



DOI [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18\(4\)-2](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18(4)-2)

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

УДК 532.51; 532.54

© Р. Е. Ванкевич*, А. А. Родионов, Н. Н. Шпилев, В. В. Чеботкова, 2025

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

*rvankevich@mail.ru

Моделирование зарождения и эволюции конвективных вихревых структур на склоне. Численный эксперимент

Статья поступила в редакцию 08.09.2025, после доработки 02.12.2025, принята в печать 06.12.2025

Аннотация

Разрабатывается детальная негидростатическая модель гравитационного течения над наклонным дном, способная явно воспроизводить конвективные ячейки для последующего обобщения и разработки новых параметризаций. Для минимизации численных шумов использован метод наклонного расчетного домена и регулярная прямоугольная сетка. Исследованы свойства адвективных схем высокого порядка точности. Показана принципиальная возможность явного численного воспроизведения относительно крупных (порядка метра и более) турбулентных структур в океане — конвективных ячеек. Накопление поверенного на физическом эксперименте цифрового массива высокого разрешения 3-мерных полей скорости и трассеров (активного и пассивного) для диапазона чисел Рейнольдса 30–300. В дальнейшем данный массив будет использован для разработки новых параметризаций в крупномасштабную модель циркуляции океана.

Ключевые слова: численная модель, моделирование больших вихрей, лабораторный бассейн

© R. Ye. Vankevich*, A. A. Rodionov, N. N. Shpilev, V. V. Chebotkova, 2025

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

*rvankevich@mail.ru

Modeling the origin and evolution of convective vortex structures on a slope. Numerical experiment

Received 08.09.2025, Revised 02.12.2025, Accepted 06.12.2025

Abstract

A detailed non-hydrostatic model of gravitational flow over an inclined bottom is being developed, which is capable of explicitly reproduce convective cells for future generalization and new parameterizations development. To minimize numerical noise, the method of an inclined computational domain and a regular rectangular grid are used. The properties of high-order accurate advection schemes are investigated. The fundamental possibility of explicitly numerical reproduction of relatively large (on the order of a meter or more) ocean turbulent structures, such as convective cells, is demonstrated. A high-resolution digital array of 3-dimensional velocity and tracer fields (active and passive) created based on a physical experiment for a range of Reynolds numbers of 30–300. This array will be used to develop new parameterizations for a large-scale ocean circulation model.

Keywords: numerical model, large eddy simulation, laboratory tank

Ссылка для цитирования: Ванкевич Р.Е., Родионов А.А., Шпилев Н.Н., Чеботкова В.В. Моделирование зарождения и эволюции конвективных вихревых структур на склоне. Численный эксперимент // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2025. Т. 18, № 4. С. 20–27. EDN EISBND. [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18\(4\)-2](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18(4)-2)

For citation: Vankevich R.Ye., Rodionov A.A., Shpilev N.N., Chebotkova V.V. Modeling the origin and evolution of convective vortex structures on a slope. Numerical experiment. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2025;18(4):20–27. [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18\(4\)-2](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18(4)-2)

1. Введение

Современные вихреразрешающие модели океана имеют концептуальное сходство с хорошо зарекомендовавшим себя методом моделирования больших вихрей (LES), используемым в вычислительной гидродинамике для количественного описания трехмерной турбулентности. В обоих случаях с помощью сетки удастся выделить только самые крупные турбулентные вихри. Цель данной статьи — использовать это сходство и разработать подробную численную модель гравитационного течения над наклонным дном, способную в некоторой мере явно воспроизводить конвективные ячейки для последующего обобщения и параметризации полученных результатов.

В рамках физического эксперимента в лабораторном бассейне [1] описана общая структура струйного 3-мерного плотностного течения над наклонным дном в стратифицированном бассейне, определены характерные масштабы и безразмерные параметры течения.

В задачи статьи входят:

- оценка возможностей в рамках современных вычислительных технологий построения модели с явным разрешением вихревых структур, возникающих при движении конвективной струи в стратифицированной среде;
- сравнение расчетов с использованием современных схем адвекции импульса и трассера с результатами физического эксперимента;
- анализ эффективности повышения разрешения расчетной сетки в сопоставлении с дополнительными затратами на вычисления.

