© Куприянова А. Е., Гриценко В. А., 2022, Океанологические исследования, 2022, Том 50, № 2, С. 106–124

УДК 551.465.41 : 551.558.1 DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2022.50(2).5

ПАДЕНИЕ ПЯТЕН СОЛЕНОЙ ВОДЫ НА НАКЛОННОЕ ДНО В ОКРУЖЕНИИ ПРЕСНОЙ: ДИНАМИКА И СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛОТНОСТНОГО ФРОНТА ВВЕРХ ПО СКЛОНУ

А. Е. Куприянова[1,2], В. А. Гриценко[2]

[1] Балтийский федеральный университет им. И. Канта,
Россия, 236016, Калининград, ул. А. Невского, д. 14,
e-mail: kupriyanova_ae@mail.ru;
[2] Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН,
Россия, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36,
e-mail: gritsenko-vl-al@mail.ru

Было выполнено исследование динамики двух малых объемов воды с отрицательной плавучестью (пятен соленой воды), имитирующих погружение более плотной воды в подстилающие воды в процессе выхолаживания поверхностных вод при сезонной конвекции в прибрежной зоне моря. Основными инструментами исследования стали лабораторный и численный эксперименты. Выделены основные этапы движения пятен – погружение, контакт и распространение по наклонному дну. Детализирован процесс взаимодействия части вод пятен при их движении вверх по склону дна. Снимки отдельных фаз движения пятен показали длительно сохраняемую неоднородность распределений трассеров, что позволило констатировать ламинарный характер возникающих течений. Анализ полученных в расчетах распределений трассеров позволил выделить характерные этапы взаимопроникновения части вод пятен, достигших дна, при их движении вверх по его склону: первоначальный контакт, «подныривание», «обволакивание» и «обрушение». Впервые было описано движение более плотных вод, возникающих в результате погружения отдельных конечных объемов отрицательной плавучести. Полученные результаты обратили внимание на интенсификацию перемешивания более плотных, чем подстилающие, вод в процессе выхолаживания приурезовых вод.

Ключевые слова: отрицательная плавучесть, сезонная конвекция, прибрежные воды, выхолаживание с поверхности, лабораторный эксперимент, вдольсклоновое течение, численная модель, присклоновая динамика вод

Введение

Натурные наблюдения в прибрежных водах при их выхолаживании с поверхности (Гидрометеорология и гидрохимия …, 1992; Fer et al., 2002) свидетельствуют о возможности возникновения на поверхности случайного набора более холодных (плотных) объемов воды (далее, пятен). Такие пятна в процессе своего вертикального погружения могут достигать склона дна и естественным образом порождать (в качестве некоторого взаимодействия множества пятен) вдольсклоновую динамику вод в приурезовых водах (Боуден, 1988; Бунэ и др., 1985; Гинзбург, Федоров, 1978;

Тернер, 1977; Федоров, Гинзбург, 1988; Чубаренко, 2010; Maxworthy, 1997). Ранее выполненные исследования коллапса пятен в двухслойной и стратифицированной по плотности жидкости (Wu, 1969; Баренблатт, 1978; Зацепин и др., 1978; Kao, Pao, 1980), а также на горизонтальном дне (Amen, Maxworthy, 1980; Flow Visualization…, 2012) показали осесимметричный характер растекания пятен с отличной от окружающей воды плотностью по пикноклину или дну. В случае наклонного дна лабораторные эксперименты авторов (Куприянова, Гриценко, 2021, рисунок 1а, б) констатировали нарушение симметрии движения по склону вод пятен. Факт движения части вод пятен вверх по склону дна присутствовал даже при наклоне в 27 градусов. При малых углах наклона дна (до 4 °С) для отмелых песчаных берегов Балтийского моря (Геология и геоморфология…, 1991; Гуделис, Литвин, 1976) пятна воды с отрицательной плавучестью, возникающие в результате сезонного выхолаживания в поверхностном слое моря, на мелководье могут достигать дна и порождать динамику вод как вниз, так и вверх по его склону. Таким образом, смешение вод пятен, двигающихся вверх по склону дна, может действительно участвовать в формировании потока отрицательной плавучести с поверхности в глубину (Maxworthy, 1997; Бунэ и др., 1985; Plaksina et al., 2012).

Цель данной работы заключалась в описании движения и взаимодействия между собой малых объемов воды с отрицательной плавучестью в процессе их распространения вверх по склону дна после их погружения и контакта с дном.

Методы исследования

Описание лабораторной установки

Серия лабораторных экспериментов была выполнена в гидролотке лаборатории физики моря Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН (Атлантическое отделение, г. Калининград) с рабочим пространством 800×600×125 мм (Д×В×Ш) и склоном дна под углом в 4 градуса. Для формирования под поверхностью пятен соленой воды использовалось оригинальное входное устройство, корпусом которого является пластина из пенополистирола размером 222×100×15 мм (Д×Ш×В). В нем размещены две отдельные трубки с соплами на конце для подачи солевых растворов различных концентраций и цвета в подстилающие воды. В качестве трубок использовались корпуса перманентных фломастеров (трубка: $d_{\text{внутр.}}$ = 11 мм, $d_{\text{внеш.}}$ = 14.5 мм, l = 38 мм; сопло: $d_{\text{внутр.}}$ = 4.5 мм, $d_{\text{внеш.}}$ = 8 мм). Оси диаметров сопел разнесены по горизонтали на расстояние 13 мм, срезы сопел располагались под поверхностью воды на глубине 24 мм на расстоянии 120 мм от склона дна. Трубки заполнялись очень мелким морским гравием 3–4 мм, их концы закрывались кусочком 20×20 мм ткани для сит (коэффициент живого сечения – 96, номинальный размер отверстия – 335 мкм). Подача раствора в трубки осуществлялась капельным способом из шприца.

После заполнения гидролотка пресной (водопроводной) водой на поверхность жидкости размещалось входное устройство. Для исчезновения возмущений, связанных с наполнением гидролотка водой и установкой входного устройства, эксперименты проводились спустя сутки. Перед началом работы происходила инициализация входного устройства путем заливки 1 мл подготовленного раствора соленой (NaCl) воды плотностью в диапазоне $1.0\cdot10^{-4}$–$5.0\cdot10^{-5}$ г/см^3 с добавкой красителя. Объем (1 мл) подобран экспериментально, чтобы рабочий объем трубки полностью заполнялся, но раствор не вытекал из сопла в подстилающие пресные воды. Заливка рабочего объема (3 мл) будущих пятен соленой воды проводилась спустя 10 секунд после инициализации входного устройства. Для избегания температурных различий пресной воды в гидролотке и раствора, вода для формирования пятен бралась из лотка непосредственно перед экспериментом и помещалась в лабораторные стаканы, изолированные пенополистиролом.

Процедура эксперимента заключалась в последовательной подаче подготовленного раствора разной подкраски (объем по 3 мл) во входное устройство. Раствор второго цвета подавался после того, как раствор первого цвета достигал дна (примерно через 5–6 секунд). Фоторегистрация процесса погружения пятен выполнялась цифровой камерой Sony (20 Мп) с интервалом в 2 секунды.

