

**В. О. Василькин, И. А. Исаченко, В. А. Гриценко**

**ОСОБЕННОСТИ ДВИЖЕНИЯ  
КОНЕЧНОГО ОБЪЕМА СОЛЕНОЙ ВОДЫ  
В ОКРУЖЕНИИ ПРЭСНОЙ ВОДЫ НА СКЛОНЕ ДНА**

*Цель данной работы заключалась в экспериментальном лабораторном изучении процесса движения конечного объема соленой воды (пятна) в окружении пресной и неподвижной воды по склону дна в невращающейся жидкости. Итогом работы стали количественные оценки средней скорости соскальзывания пятна соленой воды в пресной воде вдоль склона дна.*

*This article presents an experimental laboratory study of the movement of a finite volume of saline water (spots) surrounded by fresh and nonmoving water on the slope of the bottom in a non-rotating fluid. The findings include a quantitative assessment of the average rate of sliding of a saline water spot in fresh water along the slope of the bottom.*

**Ключевые слова:** конечный объем жидкости, фазы распространения конечного объема жидкости, динамика движения пятна соленой жидкости.

**Key words:** finite volume of fluid, phase distribution of a finite volume of fluid, dynamics of a saline fluid spot.

### **Введение**

Погружение с поверхности и распространение вдоль склона дна более тяжелых (соленых, холодных или взвесенесущих) вод, чем их окружающие, в виде придонных стратифицированных по плотности течений широко распространено в Мировом океане и является важной составляющей процесса обмена вод прибрежных зон заливов, окраинных и внутренних морских бассейнов с глубинными и придонными водами [15; 20]. Придонные течения различной природы — термохалинные или мутьевые — участвуют также в общем процессе переноса осадочного вещества из береговой зоны моря в его глубинную часть [1; 6; 11].

В связи с очевидной сложностью исследования такого рода течений в морских условиях существенное значение приобретают теоретические и лабораторные подходы, которые позволяют анализировать собственно физику явления. Использование этих методов применительно



к анализу поведения придонных стратифицированных по плотности течений в условиях как вращающейся, так и невращающейся жидкости, позволило получить ряд важных результатов [4; 5; 7; 10; 13–15; 17–19; 21]. Вместе с тем говорить о полноте представлений о динамике придонных течений и процессов перемешивания на их границах явно преждевременно.

### Постановка эксперимента

Лабораторное моделирование было выполнено в гидрлотке Атлантического отделения Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН. Лоток представлял собой прямоугольный бассейн из органического стекла длиной 10 м. Высота и ширина лотка составляли 35 см и 33 см. В описываемых ниже экспериментах была использована только часть (7,5 м) рабочей области лотка. Длина склона дна равнялась 160 см.

Измерения температуры пресной воды перед каждым экспериментом выполнялись при помощи перемещаемого по вертикали температурного датчика. Фоторегистрация течений производилась цифровыми фотоаппаратами и камерой. Для измерения координат и расстояний на задней стенке лотка была закреплена 5-метровая рулетка. Регистрация времени проводилась секундомером; при обработке фотографий время кадра считывалось из свойств файла. В качестве заполняющей лоток в начальный момент времени жидкости использовалась обычная водопроводная вода. Для идентификации конечного объема соленой воды и возможности визуализации его движения по склону дна применялись оранжевые пищевые красители и  $\text{KMnO}_4$ . Брошенные в лоток кристаллики этого вещества при погружении оставляли за собой тонкие треки, деформация которых при движении жидкости позволяла фиксировать особенности течения.

При проведении лабораторных экспериментов были использованы три секции лотка общей длиной 7,5 м и оригинальное впускное устройство типа опрокидывающегося (как у вагонетки) полуцилиндра. Соленая вода подавалась в полуцилиндр входного устройства при помощи аналога медицинской капельницы непосредственно перед началом эксперимента и некоторое время отстаивалась перед его опрокидыванием и поступлением соленой воды в пресную. Началом эксперимента считался акт опрокидывания полуцилиндра впускного устройства и попадания соленой воды на верхнюю часть склона дна в лотке. Непосредственно перед впуском соленой воды проходило измерение вертикального распределения температуры заполняющей лоток воды с шагом в 1 см. Процесс распространения соленой жидкости по склону дна снимался двумя фотокамерами одновременно с разных расстояний, а также на видеокамеру. Сделанные во время опыта фотоснимки и видеозаписи позволяли получить значения средней скорости движения пятна (по формуле  $U = S/t$ ) и числа Рейнольдса  $\text{Re} = U \cdot H/\nu$ , где  $S$  и  $t$  — путь и время движения передней грани объема соленой воды по склону дна,  $U$  — измеренная скорость распространения фронта плотностного течения вдоль наклонного дна,  $H$  — характерная толщина пятна соленой воды в начальный момент времени.



