной элемент ЛИК – гидрофизический (термостратифицированный) бассейн, введённый в эксплуатацию в 2023 году. Его размеры (длина×ширина×высота) 7,0 × 2,0 × 2,2 м, рабочий объём 29,3 м³, материал каркаса – нержавеющая сталь. Бассейн предназначен для физического моделирования гидрофизических процессов в толще морской среды, на границах раздела «вода–воздух» и «вода–дно» [Официальный..., 2026; Родионов и др., 2024a]. Ключевая особенность – система тепло- и холодоснабжения на базе водоохлаждаемой холодильной машины, позволяющая создавать и поддерживать вертикальное изменение температуры в трёх независимых зонах по вертикали с помощью теплообменников из гибкой гофрированной нержавеющей трубы с учётом температуры поверхности и дна. Для генерации поверхностного волнения используется волнопродуктор плунжерного типа, а для гашения отражённых волн – волногаситель в виде наклонной металлической рамы с нержавеющей сеткой, имитирующей

пологую береговую линию. Контроль стратификации осуществляется тремя наборами цифровых датчиков температуры (термокосами): две стационарные на противоположных торцах и одна подвижная, закреплённая на автоматизированной системе линейного перемещения.

Гидрофизический бассейн дополнен приборным комплексом для визуализации течений. Оптический метод измерения мгновенных полей скорости (трассерная визуализация) использует непрерывный лазер, создающий тонкий световой нож, и цифровые камеры, фиксирующие перемещение мелких частиц-трассеров. Для контрастного выделения структуры потока применяется метод LIF с добавлением флуоресцеина в питающую воду [Родионов и др., 2025]. Это позволяет получать чёткие изображения вихревых структур и границ перемешивания даже при выключенном внешнем освещении.

В ЛИК также входят гидроакустический бассейн со звукопоглощающей облицовкой и позиционерами (± 5 мм) [Официальный..., 2026; Родионов и др., 2024b] и вращающийся стратифицированный бассейн для изучения вихревой динамики, требующие детального рассмотрения в будущем.

Для оптимизации режимов работы теплового/холодильного оборудования и сокращения числа дорогостоящих физических экспериментов в СПбФ ИО РАН создана цифровая копия термостратифицированного бассейна [Ванкевич и др., 2024]. Модель реализована на модульной платформе на основе вычислительного пакета OpenFOAM (Open Source Field Operation And Manipulation CFD Tool Box).

Численная модель решает полную негидростатическую систему уравнений сохранения массы, импульса и переноса тепла с использованием подхода LES-моделирования и подсеточной модели Смагоринского [Ванкевич и др., 2024]. Расчётная область соответствует рабочей области бассейна и покрывается равномерной сеткой с шагом 1 см по всем направлениям, что даёт около 21,6 млн узлов. Такое разрешение позволяет уверенно моделировать вихревые движения масштабом от 10 см и более. Цифровая копия рассматривается не как замена физического эксперимента, а как вспомогательный инструмент, позволяющий рационально планировать серийные эксперименты, подбирать режимы работы оборудования без риска разрушить стратификацию и экстраполировать лабораторные зависимости на натурные масштабы (например, на высокие числа Рейнольдса) [Ванкевич и др., 2024].

3. Основные научные результаты, полученные с помощью лабораторного комплекса

3.1. Моделирование конвективных вихревых структур на склоне

В термостратифицированном бассейне проведено исследование уединённого гравитационного течения над наклонным дном, приближённое к реальным природным условиям [Родионов и др., 2025]. Создана конструкция наклонного фальшдна, состоящая из трёх частей: пологого фальшдна (наклон $1,45^\circ$, протяжённость 1400 мм), телескопической наклонной части (угол $9\text{--}15^\circ$, имитация шельфа) и нижней опоры. Визуализация потока осуществлялась методом лазерно-индуцированной флуоресценции (флуоресцеин, концентрация $\sim 0,8$ г/л) с подсветкой лазерным ножом [Родионов и др., 2025] (рис. 1).