Описание 2d-модели динамики жидкости

Для расчетов использовалась двумерная модель динамики неоднородной по плотности жидкости (Волкова, Гриценко, 2019; Куприянова, Гриценко, 2021). Обнаруженные в лабораторных экспериментах малые скорости погружения пятен соленой воды позволили ограничиться ламинарным характером моделируемых течений. Система уравнений модели для завихренности ω, функции тока ψ и избыточной плотности σ была дополнена двумя уравнениями для переноса пассивных трассеров нейтральной плавучести c_K для идентификации вод первого $c_1 = 1$ и второго $c_2 = 1$ пятен.

$$\frac{\mathrm{D}\omega}{\mathrm{D}t} = \frac{g}{\rho_0}\left(\frac{\partial\sigma}{\partial x}\cos\varphi - \frac{\partial\sigma}{\partial z}\sin\varphi\right) + \nu_0\Delta\omega,$$

$$\Delta\psi = \omega,$$

$$\frac{\mathrm{D}\sigma}{\mathrm{D}t} = D_0\Delta\sigma,$$

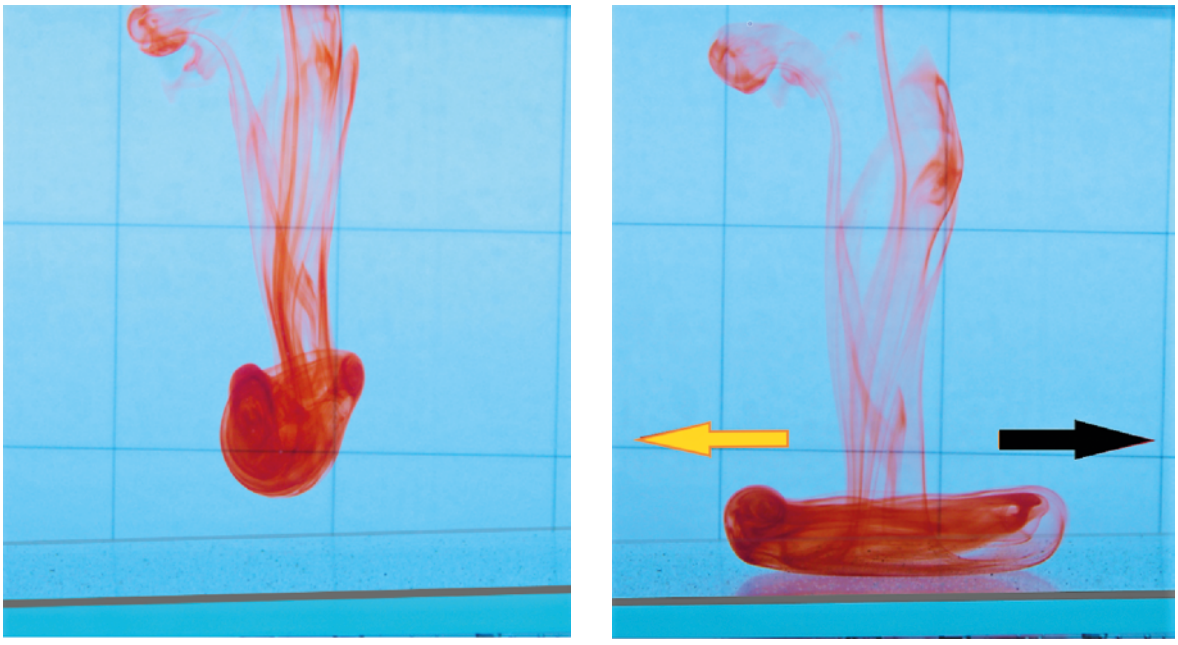
$$\frac{\mathrm{D}c_K}{\mathrm{D}t} = D_0\Delta c_K,\ K = 1, 2,$$

где $\omega = \partial u/\partial z - \partial w/\partial x$ – завихренность, ψ – функция тока, $u = \partial\psi/\partial z$ и $w = -\partial\psi/\partial x$ – компоненты скорости вдоль и перпендикулярно склону дна, g = 982 см/с^2, ρ_0 и $\rho = \rho_0 + \sigma$ – плотности пресной и соленой воды, $\nu_0 = 0.01$ см^2/с, $D_0 = 0.0001$ см^2/с – молекулярные вязкость воды и диффузии соли, $\mathrm{D}/\mathrm{D}t$ и Δ – операторы полной производной и Лапласа, c_K, K = 1, 2 – концентрации трассеров с нейтральной плавучестью.

Горизонтальная (Ox) ось координат совпадает с наклонным дном, а вертикальная (Oz) – перпендикулярна ему, φ – угол наклона дна. Явные конечно-разностные уравнения модели построены с использованием второй схемы с разностями против потока и итерационным алгоритмом расчета функции тока по значениям завихренности (Роуч, 1980). Расчетная сетка для описываемых ниже течений имела размерность 1201×121 узел. Величины пространственной дискретизации в расчетах составляли $\Delta x = \Delta z = 0.05$, шаг по времени определялся соотношением $\Delta t = 0.1 \cdot \Delta x^2$.

Лабораторные эксперименты

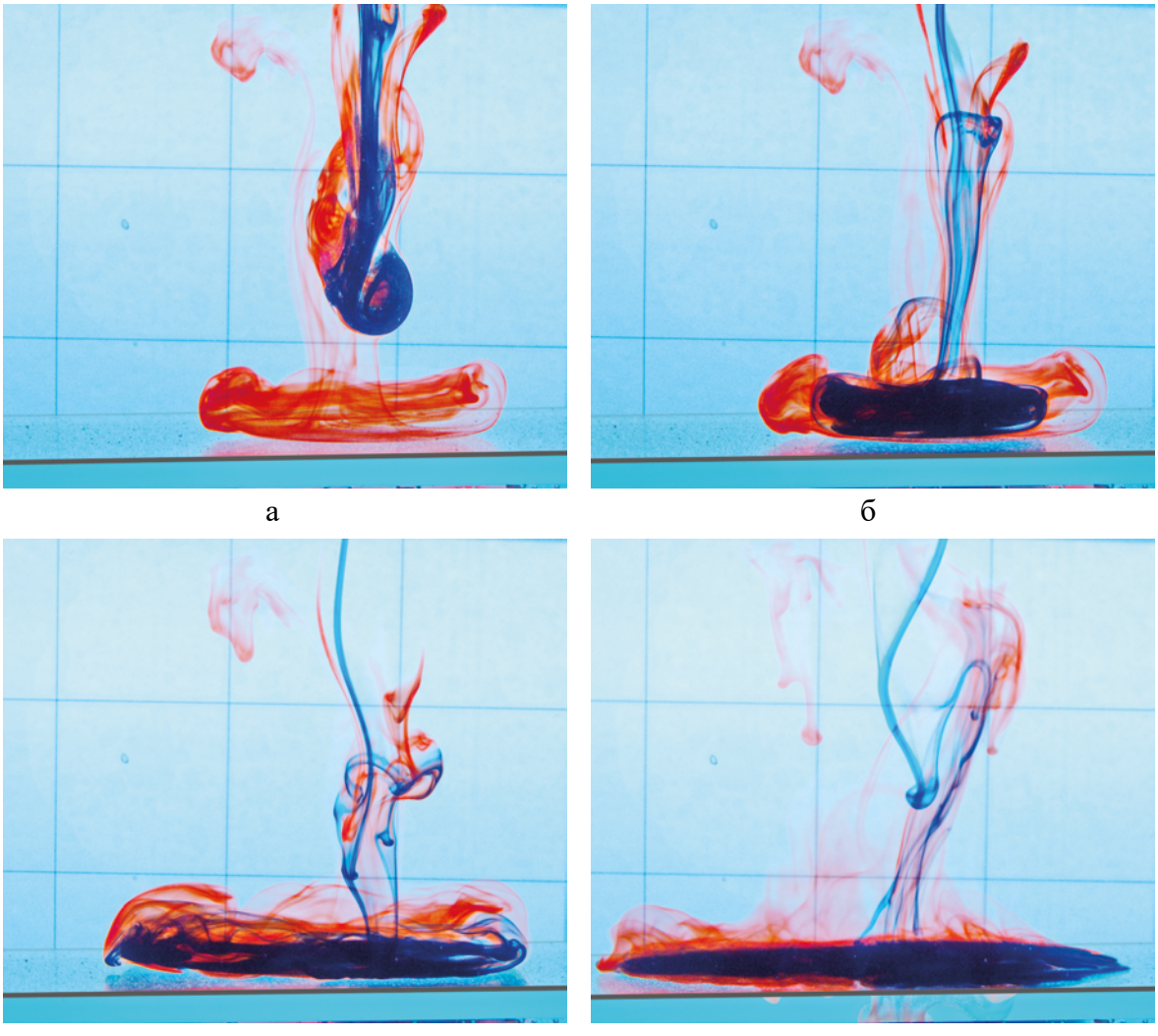
Всего было выполнено 14 экспериментов с солевыми растворами двух цветов: синим и красным. Характер движений погружающегося конечного объема соленой воды (пятна) в гидролотке вполне соответствовал ранее полученным результатам лабораторных экспериментов (Тернер, 1977; Федоров, Гинзбург, 1988; Волкова, Гриценко, 2019). После возникновения в поверхностном слое первого пятна начиналось его погружение в подстилающие пресные воды. Грибообразный вид пятна возникал вследствие генерации завихренности бароклинной природы (Куприянова, Гриценко, 2021;



