

Лабораторное моделирование распространения периодических внутренних волн над донными откосами

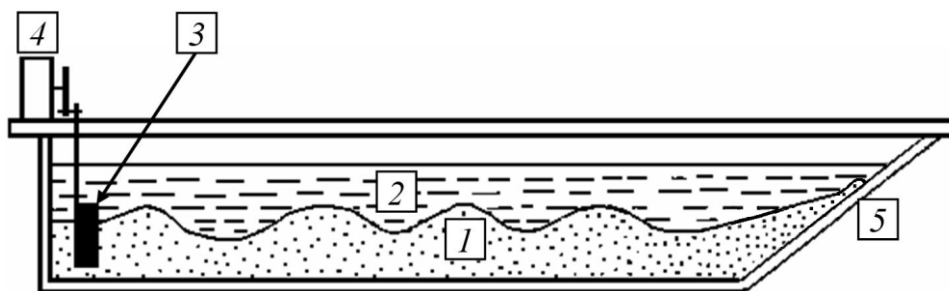
В открытом гидроканале физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова выполнено экспериментальное исследование наката периодической внутренней волны в двухслойной жидкости на береговой откос. Волна генерировалась волнопродуктором. Исследованы трансформация волны, вертикальная структура поля скорости массопереноса, изменение параметров внутренней волны при распространении над наклонным дном. Показано, что при накате и обрушении внутренней волны происходит периодический выброс порций более тяжелой жидкости нижнего слоя вверх по склону. Скорость стокова дрейфа знакопеременна по глубине, а длина (горизонтальное расстояние между соседними гребнями) и высота волны над наклонным дном (возвышение гребня над откосом по вертикали) убывают по мере распространения волны к берегу.

Введение. В процессе распространения внутренних волн в океане они трансформируются, изменяя свои пространственно-временные характеристики. Во многих случаях это обусловлено изменениями глубины бассейна, средних течений и поля плотности, отражением от подводных склонов и берегов, дисперсией и нелинейным взаимодействием волн.

Ниже представлены результаты лабораторного исследования плоской задачи о распространении периодических внутренних волн в бассейне, заполненном двухслойной жидкостью, из области постоянной глубины в прибрежную мелководную зону с плоским наклонным дном. Особенности распространения и обрушения внутренних волн над наклонными участками дна для двухслойной и непрерывно стратифицированной по вертикали жидкости исследовались с использованием данных натуральных наблюдений [1], методами лабораторного [2 – 4] и численного [5 – 7] моделирования. Обзор исследований по внутренним волнам, включающий обсуждение рассматриваемой проблемы, представлен в [8]. Интерес к изучению эволюции и обрушения внутренних волн в таких условиях связан с их значительным вкладом в динамику океана над подводными склонами и горами, в морфодинамику дна в зонах интенсивных бароклинных движений, в усиление вертикального обмена в океане.

Лабораторная установка и методика исследования. Экспериментальное исследование трансформации периодических внутренних волн в двухслойной жидкости при накате на плоский прибрежный откос проводилось на лабораторной установке физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, схематически показанной на рис. 1. Установка представляет собой открытый прямолинейный гидроканал длиной

204 см прямоугольного поперечного сечения 17×20 см [3]. Устойчивая вертикальная плотностная стратификация в канале, близкая к двухслойной, создавалась путем медленной заливки в него сначала подкрашенной соленой (нижний слой 1), а затем пресной (более легкий верхний слой 2) воды. Внутренние волны возбуждались волнопродуктором 3, представляющим собой сплошной параллелепипед, расположенный на границе раздела слоев на одном из торцов канала и совершающий вертикальные гармонические колебания. Период колебаний волнопродуктора регулировался с помощью редуктора; стабильность частоты колебаний обеспечивалась использованием асинхронного двигателя 4. На противоположном конце гидроканала была помещена наклонная плоскость 5, имитирующая подводный откос. Лабораторная установка позволяет моделировать как внутренние, так и поверхностные регулярные и нерегулярные волны.