В ходе экспериментов воспроизведены течения с числами Рейнольдса $Re = 35 \dots 500$ и числами Ричардсона Ri , охватывающими как ламинарный, так и турбулентный режимы. Показано, что при $Ri > 0,25$ стратификация подавляет турбулентность, а при $Ri < 0,25$ возникает конвекция с вихреобразованием. Получены эмпирические данные, описывающие полный жизненный цикл вихревых структур: от зарождения на склоне, развития и распространения в стратифицированной среде до взаимодействия с полем внутренних волн. Обнаружено, что при взаимодействии плотностного течения с внутренними волнами энергии не просто складываются, а умножаются, что приводит к резкому усилению вовлечения окружающей воды в плотный поток [Родионов и др., 2025].

Полученный в экспериментах массив данных представляет собой не просто набор отдельных наблюдений, а систематическую базу, охватывающую широкий диапазон чисел Рейнольдса ($Re = 35 \dots 500$) и Ричардсона, включая ламинарный, переходный и турбулентный режимы. Такая полнота критически важна, поскольку позволяет проследить эволюцию вихревых структур от их зарождения вблизи склона до полного развития и последующего взаимодействия с внутренними волнами. Этот процесс в натуральных условиях чрезвычайно трудно выделить из-за наложения множества факторов. Особую ценность представляет детальная 4D-визуализация (три пространственные координаты + время) с пространственным разрешением порядка миллиметров, что на порядки превосходит разрешение типичных натурных наблюдений и большинства численных моделей.

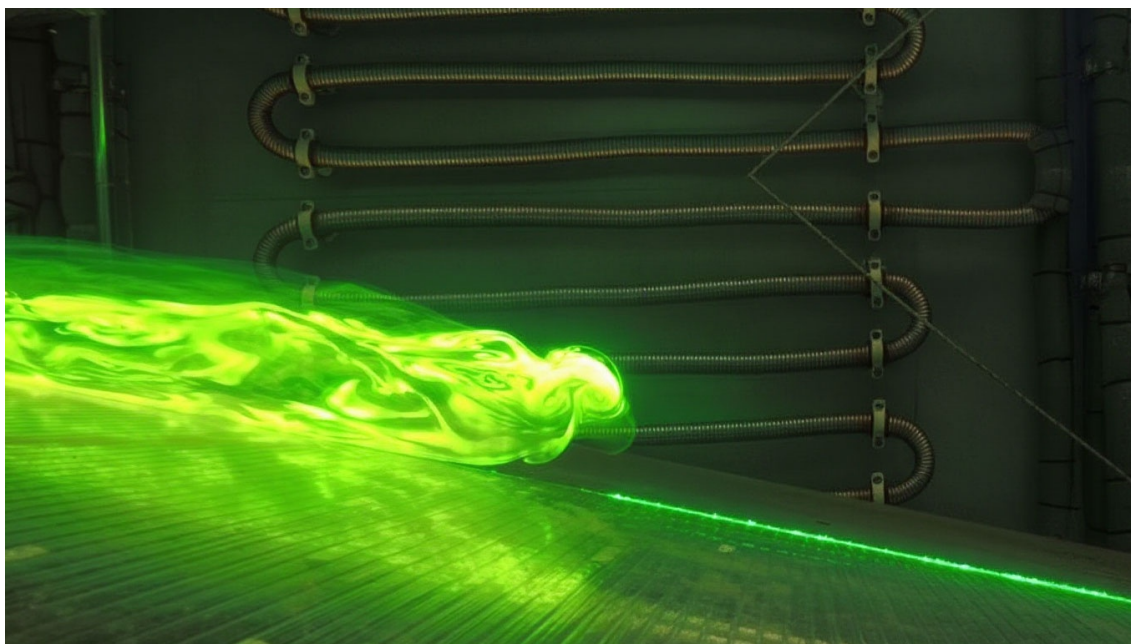


Рис. 1. Движение подкрашенной струи над наклонным дном в свете лазерного ножа. На заднем плане видны контуры системы тепло- и холодоснабжения для создания нужной стратификации воды в бассейне.

