

УДК 551.46
DOI 10.53403/9785951505071_2022_297

ДИНАМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ИНТЕНСИВНЫХ ВНУТРЕННИХ ВОЛН В ДВУХСЛОЙНОЙ ЖИДКОСТИ: ЛАБОРАТОРНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Л. В. Лобовикова¹, П. В. Лобовиков¹, О. Е. Куркина¹, А. А. Куркин¹, А. С. Козелков²

¹ Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева,
Нижний Новгород

² Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, Саров

Представлены результаты лабораторных экспериментов по изучению динамики и структуры физических полей при распространении длинных волн на границе раздела в двухслойной жидкости. Большое внимание уделено характеристикам поля давления на дне и вертикальной стенках бассейна. Адаптированы и откалиброваны для расчетов численные модели (ЛОГОС, MITgcm) квази-идентичные лабораторной. Проведены численные эксперименты с различными конфигурациями начального состояния жидкости. Результаты численного моделирования качественно и количественно согласуются с результатами лабораторных экспериментов. Однако модель, построенная в рамках пакета ЛОГОС, обладает более высокой точностью при воспроизведении указанных физических процессов, особенно для динамических характеристик волновых полей, в частности, давления. Результаты работы позволяют полагать, что модель на основе ЛОГОС может быть в дальнейшем использована для детального моделирования распространения внутренних волн в стратифицированной жидкости и выявления различных режимов течений и оценок их динамической эффективности, как в условиях лаборатории, так и на морском шельфе.

Ключевые слова: лабораторные эксперименты, численное моделирование, внутренние волны, двухслойная жидкость, численная модель MITgcm, пакет программ ЛОГОС.

Введение

Исследование внутренних волн (ВВ) в стратифицированной жидкости – актуальная задача, интерес к которой не угасает уже более 50 лет [1–4]. Существует достаточно много численных моделей – глобальная модель циркуляции MITgcm [5], ЛОГОС Аэро-Гидро [6], численная модель ISWfoam, вычислительный комплекс IGWRsearch [7], Princeton Ocean Model (POM) [8], Bergen Ocean Model (BOM) [9] и др., на основе которых изучается как генерация и взаимодействие ВВ, так и динамические эффекты интенсивных ВВ.

В настоящей работе представлен комплексный подход к решению задачи об исследовании динамики ВВ (в том числе в контексте геофизических приложений), включающий в себя как стадию лабораторного моделирования, так и адаптацию под цели исследования надежных вычислительных комплексов, прошедших валидацию на полученных экспериментальных данных. Были использованы глобальная модель циркуляции MITgcm разработанная в Массачусетском технологическом институте с бесплатным доступом и открытым кодом и пакет программ ЛОГОС Аэро-Гидро (далее ЛОГОС, <http://logos.vniief.ru/>), который является коммерческим продуктом РФЯЦ-ВНИИЭФ и на текущий момент имеет широкий спектр применения, возможности которого продолжают расширяться.

Полнонелинейная модель, на которой базируется MITgcm, основывается на трехмерных уравнениях гидродинамики трехмерной несжимаемой жидкости в приближении Буссинеска, что позволяет учитывать негидростатические процессы, в частности описывать генерацию и распространение ВВ, которые напрямую зависят от диффузионных, вязкостных и адвективных свойств жидкости, т. е. данная модель предполагает эмпирическое задание и варьирование коэффициентов, отвечающих за перечисленные эффекты.

В пакете программ ЛОГОС для моделирования динамики несжимаемой жидкости используется математическая модель многофазной среды, основанная на системе уравнений Навье – Стокса [10]. При этом, в отличие от MITgcm, ЛОГОС позволяет напрямую проводить моделирование динамики уединенных ВВ без привлечения эмпирических коэффициентов, используя метод конечных объемов с неструктурированными сетками и локальным уточнением сетки. Как и MITgcm, ЛОГОС поддерживает технологии кластерных и суперкомпьютерных вычислений, что позволяет значительно сократить время проведения расчетов для ресурсоемких инженерных задач. Необходимо отметить, что ранее пакет программ ЛОГОС не использовался для моделирования динамики стратифицированной жидкости и проведенное исследование позволило расширить диапазон его применимости к негидростатическим задачам.

