

УДК 551.465:532.59

© А. А. Волкова¹, В. А. Гриценко²

¹ Балтийский федеральный университет им. И. Канта, г. Калининград

² Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

a.al.volkova@gmail.com, gritsenko-vl-al@mail.ru

ОСОБЕННОСТИ ЦИРКУЛЯЦИИ, ВОЗНИКАЮЩЕЙ ПРИ ПОГРУЖЕНИИ С ПОВЕРХНОСТИ КОНЕЧНОГО ОБЪЕМА ВОДЫ С ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ПЛАВУЧЕСТЬЮ

Статья поступила в редакцию 17.05.2019, после доработки 07.07.2019

Изучение динамики приповерхностного слоя воды при погружении в нее с поверхности конечного объема воды с отрицательной плавучестью или термика выполнено при помощи качественных экспериментов в гидродинамической ванне и численного моделирования изучаемого явления. Лабораторные эксперименты продемонстрировали вихревой и сильно нестационарный характер погружения с поверхности конечного объема воды с отрицательной плавучестью. В лабораторных условиях были зафиксированы все обычно наблюдаемые этапы трансформации формы вод термика – «гриб», вихревое кольцо и его распад. Численное моделирование подтвердило вихревой и короткоживущий характер возникающего течения и позволило детализировать процессы погружения конечного объема соленой воды в окружении пресной. Использование трех дополнительных модельных полей трассеров нейтральной плавучести позволило отследить изменчивость формы вод термика, а также процессов перемешивания и вовлечения в движение пресной воды. Детализация вертикальной циркуляции в окрестности погружающегося термика показала наличие восходящих движений пресной воды на его периферии. Данное обстоятельство в природных условиях будет блокировать на некоторое время в данной точке поверхности моря возможность формирования следующего термика.

Ключевые слова: сезонная конвекция, плавучесть, термик, вихревое кольцо, трансформация формы, численная модель, конвективная ячейка.

A. A. Volkova¹, V. A. Gritsenko²

¹ Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

² Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

a.al.volkova@gmail.com

FEATURES OF THE CIRCULATION ARISING WHILE SINKING FROM THE SURFACE OF A FINITE VOLUME OF WATER WITH NEGATIVE BUOYANCY

Received 17.05.2019, in final form 07.07.2019

The study of the dynamics of the near-surface layer of water when sinking from the surface of a finite volume of water with negative buoyancy (or the thermal) is performed by using qualitative experiments in the hydrodynamic flume and numerical simulation of the phenomenon under study. Laboratory experiments have demonstrated vortex and highly unsteady nature of the flow of the density-inhomogeneous water generated by immersion from the surface of the finite volume of water with negative buoyancy. All usually observed stages of transformation of the shape of water thermal were recorded in laboratory – the “mushroom”, the vortex ring and its decay. Numerical simulation confirmed vortex and short-lived nature of the emerging flow and allowed for detailisation the processes of immersion of the finite volume of salt water in a fresh environment. The use of three additional model fields of neutrally buoyant tracers made it possible to track the variability of the shape of the thermal, as well as the processes of mixing and involvement of fresh water into the motion. Detailisation of vertical circulation in the vicinity of the sinking thermal showed the presence of upward movements of fresh water on its periphery. In natural conditions, this circumstance should prevent for some time the possibility of generation of the next thermal at the given location of the sea surface.

Keywords: seasonal convection, buoyancy, thermals, vortex ring, transformation of shape, the numerical model, convective cell.

Ссылка для цитирования: Волкова А.А., Гриценко В.А. Особенности циркуляции, возникающей при погружении с поверхности конечного объема воды с отрицательной плавучестью // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2019. Т. 12, № 3. С. 26–35

For citation: Volkova A.A., Gritsenko V.A. Features of the circulation arising while sinking from the surface of a finite volume of water with negative buoyancy. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2019, 12, 3, 26–35

DOI: 10.7868/S2073667319030043

Основные черты конвективных процессов в приповерхностном слое воды в период осенне-зимнего выхолаживания на интегральном уровне хорошо известны [1–3]. В конце 1970-х гг. была выполнена целая серия экспериментальных исследований, позволившая получить ряд оценок и зависимостей об изменчивости параметров приповерхностного слоя воды при его выхолаживании с поверхности [4–9]. Итоговый обзор выполненных на тот момент времени исследований приведен в работе [10]. Анализ результатов лабораторных экспериментов и натуральных наблюдений, а также аналитические оценки и модели позволили описать основные черты теплообмена на границе воздух-вода и структурные особенности процесса конвективной неустойчивости в воде, включая расчет характерных масштабов [6, 7, 10].

Вместе с тем очевидные трудности проведения экспериментальных исследований и сложности построения аналитических моделей не позволяют говорить о полноте понимания структурно сложного и физически содержательного процесса приповерхностной конвекции. Отметим, в частности, что основной фокус внимания исследований был сосредоточен на поведении и роли ансамблей термик как интегрального механизма переноса отрицательной плавучести от поверхностных к подстилающим водам [5–8, 10]. Наконец, значимость конвективных процессов в изменчивости вертикальной термохалинной структуры моря и особенно в его прибрежной части поддерживает интерес к данному классу задач [11–14].

Цель данной работы заключается в изложении результатов исследования динамики вод приповерхностного слоя пресной воды при погружении в нее с поверхности конечного объема соленой воды.

Обычно [1, 2, 10] для погружающихся объемов жидкости с большей плотностью, чем у окружающей, используется термин «термик» с отрицательной плавучестью. В данной работе, кроме собственно процесса погружения в пресную воду некоторого фиксированного объема соленой воды (термика), будет рассмотрена и вовлекаемая в движение окружающая термик пресная вода. Для обозначения совокупности движений термика и окружающей его пресной воды, следуя [10], будет использоваться термин «конвективная ячейка».