2. Математическая постановка

Сформулированная в [2] полная трехмерная негидростатическая модель бассейна призвана наиболее полно, в явном виде воспроизводить конвективные, турбулентные, вихревые и волновые процессы в лабораторном бассейне ИО РАН [3]. Для построения LES модели склоновой конвекции используется та же негидростатическая система уравнений сохранения массы, импульса (1, 2) и переноса трассеров с (3): активного — температуры и пассивного — уранина:

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = \partial_x u + \partial_y v + \partial_z w = 0, \quad (1)$$

$$\partial_t \mathbf{v} = -(\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} - \nabla P + b \hat{\mathbf{g}} - \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + F_v, \quad (2)$$

$$\partial_t c = -\mathbf{v} \cdot \nabla c - \nabla \cdot \mathbf{q}_c + F_c, \quad (3)$$

где $\mathbf{v}(u, v, w)$ — скорость среды; $(\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v}$ — адвекция момента; ∇P — кинематический градиент давления; $\nabla \cdot \boldsymbol{\tau}$ — молекулярное или турбулентное вязкое напряжение; F_v, F_c — произвольные внутренние источники импульса и трассера; $\mathbf{v} \cdot \nabla c$ — адвекция трассера (температуры); $\nabla \cdot \mathbf{q}_c$ — молекулярная или турбулентная диффузия; $b = \frac{-g\rho'}{\rho_0}$ — редуцированное гравитационное ускорение (плавучесть) $\hat{\mathbf{g}} = (0, 0, 1)$; $\rho = \rho_0 + \rho$ — плотность среды.

В полной нелинейной постановке решение поставленной задачи строится численно с использованием негидростатической модели Oceananigans [4] и адвективной схемы 5-го порядка точности WENO [5]. Выбор данного классического океанологического пакета обусловлен намерением в дальнейшем использовать модель для обобщения результатов на масштабы реальных географических объектов. В отличие от использованной ранее [2] программной среды OpenFOAM, в рамках Oceananigans указанная система может быть легко трансформирована в привычные уравнения геофизической гидродинамики.

Вычисление плотности по температуре проводилось с использованием международного уравнения состояния TEOS-10.

Моделирование нестационарных турбулентных ограниченных течений осуществляется с использованием метода моделирования больших вихрей. Уравнения решаются численно для \mathbf{v} , P , а флуктуационная компонента определяется с помощью подсеточной модели, предложенной Смагоринским [6], который представляет турбулентную вязкость в виде:

$$\nu_e = (Cs \cdot \Delta f)^2 \cdot \sqrt{2\Sigma^2} \quad (4)$$

и турбулентную диффузию как

$$\kappa_e = \nu_e / \text{Pr}. \quad (5)$$

где Δf — ширина фильтра, $\Sigma^2 = \Sigma_{ij}\Sigma_{ij}$ — двойное скалярное произведение тензора деформаций, Pr — турбулентное число Прандтля, Cs — это коэффициент Смагоринского, значение по умолчанию равно 0,16, согласно анализу [7]. Значение ν_e рассчитывается на каждом шаге по явной схеме.

3. Численная реализация

В океанологии для представления переменного по пространству рельефа дна используются несколько методов вертикальной дискретизации численного решения. Наиболее популярные из них z и Sigma координаты.

В Z -координатной модели дно аппроксимируется «ступеньками» — ряд ячеек, которые частично заполнены водой, а частично «заблокированы» как суша. Проблема ступенек — это ошибка в расчёте горизонтального давления и, как следствие, течений, которая возникает, когда дно океана или рельеф изопикнических поверхностей (поверхностей постоянной плотности) наклонены под углом по отношению к горизонтальным уровням модели.

В Sigma-координатной модели вертикальная координата «привязана» ко дну. Проблема ступенек решается, но появляются другие сложности, например, ошибки при расчете давления в областях с сильным перепадом глубин.

В итоге при использовании любого из описанных подходов следует ожидать некоторого искажения придонных течений: модель может плохо воспроизводить придонные пограничные слои и каскадирование плотных вод по склону.

Так как цель данной работы получить насколько можно более подробное и точное решение для различных режимов склоновой конвекции, для пространственной дискретизации выбран довольно редко применяемый метод наклонного расчетного домена. Суть метода состоит в том, что «горизонтальные» грани ячеек располагаются параллельно наклону дна, как показано на рис. 1.