Постановка задачи

Основные инструменты исследования в данной работе – лабораторное моделирование в лотке НИЛ Моделирования природных и техногенных катастроф НГТУ им. Р. Е. Алексеева и соответствующие численные эксперименты, воспроизводящие задачу с начальными условиями в жидкостях с двумя однородными слоями различной плотности. Лабораторные эксперименты проводились в гидродинамической установке, параметры которой приведены в табл. 1. Данная установка может быть использована для моделирования волновых процессов в замкнутых или почти замкнутых акваториях «вытянутой формы». Примером таких водоемов могут служить некоторые каналы, множество озер (например, Балатон, Веттерн и др.), бухты и гавани, фьорды.

Таблица 1

Параметры лабораторной установки

Длина резервуара	6.24 м
Ширина резервуара	0.5 м
Расстояние между левой стенкой лотка и воротами (L_g)	0.45 м
Толщина ворот (Δg)	0.03 м
Кварцевые преобразователи давления	p01-p21
Датчик атмосферного давления	p22

Численные расчеты выполнены с помощью вычислительного комплекса MITgcm [11, 12] и пакета программ ЛОГОС Аэро-Гидро [13]. Их результаты сопоставлены с данными лабораторных экспериментов по генерации и распространению уединенной внутренней волны отрицательной полярности, схема, одного из которых приведена на рис. 1. Начальные параметры задачи: $\rho_1 = 995.75 \text{ кг/м}^3$ – плотность пресной воды, $\rho_2 = 1019.49 \text{ кг/м}^3$ – плотность соленой воды. Динамическая вязкость верхнего слоя $\mu_2 = 0.8937 \text{ мПа}\cdot\text{с}$, и динамическая вязкость нижнего слоя $\mu_1 = 0.85336 \text{ мПа}\cdot\text{с}$, $h_1 = 0.05 \text{ м}$, $h_2 = 0.2 \text{ м}$, $H_1 = 0.05 \text{ м}$, $H_2 = 0.2 \text{ м}$. Уединенные внутренние волны генерируются методом так называемого «гравитационного коллапса» [14, 15] за счет извлечения вертикальной перегородки со скоростью 1 м/с. При этом происходит образование локализованного возмущения на границе раздела жидкостей и последующее его распространение. Поскольку уровень легкой жидкости в основной части бассейна меньше, уровня тяжелой, то уединенная внутренняя волна, в описанном случае, имеет отрицательную полярность.

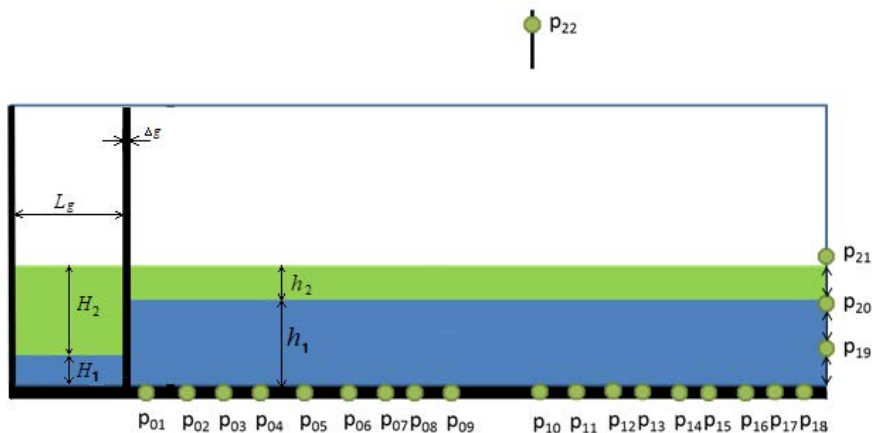


Рис. 1. Схема задачи

Начальные условия в численных моделях квази-идентичны лабораторной, т. е. полностью соответствовали схеме, представленной на рис. 1. Регистрация проведенных экспериментов осуществляется с помощью видеосъемки и кварцевых преобразователей давления, установленных на дне и вертикальной стенке гидродинамической установки. Для воспроизведения морфологических характеристик уединенной волны производится оцифровка видеок кадров каждого эксперимента. Временные ряды давления в волновом поле как при численных, так и при лабораторных экспериментах записывались в точках p_{01} – p_{21} (рис. 1).