Всего было выполнено три серии экспериментов, в каждой из которых проводилось формирование различных по солености конечных объемов воды ( $\Delta\rho_0 = 1, 5$  и  $10$  г/л) и генерация соответствующих течений. Для каждого эксперимента на момент старта проводилось измерение вертикального распределения температуры пресной воды в лотке; типичный вид некоторых измеренных профилей приведен на рисунке 1.

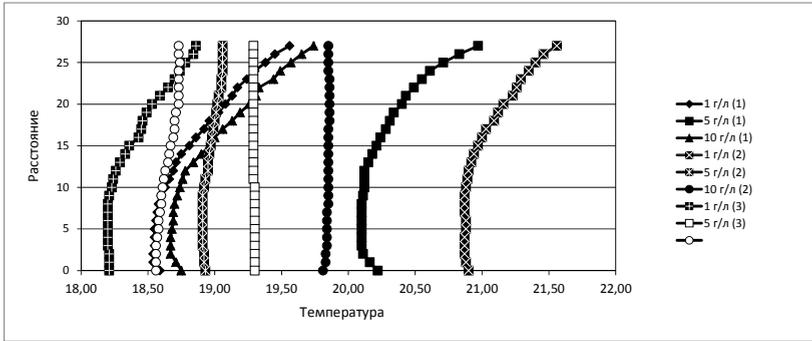


Рис. 1. Типичный вид вертикальных профилей температуры в лотке по направлению от дна (0 см) до поверхности (27 см). Отчетливо виден квазипостоянный характер значений температуры в придонном слое воды от 0 до 10 см. Для более близких к поверхности воды слоев получено два типа распределений температуры

На рисунке 2 приведены последовательные фазы течения, сформированного в результате образовавшегося на вершине склона пятна соленой воды.