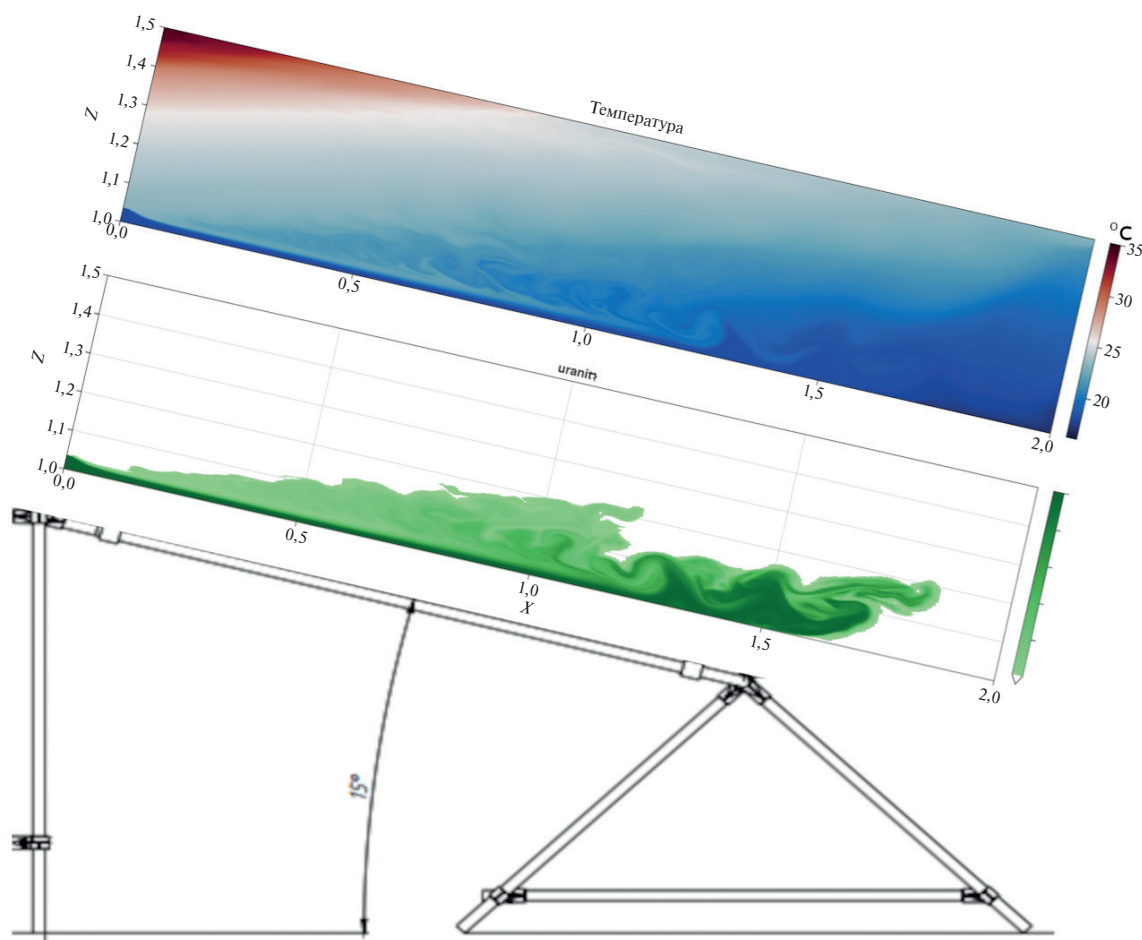


Рис. 1. Схематическое представление расчетного домена и пример расчета склоновой конвекции (безразмерная концентрация трассера) в условиях вертикальной термической стратификации лабораторного бассейна

Fig. 1. Schematic representation of the calculation domain and an example of slope convection simulation (dimensionless tracer concentration) in presence of vertical thermal stratification in a laboratory tank

При этом необходимо повернуть направление действия силы тяжести на угол наклона домена. Важно подчеркнуть, что это не физическое искажение домена, а лишь математический поворот, который помогает снизить ошибки конечно-объемной аппроксимации уравнений модели. Учитывая ограниченную применимость данного метода для отдельных небольших участков подводных склонов, им часто пренебрегают в силу необходимости вносить существенные изменения в код модели. Для сформулированного в псевдообъектной среде Julia модели Oceananigans это не проблема: вся задача реализуется за счет изменения направления на некоторый угол θ гравитационного ускорения в уравнении плавучести:

$$\hat{g} = (\sin\theta, 0, \cos\theta). \quad (6)$$

Такое же преобразование может быть применено и к изменению оси вращения для силы Кориолиса в более полной постановке задачи.