Основные результаты

Траектории движения уединенной ВВ в виде X - T диаграмм смещения границы раздела жидкостей по данным численного моделирования (MITgcm, ЛОГОС) и лабораторного эксперимента представлены на рис. 2. На рисунке четко прослеживается движение с постоянной скоростью уединенной ВВ отрицательной полярности вдоль трассы распространения, значительное увеличение ее максимальной амплитуды в момент столкновения с твердой стенкой, расположенной на правой границе расчетной области и генерация мелкомасштабных возмущений после ее взаимодействия со стенкой во всех экспериментах (численных и лабораторных). При этом наклон траекторий распространения солитоноподобной волны, характеризующий ее нелинейную скорость сохраняется.

Результаты сопоставления формы смещения границы раздела жидкостей в центре расчетной области приведены на рис. 3. Можно видеть, что наблюдается хорошее качественное соответствие по длине волны. При этом, отличие результатов численных экспериментов от лабораторных по амплитуде смещения составляет 7.2 % (MITgcm) и 9.8 % (ЛОГОС).

Для количественных оценок различий результатов лабораторного и численного моделирования можно использовать функцию взаимной корреляции временных рядов смещения границы раздела жидкости (рис. 4, слева). Как можно видеть на рис. 4 (справа) максимальная корреляция между экспериментальными данными и данными численных экспериментов достигает значения $K = 0.90$ с задержкой в 4 секунды (ЛОГОС) и $K = 0.86$ с задержкой в 2 секунды (MITgcm), что говорит о неплохой согласованности результатов численного и лабораторного моделирования.

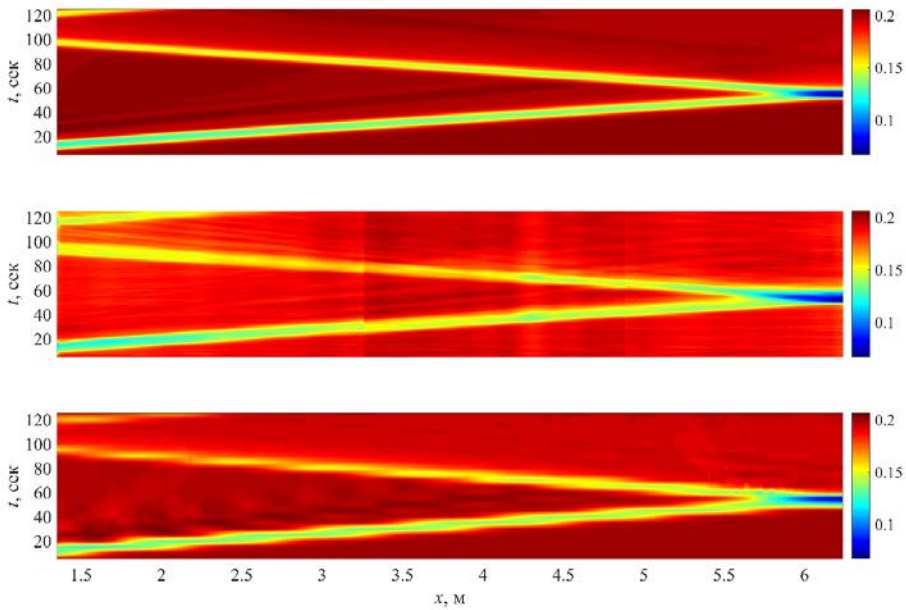


Рис. 2. Пространственно-временные диаграммы процесса смещения границы раздела жидкостей по данным численного моделирования в MITgcm (сверху), по данным видео лабораторного эксперимента (в центре) и по данным численного моделирования в программном пакете ЛОГОС (снизу); цветом показана амплитуда в м