В качестве основного инструмента исследований в работе была использована нелинейная двумерная модель динамики неоднородной по плотности жидкости [15, 16], дополненная качественным лабораторным экспериментом. Обращение к 2d-моделированию не случайно и определяется возможностями разрешения вертикальной циркуляции и перемешивания на малых вертикальных масштабах [9, 15, 16, 17].

Лоток

Для понимания особенностей изучаемого класса течений и необходимых требований к численному моделированию на первом этапе исследований была выполнена серия лабораторных экспериментов. В стеклянном гидрлотке с размерами $80 \times 60 \times 12,5$ см на поверхности пресной воды формировался объем соленой воды в 1–2 мл с избыточной плотностью $\sim 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-5}$ г/см³. Использование соленостного варианта для создания отрицательной плавучести воды объясняется двумя факторами. Во-первых, хорошо известны трудности термостабилизации воды в лабораторной установке. Во-вторых, процесс перемешивания по массе (солености) протекает значительно медленнее, чем по температуре, что облегчает наблюдение и регистрацию смены фаз возникающих течений. Фоторегистрация течений выполнялась фотоаппаратом Nikon D7000 с разрешением 16,1 млн пикселей (4928×3264) при использовании дополнительной оптики. Подсветка течений выполнялась набором светодиодных ламп.

Типичный вид последовательности трансформации массы соленой воды термика приведен на рис. 1. Сначала быстро формируется хорошо известная грибовидная форма термика (рис. 1, а), затем происходит расширение «шляпки» гриба (рис. 1, б) и появление хорошо различимого вихревого кольца (рис. 1, в). Затем (рис. 1, г) наступает фаза неустойчивости вихревого кольца и начало его распада на систему термиков меньшего масштаба [18, 19].

Количественные оценки характерных масштабов изменчивости формы термиков в лотке не проводились. Грубые оценки скорости погружения термиков по их пространственному положению и времени фиксации на фотографиях дали оценку в 3–5 мм/с, что практически совпадает с оценками других авторов [1, 9, 19]. В процессе экспериментов удалось получить все ранее наблюдаемые фазы трансформации первоначального пятна соленой воды, сначала – в объем грибовидной формы с тонкой длинной ножкой, затем – преобразование в вихревое кольцо и его последующий распад. Все эти структурно различные формы эволюции термиков при их погружении отмечались в ранее выполненных лабораторных экспериментах – например, рис. 77 на стр. 46, рис. 112 на стр. 68 и рис. 217 на стр. 128 [18], а также в работах [14, 19].

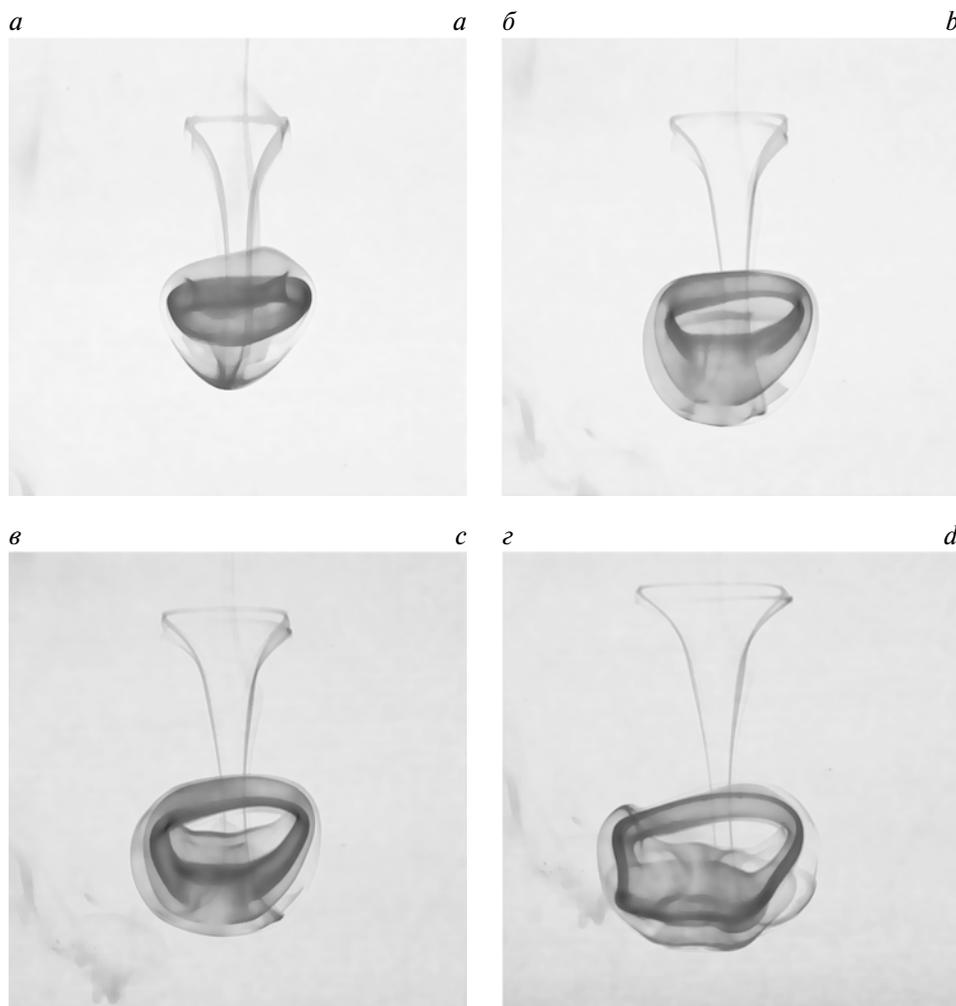


Рис. 1. Типичный вид последовательности этапов трансформации конечного объема соленой воды (термика) при его погружении с поверхности пресной воды.

Fig. 1. Successive stages of immersion of salt water (thermal) from the surface in the freshwater environment. The initial volume of the salt water is 2 ml; the density excess is 0,0001 g/cm³.