Р и с. 1. Схема лабораторной установки: 1 – слой соленой воды; 2 – слой пресной воды; 3 – волнопродуктор; 4 – асинхронный двигатель; 5 – подводный откос

В экспериментах толщины пресной и соленой воды были одинаковыми и равными 5 см. Для измерения солености использовался кондуктометрический метод. Профили электропроводности в различных сечениях канала определялись при помощи датчика, который представляет собой два стальных стержня диаметром 1 мм, расположенных на удалении 5 мм друг от друга. Электрическое взаимодействие с водой осуществлялось с помощью двух точечных платиновых контактов, величина зазора между которыми составляла 2 мм. Датчик включался в цепь переменного тока, затем модулированный по амплитуде сигнал подавался через блок сопряжения на плату аналого-цифрового преобразователя компьютера. Тарировка производилась абсолютным методом, то есть по изменению падения напряжения на входе аналого-цифрового преобразователя в зависимости от концентрации солевого раствора. Для получения тарировочной кривой солемер опускали от свободной поверхности двухслойной жидкости до дна (полная глубина 10 см) и измеряли соленость через каждые 0,5 см.

Положения границы раздела слоев (колебания скачка плотности) во время экспериментов регистрировались видеокамерой. Характеристики внут-

ренных волн на этапах генерации, распространения над участком постоянной глубины и над подводным откосом определялись по видеозаписям с использованием компьютерных методов анализа изображений. Эксперименты выполнены для углов наклона прибрежного откоса α , равных $4 - 15^\circ$. Для расчета частотных спектров колебаний скачка плотности на заданном удалении от волнопродуктора использовались данные измерений, полученные солеметром.

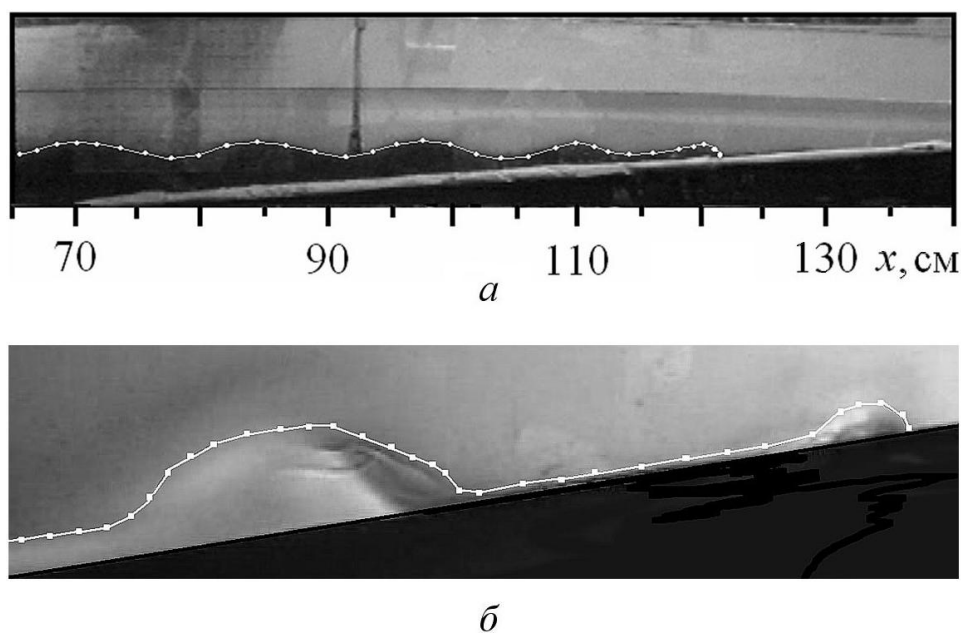
В серии экспериментов определялась также средняя горизонтальная скорость индуцированного внутренними волнами течения (бароклинный стоков дрейф). Для предварительного анализа скорости волнового переноса использовался трассерный метод. Положения трассера (первоначально вертикального трека от падающего кристалла марганцовокислого калия) регистрировались видеокамерой. С целью более точного количественного определения скорости движения частиц во внутренней волне применялся лазерный доплеровский анемометр [9]. Использовалась двухлучевая дифференциальная схема с областью пересечения зондирующих пучков $0,097 \times 0,096 \times 0,788$ мм. Точность измерения скорости течения этим способом составила $0,2 \text{ мм} \cdot \text{с}^{-1}$.