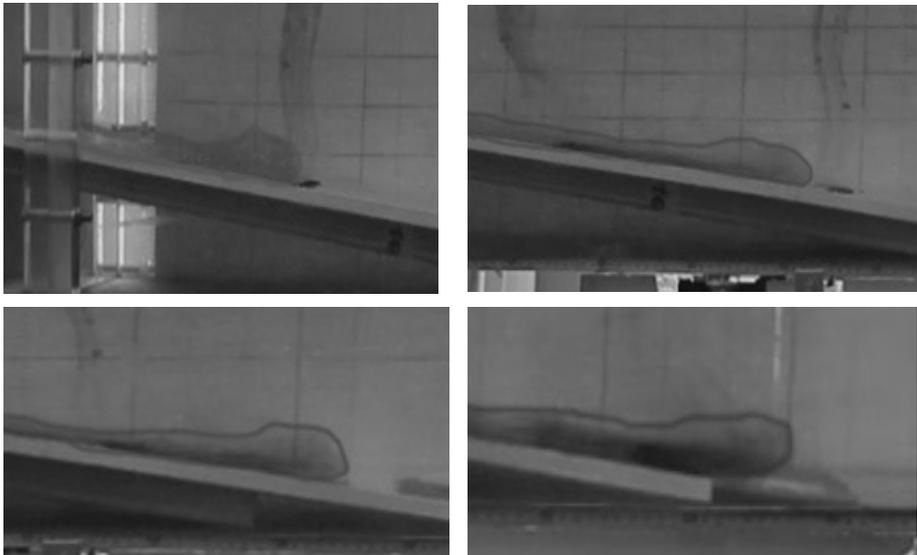


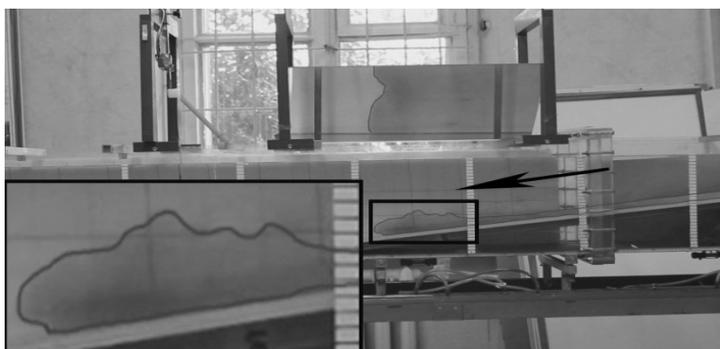
Рис. 2. Общая картина движения конченого объема соленой воды в пресной по склону дна (объем пятна — 1 л, соленость 1 г/л). На приведенных снимках показан вид последовательных фаз эволюции формы пятна при его движении по склону лотка. Жирная линия на всех снимках оконтуривает объем соленой воды



Предварительный визуальный анализ экспериментальных данных позволил констатировать наличие двух различных типов течений, инициированных созданием на вершине склона дна конечного объема соленой воды: первый тип — слабо возмущенное, по-видимому ламинарное, второй — заметно возмущенное, турбулентное. Разница типов движения соленой воды по склону дна в окружении пресной отчетливо видна на фотографиях экспериментальных течений (рис. 3). Типичный вид слабо возмущенного течения, порожденного движением пятна воды с соленостью 1 г/л (рис. 3, *а*) имеет хорошо сформированную головную часть, распространяется по дну с малой скоростью ( $\sim 0,4$  см/с) и практически не вовлекает в течение окружающую жидкость. Подобное поведение прослеживалось и при других малых значениях солености воды в пятне.



*а*



*б*

Рис. 3. Снимки экспериментов для жидкостей соленостью 1 г/л (*а*) и 10 г/л (*б*).

Показана лабораторная установка в динамике эксперимента и увеличенное изображение «головы» потока

При увеличении значения солености начального объема воды до 10 г/л (то есть в 10 раз) характер движения пятна соленой воды изме-



нялся на возмущенный (см. рис. 3, б). Для этого режима типичны менее четкие очертания головной части потока и заметное вовлечение окружающей жидкости, вследствие чего объем в разной степени соленой воды при движении пятна по склону дна увеличивался в несколько раз. На приведенных снимках виден процесс формирования кометоподобного следа подкрашенной и содержащей соль воды. Аналогичные особенности течений возникали и в других экспериментах с высокой начальной соленостью воды в пятне.

### *Результаты экспериментов в гидроролтке*

40

Качественный анализ полученных экспериментальных результатов позволил констатировать существование, как и в классическом случае коллапса плотностной неоднородности [2; 9], трех различных по физике фаз распространения конечного объема более тяжелой (соленой) жидкости в условиях наклонного дна.

Первая фаза определяется этапом быстрого сжатия по вертикали (или коллапса) конечного объема более плотной воды, попавшего на вершину склона дна из впускного устройства.

Вторая фаза определяется эффектом адвективного движения более тяжелой соленой воды под действием скатывающей силы, которая зависит от величины силы плавучести и угла наклона дна, а также импульса движения, полученного от процесса схлопывания по вертикали и перехода большей части запаса потенциальной энергии начального пятна в кинетическую. Генерация завихренности бароклинной природы [12; 16] порождает существенное размывание градиентов плотности и скорости на переднем фронте пятна, заметно увеличивая при этом его пространственные размеры и уменьшая значения избыточной плотности внутри него.

Наконец, третья фаза, вязкая, происходит в квазистационарном режиме за счет достижения баланса между вязкой и скатывающей компонентами эволюционирующего течения. Следует отметить, что описанный набор фаз процесса коллапса пятна на склоне дна полностью соответствует классификации, ранее полученной Г. И. Баренблаттом [3] при изучении коллапса пятна в двухслойной жидкости.