Дискретизация систем уравнений (1–3) осуществлялась методом конечных объемов [7] на равномерной сетке. Шаг по пространству вдоль склона выбирался из анализа среднего размера вихрей на фотографиях струи в верхней проекции (верхний фрагмент рис. 2). По условно «горизонтальным направлениям» x , y шаг составил 5 мм. Данное разрешение позволяет уверенно моделировать вихревые движения масштаба порядка 5 см и больше.

Для определения требуемого шага по вертикали проводились предварительные численные эксперименты для вертикальных разрешений 5, 2,5, 1 мм с использованием различных схем адвекции импульса и трассера. Результаты предварительных экспериментов представлены на рис. 2. Вертикальной линией

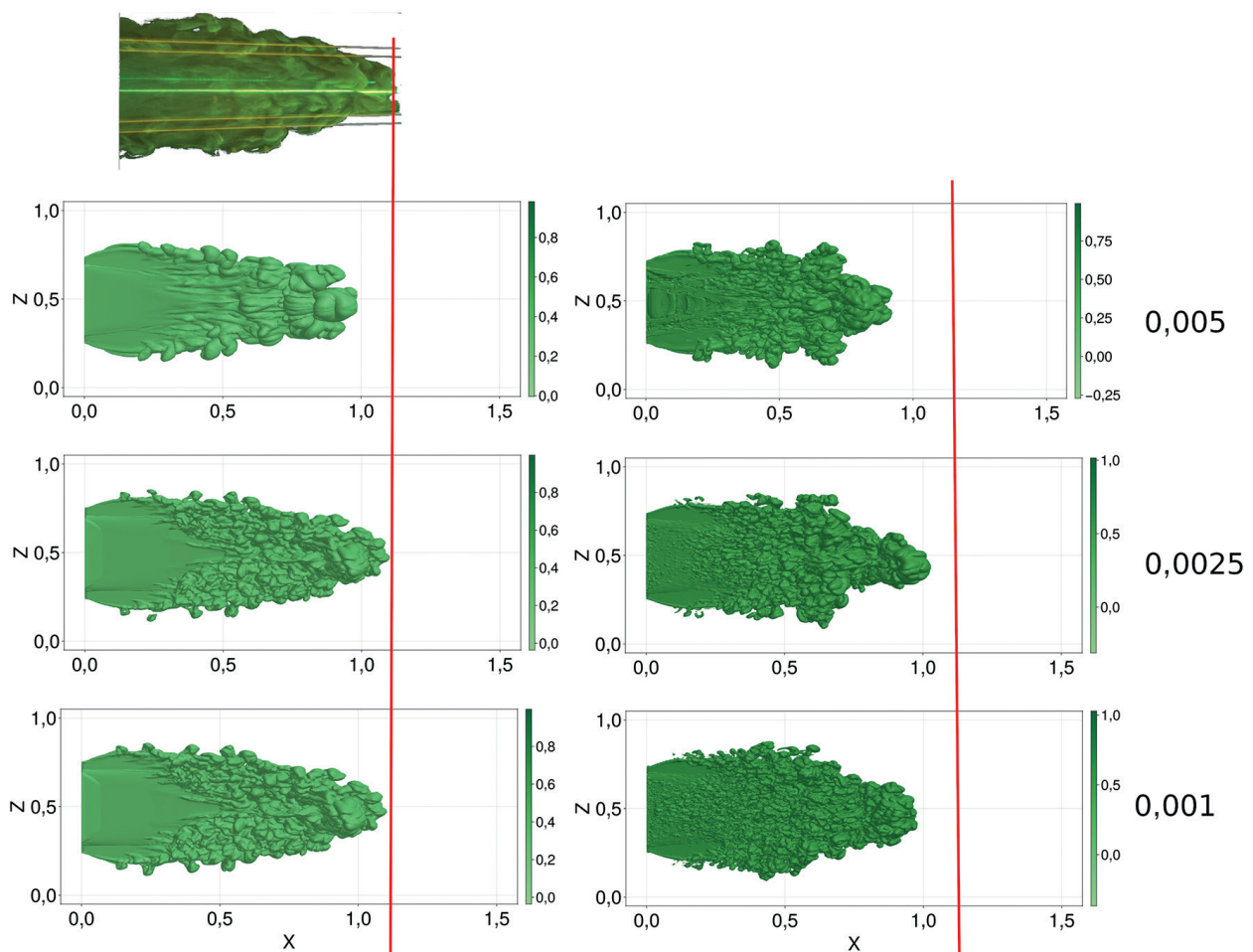


Рис. 2. Сравнительный анализ решений с использованием различных адвективных схем. Вертикальной линией обозначено положение передней кромки струи по результатам измерений в бассейне. Адвективные схемы: левый столбец — WENO, правый —противопоточная 5-го порядка точности

Fig. 2. Comparative analysis of different advective schemes. The vertical line indicates the position of the jet's leading edge measured in the laboratory tank. Advective schemes: left column — WENO, right column — 5th-order up-wind

на рисунке обозначено положение передней кромки струи по результатам изменений в бассейне. Анализ структуры вихрей и положения кромки струи показал, что разрешение 2,5 мм — достаточно, и дальнейшие расчеты проводились с пространственным разрешением $5 \times 5 \times 2,5 \text{ мм}^3$. В качестве начальных условий задавались: измеренный начальный профиль температуры и нулевые значения скорости по всему бассейну.

На левой границе вток для задания 3-мерной струи задавался также по данным измерений температуры и определенных из анализа видеозаписей скорости и толщины и ширины струи на входе в расчетный домен.

На нижней границе придонное трение задавалось квадратичным законом сопротивления с постоянным коэффициентом сопротивления для гладкого дна — 0,016.

Правая граница расчетного домена вынесена значительно за пределы склона для минимизации граничного эффекта и формирования обратного циркуляционного движения. Для скаляров граничное условие формулировалось в виде нулевых градиентов в направлении склона, для скоростей — условие излучения [8].