Результаты экспериментов. Выполненные лабораторные эксперименты позволили рассмотреть закономерности наката периодической внутренней волны на наклонный прибрежный участок дна, описать изменение высоты и длины внутренней волны при распространении над откосом, рассчитать спектры колебаний границы раздела слоев и индуцированные внутренней волной средние горизонтальные течения в слоях. Остановимся на основных результатах проведенного исследования.

При включении волнопродуктора происходит генерация внутренней волны, которая распространяется от волнопродуктора 3 к наклонному участку дна 5 (рис. 1). При достижении глубоководной границы откоса внутренняя волна продолжает свое движение по направлению к берегу, включающее распространение над наклонным дном и накат волны на участок склона в окрестности пересечения невозмущенной границы раздела слоев и дна.

При распространении над откосом формируется система внутренних волн различной длины и высоты. В показанном на рис. 2, *а* случае над откосом располагаются пять последовательных гребней внутренней волны. На конечной стадии наката происходит обрушение внутренних волн. На этом этапе образуется турбулентное плотностное течение (струя), распространяющееся вверх по откосу. Детальное описание процесса обрушения внутренней волны на основе результатов численного моделирования дано в работах [5, 6]. В случае генерации регулярной волны в головной части придонной струи происходит периодическое образование порций (*boluses*) более тяжелой жидкости, распространяющихся вверх по откосу на одно и то же расстояние (рис. 2, *б*). Аналогичные структуры были получены ранее и в других лабораторных экспериментах [2, 4, 8]. Их детальный количественный анализ содержится в работах [2, 4]. Отражение внутренних волн от откоса в целом в про-

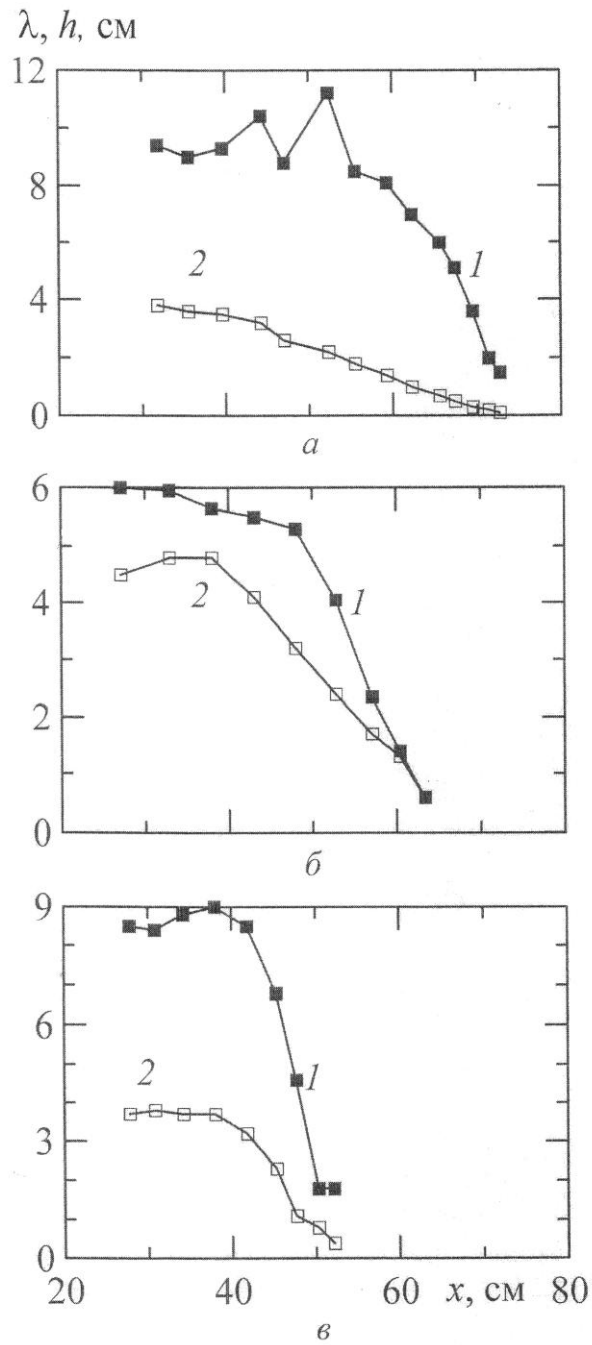
веденных лабораторных экспериментах выражено слабо, что отмечалось в работе [2].