Модель

Исходя из очевидно вихревого характера неоднородных по плотности течений (рис. 1) для моделирования процесса погружения с поверхности малого объема воды с отрицательной плавучестью была использована вполне удовлетворяющая этим требованиям нелинейная двумерная модель [15, 16]. Незначительные скорости погружения соленой воды позволили предположить слаботурбулентный характер перемешивания, который был учтен при помощи простой схемы эффективной вязкости. Система уравнений модели, кроме уравнений для завихренности, плотности и функции тока, включила в себя еще три уравнения для трассеров, позволивших «подкрашивать» необходимые для детализации течений поведение конкретных объемов воды:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \nu_T \Delta \omega, \quad \Delta \Psi = \omega;$$

$$\frac{d\rho}{dt} = D_T \Delta \rho;$$

$$\frac{dc_k}{dt} = D_T \Delta c_k, \quad k = 1, 2, 3,$$

где $\omega = \partial u/\partial z - \partial w/\partial x$ – завихренность, ψ – функция тока, $u = \partial\psi/\partial z$ и $w = -\partial\psi/\partial x$ – горизонтальная и вертикальная составляющие скорости, g – ускорение силы тяжести, ρ_0 – плотность пресной воды, $\rho = \rho_0 + \sigma$ – плотность соленой воды, $v_T = v_0 + c_1(x, z, t) \cdot v_{\text{ЭФ}}$, $D_T = (Sc)^{-1} v_T$ – коэффициенты турбулентных вязкости и диффузии, $Sc = 2$ – турбулентное число Шмидта, $v_{\text{ЭФ}}$ – коэффициент эффективной вязкости, $v_0 = 0,015 \text{ см}^2/\text{с}$ – молекулярная вязкость воды, d/dt и Δ – операторы полной производной и Лапласа, c_k , $k=1, 2, 3$ – безразмерные величины, которые изменяются от 0 до 1, обладают нейтральной плавучестью, переносятся вместе с жидкостью и используются для трассировки выбранных объемов соленой и пресной вод. Трассер $c_1(x, z, t)$ использовался для идентификации вод термика и возможного учета наличия в нем турбулентных движений. Горизонтальная (Ox) и вертикальная (Oz) оси координат совпадают соответственно с дном и боковой стенкой модельного пространства.

В начальный момент времени пресная вода в модельном пространстве предполагалась неподвижной. Отрицательная плавучесть выбранного объема воды в расчетах обеспечивалась «добавкой» соли. Конечный объем соленой воды задавался в виде горизонтально протяженного прямоугольника размерами 31×16 узлов расчетной сетки или $[1.5h_0; 0.75h_0]$. При помощи второго трассера «подкрашивались» два объема пресной воды с размером 285×11 узлов расчетной сетки $[14.25h_0; 0.5h_0]$, расположенные в поверхностном слое слева и справа от начального положения соленой воды. Эволюция распределений данного трассера помогла отследить процесс вовлечения воды с поверхности при погружении термика. При помощи третьего трассера «подкрашивались» два горизонтально протяженных объема пресной воды с размерами 101×11 узлов, расположенные слева и справа от начального положения термика и на некоторой глубине от поверхности воды, соответственно, h_0 и $1.5h_0$. Эти объемы помогли в дальнейшем визуализировать процесс вовлечения в движение близких к поверхности вод. Все модельные поля задавались на сетке размерностью 601×801 или $30h_0 \times 40h_0$, безразмерная дискретизация по пространству $\Delta x = \Delta z = 0.05$.

Расчеты

При расчетах величины характерных масштабов модельных течений были следующими: $h_0 = 1-8 \text{ см}$, $\Delta\rho_0 = 0.00025-0.001 \text{ г/см}^3$, $u_0 = 0.5-3.0 \text{ см/с}$, $time_0 = h_0/u_0$. Величина эффективной вязкости задавалась в диапазоне $v_{\text{ЭФ}} = 0.1-0.3 \text{ см}^2/\text{с}$. Диапазоны изменчивости масштабов расчетных течений соответствуют ранее полученным оценкам [1, 6, 7, 10]. На рис. 2 приведен типичный вид распределений плотности и трассера для двух последовательных фаз модельного течения, иллюстрирующих процессы погружения конечного объема воды с отрицательной плавучестью (левый столбец графиков) и вовлечения пресных поверхностных вод (правый ряд графиков). На рисунке приводится только верхняя половина модельного пространства, в которой сосредоточены основные детали течения.

Использование второго трассера позволило детализировать процесс вовлечения в движение и последующее погружение пресных вод поверхностного слоя (рис. 2, правый ряд графиков). Хорошо видно, что погружающийся термик вовлекает за собой часть поверхностных вод, причем степень вовлечения уменьшается с расстоянием до термика. Описанное обстоятельство позволяет рассматривать термик и вовлекаемые им в движение поверхностные воды как компоненты единой конвективной ячейки.

Полученные в расчетах распределения завихренности и функции тока (рис. 3) демонстрируют отчетливо вихревой характер течения, хорошо заметный и в лабораторных экспериментах (рис. 1). На графиках завихренности, избыточной плотности и функции тока отчетливо виден процесс формирования вихревого кольца (ср. с рис. 1, в, г).

Отметим, что общая картина эволюции основных расчетных полей вполне соответствует имеющимся представлениям о конвективных процессах в приповерхностном слое воды [1, 3, 10, 17, 19] и дополняет их деталями процессов вовлечения в погружение и наличием восходящих движений пресной воды. Визуально картина модельного течения качественно близка к обычно наблюдаемым особенностям динамики неоднородной по плотности воды в такого рода ситуациях [8, 9, 18, 19].