На верхней границе использовано приближение «твердой крышки» (Rigid-Lid Approximation). Вместо того, чтобы моделировать движение свободной поверхности океана (которая колеблется из-за волн, приливов), её «заменяют» неподвижной твердой крышкой. Это фильтрует поверхностные гравитационные волны, которые имеют очень высокую скорость и сильно ограничивают шаг по времени в моделях.

4. Результаты

В ходе численных экспериментов по моделированию склоновой конвекции исследовалось влияние адвективных схем и вертикального разрешения на качество воспроизведения моделью общей структуры течения. В первую очередь оценивались скорость и путь, пройденный струей, а также размеры и положение вихревых структур по сечению струи. Сравнительный анализ решений с использованием различных адвективных схем и вертикального разрешения приведён рис. 2. В расчетах использовались адвективные схемы 5-го порядка точности WENO (weighed essentially non-oscillatory scheme) и традиционная противопоточная схема 5-го порядка точности. Адекватное качество воспроизведения характеристик потока достигается с адвективной схемой WENO уже на промежуточном вертикальном разрешении в 2,5 мм: вихревые образования концентрируются ближе к фронту струи, в центре струи плотность вихрей ниже, они ориентированы преимущественно в вертикальной плоскости и распространяются в направлении, перпендикулярном к направлению движению струи. Традиционная противопоточная схема (правые столбцы на рисунке) приближается к наблюдениям только на вертикальном разрешении в 1 мм, при этом структура вихрей менее выражена и их размеры существенно меньше наблюдаемых; путь пройденный струей значительно меньше наблюдаемого и воспроизводимого адвективной схемой WENO.

Полученные численные решения демонстрируют существенную трехмерность потока. Решение 2-мерной плоской задачи (наиболее часто рассматриваемой в литературе) имеет смысл только для ламинарного движения струи или физических экспериментов в лотке. Пример соответствующего расчета приведен на рис. 3. В случае развитого турбулентного движения, характерного для более высоких значений числа Рейнольдса, 2D решение существенно недооценивает потерю массы при распространении струи (отсутствие массообмена с окружающей средой в «горизонтальном» направлении перпендикулярном движению), что более чем на 30 % увеличивает глубину проникновения потока в плотные слои стратифицированной жидкости.