Именно этот массив был использован для верификации негидростатической LES-модели с пространственным разрешением $5 \times 5 \times 2,5$ мм [Родионов и др., 2025]. Сравнение показало, что классические противопоточные схемы адвекции (даже 5-го порядка точности) не способны адекватно воспроизвести структуру вихревых полей без чрезмерного завышения вязкости, в то время как схема WENO (weighted essentially non-oscillatory) обеспечивает стабильное и точное моделирование при приемлемых вычислительных затратах. Таким образом, лабораторные данные стали «золотым стандартом» для выбора и калибровки численных алгоритмов, которые затем могут быть перенесены на более крупные масштабы.

3.2. Генерация и эволюция вихревых колец

Вихревые кольца – один из наиболее ярких и устойчивых примеров когерентных структур в гидродинамике. Их способность переносить массу и импульс на значительные расстояния при слабом взаимодействии с окружающей средой делает их привлекательным объектом как для фундаментальных исследований, так и для прикладных разработок: от систем пожаротушения до доставки веществ в труднодоступные зоны водоёмов [Монахов и др., 2024]. Однако большинство известных лабораторных исследований вихревых колец проведено либо в однородной жидкости, либо в малых лотках, где влияние стенок и отсутствие стратификации ограничивают переносимость результатов на реальные условия.

Для преодоления этих ограничений в гидрофизическом бассейне СПбФ ИО РАН был создан и испытан макет генератора вихревых колец «стенка с отверстием» (радиус отверстия 37,5 мм, давление питания 2–5 кгс/см², управление – быстродействующий электромагнитный клапан с временем срабатывания 0,05 с) [Монахов и др., 2024].

Выбор генератора в виде стенки с отверстием обусловлен тем, что такая конфигурация, в отличие от цилиндрической трубки, формирует поток с существенно более сильным закручиванием на стадии образования вихря. Кроме того, сгенерированные таким образом кольца движутся быстрее и имеют более энергичное ядро [Волков и др., 2024].

Эксперименты проводились в условиях контролируемой температурной стратификации с вертикальным градиентом до 15 °С/м. Ключевым параметром, определяющим судьбу вихревого кольца, является безразмерная длина струи $L = V_0 \cdot T / R_0$, где V_0 – скорость истечения, T – длительность импульса, R_0 – радиус отверстия. Этот комплекс характеризует соотношение между количеством движения, переданным среде, и геометрическим масштабом формирующейся структуры. В серии экспериментов с варьированием давления и времени открытия клапана было установлено, что устойчивые кольца формируются при $L \leq 10$: в этом диапазоне кольца сохраняют свою тороидальную форму в течение десятков секунд и проходят расстояние до 5 м

(до противоположной стенки бассейна), незначительно увеличиваясь в размерах. При $L \geq 20$ вихревое кольцо разрушается непосредственно в процессе формирования, не успевая оторваться от генерирующей струи. Промежуточный диапазон $10 < L < 20$ характеризуется переходными режимами, где кольцо может существовать, но его стабильность сильно зависит от начальных возмущений и стратификации [Монахов и др., 2024].

Таким образом, оба цикла экспериментов (и по склоновой конвекции, и по вихревым кольцам) демонстрируют уникальные возможности ЛИК как платформы для получения эталонных данных, недоступных в натурных наблюдениях и большинстве численных моделей. Главный итог этих работ не сводится к отдельным фактам, а заключается в создании систематических 4D-массивов (пространство + время), которые служат «золотым стандартом» для верификации LES-моделей, тестирования численных схем и, в перспективе, для обучения нейросетевых параметризаций подсеточных процессов. Именно такие данные (поверенные, документированные и охватывающие широкий диапазон режимов) являются мостом между физическим экспериментом и вычислительными методами нового поколения, включая нейродифференциальные модели и искусственный интеллект. Тем самым эксперименты в гидрофизическом бассейне ЛИК не просто подтверждают известные закономерности, но и закладывают эмпирический фундамент для создания параметризаций, пригодных для крупномасштабных моделей циркуляции океана.

4. Перспективы: от физического эксперимента к гибриднему моделированию

Полученные на ЛИК экспериментальные данные выходят далеко за рамки верификации конкретной модели. Собранные массивы высококачественных измерений представляют собой идеальную основу для обучения нейросетевых параметризаций подсеточных процессов. В отличие от традиционных полуэмпирических формул, нейросетевые модели, обученные на таких детализированных данных, способны улавливать нелинейные зависимости между крупномасштабными характеристиками течения и его мелкомасштабными эффектами: турбулентной вязкостью, диффузией, перемешиванием. Классические параметризации, как правило, строятся на основе ограниченного набора экспериментальных данных и интуитивных предположений о виде замыкающих соотношений. Нейросетевой подход, напротив, позволяет извлекать закономерности непосредственно из данных, не навязывая априорной функциональной формы.