Р и с. 2. Накат внутренней волны на откос: *a* – структура периодической внутренней волны над откосом; *б* – выброс порций более тяжелой жидкости вверх по откосу при обрушении внутренних гравитационных волн. Угол наклона дна α равен 5° , соленость нижнего слоя S составляет 25‰. Откос начинается в точке $x = 50$ см

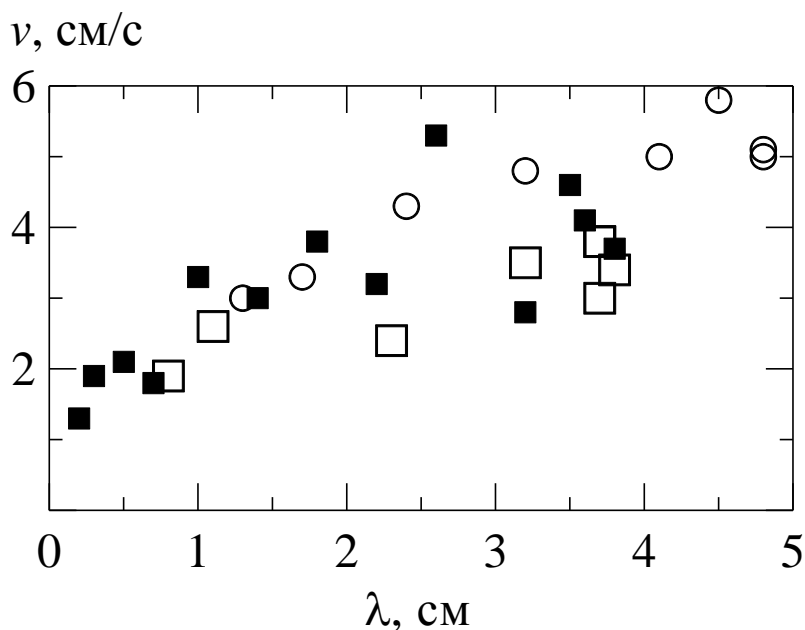
При распространении от волнопродуктора к противоположной наклонной границе бассейна внутренняя волна трансформируется, сначала в результате амплитудно-частотной дисперсии, что проявляется слабо, а затем с уменьшением глубины бассейна. Характер изменения длины λ и высоты h внутренней волны при подходе к откосу и распространении над ним для трех углов наклона дна показан на рис. 3. Длина волны определялась как расстояние между вертикальными прямыми, проведенными через соседние гребни волн. Высота внутренней волны вне откоса определялась как возвышение гребня над соседней ложбиной, а над наклонной границей – как возвышение гребня над наклонным дном, измеренное по вертикали. Стадия обрушения волны при оценках ее длины и высоты исключалась из рассмотрения.