Результаты полного трехмерного негидростатического расчета плотностного течения в стратифицированной среде приведены на рис. 4. Условия физического эксперимента, описанные в [1] подобраны таким образом, чтобы воспроизвести процесс отрыва водных масс от склона и их дальнейшего распространения в окружающую среду в виде преимущественно горизонтального течения — интрузии. Согласно представленному результату, численная модель адекватно воспроизводит структуру плотностного течения, при этом слегка недооценивая путь, пройденный гравитационным течением до момента отрыва от склона. Данное утверждение справедливо при использовании адвективной схемы 5-го порядка точности WENO и толщиной расчетной ячейки в 2,5 мм и меньше. Для сравнения, на фрагменте рис. 4, б приведен расчет с использованием обычной противопоточной схемы 5-го порядка точности и вертикальным разрешением в 1 мм. Решение с использованием противопоточной схемы проигрывает по всем обсуждаемым выше параметрам: структура струи, размеры вихревых структур, дистанция распространения и точка отрыва от склона.

5. Дискуссия и выводы

В рамках развития цифровой копии большого стратифицированного бассейна ИО РАН сформулирована и опробована численная модель, адекватно воспроизводящая структуру плотностного течения на наклонном дне.

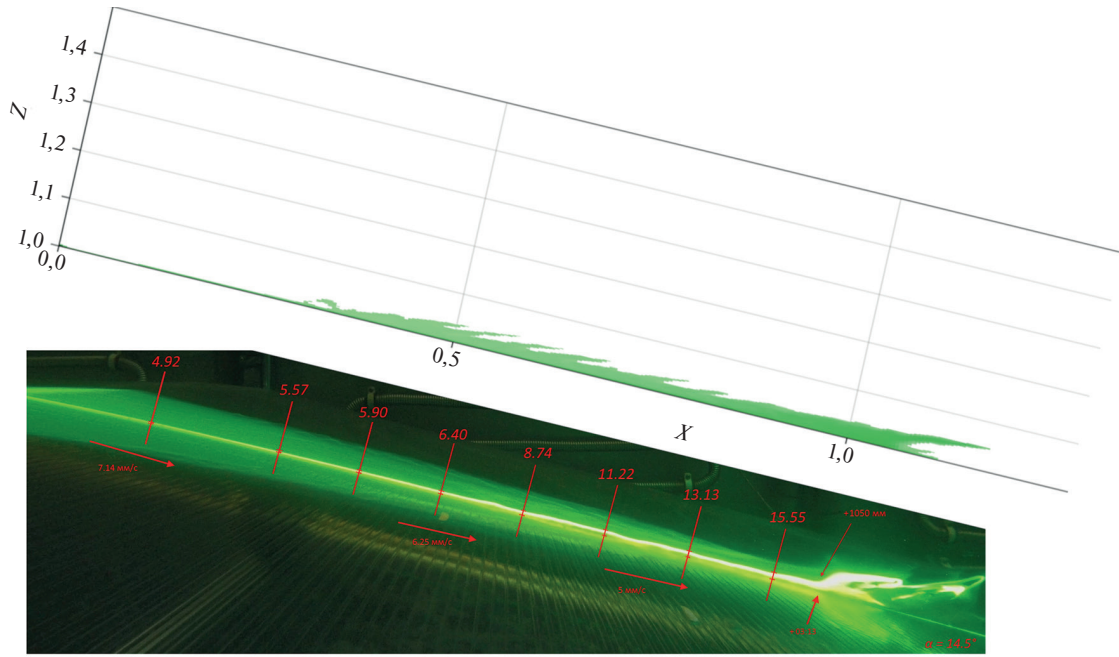


Рис. 3. Сравнение решения 2-мерной плоской задачи и для ламинарной струи. На фотографии числами обозначены измеренные толщины слоев, скорость и общее время распространения струи

Fig. 3. Comparison of the solution of a 2-dimensional flat problem and a laminar jet. The numbers in the photo represent the measured layer thicknesses, velocity, and total propagation time of the jet