Особенно перспективным представляется использование нейродифференциальных уравнений, которые позволяют не просто аппроксимировать статические зависимости, но и моделировать эволюцию подсеточных полей во времени, сохраняя физическую согласованность. В отличие от стандартных нейросетей, аппроксимирующих отклик в фиксированный момент времени, нейродифференциальные уравнения описывают динамику системы как непрерывный процесс, что принципиально важно для турбулентных течений, где память и эволюция играют ключевую роль. В этом контексте лабораторный эксперимент выступает не как альтернатива численному моделированию, а как его необходимое дополнение: поставщик эталонных данных, без которых методы машинного обучения остаются «слепыми» и склонными к переобучению на синтетических данных, полученных из упрощённых моделей.

Однако здесь возникает фундаментальный вопрос: почему нейросетевые параметризации, обученные на лабораторных данных, вообще способны работать? Что стоит за теми нелинейными зависимостями, которые они извлекают? Ответ на этот вопрос даёт нелокальная гидродинамика – направление, предлагающее принципиально иной взгляд на замыкание уравнений движения [Родионов и Хантулева, 2026; Khantuleva, 2022; Zubarev, 1971; Zubarev and Tischenko, 1972]. В классической гидродинамике связь между напряжениями и деформациями предполагается локальной: напряжение в точке зависит только от градиента скорости в этой же точке. Для турбулентных и стратифицированных течений такое приближение является сильным упрощением. Нелокальный подход, напротив, постулирует, что напряжение в данной точке зависит от состояния среды в некоторой окрестности (пространственная нелокальность) и от предыстории процесса (временная нелокальность, или наследственность).

Для турбулентных течений пространственная нелокальность, связанная с дальнедействующими взаимодействиями между вихрями разных масштабов, объясняет, почему классические локальные замыкания неспособны адекватно воспроизвести структуру турбулентных полей. Это тот самый вывод, который был сделан при верификации LES-модели по лабораторным данным (подраздел 3.1).

С вычислительной точки зрения нелокальные модели естественным образом формулируются через дробные лапласианы и интегральные операторы с ядром нелокальности. Именно такие

операторы лежат в основе нового поколения подсеточных моделей для LES, так называемых «нелокальных LES». Более того, существуют работы [Akhavan-Safaei et al., 2021; Samiee et al., 2022], в которых нелокальные подсеточные замыкания строятся с помощью физически информированных нейронных сетей, что напрямую перекликается с обсуждаемым подходом. Тем самым нелокальная гидродинамика предоставляет теоретический фундамент для того эмпирического моста между лабораторией и численной моделью, который выстраивается на базе ЛИК: если нейродифференциальные уравнения и методы ИИ позволяют извлекать закономерности из данных, то нелокальные модели позволяют объяснить, почему эти закономерности имеют именно такой вид, и придать им физически осмысленную форму. Это особенно ценно для параметризаций, предназначенных для крупномасштабных моделей циркуляции океана, где априорная функциональная форма замыканий часто неизвестна.

Кроме того, наличие цифровой копии бассейна [Ванкевич и др., 2024] позволяет экстраполировать лабораторные зависимости на натурные масштабы, недостижимые в физическом эксперименте. Используя откалиброванную LES-модель, можно не просто переносить результаты на более высокие числа Рейнольдса, но и проводить виртуальные эксперименты с параметрами (глубина океана, градиенты плотности, скорости фоновых течений, вращение Земли), которые в лаборатории воспроизвести невозможно. Цифровая копия становится мостом между контролируемым лабораторным объёмом и реальным океаном, позволяя исследовать сценарии, не реализуемые в физической модели. При этом нелокальные подсеточные замыкания, откалиброванные по лабораторным данным, могут быть встроены непосредственно в цифровую копию, что повышает её предсказательную способность при экстраполяции на натурные условия.