а б

Рис. 1 – Начальные стадии эволюции подкрашенного объема (~3 см^3) соленой воды (пятна) в окружении пресной: формирование «грибочка» (**а**), преобразование в вихревое кольцо (**б**) с последующим контактом и распространением по дну. Отметим, что движение вод пятна (см. фазу **б**) происходит как вниз, так и вверх по склону дна (на рисунке движения обозначены желтой (вниз) и красной (вверх) стрелками). Здесь и далее на всех снимках: левый край склона дна несколько ниже правого (~4°), а сама линия дна выделена сплошной серой линией. Перепад плотности между соленой и пресной водами – $\Delta\rho_0 = 0.0001$ г/см^3. Размер фоновой ячейки – 4×4 см

Волкова, Гриценко, 2019). После этапов погружения (рисунок 1а), контакта со склоном дна и растекания по нему (рисунок 1б), движение пятна происходило не только вниз, но и вверх по склону (разница направления движения отмечена стрелками на рисунке 1б). Начальные и последующие скорости погружения пятен не превышают 1 см/с при выбранных значениях перепада плотности. Параметры пятен, в целом, соответствовали условиям лабораторных экспериментов различных авторов (Тернер, 1977; Гинзбург, Федоров, 1978).



а б в г

Рис. 2 – Один из примеров взаимодействия двух пятен при их движении по слабо наклонному (~4°) дну (**а**–**г**). Второе пятно (синяя подкраска) было сформировано рядом с начальным положением первого через 2 секунды после появления первого (красная подкраска). Снимки наглядно иллюстрируют фазы погружения второго пятна (**а**), контакта второго пятна с дном при наличии первого (**б**), растекания вдоль склона второго пятна вместе с первым (**в**) с вовлечением во вращательное движение головных частей вод, обволакивания первого водами второго пятна. На завершающей фазе взаимодействия пятен (**г**) к динамике вод добавляется гравитационное сжатие пятен и прекращение их движения вверх по склону дна. Все характеристики пятен тождественны параметрам пятен на рисунке 1. Слабо наклонная линия дна выделена сплошной серой линией

Эксперименты показали, что движение части вод первого пятна вверх по склону дна происходит с все меньшей скоростью за счет потери энергии на преодоление вязкого трения на дне, лобового сопротивления, вовлечения в себя окружающей пресной воды и работы против вдольсклоновой компоненты силы тяжести. Второе пятно после своего возникновения, сформированное на расстоянии в 13 мм от начального положения первого, претерпевало те же стадии трансформации, что и первое, с последующим опережением его вод как при движении вниз (Fernandez, 2008), так и вверх по склону дна.

На рисунке 2 приведен один из примеров этапов взаимодействия двух пятен соленой воды при их движении по дну (вверх и вниз). Различного цвета подкраска пятен позволила запечатлеть этапы взаимопроникновения пятен друг в друга в процессе их поступательного движения (вверх и вниз) по склону дна (рисунок 2в, г).

Приведенные на рисунке 2 снимки позволяют увидеть этапы: растекания по склону первого пятна и начала погружения второго (а); асимметрии движения второго пятна по склону (б); начала обволакивания вод первого пятна водами второго, и хорошо заметного сочетания совместного поступательного (по линии дна) и вращательного (в вертикальной плоскости) движения вод обоих пятен (в) и завершения стадии движения вверх (г) с гравитационным сжатием вод пятен по вертикали.

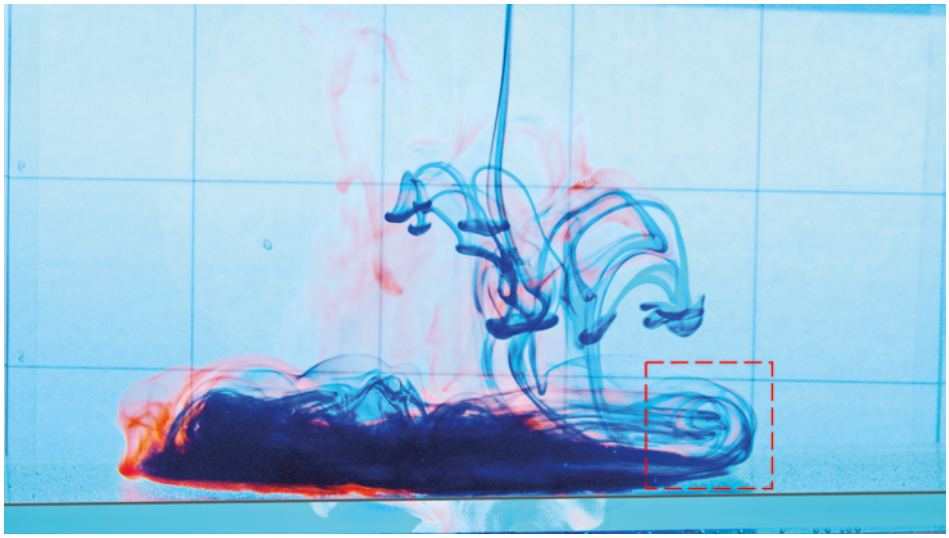


Рис. 3 – На снимке показана фаза (обволакивание) движения вод пятен отрицательной плавучести, последовательно во времени сформированных на поверхности, достигших дна и распространяющихся вниз (левая часть пятна) и вверх (правая часть) по его склону. В процессе своего движения второе по времени формирования пятно после контакта с дном подныривает под воды первого пятна, и начинается этап обволакивания вод первого пятна водами второго. В правой части снимка отчетливо видно вращательное движение части вод обоих пятен, сохраняющее их слоистую плотностную структуру, что позволяет говорить о ламинарном режиме перемешивания водных масс пятен.
Характеристики пятен идентичны рисунку 1

Сформировавшееся поступательно-вращательное движение вверх по склону дна частей вод обоих пятен, взаимопроникающих друг в друга, более детально показано на рисунке 3. В ходе всех экспериментов наблюдалось активное взаимодействие вод пятен при их движении вверх: после контакта с дном часть вод второго пятна, за счет вовлечения во вращательное движение первого пятна и большего запаса отрицательной плавучести, подныривала под него и опережала фронтальный раздел первого пятна с расположенной перед ним пресной водой. В результате начинается объединение вод обоих пятен в единый объем (новое пятно) с сохранением вращательного характера движений и неоднородностью плотностной структуры. Заметим, что адвективные черты процесса взаимопроникновения подобного рода пятен ранее были зафиксированы в экспериментах (Fernandez, 2008), однако вращательный характер движений вод не отмечался.

Подводя итоги наблюдений, можно отметить, что именно вращательный характер движений вод внутри соленых пятен обеспечивает их смешение между собой и с окружающей пресной водой. Одновременно ламинарный режим течений способствует сохранению на некоторое время неоднородности их плотностной структуры. Данное обстоятельство хорошо видно на снимках за счет различной окраски вод пятен (рисунки 2, 3).

Еще одним итогом наблюдений за лабораторными течениями стала возможность проведения параллели между динамикой вод пятен при их движении вверх по дну и обрушением набегающих на склон дна внутренних волн. Действительно, сравнивая снимки XXVI и XXVI Дж. Тернера, иллюстрирующие процесс опрокидывания на склон дна внутренних волн (Тернер, 1977), и финальные стадии движения пятен соленых вод в окружении пресной вверх по склону дна (см. выше движения пятен на рисунке 2в, г), можно отметить качественное подобие динамики их вод.