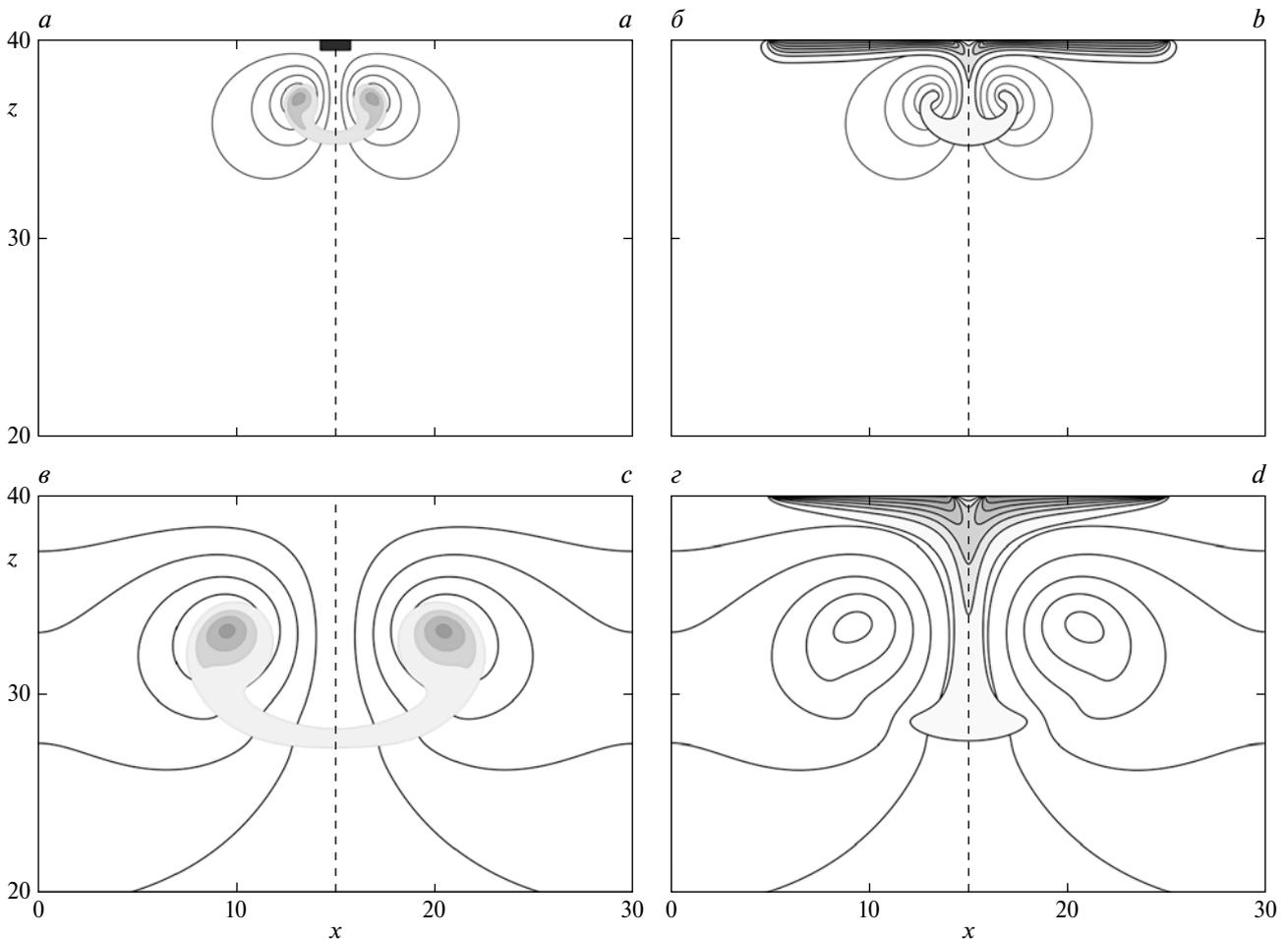


Рис. 2. Близкие к начальной (*a, б*; модельное время $call\ time = 12.5$) и финальной (*в, г*; $call\ time = 50.0$) фазы расчетного течения, возникшего при погружении с поверхности конечного объема соленой воды. Левый ряд изображений – избыточная безразмерная плотность воды ($\sigma = (\rho - \Delta\rho_0)/\Delta\rho_0$ изолинии пробегают значения от 0.03 до 0.12 с шагом 0.03 с серой заливкой) на фоне линий тока (изолинии – от -1.0 до $+1.0$ с шагом 0.2; штриховая линия соответствует нулевому значению). Правый ряд графиков – распределения второго трассера c_2 , идентифицирующего части поверхностного слоя воды (изолинии от 0.005 до 0.25 через 0.1 с серой заливкой) на фоне изолиний тока (изолинии – от -1.5 до 1.5 через 0.3). Характерные масштабы течения: $u_0 = 0.5$ см/с, $h_0 = 2$ см, $time_0 = 4$ с, $\Delta\rho_0 = 0.00025$ г/см³. Небольшой черный прямоугольник у верхней границы на графиках левого ряда обозначает начальное положение термика.

Fig. 2. Flow fields occurring during the immersion of the finite volume of saltwater from the surface. Close to the initial (*a, b*; $time = 12.5$) and final (*c, d*; $time = 50.0$) state of the model. The left row of the figure shows the dimensionless excess of density of water (isolines from 0.03 to 0.12, increment – 0.03, gray shading) and streamlines (isolines from -1.0 to $+1.0$, increment – 0.2, the dashed line corresponds to zero). The right row of the figure is the distribution of the second tracer c_2 highlighting the surface layer of water (isolines from 0.005 to 0.25, increment – 0.1, gray shading) and streamlines (isolines from -1.5 to 1.5, increment – 0.3). Parameters of the flow: $u_0 = 0.5$ cm/s, $h_0 = 2$ cm, $time_0 = 4$ s, $\Delta\rho_0 = 0.00025$ g/cm³. A small black rectangle at the upper border (*a, c*) indicates the initial position of the thermal.

Отсутствие длинной тонкой ножки в поле плотности в расчетном течении на фазе погружения пятна соленой воды с поверхности объясняется спецификой задания поля солености воды в модели – ненулевая соленость задавалась на первом расчетном слое под поверхностью воды, т.е. на внутреннем слое расчетной сетки. Это позволило не заниматься конструированием расчетного условия для плотности на верхней границе модельного пространства. Полученные распределения избыточной плотности (солености), собственно и определяющей отрицательную плавучесть воды, удовлетворительно воспроизвели на качественном уровне все наблюдаемые этапы поведения пятна соленой воды в лабораторных экспериментах [1, 10, 17, 19].