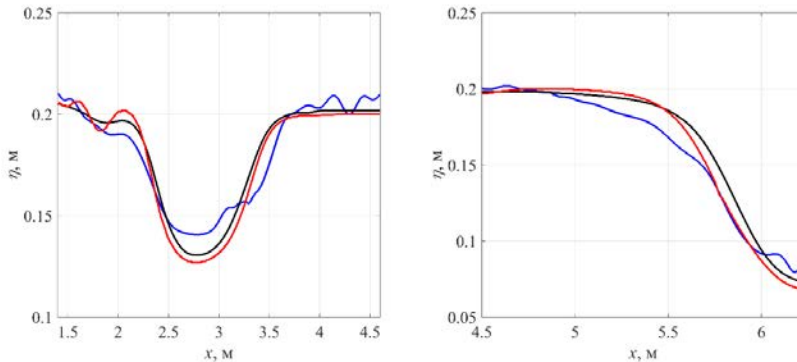


Рис. 3. Форма уединенной внутренней волны в центре установки (слева) и в момент взаимодействия со стенкой (справа); синяя линия – лабораторный эксперимент; черная – MITgcm; красная – ЛОГОС

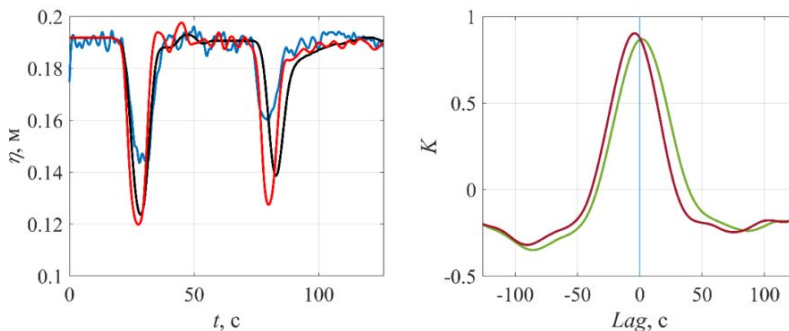


Рис. 4. Слева: смещение границы раздела от времени в точке $x = 3.1$ м. Синяя линия – лабораторный эксперимент; черная – MITgcm; красная – ЛОГОС; справа: корреляция смещения границы раздела, коричневым цветом – эксперимент-ЛОГОС, зеленым цветом – эксперимент-MITgcm

На рис. 5: по данным лабораторного и численного моделирования показано проявление процесса генерации и трансформации интенсивных ВВ отрицательной полярности в поле динамического давления на дне и вертикальной стенке лотка. Следует отметить, что как изменения давления, как и динамика этих изменений во времени, хорошо согласуются в лабораторных и численных экспериментах (разница в амплитуде давления за время эксперимента составила не более 26 %, как для MITgcm, так и для ЛОГОС).