Наконец, отличительная особенность движений части вод пятен вверх по склону дна заключается в сочетании вращательного характера движений внутри и в окрестности пятен и молекулярного уровня перемешивания соленых и пресных вод из-за малых величин отрицательной плавучести, присущих всем конвективным процессам в прибрежной зоне моря (Бунэ и др., 1985; Гинзбург, Федоров, 1978; Федоров, Гинзбург, 1988). Различие характерных временных (диффузионного и адвективного) масштабов приводит к преобладанию динамического механизма смешения соленых и пресных вод над молекулярным перемешиванием.

Структура модельных течений

В данном разделе будет выполнено описание одного из расчетных течений, возникшего после формирования над склоном дна последовательно во времени двух пятен соленой воды с одинаковыми начальными значениями избыточной плотности $\Delta\rho_0$ = 0.0003 г/см^3, сеточными размерами (31×31 узел) и положением в пространстве. Выбор значения линейного масштаба (h_0 = 1 см) обеспечил примерное соответствие размеров пятна ($1.5\,h_0 \times 1.5\,h_0$)

в расчетах с пятнами соленой воды в лотке. Характерные значения масштабов: линейного (h_0) и перепада плотности ($\Delta\rho_0$) между пресной водой в лотке и соленой водой пятна, были равны, соответственно, 1 см и 0.0003 г/см^3. Значения масштабов скорости и времени определялись из соотношений $u_0 = [(h_0\Delta\rho_0 g/\rho_0)\ 2\cos\varphi]^{1/2} \approx$ $\approx$ 0.76 см/с и $t = h_0/u_0 \approx$ 1.3 с. Сделанный выбор соответствует условиям лабораторных экспериментов (Тернер, 1977; Maxworthy, 1997; Бунэ и др., 1985; Зацепин и др., 2005). Для лучшего разрешения деталей течения все ниже приводимые графики построены только для части расчетного пространства, полные размеры которого $[0, 60\,h_0]\times[0, 6.0\,h_0]$. Модельное пространство не горизонтально и наклонено на угол в 10°, то есть левый край модельного пространства, как и в лабораторных экспериментах, расположен несколько ниже правого. Пробный расчет с меньшим углом наклона в 5° показал необходимость увеличения расчетной сетки вдвое, что существенно увеличивало время расчета и снижало отличие промежуточных фаз взаимодействия пятен друг от друга.

Структура течений после появления первого пятна

Начальный этап динамики вод и эволюции плотностной структуры, возникающий при движении пятна соленой воды, оказался вполне ожидаемым, поскольку данная фаза ранее была получена в лабораторных экспериментах авторов (Волкова, Гриценко, 2019; Куприянова, Гриценко, 2021). Сначала происходит вертикальное погружение пятна с формированием вихревого диполя (рисунок 4а, б), а затем, по достижению пятном склона дна, происходит растекание его вод вниз и вверх по нему.

Очевидно, что вдольсклоновая компонента плавучести, направленная вниз по склону дна, будет «тормозить» движение вод пятен вверх по склону дна. Движение части вод погрузившегося с поверхности пятна вверх по склону (рисунок 4б), как и в лабораторных экспериментах (рисунок 3), сопровождается их смешением с окружающими пресными водами. Вращательный характер движений вод пятна и способность его смешения с окружающими пресными участками определяется бароклинным механизмом генерации завихренности в зоне контакта соленых и пресных вод (Тернер, 1977; Волкова, Гриценко, 2019). Вихревой характер движений вод пятна хорошо различим на распределениях линий тока (рисунок 4). Вязкое трение на дне, вращательный характер движений и гравитационное сжатие определяют эллипсоидальную форму пятна. Движение части соленых вод пятна вниз по склону дна (рисунок 4б) будет иметь черты динамики придонных гравитационных течений (Тернер, 1977; Самолюбов, 1999), это было ранее рассмотрено авторами (Куприянова, Гриценко, 2021).

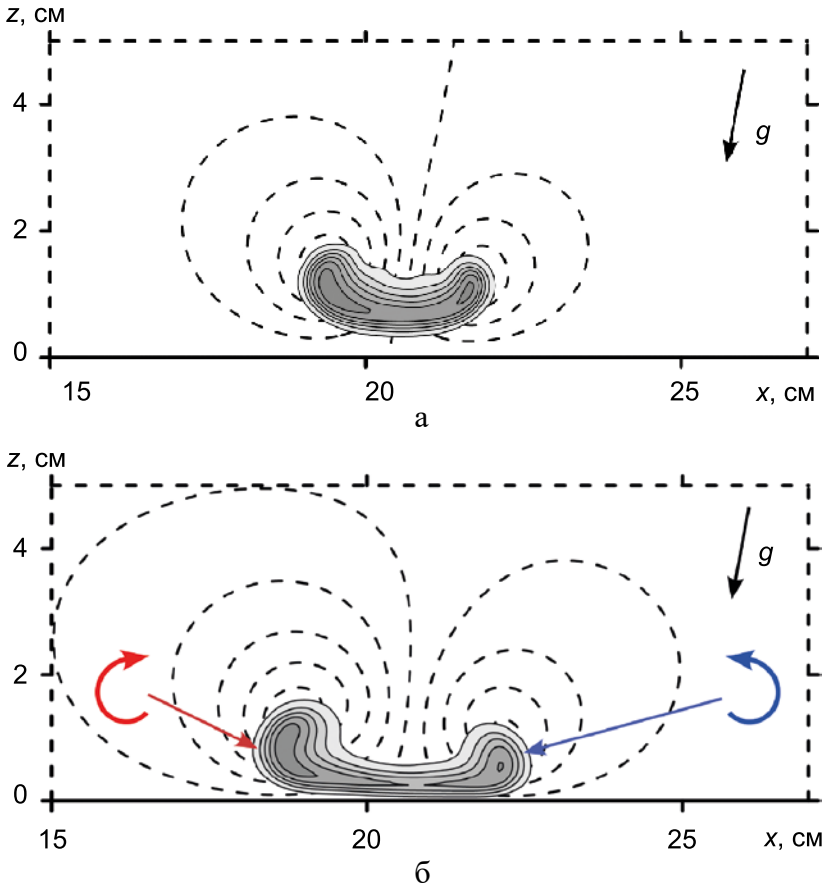


Рис. 4 – Две последовательные фазы погружения (**а**) первого пятна отрицательной плавучести, достижения склона дна и начала растекания по нему (**б**). На графиках приведены распределения изолиний значений плотности $\sum = \sigma/\Delta\rho_0$ (сплошные линии с градацией серой заливки, значения изолиний изменяются от 0.05 до 0.95 с шагом 0.15 или $\sum \in [0.05; 0.95; 0.15]$) и функции тока ψ (штриховые линии), проведенные через 0.2. Начальный объем пятна (безразмерный) составлял 2.25. Безразмерное время (time) каждой из фаз было следующим: (**а**) – 2.5; (**б**) – 3.75. Хорошо видно отсутствие симметрии в движении соленой воды пятна вниз (влево) и вверх (вправо) по склону дна и разные знаки завихренности внутри частей этого пятна (см. стрелочки на рисунке 4).
Стрелочка в верхней части рисунка показывает направление ускорения силы тяжести *g*

Структура течений после появления второго пятна

Начальные фазы динамики второго пятна полностью повторяют движения первого. Полученные распределения функции тока и плотности показывают (рисунок 5), что динамическое взаимодействие пятен начинается до непосредственного контакта их вод. На графиках отчетливо видны изменения геометрии изолиний трассеров – их уплощение (на рисунке отмечено различие на фоне красной линии), а также некоторое различие в форме частей вод первого пятна, двигающихся вверх и вниз по склону дна.