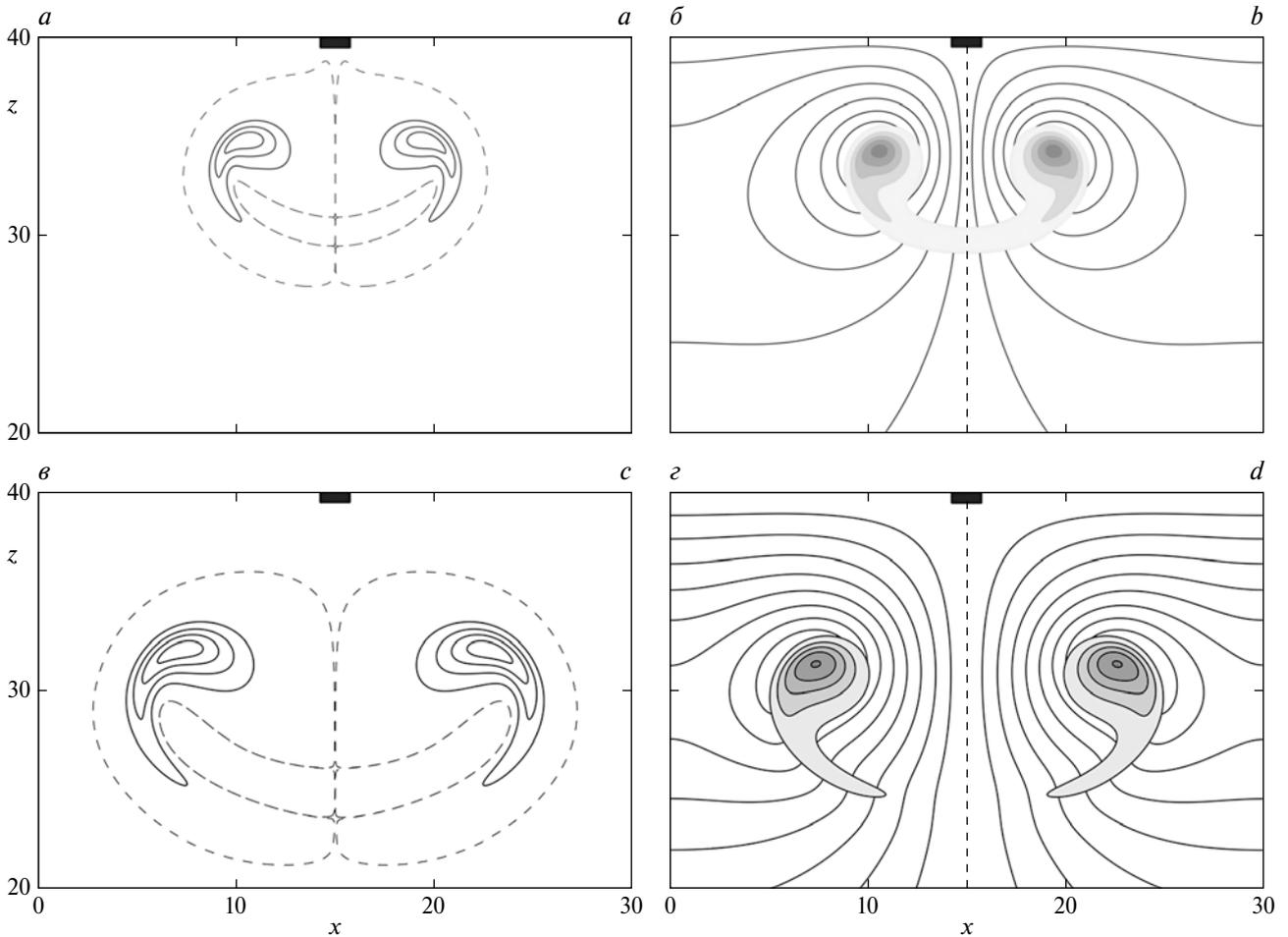


Рис. 3. Распределения завихренности ω (изолинии от -0.8 до 0.8 с шагом 0.2 ; *a, в*) и избыточной плотности $\sigma = (\rho - \Delta\rho_0)/\Delta\rho_0$ (изолинии от 0.005 до 0.045 с шагом 0.01 с серой заливкой; *б, г*) на фоне линий тока ψ (изолинии – от -1.5 до $+1.5$ с шагом 0.2) для моментов времени *call time* = 37.5 и *call time* = 75.0 (верхний и нижний ряд графиков соответственно) того же, что и выше расчетного течения.

Штриховые линии обозначают изолинии с нулевыми значениями. Хорошо виден этап трансформации термика в вихревое кольцо.

Fig. 3. Distributions of the vorticity ω (isolines from -0.8 to 0.8 , increment 0.2 ; *a, c*) and density excess (isolines from 0.005 to 0.045 , increment 0.01 , gray shading; *b, d*) on the background of the streamlines (isolines – from -1.5 to $+1.5$, increment 0.2) for two time steps: 37.5 (*a, c*) and 75.0 (*b, d*). Dashed lines show zero value isolines.

The stage of transformation of the thermal into a vortex ring is clearly observed.

Проиллюстрируем теперь более детально особенности вертикальных движений в приповерхностном слое воды, порожденных погружением термика. На рис. 4 приведены распределения поля вертикальной скорости воды и третьего трассера в модельном пространстве для двух моментов времени.