Выполненные эксперименты показали (рис. 3), что как длина, так и высота внутренней волны убывают по мере распространения над откосом. Аналогичным образом происходит изменение и головной части обрушившейся внутренней волны [2]. Увеличение угла наклона дна α приводит к более быстрому уменьшению длины и высоты волны в направлении к берегу. В работе [4] показано экспериментально, что число расположенных над откосом обрушившихся внутренних волн увеличивается при уменьшении угла наклона дна.



Р и с. 3. Изменение длины λ (кривые 1) и высоты h (кривые 2) периодической внутренней волны при подходе к откосу и распространении над ним для трех углов наклона дна: *a* – $\alpha = 5^\circ$; *б* – $\alpha = 10^\circ$; *в* – $\alpha = 15^\circ$. Соленость нижнего слоя 80‰, начало откоса – в точке $x = 50$ см

Длины внутренних волн соизмеримы с толщинами слоев, исключая зону наивысшего подъема жидкости, и поэтому волны должны обладать достаточно сильной дисперсией, то есть зависимостью скорости распространения v от длины волн λ . Такая зависимость, полученная по данным рис. 3, представлена на рис. 4. Несмотря на значительный разброс экспериментальных точек, можно утверждать, что возбуждаемые волнопродуктором внутренние волны действительно обладают достаточно сильной частотной дисперсией на всех стадиях волнового процесса, что проявляется в увеличении скорости распространения волны в 2 – 2,5 раза при росте ее длины в 1 – 4 раза.