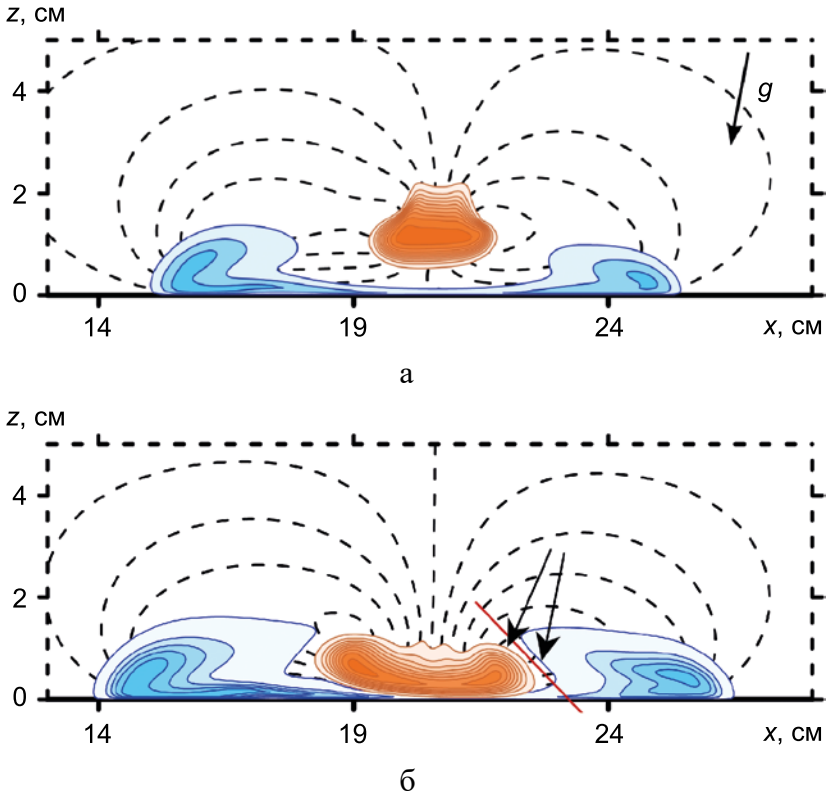


Рис. 5 – Две последовательные фазы погружения второго пятна на фоне продолжающегося движения первого. Распределения значений трассеров обоих пятен (синий – первого, оранжевый – второго) и линий тока, иллюстрирующих приближение второго пятна к дну (**а**) и начало его растекания по склону дна, с хорошо различимым признаком начала взаимодействия пятен (**б**) в виде уплощения изолиний трассеров (на рисунке две черные стрелочки указывают на параллельные изолинии каждого из них, а их общее направление отмечено красной линией). Характерные масштабы пятен одинаковы: изолинии трассеров пробегают значения от 0.01 и до 0.41 через 0.1 для первого пятна ($c_1 \in [0.01; 0.41; 0.1]$) и до 0.91 – для второго ($c_2 \in [0.01; 0.91; 0.1]$), изолинии функции тока $\psi \in [-1.0; 1.0; 0.2]$. Безразмерное время (time) каждой из фаз: (**а**) – 7.5; (**б**) – 8.75

Собственно взаимодействие водных масс пятен начинается с проникновения («подныривания») вод второго пятна под первое, хорошо заметное на распределениях изолиний их трассеров (рисунок 6а). Затем воды второго пятна, продвигаясь по дну, достигают переднего фронта первого пятна и вступают во взаимодействие с впереди лежащей пресной водой (рисунок 6б). Бароклинная генерация завихренности в зоне контакта вод пятен с пресной водой способствует вовлечению вод второго пятна в уже существующее вихревое движение первого. Начинается эффект «обволакивания» («обертывания») вод первого пятна водами второго (рисунок 6в, г). На рисунке 6 отчетливо видна неоднородность распределений полей обоих трассеров и плотностной структуры взаимодействующих между собой пятен соленой воды.

В дальнейшем продолжается взаимопроникновение вод пятен в процессе их поступательного (вверх по склону дна) и вращательного (в вертикальной плоскости) движений (рисунок 6).

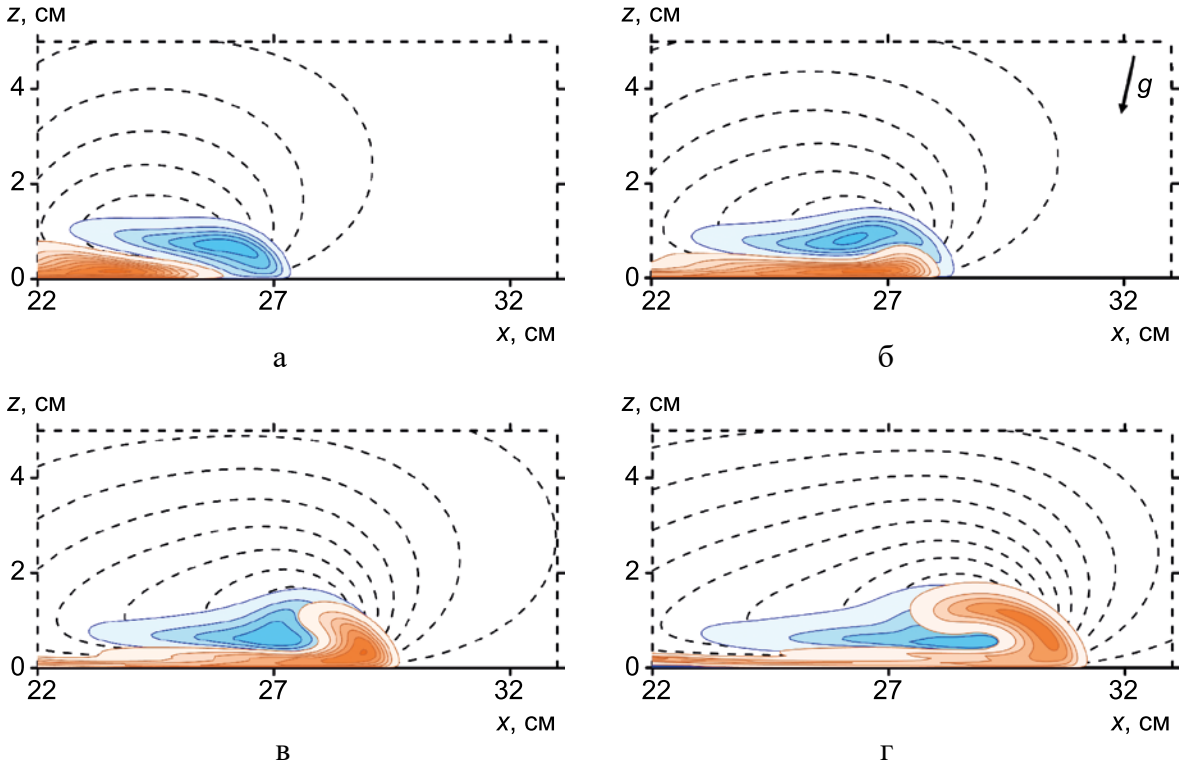


Рис. 6 – Четыре последовательные фазы взаимодействия части вод пятен соленой воды, двигающихся вверх по склону дна (первое пятно «подкрашено» синим цветом, второе – оранжевым): (**а**) – проникновение («подныривание») части вод второго пятна под первое, (**б**) – оттеснение от дна вод первого пятна вторым и контакт с пресной, впереди лежащей, водой, (**в**) – начало вращательного движения вод второго пятна, порождаемое за счет генерации бароклинной завихренности в зоне контакта и уже существующего вихревого движения первого пятна, и, наконец, (**г**) – совместное вращательное движение вод обоих пятен вверх по склону дна. На графиках приведены распределения изолиний трассеров обоих пятен (синие и оранжевые линии, соответственно, $c_1 \in [0.01; 0.31; 0.1]$ и $c_2 \in [0.01; 0.61; 0.1]$ с шагом в 0.1 с градацией заливки) и функции тока (штриховые линии, проведенные через 0.2). Безразмерное время (time) каждой из фаз: (**а**) – 10.0; (**б**) – 11.25; (**в**) – 12.5; (**г**) – 13.75

Завершается этап активного взаимопроникновения вод пятен друг в друга «обрушением» вод второго пятна после почти полного их оборота в вертикальной плоскости (рисунок 7). В самом деле, продолжение вращательного движения вод второго пятна приведет к их контакту с дном, что, по-видимому, может быть интерпретировано как обрушение.