Выполненные расчеты показали, что одновременно с погружением более тяжелых (соленых) вод термика рядом с ним образуются восходящие движения воды. В самом деле, выбранные для идентификации этого процесса объемы воды, расположенные ниже поверхностного слоя, вовлекаются в круговорот общего движения и на первой стадии поднимаются к поверхности воды (ср. начальное и следующее положения подкрашенного объема воды на рис. 4, *a*), а затем вовлекаются в процесс погружения (рис. 4, *б*). Несимметричный характер распределения изолиний третьего трассера на графике рис. 4, *б* объясняется неодинаковой глубиной начального положения «подкрашенных» объемов воды, соответственно h_0 и $1.5h_0$.

Очевидно, что в случае процесса осенне-зимнего выхолаживания воды с поверхности восходящие движения воды в окрестности погружающего термика какое-то время будут блокировать возможность

зарождения нового термика в этой же точке поверхности воды. Известно [1, 10, 18], что в лабораторных экспериментах в условиях ограниченного объема воды и площади ее поверхности (или дна), стационарности охлаждения с поверхности (или прогрева дна) возникает хорошо различимая ячеистая структура из конвективных ячеек. В реальных условиях выхолаживания воды с поверхности появления термиков носит случайный характер [2, 4–6, 10]. Локальный (по времени и пространству) характер записания процесса возникновения термика в окрестности конвективной ячейки не противоречит постоянству проникновения холода через поверхность воды.

Наиболее отчетливо особенности вертикальных движений жидкости видны на профиле распределения вертикальной скорости на горизонтальном сечении модельного пространства (рис. 5).

Расчеты показали, что на описываемом этапе модельного течения скорость погружения воды с наибольшей плотностью (т.е. находящейся в центре плотностной неоднородности) близка к нулевой, а экстремумы вертикальной скорости наблюдаются для вод с небольшой избыточной плотностью, т.е. для вовлеченных в движение вод. Таким образом, возникновение погружающегося с поверхности воды термика приводит к формированию конвективной ячейки, включающей в себя кроме вод термика, еще и вовлекаемые им в вертикальную циркуляцию рядом расположенные объемы пресной воды. Очевидно, что время существования такой конвективной ячейки конечно, что должно способствовать появлению эффекта перемежаемости в распределении плотности поверхностного слоя воды на малых линейных масштабах.

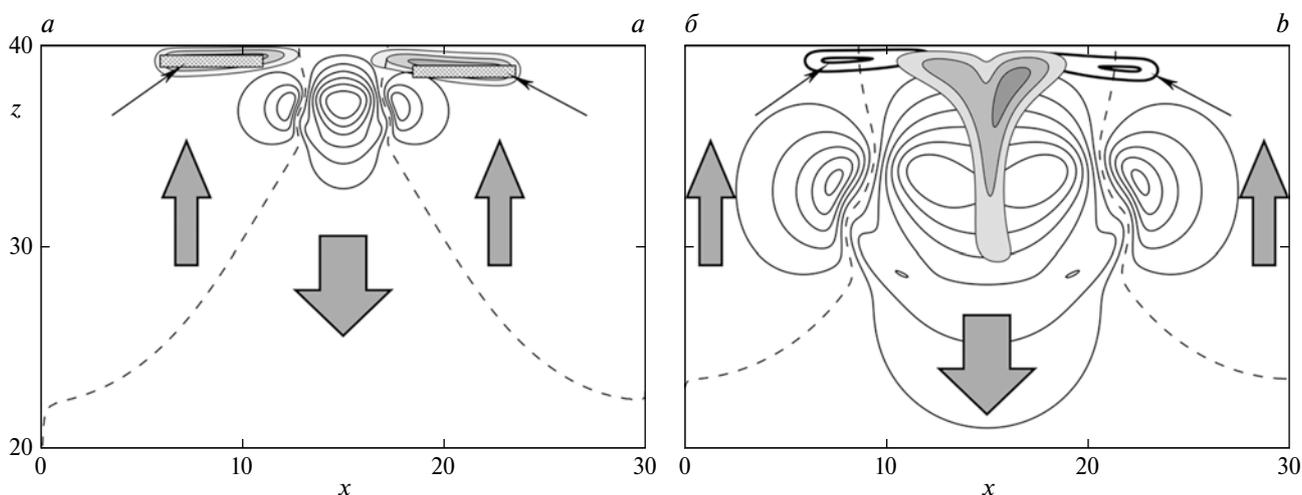


Рис. 4. Распределения изолиний значений вертикальной скорости для двух фаз (а, б) расчетного течения, иллюстрирующих динамическую структуру конвективной ячейки, сформировавшейся при погружении термика для двух моментов модельного времени (*call time* = 12.5 и 50.0) на фоне изолиний третьего трассера c_3 , использованного для идентификации двух объемов пресной воды приповерхностного слоя. Изолинии значений третьего трассера пробегают значения от 0.05 до 0.15 с шагом 0.05 с серой заливкой. Характерные масштабы течения: $u_0 = 0.5$ см/с, $h_0 = 2$ см, $time_0 = 4$ с, $\Delta\rho_0 = 0.00025$ г/см³. Большие стрелки с серой заливкой показывают интегральное направление вертикальной циркуляции воды в конвективной ячейке. Тонкие черные стрелки указывают на предшествующее по фазе положение «подкрашенного» третьим трассером объемов подповерхностной воды: на левом графике стрелка указывает на начальное положение «подкрашенного» объема воды (на рисунке он заштрихован); на правом графике стрелка указывает на положение изолиний третьего трассера (толстые черные линии со значениями 0.25 и 0.5) для *call time* = 12.5.

Fig. 4. Vertical velocity distribution for two phases (a, *time* = 12.5 and c, *time* = 50.0) of the simulated flow. Figures illustrate the dynamic structure of a convective cell formed due to immersion of the thermal into freshwater environment. Isolines of the third tracer – from 0.05 to 0.15, with the increment 0.05 – are shown by gray shading. Parameters of the flow: $u_0 = 0.5$ cm/s, $h_0 = 2$ cm, $time_0 = 4$ s, $\Delta\rho_0 = 0.00025$ g/cm³. Large gray arrows indicate the integral direction of the vertical circulation of water in a convective cell. Thin black arrows indicate the initial position of the “tinted” third tracer of subsurface water volumes: a – the arrow indicates the initial position of the “tinted” volume of water (in the figure it is shaded); b – the arrow indicates the position of the isolines of the third tracer (thick black lines – values 0.25 and 0.5) for *call time* = 12.5.