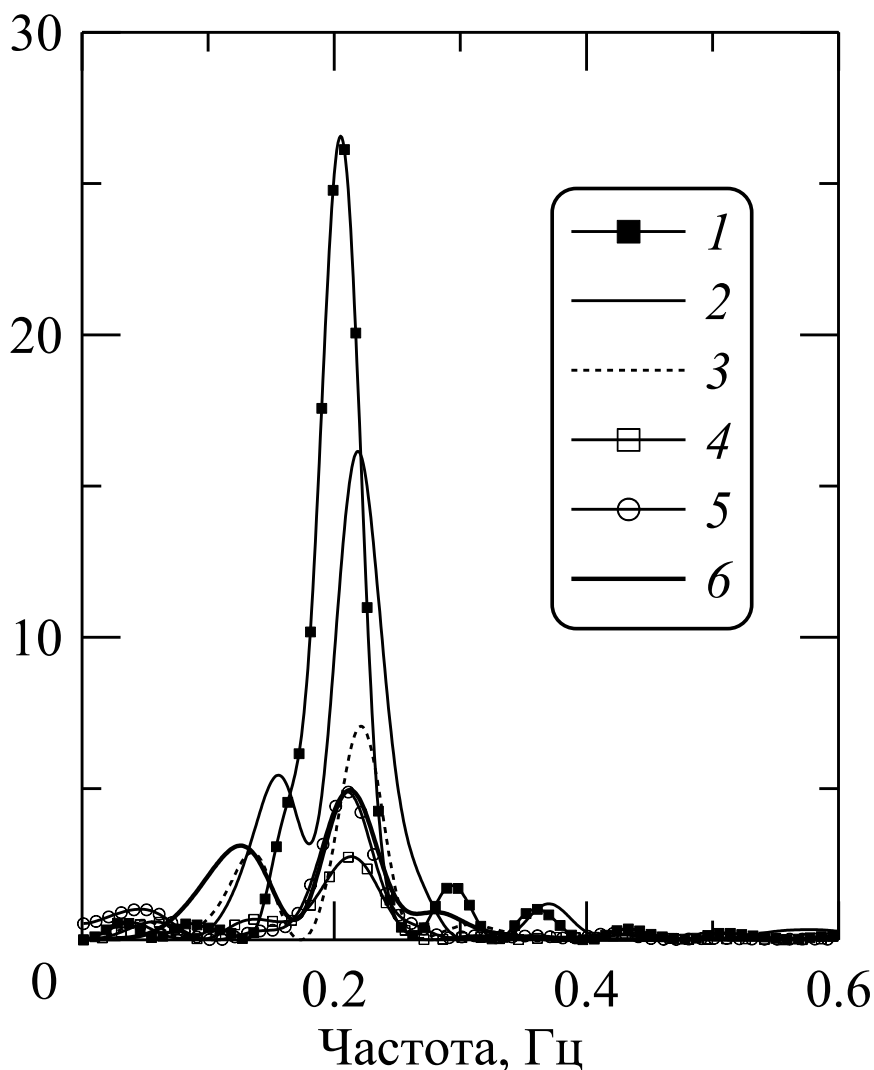


Р и с. 4. Фазовая скорость внутренних волн v в зависимости от их длины λ : ■ – $\alpha = 5^\circ$; ○ – $\alpha = 10^\circ$; □ – $\alpha = 15^\circ$. Соленость нижнего слоя 80‰

Для проверки вывода об ослаблении поля внутренних волн по мере смещения точки наблюдения к берегу рассчитаны частотные спектры колебаний границы раздела слоев при подходе к подводному откосу и непосредственно над ним. Как отмечалось ранее, для этой цели использовались временные ряды колебаний границы раздела слоев, полученные с помощью солемера. Рассчитанные спектры (рис. 5) позволяют сделать вывод об уменьшении энергии доминирующих колебаний скачка плотности по мере смещения точки наблюдения в направлении к берегу (спектры 1 – 4). Максимум спектра падающей волны (кривая 1) соответствует частоте 0,205 Гц (период 4,9 с). В некоторых точках канала, расположенных вне и в зоне откоса, наблюдаются многомодовые колебания (спектры 2, 3, 6 с несколькими пиками), которые можно интерпретировать как результат наложения волн с различными характери-

стиками. Можно ожидать, что они соответствуют интенсивной набегающей и значительно более слабой отраженной внутренней волне.

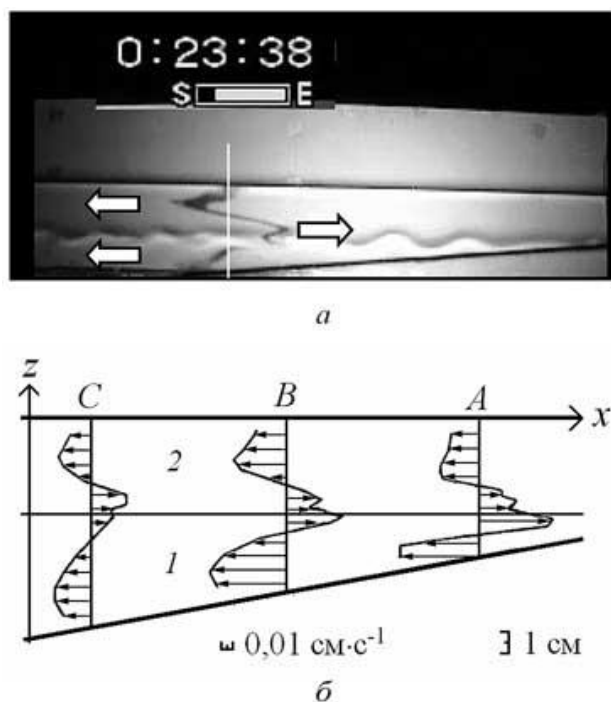
Спектр, $\text{см}^2 \cdot \text{с}$



Р и с. 5. Частотные спектры внутренних волн на различных расстояниях x от волнопродуктора: 1 – $x = 30$ см; 2 – $x = 35$ см; 3 – $x = 40$ см; 4 – $x = 45$ см; 5 – $x = 50$ см; 6 – $x = 55$ см. Глубоководная граница откоса расположена в точке $x = 50$ см, угол наклона дна 15° , соленость нижнего слоя 25‰. Начало откоса при $x = 50$ см

Распространение крутых внутренних волн вдоль границы раздела слоев сопровождается волновым переносом массы, являющимся аналогом стоковского дрейфа для нелинейных поверхностных волн [10]. Использование трассеров позволило установить генеральные направления волнового переноса в слоях на различных горизонтах. Типичный случай приведен на рис. 6, а, из которого

следует, что направление скорости волнового переноса в жидкости в условиях вертикальной плотностной стратификации изменяется: выше и ниже границы раздела пресной и соленой воды она направлена от откоса в центральную часть канала, а в окрестности границы раздела слоев – в сторону берега.