Итогом этих непрерывно протекающих движений проникновения пятен соленой воды друг в друга является формирование нового объекта движения, «объединенного» пятна, сохраняющего при этом неоднородность распределений трассеров и плотностной структуры (рисунок 8). Приведенный график иллюстрирует только правую часть вод пятна, распространяющуюся вверх по склону дна. Эволюция второй части пятна, двигающейся вниз по склону, была ранее рассмотрена авторами (Куприянова, Гриценко, 2021).

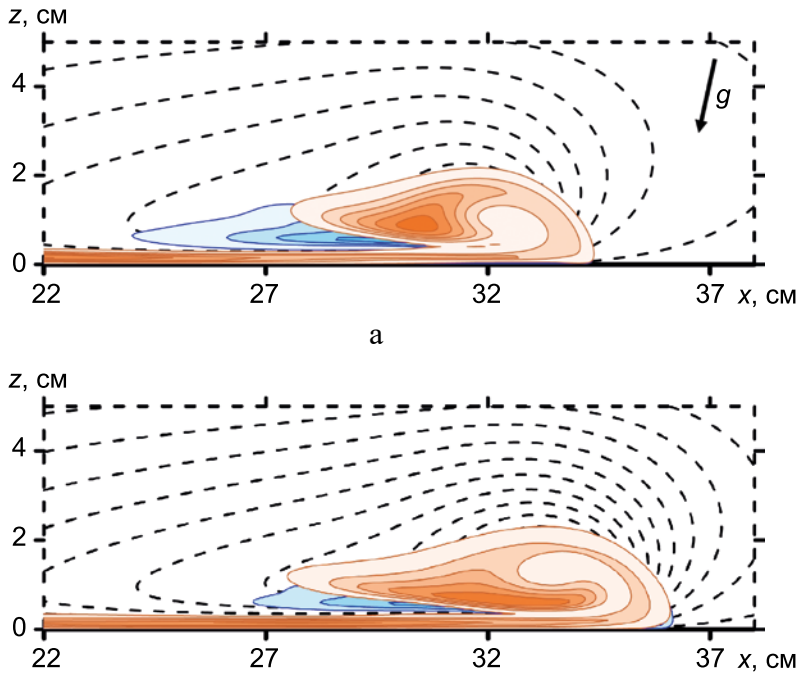


Рис. 7 – Две последовательные фазы взаимопроникновения вод пятен друг в друга. На графиках приведены распределения изолиний вод первого (сплошные синие линии с градацией заливки первого $c_1 \in [0.005; 0.205; 0.05]$) и второго (толстые красно-коричневые линии с градацией оранжевой заливки $c_2 \in [0.005; 0.255; 0.05]$) трассеров, а также линии тока через 0.2. Хорошо видно, как воды второго пятна, находясь несколько впереди вод первого (**а**), постепенно «обворачивают» воды первого, и после их «обрушения» (**б**) завершается третья фаза взаимодействия пятен и начинается совместное вращательное движение соленых вод пятен с сохранением неоднородности, как по распределениям трассеров, так и по распределениям избыточной плотности в едином объекте. Безразмерное время (time) каждой из фаз: (**а**) – 16.25; (**б**) – 17.5

Основные этапы взаимодействия пятен. Подчеркнем, что введение в модель трассеров для идентификации вод пятен позволило детализировать процесс их взаимопроникновения, который для случая одинаковых начальных значений объемов и отрицательной плавучести может быть подразделен на четыре этапа.

Первый этап – «контакт» – возникает в тот момент движения второго пятна за первым, когда начинают взаимодействовать локальные особенности поля давления, определяющие движение каждого из них, проявляющиеся в виде уплощения изолиний плотности в зоне отдаленного контакта вод первого и второго пятен (рисунок 5). При этом контакта пятен еще нет.

Второй этап взаимодействия характеризуется проникновением («подныриванием») вод второго пятна под первое, оттесняя при этом воды первого пятна от дна (рисунок 6а). Одновременно воды второго пятна после достижения ими пресных вод (рисунок 6б), расположенных перед первым пятном, вовлекаются во вращательное движение (рисунок 6в), возникшее за счет бароклинного порождения завихренности на плотностном фронте первого пятна.

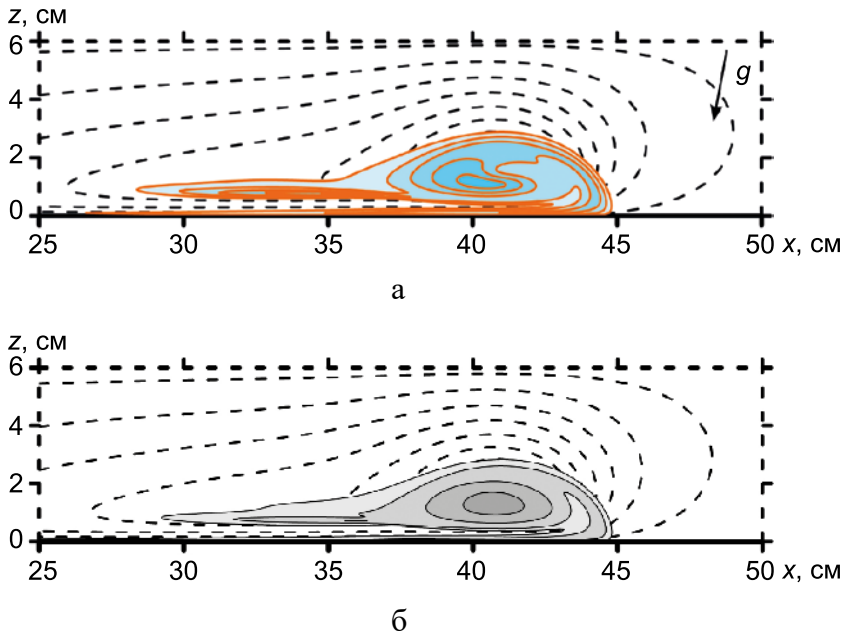


Рис. 8 – Особенности строения сформировавшегося нового пятна соленой воды, продолжающего все более медленное движение вверх по склону дна. На распределениях концентраций трассеров (**а**) обоих пятен (синие линии с градацией заливки для первого пятна $c_1 \in [0.001; 0.126; 0.025]$ и более толстые, красно-коричневые, для второго $c_2 \in [0.005; 0.205; 0.025]$), а также изолиний плотности $\sum = \sigma/\Delta\rho_0$ ((**б**) черные линии с градацией серой заливки $\sum \in [0.001; 0.201; 0.05]$) отчетливо видна неоднородность как полей трассеров, так и поля плотности. Изолинии функции тока, проведенные с шагом 0.4, демонстрируют установившееся совместное вращательное движение соленых вод обоих пятен. Безразмерное время фазы – time = 22.5

На третьем этапе происходит опережение вторым пятном первого и начинается процесс обволакивания («обертывания») первого пятна водами второго (рисунок 6г). Вращательный характер движений вод определяет взаимопроникновение их вод друг в друга, а медленно работающий механизм молекулярной диффузии сохраняет неоднородность воды формирующегося объединенного пятна. На распределениях трассеров хорошо виден процесс их совместного вращательного движения. Завершается данная фаза после «обрушения» вод второго пятна (рисунок 7).

Наконец, содержание ***четвертого этапа*** должно зависеть от соотношения величин отрицательной плавучести и объемов воды каждого из пятен. В случае идентичности параметров пятен на этом этапе происходит их объединение. Для описываемого расчетного течения в объединенном пятне все еще сохраняется неоднородность распределений трассеров и плотности (рисунок 8).

Обсуждение и результаты

Анализ результатов фоторегистрации экспериментов в лотке позволил понять детали взаимодействия конечных объемов соленой воды при их движении вверх по склону дна. Ранее выполненные лабораторные эксперименты (Куприянова, Гриценко, 2021) показали способность пятен соленых вод достигать дна и порождать движение части его вод вверх по склону дна даже при большом угле наклона (27°). Снижение в лабораторных экспериментах угла наклона дна до 4° приближает условия их проведения к характеристикам отмелых берегов Балтийского моря (Гидрометеорология и гидрохимия …, 1994; Гуделис, Литвин, 1976). Это позволило с большей детальностью выделить типичные фазы взаимодействия двух объемов соленой воды в процессе их распространения вверх по склону дна в окружении пресной, а именно: погружение и контакт с дном первого пятна, погружение второго пятна и взаимодействие с первым («подныривание» и «обволакивание»), совместное поступательное движение вверх по склону дна, формирование вихревого движения нового пятна, состоящего из вод обоих пятен и его гравитационное сжатие по вертикали. Все отмеченные детали поведения пятен были подтверждены в модельных расчетах.