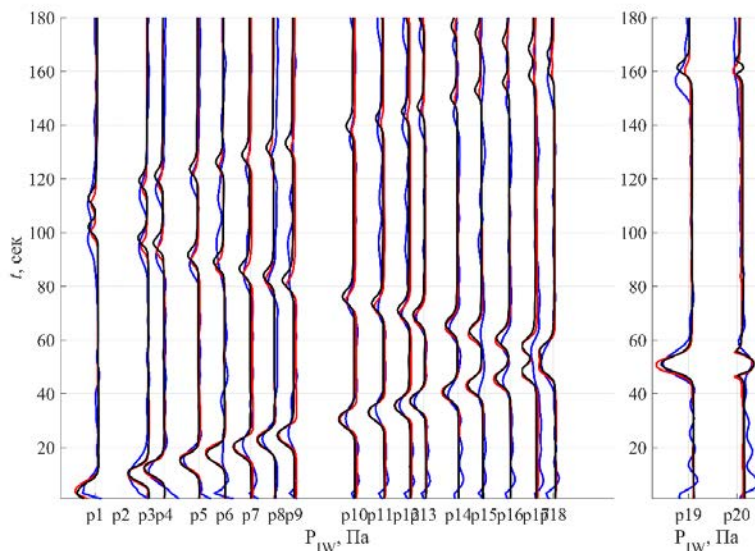


Рис. 5. Сравнение вклада ВВ в общее поле давления жидкости на дно и вертикальную стенку в рамках трех подходов: черная линия – численное моделирование средствами MITgcm; синяя линия – лабораторный эксперимент; красная линия – численное моделирование средствами пакета ЛОГОС

Максимальные вариации давления ВВ на датчике p_{10} (в центре расчетной области) (рис. 6) составляют ≈ 9.45 Па по данным пакета программ ЛОГОС и ≈ 7 Па по экспериментальным данным, а максимальная корреляция между экспериментальными данными и ЛОГОС достигает значения $K = 0.87$.

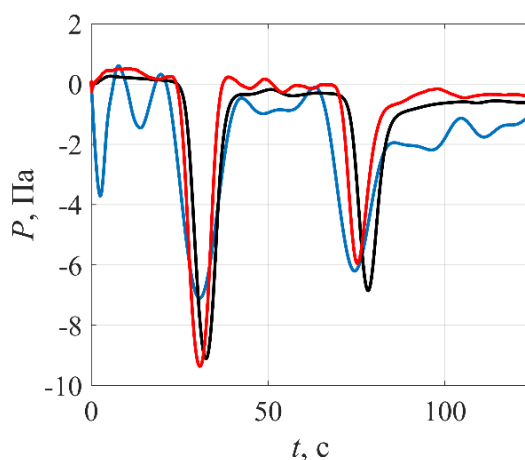


Рис. 6. Слева: временное распределение давления ВВ с датчика p_{10} . Синяя линия – лабораторный эксперимент; черная – MITgcm; красная – ЛОГОС

Заклучение

В данной работе проанализированы особенности динамических полей, индуцированных сильно нелинейной уединенной внутренней волной в двухслойной жидкости. Результаты расчетов сопоставлены с данными лабораторных экспериментов, наблюдается их хорошее соответствие. Проведено качественное и количественное сравнение характеристик ВВ (амплитуда, ширина, корреляция), дана оценка величины придонного давления в интенсивной ВВ и давления на вертикальную стенку при ее отражении. Показано, что результаты лабораторного и численных экспериментов обладают корреляцией ($K > 0.8$), как для смещения границы раздела, так и для временных рядов давления. Комплексный анализ полученных данных позволяет говорить о достаточно высокой эффективности применения программ вычислительной гидродинамики к воспроизведению результатов лабораторных экспериментов с интенсивными ВВ в двухслойной жидкости. Однако пакет программ ЛОГОС, обладает более высокой точностью при воспроизведении указанных физических процессов, особенно динамических характеристик волновых полей, в частности, давления. Результаты работы позволяют полагать, что пакет программ ЛОГОС может быть в дальнейшем использован для детального моделирования распространения ВВ в стратифицированной жидкости и выявления различных режимов течений и оценок их динамической эффективности, как в условиях лаборатории, так и на морском шельфе.

Представленные результаты получены при поддержке стипендии Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам (СП–3546.2021.5).