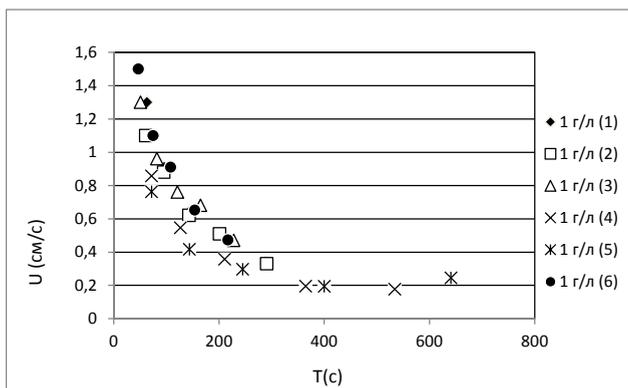
Подчеркнем, что изучение первой фазы — быстрого сжатия пятна соленой воды по вертикали в лотке — при выбранной системе регистрации затруднительно, и ее исследование, как и вязкой фазы, в данной работе рассматриваться не будет.

На всех фотографиях (рис. 2, 3) лабораторных течений отчетливо заметен квазистационарный характер движения пятна, или собственно исходного объема соленых вод, по склону дна. Быструю, начальную фазу быстрого сжатия пятна соленой воды после ее поступления в лоток зафиксировать не удалось. Использованный в лабораторных экспериментах способ фоторегистрации лабораторных течений не позволил получить репрезентативные данные по этому этапу. Поэтому в данной работе особенности быстрого сжатия пятна на склоне дна рассматриваться не будут.

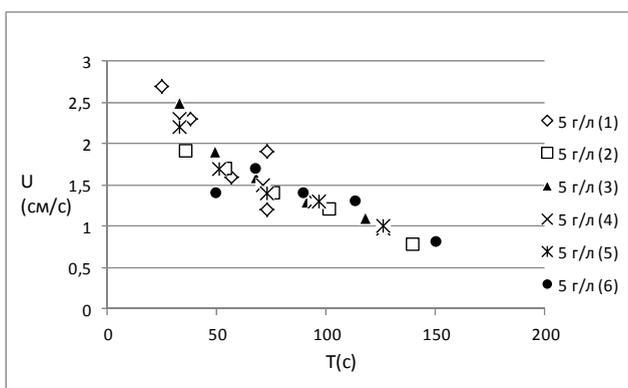


Количественный анализ экспериментальных данных

На рисунке 4 приведены графики изменчивости скорости движения пятна (U) от времени (T) по результатам фиксации времени прохождения пятном соленой воды пяти контрольных створов (на рисунке значения скорости представлены различными значками отдельно для каждого из экспериментов).



а



б

Рис. 4. Зависимость скорости движения пятна от времени для экспериментов с соленостью в 1 г/л (а) и 10 г/л (б). Различными значками обозначены результаты измерений в разных экспериментах

На рисунке 5 представлены рассчитанные методом наименьших квадратов графики линейной и гиперболической регрессий на фоне измеренных значений для всех экспериментов серии. Помимо этого на графиках показаны соответствующие теоретические оценки скорости. Кроме ранее полученных в работах [8]  $u_z = \sqrt[3]{q \cdot g \cdot \sin(\alpha)}$  ( $q$  – расход



воды) и [18]  $u_s \approx 1.5 \cdot \sqrt[3]{q \cdot g \cdot \frac{\Delta \rho_0}{\rho_0}}$  был использован и собственный ва-

риант оценки, полученный из простого соображения равенства кинетической энергии пятна запасу его потенциальной энергии на вершине склона. В очевидных обозначениях для единицы массы можно записать следующую формулу:  $V^2 / 2 = \frac{\Delta \rho_0}{\rho_0} g \cdot L \cdot \sin(\alpha)$ , где  $V$  – скорость

склона,  $\Delta p$  – перепад солености,  $p_0$  – вода,  $L$  – длина склона,  $\alpha$  – угол склона дна. Откуда легко был получен масштаб скорости:

$$U_{теор} = \sqrt{2 \cdot \frac{\Delta \rho_0}{\rho_0} \cdot g \cdot L \cdot \sin(\alpha)}.$$