Р и с. 6. Волновое течение, сопутствующее периодической внутренней волне при распространении над подводным откосом: *а* – волновой перенос пассивного трассера в слоях (трансформация вертикального следа кристалла марганцовокислого калия, стрелки – направление течения на различных горизонтах); *б* – определенные лазерным методом экспериментальные эпюры горизонтальных скоростей в трех сечениях канала *A*, *B* и *C* над наклонным дном ($\alpha = 4^\circ$)

Вертикальное распределение скорости волнового переноса получено лазерным методом. Для этого с шагом по вертикали 3 мм определялись горизонтальные проекции орбитальных (эйлеровых) скоростей. Их осреднение по времени за период волны позволило найти распределение скорости бароклинного массопереноса [3]. Найденные таким методом вертикальные распределения скорости горизонтального массопереноса внутренней волной (с периодом 8 с) в трех поперечных сечениях на оси канала над подводным откосом представлены на рис. 6, *б*. Сечения соответствуют расстояниям от линии уреза воды, равным 85 см (сечение *A*), 114 см (*B*) и 144 см (*C*).

Характер распределения скорости волнового переноса в сечениях канала позволяет описать пространственную структуру бароклинной скорости массопереноса. При набегании внутренней волны на береговой откос образуются две ячейки вертикальной циркуляции в слое пресной и в слое

соленой воды. По мере приближения к линии уреза (переход от сечения *C* к сечению *A*) скорость массопереноса в нижнем слое увеличивается более значительно, чем в верхнем. Это можно объяснить уменьшением глубины нижнего слоя по мере приближения к берегу.

Выполненные измерения скорости волнового переноса для волн различных периодов показали, что увеличение периода внутренней волны вызывает уменьшение скорости массопереноса при сохранении структуры распределения этой скорости по вертикали. Интегральный перенос массы по глубине отличен от нуля. Это возможно только тогда, когда поле скорости волнового переноса неоднородно поперек экспериментального бассейна. Соответствующие измерения показали, что, действительно, при приближении к боковым стенкам канала скорость массопереноса увеличивается, причем ее максимальные значения сосредоточены в пристеночных пограничных слоях толщиной 0,5 – 1 см.

Заключение. В последние годы значительно возрос интерес к комплексному изучению динамики внутренних волн в районах подводных склонов, морских гор, проливов, устьев рек и других неоднородностей рельефа дна океана и береговой черты. В этих зонах происходит усиление и генерация внутренних волн, которые существенно влияют на транспорт донных осадков, вертикальный обмен в океане и биопродуктивность. В данной работе представлены результаты лабораторного исследования распространения периодических внутренних волн в двухслойной жидкости над плоским береговым откосом. Эксперименты выполнены в гидроканале физического факультета Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова.

Показано, что при распространении над наклонным дном формируется система внутренних волн различной длины и высоты. На конечной стадии наката волн происходит их нелинейное укручение и обрушение с образованием зон интенсивного турбулентного перемешивания. В результате вдоль откоса образуется система распространяющихся вверх по откосу областей тяжелой жидкости (*boluses*) с достаточно сложной внутренней плотностной структурой.

Длина (расстояние между соседними гребнями по горизонтали) и высота (возвышение гребня над откосом по вертикали) внутренних волн убывают в направлении к берегу по мере распространения над откосом. Чем более пологим является откос, тем медленнее происходит убывание длин и высот волн при подходе к берегу. При уменьшении угла наклона дна также увеличивается число находящихся над откосом и распространяющихся вверх, а затем вниз по нему порций тяжелой жидкости, вызванных обрушившимися внутренними волнами.