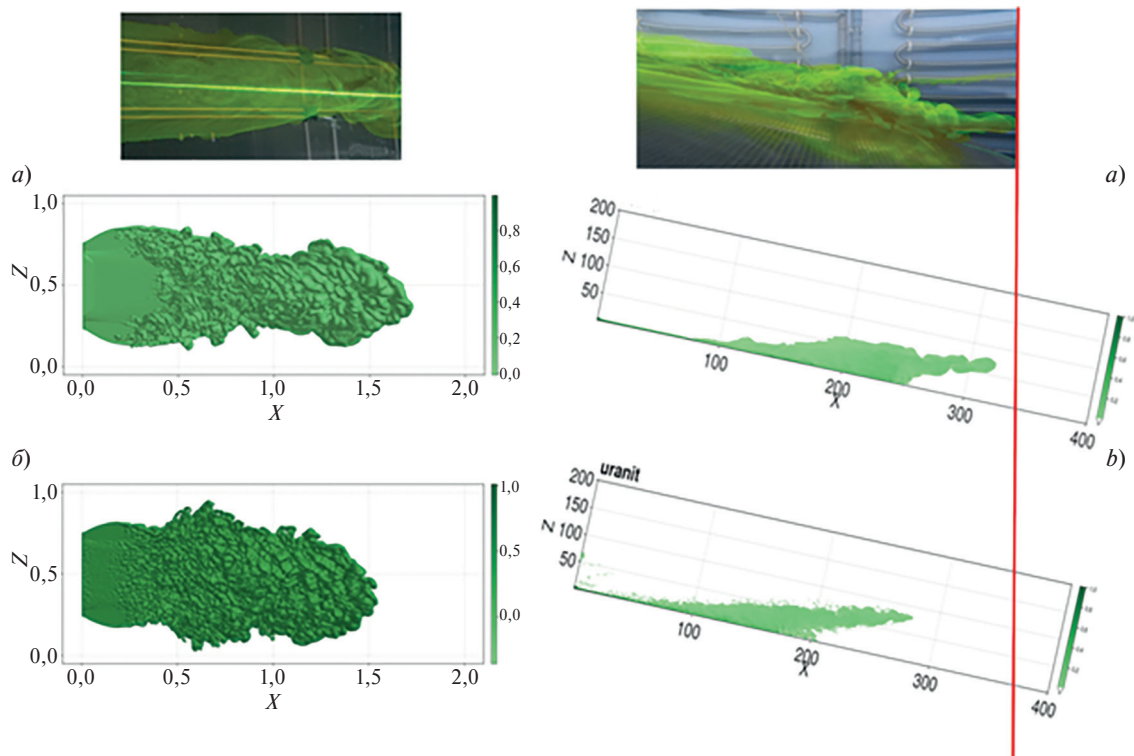


Рис. 4. Сравнение воспроизведения гравитационного течения различными адвективными схемами: *a* — WENO; *б* — противопоточная. Вертикальной чертой отмечена зафиксированная на камеру граница распространения интрузии в лабораторном эксперименте

Fig. 4. Comparison different advective schemes performance in the reproduction of the gravitational flow: *a* — WENO; *b* — Up-wind. The vertical line marks the boundary of the intrusion propagation in the laboratory experiment, which was captured by the camera

Принципиальным моментом является использование адаптивной схемы WENO для переноса импульса, температуры и трассеров на криволинейных сетках конечного объема. Эта схема автоматически адаптируется к изменению пространственного разрешения и позволяет проводить стабильное, высокоточное моделирование турбулентности в океане без диссипации при относительно невысоких требованиях к пространственному разрешению сетки. В рамках описанного численного эксперимента не удалось получить адекватного решения с использованием обычной противопоточной схемы даже при существенном сгущении сетки. Вероятно, такое решение может быть получено при дальнейшем уменьшении шага расчетной сетки, что не реализуемо в рамках имеющихся у авторов вычислительных мощностей.

Реализованная модель может быть использована для небольшого участка пологого подводного склона. Для всего океана с его сложным трёхмерным рельефом этот подход невозможен в принципе.