42

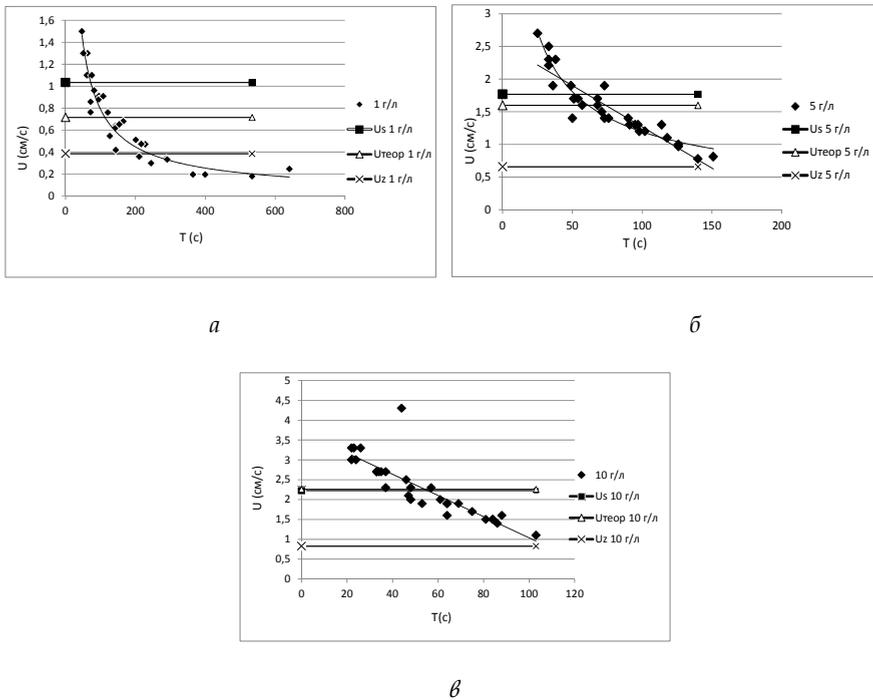


Рис. 5. Зависимость скорости движения пятна от времени для экспериментов с соленостью в 1 г/л (а), 5 г/л (б) и 10 г/л (в) и рассчитанные аналитические оценки

(обозначены на рисунке тонкой линией), приведенные в тексте статьи выше

Как видно из графиков на рисунке 5, а, зависимость изменений скорости от времени при малой солености аналитически близка к гиперболической, в то время как при повышении солености (рис. 5, б и 5, в) зависимость все более приближается к линейной. Можно предположить, что на самом деле эти три вида изменчивости имеют единую природу и просто отражают особенности движения пятна в зависимости от имеющегося на текущий момент перепада плотности (или запаса отрицательной плавучести) между пятном и окружающей водой.



Сравнивая полученные в экспериментах значения скорости движения пятна соленой воды по склону, следует отметить, что все теоретические оценки получены в предположении о стационарном характере распространения плотностного течения по склону дна. Как следует из графиков рисунка 5, данное предположение не подтвердилось: скорость движения пятна определяется балансом сил скатывания из-за отрицательной плавучести соленой воды и торможения, определяемого лобовым сопротивлением, вовлечением и перемешиванием.

При наличии достаточного запаса отрицательной плавучести пятно тормозится относительно равномерно (см. начальный участок ветви гиперболы на рис. 5, *а* и *б* и прямой на рис. 5, *в*), а затем торможение начинает доминировать и скорость движения резко замедляется (см. конечный участок ветви гиперболы на рис. 5, *а* и *б*). Проведенный анализ результатов нескольких серий лабораторных экспериментов показал существование трех видов изменчивости скорости движения в зависимости от значений начального перепада плотности между пятном и окружающей его водой, определяющего запас отрицательной плавучести массы воды пятна на склоне дна: гиперболической, переходной от гиперболической к линейной и линейной. Есть основания предполагать, что эти виды изменчивости имеют общую природу и просто отражают особенности движения пятна в зависимости от перепада плотности. Сравнение экспериментальных значений и теоретических оценок показало, что наилучшее совпадение наблюдается для случая наиболее плотной жидкости (10 г/л). По-видимому, большой запас отрицательной плавучести делает такого рода течения на использованном в эксперименте склоне дна близкими по свойствам движения к напорным течениям. При минимальном значении избыточной плотности соленой воды движение пятна носит сильно нестационарный характер, и имеющиеся теоретические оценки здесь не могут быть применены.