Выполнены расчеты временных спектров колебаний границы раздела слоев для точек перед и над береговым откосом. Их анализ показал, что при смещении точки измерений к берегу энергия поля внутренних волн убывает. В некоторых точках наблюдались многомодовые спектры, что означает наложение колебаний жидкости различной частоты.

Распространение внутренних волн большой амплитуды вызывает волновой перенос массы, являющийся аналогом стоковского дрейфа частиц в нелинейных поверхностных волнах [10]. Горизонтальная скорость волнового

переноса знакопеременна по глубине, а именно: выше и ниже скачка плотности она направлена от откоса в центральную часть канала, в его окрестности – в сторону берега. Таким образом, при набегании внутренней волны на береговой откос образуются две ячейки вертикальной циркуляции (в каждом слое). По мере приближения к береговой линии (для границы раздела слоев) скорость массопереноса в нижнем слое увеличивается более значительно, чем в верхнем. Это объясняется уменьшением глубины нижнего слоя в направлении к берегу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Emery K.O., Gunnerson C.G.* Internal swash and surf // Proc. Nat. Acad. Sci. USA. – 1973. – 70, № 8. – P. 2379 – 2380.
2. *Wallace B.C., Wilkinson D.L.* Run-up of internal waves on a gentle slope in a two-layered system // J. Fluid Mech. – 1988. – 191. – P. 419 – 442.
3. *Шелковников Н.К., Тимонов М.Б., Тупоршин В.Н.* О внутреннем волновом переносе в двухслойной жидкости // Морской гидрофизический журнал. – 1987. – № 6. – С. 60 – 63.
4. *Helfrich K.R.* Internal solitary wave breaking and run-up on a uniform slope // J. Fluid Mech. – 1992. – 243. – P. 133 – 154.
5. *Vlasenko V., Hutter K.* Numerical experiments on the breaking of solitary internal waves over a slope-shelf topography // J. Phys. Oceanogr. – 2002. – 32, № 6. – P. 1779 – 1793.
6. *Vlasenko V., Hutter K.* Transformation and disintegration of strongly nonlinear internal waves by topography in stratified lakes // Annales Geophysicae. – 2002. – 20, № 12. – P. 2087 – 2103.
7. *Bourgault D., Kelley D.E., Galbraith P.S.* Interfacial solitary wave run-up in the St. Lawrence Estuary // J. Mar. Res. – 2005. – 63, № 6. – P. 1001 – 1015.
8. *Helfrich K.R., Melville W.K.* Long nonlinear internal waves // Annu. Rev. Fluid Mech. – 2006. – 38. – P. 395 – 425.
9. *Шелковников Н.К., Розанов В.В., Солнцев М.В. и др.* Измерение скорости потока в канале лазерным доплеровским гидрометром // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. – 1979. – 20, № 4. – С. 110 – 114.
10. *Сретенский Л.Н.* Теория волновых движений жидкости. – М.: Наука, 1977. – 816 с.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь
Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова

Материал поступил
в редакцию 29.05.08

ABSTRACT Laboratory investigation of a periodical internal wave run-up on a bottom slope in a two-layer fluid is carried out in the open wave tank of Physical Department of Lomonosov Moscow State University. The wave is induced by a wave generator. Wave transformation, vertical structure of mass transport velocity field, variation of the internal wave parameters during its propagation over the slope bottom are studied. It is shown that run-up and breaking of internal waves are accompanied by periodical emission of portions of more heavy water of the lower layer upward along the slope. Stokes drift speed alternates its sign, whereas the wavelength (horizontal distance between the neighbouring wave crests) and its height over the slope bottom (vertical crest rise above the slope) decrease as the wave propagates to the coast.