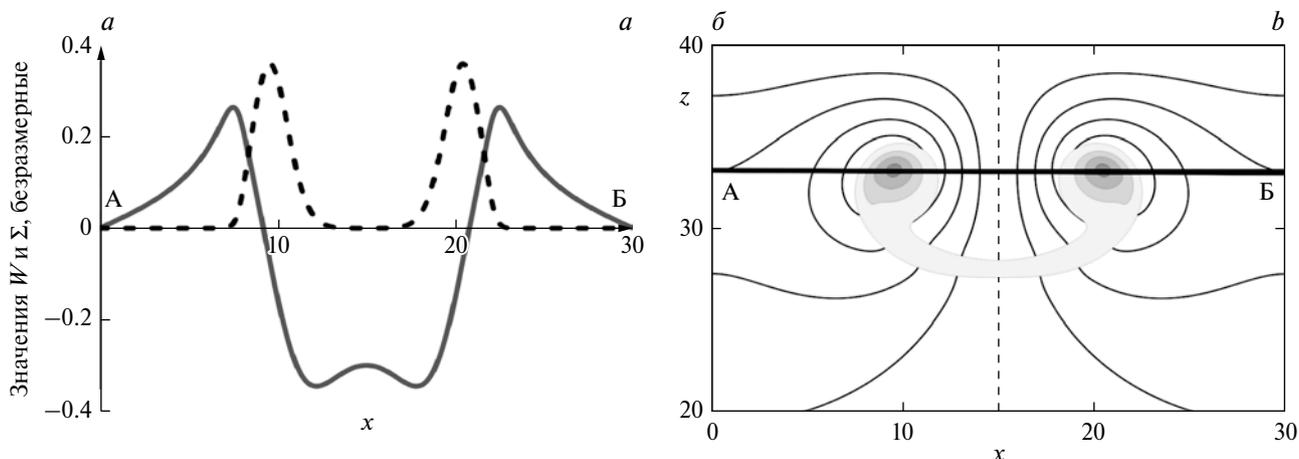


Рис. 5. Распределение значений вертикальной скорости неоднородной по плотности воды на горизонтальном сечении АБ модельного пространства (*call time* = 50). На левом графике (а) сплошная линия соответствует вертикальной скорости W , а штриховая – значениям избыточной плотности $\Sigma = 10\sigma$, $\sigma = (\rho - \Delta\rho_0)/\Delta\rho_0$ на сечении АБ (см. горизонтальную линию на правом рисунке). Масштабирование значений плотности выполнено для корректной одновременной визуализации двух графиков. На правом графике (б) приведены распределения избыточной плотности $\sigma = (\rho - \Delta\rho_0)/\Delta\rho_0$ (изолинии от 0.005 до 0.033 с шагом 0.007 и серой заливкой) на фоне изолиний тока (значения от -1.5 до 1.5 с шагом 0.3). Характерные масштабы течения: $u_0 = 0.5$ см/с, $h_0 = 2$ см, $time_0 = 4$ с, $\Delta\rho_0 = 0.00025$ г/см³.

Fig. 5. Vertical velocity values distribution of the non-uniform in density water on a horizontal section АБ in the model space (*call time* = 50). On the panel (а), the solid line corresponds to the vertical speed, and the dashed line to the values of the density excess at the АБ section. Scaling of density values is performed for correct simultaneous visualization of two graphs. The right graph (б) shows the distribution of the density excess (isolines from 0.005 to 0.033, increment – 0.007 and gray shading) on the background of the streamlines (dashed lines, values from -1.5 to 1.5 , increment – 0.3). The parameters of the flow are: $u_0 = 0.5$ cm/s, $h_0 = 2$ cm, $time_0 = 4$ s, $\Delta\rho_0 = 0.00025$ g/cm³.

Выводы

При помощи серии лабораторных экспериментов и расчетов на нелинейной численной 2d-модели выполнено исследование особенностей динамики приповерхностного слоя воды, возникающей при погружении с поверхности пресной воды конечного объема соленой воды. Анализ параметров расчетных течений показал появление короткоживущей конвективной ячейки, объединяющей в себе нисходящие движения соленой воды и восходящие движения пресной. Распределения плотности, завихренности и функции тока модельных течений продемонстрировали известные этапы трансформации формы соленых вод термика при его погружении в пресную: быстро возникающая грибовидная форма, вихревое кольцо и начало его распада. Использование дополнительных трех трассеров нейтральной плавучести для идентификации соленых вод пятна и выбранных объемов пресных вод из приповерхностного слоя позволило визуализировать процесс вовлечения в поверхностном и приповерхностном слоях воды. Полученные в расчетах особенности строения конвективной ячейки позволили предположить, что именно вертикальная циркуляция в ней может быть причиной локального «запирания» процесса возникновения нового термика и погружения более тяжелой воды с поверхности в пределах горизонтального размера конвективной ячейки и времени ее существования.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-05-00717 (лабораторные эксперименты) и госзадания № 0149-2019-0013 (модельные расчеты).