Литература

1. Boegman L., Stastna M. Sediment resuspension and transport by internal solitary waves // Annual review of fluid mechanics. – 2019. – V. 51. – P. 129–154.
2. Woodson C. B. The fate and impact of internal waves in nearshore ecosystems // Annual review of marine science. – 2018. – V. 10. – P. 421 – 441.
3. Lamb K. G. Internal wave breaking and dissipation mechanisms on the continental slope/shelf // Annual Review of Fluid Mechanics. – 2014. – V. 46. – P. 231–254.
4. Zou L, Li Y., Hu Y., Wang Z., Yu Z. Frontal collision of two nonlinear internal solitary waves in a stratified fluid // Applied Ocean Research. – 2020. – V. 104. – P. 102334.
5. Adcroft A., Campin J.-M. MITgcm User Manual. Cambridge: MIT. 2011. P. 455.
6. Дерюгин Ю. Н., Козелков А. С., Зеленский Д. К., Глазунов В. А., Полищук С. Н., Ялозо А. В., Емельянов А. Б. Программный модуль пакета программ «ЛОГОС» для моделирования аэрогидродинамики и теплопереноса (ЛОГОС-ТМП), версия 2017–2019.
7. Lamb K. G. Numerical experiments of internal wave generation by strong tidal flow across a finite amplitude bank edge // Journal of Geophysical Research: Oceans. – 1994. – V. 99. – No. C1. – P. 843–864.
8. George L. Mellor Users guide for a three-dimensional, primitive equation, numerical ocean model Program in Atmospheric and Oceanic Sciences Princeton University // Princeton, 2002 - NJ 08544 – 0710.
9. Berntsen J. Users guide for a modesplit σ -coordinate numerical ocean model. 2004. P. 51.
10. Hirt C. W., Nichols B. D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries // J. Comput. Phys. – 1981. – V. 39. – P. 201–225.
11. Marshall J. S., Adcroft A. J., Hill C., Perelman L., Heisey C. A finite-volume, incompressible Navier Stokes model for studies of the ocean on parallel computers // J. Geophys. Res. – 1997. – V. 102. № C3. – P. 5753–5766.
12. Marshall J. S., Hill C., Perelman L., Adcroft A. J. Hydrostatic, quasi-hydrostatic, and nonhydrostatic ocean modeling // J. Geophys. Res. – 1997. – V. 102. № C3. – P. 5733–5752.
13. Козелков А. С., Курулин В. В., Лашкин С. В., Шагалиев Р. М., Ялозо А. В. Исследование потенциала суперкомпьютеров для масштабируемого численного моделирования задач гидродинамики в промышленных приложениях // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2016. – Т. 56. № 8. – С. 1524–1535.

14. Grue J. Generation, propagation, and breaking of internal solitary waves // *Chaos*. – 2005. – V. 15. № 3. – P. 1–14.
15. Chen C.-Y., Hsu J.R.-C., Chen C.-W., Chen H.-H., Kuo C.-F., Cheng M.-H. Generation of Internal Solitary Wave by Gravity Collapse // *J. Mar. Sci. Technol.* – 2007. – V. 15. № 1. – P. 1–7.

DYNAMIC EFFECTS OF INTENSIVE INTERNAL WAVES IN A TWO-LAYER LIQUID: LABORATORY EXPERIMENTS AND NUMERICAL SIMULATION

L. V. Lobovikova¹, P. V. Lobovikov¹, O. E. Kurkina¹, A. A. Kurkin¹, A. S. Kozelkov²

¹ Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod

² Russian Federal Nuclear Center –

All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics, Sarov

The results of laboratory experiments on the study of the dynamics and structure of physical fields during the propagation of long waves at the interface in a two-layer liquid are described. Much attention is paid to the characteristics of the pressure field at the bottom and vertical walls of the pool. Mathematical models (LOGOS, MITgcm) are adapted and calibrated for calculations, quasi-identical to the laboratory one. Numerical experiments are carried out with various configurations of the initial state of the liquid. The results of numerical simulation are in qualitative and quantitative agreement with the results of laboratory experiments. However, the model built within the LOGOS package has a higher accuracy in reproducing the indicated physical processes, especially for the dynamic characteristics of field waves, in particular, pressure. The results of the work suggest that the LOGOS-based model can be further used for detailed modeling of the propagation of internal waves in a stratified fluid and for identifying various flow regimes and assessing their dynamic efficiency, both in laboratory conditions and on the sea shelf.

Key words: Laboratory experiments, numerical modeling, internal waves, two-layer fluid, MITgcm numerical model, LOGOS software package.