Таким образом, физический эксперимент, цифровая модель, нелокальная теория и методы ИИ образуют замкнутый цикл: лабораторные данные → верификация модели → обучение параметризаций (в том числе с использованием нелокальных замыканий) → экстраполяция на натуру → уточнение постановки лабораторных экспериментов. Этот цикл, реализованный на базе ЛИК, является практическим воплощением новой парадигмы океанологического моделирования, где физический эксперимент перестаёт быть «иллюстрацией» теории или полигоном для отработки методик, а становится ключевым звеном в создании моделей нового поколения. В рамках такого подхода экспериментатор, разработчик численных моделей, специалист по нелокальной гидродинамике и эксперт по машинному обучению работают в единой логике, где каждый этап (от постановки опыта до экстраполяции результатов) подчинён общей цели: повышению предсказательной способности моделей циркуляции океана.

Реализация этой концепции требует не только технического оснащения, но и развития междисциплинарных компетенций, а также создания открытых баз данных, доступных для широкого научного сообщества. Именно на этом пути (интеграции физического эксперимента, высокопроизводительных вычислений, нелокальной теории и методов ИИ) лежит, по нашему мнению, главный вектор развития моделирования в океанологии на ближайшие десятилетия.

5. Заключение

Физическое моделирование в океанологии переживает этап возрождения, но уже не как самостоятельный метод, а в тесной связке с численным моделированием и цифровыми двойниками. Созданная в 2021 г. Уникальная научная установка «Лабораторно-испытательный комплекс» СПбФ ИО РАН представляет собой яркий пример такого комбинированного подхода, где уникальные экспериментальные возможности сочетаются с передовыми вычислительными технологиями.

За 2021–2026 гг. на ЛИК получены значимые научные результаты, имеющие как фундаментальное, так и прикладное значение. Впервые в крупномасштабном стратифицированном бассейне воспроизведён полный жизненный цикл конвективных вихревых структур на наклонном дне: от зарождения до взаимодействия с внутренними волнами, что позволило выявить нелинейные эффекты усиления перемешивания и сформировать эталонные 4D-массивы для верификации LES-моделей. Создан и испытан генератор вихревых колец, работающий в условиях управляемой стратификации; установлены критерии устойчивости колец и их чувствительность к температурным контрастам, открывающие новые возможности для управления переносом вещества в водной толще. Разработана и верифицирована цифровая копия термостратифицированного бассейна на основе OpenFOAM, позволяющая не только оптимизировать режимы работы оборудования, но и экстраполировать лабораторные данные на натурные масштабы, недоступные в физическом эксперименте.

Собранные массивы высококачественных измерений представляют собой уникальный научный актив: они уже используются для верификации LES-моделей и тестирования численных схем, а в перспективе станут основой для обучения нейросетевых параметризаций подсеточных процессов. Этот подход (от физического эксперимента через цифровое моделирование к методам искусственного интеллекта) формирует новую парадигму океанологических исследований, где лабораторные установки становятся ключевым звеном в создании моделей нового поколения.