Литература

1. Тернер Дж. Эффекты плавучести в жидкости. М.: МИР, 1977. 431 с.
2. Скорер Р. Аэрогидродинамика окружающей среды. М.: МИР, 1980. 549 с.
3. Гершуни Г.З. и др. Устойчивость конвективных течений. М.: Наука, 1989. 492 с.
4. Гинзбург А.И., Зацепин А.Г., Федоров К.Н. Тонкая структура термического пограничного слоя в воде у поверхности раздела воздух-вода // Известия АН СССР. Сер. Физика атмосферы и океана. 1977. Т. 13, № 12. С. 1268–1277.
5. Гинзбург А.И., Федоров К.Н. Охлаждение воды с поверхности при свободной и вынужденной конвекции // Известия АН СССР. Сер. Физика атмосферы и океана. 1978. Т. 14, № 1. С. 79–87.
6. Гинзбург А.И., Дикарев С.Н., Зацепин А.Г., Федоров К.Н. Феноменологические особенности конвекции в жидкости со свободной поверхностью // Известия АН СССР. Сер. Физика атмосферы и океана. 1981. Т. 17, № 4. С. 400–407.
7. Федоров К.Н. О физической структуре приповерхностного слоя океана // Метеорология и гидрология. 1981. № 10. С. 58–66.
8. Бунэ А.В., Дикарев С.Н., Зацепин А.Г., Тишаев Д.В. Пример численного и лабораторного моделирования процесса развития конвекции // Известия АН СССР. Сер. Физика атмосферы и океана. 1985. Т. 21, № 8. С. 892–895.
9. Бунэ А.В., Гинзбург А.И., Полежаев В.И., Федоров К.Н. Численное и лабораторное моделирование развития конвекции в охлаждающемся с поверхности слое воды // Известия АН СССР. Сер. Физика атмосферы и океана. 1985. Т. 21, № 9. С. 956–963.
10. Федоров К.Н. и др. Приповерхностный слой океана. Л.: Гидрометеоздат, 1988. 303 с.
11. Ингель Л.Х. К теории конвективных струй и термик в атмосфере // Изв. РАН: физика атмосферы и океана. 2016. Т. 53, № 6. С. 676–680.
12. Чубаренко И.П. Горизонтальный конвективный водообмен над подводными склонами. Калининград: Терра Балтика, 2010. 256 с.
13. Fer I., Lemmin U., Thorpe S.A. Cascading of water down the sloping sides of a deep lake in winter // Geophysical Research Letters. 2001. V. 28, N. 10. P. 2093–2096.
14. Thorpe S.A. Contribution of entrainment and vertical plumes to the winter cascading of cold shelf waters in a deep lake // Limnol. Oceanogr. 2002. V. 47, N. 2. P. 576–580.
15. Гриценко В.А., Юрова А.А. О распространении придонного гравитационного течения по крутому склону дна // Океанология. 1997. Т. 37, № 1. С. 44–49.
16. Гриценко В.А., Юрова А.А. Об основных фазах отрыва придонного гравитационного течения от склона дна // Океанология. 1999. Т. 39, № 2. С. 187–191.
17. Гебхарт Б. и др. Свободноконвективные течения, тепло- и массообмен. М.: МИР. В 2-х книгах. Кн. 1. 678 с.
18. Ван-Дайк М. Альбом течений жидкости газа. М.: МИР, 1986. 184 с.
19. Мелешико В.В. и др. Динамика вихревых структур. Киев: Наукова Думка, 1993. 279 с.

References

1. Turner J.S. Buoyancy Effects in Fluids. M., MIR, 1977. 431 p. (in Russian).
2. Scorer R.S. Environmental aerodynamics. M., MIR, 1980. 549 p. (in Russian).
3. Gershuni G.Z. et al. Stability of convective flows. M., Nauka, 1989. 492 p. (in Russian).
4. Ginsburg A.I., Dikarev S.N., Zatselin A.G., Fedorov K.N. Fine structure of the thermal boundary layer in the water near air-water interface. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. 1977, 13, 12, 1268–1277 (in Russian).
5. Ginsburg A.I., Fedorov K.N. Cooling of water from the surface under free and forced convection regimes. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. 1978, 14, 1, 79–87 (in Russian).
6. Ginsburg A.I., Zatselin A.G., Fedorov K.N. Phenomenological features of convection in a liquid from a free surface. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. 1981, 17, 4, 400–407 (in Russian).
7. Fedorov K.N. On the physical structure of the near-surface oceanic layer. *Russian meteorology and hydrology*. 1981, 10, 58–66 (in Russian).
8. Bune A.V., Dikarev S.N., Zatselin A.G., Tishaev D.V. Example of numerical and laboratory modeling process of development of convection. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. 1985, 21, 8, 892–895 (in Russian).
9. Bune A.V., Ginsburg A.I., Polezhaev V.I., Fedorov K.N. Numerical and laboratory modelling of the development of convection in a water layer cooling from its surface. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. 1985, 21, 9, 956–963 (in Russian).
10. Fedorov K.N. et al. Near-surface ocean layer. L., *Gidrometeoizdat*, 1988. 303 p. (in Russian).
11. Ingel L.Kh. On the Theory of Convective Jets and Thermals in the Atmosphere. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. 2016, 53, 6, 676–680 (in Russian).

12. *Chubarenko I.P.* Horizontal convection above underwater slopes. *Kaliningrad, Terra Baltica*, 2010. 256 p. (in Russian).
13. *Fer I., Lemmin U., Thorpe S.A.* Cascading of water down the sloping sides of a deep lake in winter. *Geophysical Research Letters*. 2001, 28, 10, 2093–2096.
14. *Thorpe S.A.* Contribution of entrainment and vertical plumes to the winter cascading of cold shelf waters in a deep lake. *Limnol. Oceanography*. 2002, 47, 2, 576–580.
15. *Gritsenko V.A., Yurova A.A.* About the propagation of the near-bottom gravity flow along the steep slope of the bottom. *Oceanology*. 1997, 37, 1, 44–49 (in Russian).
16. *Gritsenko V.A., Yurova A.A.* About the basic phases of separation of near-bottom gravity currents from the slope of the bottom. *Oceanology*. 1999, 39, 2, 187–191 (in Russian).
17. *Gebhart B.* et al. Buoyancy – induced flows and transport. M., MIR, B. 1, 1991. 678 p. (in Russian).
18. *Van Dyke M.* An album of fluid motion. M., MIR, 1986. 184 p. (in Russian).
19. *Meleshko V.V.* et al. Dynamics of vortex structures. *Kyiv, Naukova Dumka*, 1993. 279 p. (in Russian).