Малые скорости (до 5–7 мм/с) погружения пятен соленой воды с характерными масштабами течений (1–2 см) во всех экспериментах позволяют говорить о ламинарном характере возникающих течений неоднородной по плотности жидкости (число Рейнольдса много меньше критического значения), что, в свою очередь, обеспечивает сохранение неоднородности плотностной структуры в части пятна, движущейся вверх по склону дна.

Анализ модельных течений, возникающих после появления в поверхностном слое конечных объемов воды с отрицательной плавучестью, показал вихревой характер их движений как при вертикальном погружении за счет отрицательной плавучести, так и при дальнейшем движении по дну. Во всех выполненных экспериментах второе пятно с теми же начальными значениями плавучести и объема всегда настигало и несколько обгоняло первое в придонной области, далее происходило их объединение в новое пятно.

Совместное использование результатов лабораторных и численных экспериментов с близкими характерными масштабами формируемых течений позволило детально описать этапы погружения с поверхности пресной воды конечных объемов соленой воды (Волкова, Гриценко, 2019), достижения склона дна и движения части вод вниз по нему (Куприянова, Гриценко, 2021), и в данной работе – взаимодействия другой части вод пятен при их движении вверх по склону дна. Полученные результаты позволили выделить этапы взаимодействия такого рода пятен между собой и их объединение в единый объект – пятно с вихревым характером движений – с сохранением неоднородности плотностной структуры.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке госзадания ИО РАН (тема № FMWE-2021-0012).

Список литературы

1. *Баренблатт Г. И.* Динамика турбулентных пятен и интрузии в устойчиво стратифицированной жидкости // Известия АН СССР. Сер. Физика атмосферы и океана. 1978. Т. 14. № 2. С. 195–206.
2. *Боуден К.* Физическая океанография прибрежных вод. М.: Мир, 1988. 324 с.
3. *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.
4. *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.
5. Геология и геоморфология Балтийского моря. Сводная объяснительная записка к геологическим картам масштаба 1:500000 / под ред. Григялиса А. А. Л.: Недра ЛО, 1991. 420 с.
6. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР / под ред. Терзиева Ф. С., Рожкова В. А., Смирновой А. И. Санкт-Петербург: Гидрометеоиздат, 1992. Т. III. Вып. 1. 450 с.
7. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР / под ред. Терзиева Ф. С., Рожкова В. А., Римша Е. Я., Шпаер И. С. Санкт-Петербург: Гидрометеоиздат, 1994. Т. III. Вып. 2. 435 с.
8. *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.
9. *Гриценко В. А., Чубаренко И. П.* Об особенностях структуры фронтальной зоны придонных гравитационных течений // Океанология. 2010. Т. 50. № 1. С. 26–32.
10. *Гуделис В. К., Литвин В. М.* Геоморфология дна // Геология Балтийского моря. Вильнюс: Мокслас, 1976. С. 25–34.
11. *Зацепин А. Г., Гриценко В. А., Кременецкий В. В., Поярков С. Г., Строганов О. Ю.* Лабораторное и численное исследование процесса распространения плотностных течений по склону дна // Океанология. 2005. Т. 45. № 1. С. 5–15.
12. *Зацепин А. Г., Федоров К. Н., Воропаев С. Н., Павлов А. М.* Экспериментальное исследование растекания перемешанного пятна в стратифицированной жидкости // Известия АН СССР. Сер. Физика атмосферы и океана. 1978. Т. 14. № 2. С. 234–237.
13. *Куприянова А. Е., Гриценко В. А.* Лабораторное и численное исследование особенностей процесса выхолаживания воды с поверхности в прибрежных водах // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 4. С. 484–494. https://doi.org/10.31857/S0002351521040076.
14. *Роуч П.* Вычислительная гидродинамика. М.: Мир, 1980. 618 с.
15. *Самолюбов Б. И.* Придонные стратифицированные течения. М.: Научный мир, 1999. 463 с.
16. *Тернер Дж.* Эффекты плавучести в жидкости. М.: Мир, 1977. 431 с.
17. *Федоров К. Н., Гинзбург А. И.* Приповерхностный слой океана. Л: Гидрометеоиздат, 1988. 303 с.
18. *Чубаренко И. П.* Горизонтальная конвекция над подводными склонами. Калининград: Терра Балтика, 2010. 256 с.
19. *Чубаренко И. П.* Горизонтальный конвективный водообмен над подводным склоном: механизм формирования и анализ развития // Океанология. 2010. Т. 50. № 2. С. 184–193.
20. *Amen R., Maxworthy T.* The gravitational collapse of a mixed region in to a linearly stratified fluid // J. Fluid Mech. 1980. Vol. 96. No. 1. P. 65–80.
21. *Fer I., Lemmin U., Thorpe S. A.* Observations of mixing near the sides of a deep lake in winter // Limnol. Oceanogr. 2002. Vol. 47. No. 2. P. 535–544.

22. *Fernandez R. L., Imberger J.* Relative Buoyancy Dominates Thermal-Like Flow Interaction along an Incline // J. Hydraulic Engineering. 2008. Vol. 134. No. 5. P. 636–643.
23. Flow Visualization. Techniques and Examples (Second Edition) / Eds. Smits A. J., Lim T. T. Imperial College Press. 2012. 427 p.
24. *Kao T. W., Pao H. P.* Wake collapse in the thermocline and internal solitary waves // J. Fluid Mech. 1980. Vol. 97. No. 1. P. 115–129.
25. *Maxworthy T.* Convection Into Domains With Open Boundaries // Annu. Rev. Fluid. Mech. 1997. Vol. 29. P. 327–371.
26. *Plaksina Yu. Yu., Uvarov A. V., Vinnichenko N. A., Lapshin V. B.* Experimental investigation of near-surface small-scale structures at water–air interface: Background Oriented Schlieren and thermal imaging of water surface // Russian Journal of Earth Sciences. 2012. Vol. 12. No. 4. ES4002. https://doi.org/10.2205/2012ES000517.
27. *Wu J.* Mixed region collapse with internal ware generation in a density stratified medium // J. Fluid Mech. 1969. Vol. 35. No. 3. P. 531–544.

Статья поступила в редакцию 07.06.2022, одобрена к печати 26.07.2022.
Для цитирования: *Куприянова А. Е., Гриценко В. А.* Падение пятен соленой воды на наклонное дно в окружении пресной: динамика и структурные особенности распространения плотностного фронта вверх по склону // Океанологические исследования. 2022. Т. 50. № 2. С. 106–124. https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2022.50(2).5.

SINKING PATCHES OF SALT WATER ON A SLOPE OF BOTTOM SURROUNDED BY FRESH WATER: DYNAMICS AND STRUCTURAL FEATURES OF DENSITY FRONT PROPAGATION UP THE SLOPE

A. E. Kupriyanova[1,2], V. A. Gritsenko[2]

[1] Immanuel Kant Baltic Federal University,
14, A. Nevskogo str., Kaliningrad, 236016, Russia,
e-mail: kupriyanova_ae@mail.ru;
[2] Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
36, Nakhimovskiy prospekt, Moscow, 117997, Russia,
e-mail: gritsenko-vl-al@mail.ru

The study of the dynamics of two small volumes of water with negative buoyancy (patches of salt water), imitated a sinking of dense water into an underlying water, was carried out. These volumes usually appear in the process of surface water cooling during seasonal convection in the coastal zone of the sea. The main tools of investigation were laboratory and numerical experiments. The main stages of motion of patches were identified: sinking, contact, and spreading along a bottom slope. The process of interaction of the water patches during their movement up the bottom slope was detailed in laboratory experiments. Patches of salt water retained unmixed long time, that confirm the laminar character of the appearing flows. Distributions of tracers obtained in the calculations was analyzed with the aim to identify the characteristic stages of the flow of patches up the slope. Three stages were suggested: initial contact, diving, wrapping and breaking. For the first time dense water flow up the slope, which occur as a result of sinking of small volumes of salt water, was described. The results allow us to notice the intensification of mixing of water dense than underlying waters in the process of surface water cooling in coastal zone of the sea.