### Список литературы

1. Айбулатов Н. А. Динамика твердого вещества в шельфовой зоне. Л., 1990.
2. Баренблатт Г. И. Подобие, автомодельность, промежуточная асимптотика: теория и приложения к геофизической гидродинамике. Л., 1978.
3. Баренблатт Г. И., Ентов В. М., Рыжик В. М. Движение жидкостей и газов в природных пластах. М., 1982.
4. Гриценко В. А., Чубаренко И. П. Об особенностях структуры фронтальной зоны придонных гравитационных течений // *Океанология*. 2010. № 1. С. 32–39.
5. Гриценко В. А., Юрова А. А. О распространении придонного гравитационного течения по крутому склону дна // *Океанология*. 1997. Т. 37, № 1. С. 44–49.
6. Емельянов Е. М. Барьерные зоны в океане. Калининград, 1998.
7. Жмур В. В., Назаренко Д. В. Динамика тонкого слоя жидкости повышенной плотности у наклонного дна // *Океанология*. 1994. Т. 34, № 2. С. 193–200.
8. Зацепин А. Г., Гриценко В. А., Кременецкий В. В. и др. Лабораторное и численное исследование процесса распространения плотностных течений по склону дна // *Океанология*. 2005. № 1. С. 5–15.
9. Зацепин А. Г., Петрига А. А. Лабораторное исследование распространения турбидитного потока по наклонному дну // *Проблемы региональной экологии*. 2014. № 2. С. 166–170.



10. Зацепин А. Г., Костяной А. Г., Семенов А. В. Лабораторное исследование осесимметричного плотностного течения на наклонном дне во вращающейся жидкости // *Океанология*. 1996. Т. 36, № 3. С. 339–346.
11. Косьян Р. Д., Пыхов Н. В. Гидрогенные перемещения осадков в береговой зоне моря. М., 1991.
12. Кочин Н. Е., Кибель И. А., Розе Н. В. Теоретическая гидромеханика. Т. 1. М., 1963.
13. Максименко Н. А., Зацепин А. Г. О закономерностях опускания более плотных вод по гладкому склону океана // *Океанология*. 1997. Т. 37, № 4. С. 513–516.
14. Назаренко Д. В., Везерли Дж., Жмур В. В. и др. Формирование струй плотных вод в придонном слое океана у наклонного дна // *Океанология*. 1998. Т. 38, № 2. С. 195–202.
15. Самолюбов Б. И. Придонные стратифицированные течения. М., 1999.
16. Тернер Дж. Эффекты плавучести в жидкостях. М., 1977.
17. Griffiths R. W. Inertial wave drag and the production of intense vortices by turbulent gravity currents with implications for sinking of bottom waters // *Ocean Modelling*. 1983. Vol. 50. P. 9–12.
18. Simpson J. E. Gravity Currents in the Environment and the Laboratory. Ellis Workwood Ltd., 1987.
19. Shapiro G. I., Zatsepin A. G. Gravity current down a steeply inclined slope in a rotating fluid // *Ann. Geophysicae*. 1997. Vol. 15. P. 366–374.
20. Whitehead J. A. Dense water off continents // *Nature*. 1987. Vol. 327, № 6124. P. 656–657.
21. Whitehead J. A., Stern M. E., Flierl G. R., Klinger B. A. Experimental observations of baroclinic eddies on a sloping bottom // *J. Geophys. Res.* 1990. № C6. P. 9585–9610.

#### Об авторах

Виктор Олегович Василькин – асп., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.  
E-mail: vasilkin\_vo@mail.ru

Игорь Александрович Исаченко – асп., Атлантическое отделение Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Калининград.  
E-mail: vasilkin\_vo@mail.ru

Владимир Алексеевич Гриценко – д-р физ.-мат. наук, проф., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.  
E-mail: gritsenko\_vl@mail.ru

#### About the authors

Vyktor Vasilkin, PhD student, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.  
E-mail: vasilkin\_vo@mail.ru

Igor Isathenko, PhD student, Atlantic Branch of the Institute of Oceanology, Kaliningrad.  
E-mail: vasilkin\_vo@mail.ru

Prof Vladimir Gritsenko, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.  
E-mail: gritsenko\_vl@mail.ru