Данная работа показывает принципиальную возможность явного численного воспроизведения относительно крупных (достигающих в океане масштабов метра и более) турбулентных структур — конвективных ячеек. Основной задачей работы было накопление поверенного на физическом эксперименте цифрового массива 3-мерных подробных полей скорости и трассеров (активного и пассивного) для диапазона течений Re 30:300. В дальнейшем данный массив может быть использован для оценки эффективности (с учетом вращения Земли и фоновых течений) локальной океанологической модели с реалистичным дном, а также для разработки соответствующих параметризаций или обучения нейросети для включения в крупномасштабную модель циркуляции 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. 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)
2. Ванкевич Р.Е., Родионов А.А., Лобанов А.А., Филин К.Б., Шпилев Н.Н. Цифровая копия термостратифицированного бассейна Санкт-Петербургского филиала Института океанологии им. П.П. Шишова РАН. // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2024. Т. 17, № 4. С. 100–108. EDN CYWRAP. [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2024.17\(4\)-8](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2024.17(4)-8)
3. Родионов А.А., Ванкевич Р.Е., Лобанов А.А., Глитко О.В., Шпилев Н.Н. Термостратифицированный бассейн Санкт-Петербургского филиала Института океанологии им. П.П. Шишова 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)
4. Wagner G.L., Silvestri S., Constantinou N.C., et al. High-level, high-resolution ocean modeling at all scales with Oceananigans // *arXiv preprint*. 2025. arXiv:2502.14148. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2502.14148>
5. Silvestri S., Wagner G.L., Campin J.-M., et al. A new WENO-based momentum advection scheme for simulations of ocean mesoscale turbulence // *Journal of Advances in Modeling Earth System*. 2024. Vol. 16., Iss. 7. P. e2023MS004130. EDN ZJGUSH. <https://doi.org/10.1029/2023MS004130>
6. Smagorinsky J. General circulation experiments with the primitive equations: I. The basic experiment // *Monthly Weather Review*. 1963. Vol. 91. P. 99–164. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1963\)091<0099:GCEWTP>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1963)091<0099:GCEWTP>2.3.CO;2)

7. Lilly D.K. The representation of small-scale turbulence in numerical simulation experiments. University Corporation for Atmospheric Research. 1966. NCAR Manuscript No. 281. <https://doi.org/10.5065/D62R3PMM>
8. Schumann U., Sweet R.A. Fast Fourier transforms for direct solution of Poisson's equation with staggered boundary conditions // Journal of Computational Physics. 1988. Vol. 75. P. 123–137. [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(88\)90102-7](https://doi.org/10.1016/0021-9991(88)90102-7)

References

1. Rodionov A.A., Vankevich R. Ye., Lobanov A.A., Shpilev N.N. ... *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2024;17(4):90–99. [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18\(4\)-1](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18(4)-1) (In Russ).
2. Vankevich R. Ye., Rodionov A.A., Lobanov A.A., Filin K.B., Shpilev N.N. Digital copy of the thermally stratified water tank of St. Petersburg Branch of Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2024;17(4):100–108. [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2024.17\(4\)-8](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2024.17(4)-8) (In Russ).
3. Rodionov A.A., Vankevich R. Ye., Lobanov A.A., Glitko O.V., Shpilev N.N. 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).
4. Wagner G.L., Silvestri S., Constantinou N.C. et al. High-level, high-resolution ocean modeling at all scales with Oceananigans. *arXiv preprint*. 2025. arXiv:2502.14148. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2502.14148>
5. Silvestri S., Wagner G.L., Campin J.-M., et al. A new WENO-based momentum advection scheme for simulations of ocean mesoscale turbulence. *Journal of Advances in Modeling Earth System*. 2024;16(7): e2023MS004130. EDN ZJGUSH. <https://doi.org/10.1029/2023MS004130>
6. Smagorinsky J. General circulation experiments with the primitive equations: I. The basic experiment. *Monthly Weather Review*. 1963;91:99–164. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1963\)091<0099:GCEWTP>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1963)091<0099:GCEWTP>2.3.CO;2)
7. Lilly D.K. The representation of small-scale turbulence in numerical simulation experiments. University Corporation for Atmospheric Research. 1966. NCAR Manuscript No. 281. <https://doi.org/10.5065/D62R3PMM>
8. Schumann U., Sweet R.A. Fast Fourier transforms for direct solution of Poisson's equation with staggered boundary conditions. *Journal of Computational Physics*. 1988;75:123–137. [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(88\)90102-7](https://doi.org/10.1016/0021-9991(88)90102-7)

Об авторах

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

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

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

ЧЕБОТКОВА Василина Владимировна, ведущий инженер СПбФ ИО РАН, ORCID: 0009-0005-2724-9222, e-mail: vvvasilinaaa@mail.ru