Keywords: negative buoyancy, seasonal convection, coastal waters, sea surface cooling, laboratory experiment, along-slope current, numerical model, along-slope water dynamics

Acknowledgment: The study was done with a support of the state assignment of IO RAS (Theme No. FMWE-2021-0012).

References

1. Amen, R. and T. Maxworthy, 1980: The gravitational collapse of a mixed region in to a linearly stratified fluid. *J. Fluid Mech.,* **96** (1), 65–80.
2. Barenblatt, G. I., 1978: Dinamika turbulentnykh pyaten i intruzii v ustoychivo stratifitsirovannoy zhidkosti. *Izvestiya AN SSSR,* Seriya Fizika i Atmosfera okeana, **14** (2), 195–206.
3. Bowden, K., 1988: *Fizicheskaya okeanografiya pribrezhnyh vod (Physical Oceanography of Coastal Waters)*. Moscow, Mir, 324 p.
4. Bune, A. V., A. I. Ginzburg, V. I. Polezhaev, and K. N. Fedorov, 1985: Chislennoe i laboratornoe modelirovanie razvitiya konvektsii v okhlazhdayushchemsya s poverkhnosti sloye vody (Numerical and laboratory modeling of the development of convection in a layer of water cooling from the surface). *Izvestya AN SSSR,* Seriya Fizika i Atmosfera okeana, **21** (9), 956–963.

5. Chubarenko, I. P., 2010: *Gorizontal'naya konvektsiya nad podvodnymi sklonami (Horizontal convection over submarine slopes)*. Kaliningrad, Terra Baltika, 256 p.
6. Chubarenko, I. P., 2010: Gorizontal'nyy konvektivnyy vodoobmen nad podvodnym sklonom: mekhanizm formirovaniya i analiz razvitiya (Horizontal convective water exchange over the underwater slope: formation mechanism and development analysis). *Okeanology*, **50** (2), 184–193.
7. Fedorov, K. N. and A. I. Ginzburg, 1988: *Pripoverkhnostnyy sloy okeana (The surface layer of the ocean)*. Leningrad, Gidrometeizdat, 303 p.
8. Fer, I., U. Lemmin, and S. A. Thorpe, 2002: Observations of mixing near the sides of a deep lake in winter. *Limnol. Oceanogr.*, **47** (2), 535–544.
9. Fernandez, R. L. and J. Imberger, 2008: Relative Buoyancy Dominates Thermal-Like Flow Interaction along an Incline. *J. Hydraulic Engineering*, **134** (5), 636–643.
10. *Flow Visualization. Techniques and Examples* (Second Edition). Eds. Smits, A. J. and T. T. Lim. 2012. Imperial College Press, 427 p.
11. *Geologiya i geomorfologiya Baltiyskogo morya. Svodnaya ob"yasnitel'naya zapiska k geologicheskim kartam masshtaba 1:500000,* pod redaktsiyey A. A. Grigyalisa *(Geology and geomorphology of the Baltic Sea. Summary explanatory note to geological maps at a scale of 1:500 000*): 1991. Leningrad, Nedra LO, 420 p.
12. *Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morey SSSR,* pod redaktsiyey Terziyeva, F. S., V. A. Rozhkova and A. I. Smirnovoy *(Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas of the USSR*): 1992. Saint Petersburg, Gidrometeizdat, **3** (1), 450 p.
13. *Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morey SSSR,* pod redaktsiyey Terziyeva, F. S., V. A. Rozhkova, Ye. Ya. Rimsha and I. S. Shpayer *(Hydrometeorological conditions of the shelf zone of the seas of the USSR)*: 1994. Saint Petersburg, Gidrometeizdat, **3** (2), 435 p.
14. Ginzburg, A. I. and K. N. Fedorov, 1978: Okhlazhdeniye vody s poverkhnosti pri svobodnoy i vynuzhdennoy konvektsii (Cooling of water from the surface under free and forced convection). *Izvestiya AN SSSR.* Seriya Fizika atmosfery i okeana, **14** (1), 79–87.
15. Gritsenko, V. A. and I. P. Chubarenko, 2010: Ob osobennostyakh struktury frontal'noy zony pridonnykh gravitatsionnykh techeniy (On the structural features of the frontal zone of near-bottom gravity currents). *Okeanology,* **50** (1), 26–32.
16. Gudelis, V. K. and V. M. Litvin, 1976: Geomorfologiya dna (Bottom geomorphology). *Geologiya Baltiyskogo morya*, Vil'nyus, Mokslas, 25–34.
17. Kao, T. W. and H. P. Pao, 1980: Wake collapse in the thermocline and internal solitary waves. *J. Fluid Mech.,* **97** (1), 115–129.
18. Kupriyanova, A. E. and V. A. Gritsenko, 2021: Laboratory and Numerical Study of the Peculiarities of Sea Surface Cooling in Coastal Waters. *Izv. Atmos. Ocean. Phys.*, **57**, 425–434, https://doi.org/10.1134/S0001433821040186.
19. Maxworthy, T., 1997: Convection Into Domains With Open Boundaries. *Annu. Rev. Fluid. Mech.*, **29**, 327–371.
20. Plaksina, Yu. Yu., A. V. Uvarov, N. A. Vinnichenko, and V. B. Lapshin, 2012: Experimental investigation of near-surface small-scale structures at water-air interface: Background Oriented Schlieren and thermal imaging of water surface. *Russian Journal of Earth Sciences*, **12** (4), ES4002, https://doi.org/10.2205/2012ES000517.
21. Rouch, P., 1980: *Vychislitel'naya gidrodinamika (Computational hydrodynamics)*. Moscow, Mir, 618 p.
22. Samolyubov, B. I., 1977: *Pridonnyye stratifitsirovannyye techeniya (Bottom stratified currents)*. Moscow, Nauchnyy mir, 463 p.
23. Turner, J. S., 1973: *Buoyancy Effects in Fluids*. New York, Cambridge Univ. Press, 367 p.

24. Volkova, A. A. and V. A. Gritsenko, 2019: Osobennosti tsirkulyatsii, voznikayushchey pri pogruzhenii s poverkhnosti konechnogo ob'yema vody s otritsatel'noy plavuchest'yu (Peculiarities of the circulation that occurs when diving from the surface of a finite volume of water with negative buoyancy). *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika*, **12** (3), 26–35.
25. Wu, J., 1969: Mixed region collapse with internal ware generation in a density stratified medium. *J. Fluid Mech*., **35** (3), 531–544.
26. Zatsepin, A. G., K. N. Fedorov, S. N. Voropayev, and A. M. Pavlov, 1978: Eksperimental'noye issledovaniye rastekaniya peremeshannogo pyatna v stratifitsirovannoy zhidkosti. *Izvestiya AN SSSR,* Seriya Fizika atmosfery i okeana, **14** (2), 234–237.
27. Zatsepin, A. G., V. A. Gritsenko, V. V. Kremenetsky, S. G. Poyarkov, and O. Yu. Stroganov, 2005: Laboratornoye i chislennoye issledovaniye protsessa rasprostraneniya plotnostnykh techeniy po sklonu dna (Laboratory and numerical study of gravity currents over a sloping bottom). *Okeanology*, **45** (1), 5–15.

Submitted 07.06.2022, accepted 26.07.2022.
For citation: Kupriyanova, A. E. and V. A. Gritsenko, 2022: Sinking patches of salt water on a slope of bottom surrounded by fresh water: dynamics and structural features of density front propagation up the slope. *Journal of oceanological research*, **50** (2), 106–124, https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2022.50(2).5.