Финансирование

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

Список литературы

- Ванкевич Р. Е., Родионов А. А., Лобанов А. А. и др. Цифровая копия термостратифицированного бассейна Санкт-Петербургского филиала Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. — 2024. — Т. 17, № 4. — С. 100—108. — [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2024.17\(4\)-9](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2024.17(4)-9).
- Волков К. Н., Емельянов В. Н., Капранов И. Е. и др. Моделирование взаимодействия вихревого кольца с нормально расположенной плоской преградой // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. — 2024. — Т. 17, № 4. — С. 71—80. — [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2024.17\(4\)-5](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2024.17(4)-5).
- Монахов Р. Ю., Родионов А. А., Капранов И. Е. и др. Численное и физическое моделирование генерации и эволюции вихревых колец в крупномасштабном гидрофизическом бассейне // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. — 2024. — Т. 17, № 4. — С. 55—70. — [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2024.17\(4\)-4](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2024.17(4)-4).
- Официальный сайт Санкт-Петербургского филиала Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН (Лабораторно-испытательный комплекс). — 2026. — URL: <https://spb.ocean.ru/laboratornyy-kompleks/> (дата обр. 02.05.2026).
- Родионов А. А., Ванкевич Р. Е., Лобанов А. А. и др. Термостратифицированный бассейн Санкт-Петербургского филиала Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН для моделирования гидрофизических процессов // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. — 2024а. — Т. 17, № 4. — С. 90—99. — [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2024.17\(4\)-8](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2024.17(4)-8).
- Родионов А. А., Ванкевич Р. Е., Лобанов А. А. и др. 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. — [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18\(4\)-1](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18(4)-1).
- Родионов А. А., Никитин Д. А., Филин К. Б. и др. Гидроакустический бассейн Санкт-Петербургского филиала Института океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. — 2024b. — Т. 17, № 4. — С. 109—121. — [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2024.17\(4\)-9](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2024.17(4)-9).
- Родионов А. А. и Хантулева Т. А. Принципы нелокальной гидродинамики океана // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. — 2026. — Т. 19, № 1. — С. 16—31. — [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.19\(1\)-1](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.19(1)-1).
- Akhavan-Safaei A., Samiee M. and Zayernouri M. Data-driven fractional subgrid-scale modeling for scalar turbulence: A nonlocal LES approach // *Journal of Computational Physics*. — 2021. — Vol. 446. — P. 110571. — <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2021.110571>.
- Khantuleva T. A. Models of Continuum Mechanics and Their Deficiencies // *Mathematical Modeling of Shock-Wave Processes in Condensed Matter*. — Singapore : Springer, 2022. — Chap. 1. — (Shock Wave and High Pressure Phenomena). — https://doi.org/10.1007/978-981-19-2404-0_1.
- Samiee M., Akhavan-Safaei A. and Zayernouri M. Tempered fractional LES modeling // *Journal of Fluid Mechanics*. — 2022. — Vol. 932. — A4. — <https://doi.org/10.1017/jfm.2021.955>.
- Zubarev D. N. Nonequilibrium Statistical Thermodynamics. — Moscow : Nauka, 1971. — P. 377—390.
- Zubarev D. N. and Tischenko S. V. Nonlocal hydrodynamics with memory // *Physica*. — 1972. — Vol. 59, no. 2. — P. 285—304. — [https://doi.org/10.1016/0031-8914\(72\)90081-1](https://doi.org/10.1016/0031-8914(72)90081-1).

THE REVIVAL OF PHYSICAL MODELLING IN OCEANOLOGY: INTEGRATION OF EXPERIMENTAL AND COMPUTATIONAL METHODS BASED ON PRECISION LABORATORY RESEARCH

A. A. Rodionov¹, A. A. Lobanov¹, R. E. Vankevich¹, N. N. Shpilev¹, A. Yu. Dvornikov^{*,1}

¹ Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

*Corresponding author: Anton Dvornikov, dvornikov.ayu@spb.ocean.ru

Received: 24 September 2026 Accepted: 15 October 2026 Published: 0 October 2026

Abstract. The article discusses the revival of interest in physical modelling in oceanology on a new technological basis. It is shown that modern computational methods (Large Eddy Simulation, Neural Differential Models) require detailed verification against reference data that only high-precision laboratory experiments can provide. Using the example of the Unique Scientific Facility “Laboratory-Test Complex” of the St. Petersburg Branch of the Shirshov Institute of Oceanology, the integration of physical modelling, digital twins, and machine learning methods is demonstrated. The results of experiments on convective vortex structures and the generation of vortex rings in a stratified environment are described. The prospects of using nonlocal hydrodynamics and neural network parameterizations for creating a new generation of ocean circulation models are substantiated.

Keywords: physical modelling, oceanology, laboratory experiment, large eddy simulation, digital twins, neural network parameterizations, nonlocal hydrodynamics

Funding. The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for the Shirshov Institute of Oceanology (project No. FMWE-2024-0029).

For citation: Rodionov A. A., Lobanov A. A., Vankevich R. E., Shpilev N. N., Dvornikov A. Yu. The Revival of Physical Modelling in Oceanology: Integration of Experimental and Computational Methods Based on Precision Laboratory Research // Bulletin of the Department of Earth Sciences of the Russian Academy of Sciences. — 2026. — Vol. 18, № 3. — NZ1005. — <https://doi.org/10.2205/2026NZ000382>