

УДК 551.466.4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛОКАЛЬНОГО ОТРАЖЕНИЯ ДЛИННЫХ ВОЛН ОТ ПОДВОДНОГО СКЛОНА

© 2015 г. Я. В. Сапрыкина¹, С. Ю. Кузнецов¹, А. Н. Коваленко²

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

e-mail: saprykina@ocean.ru, kuznetsov@ocean.ru

²Филиал Открытого акционерного общества, Научно-исследовательский

институт транспортного строительства, научно-исследовательский центр “Морские берега”, Сочи

e-mail: andrey.covalenko2012@yandex.ru

Поступила в редакцию 26.11.2013 г., после доработки 24.10.2014 г.

На основе данных лабораторного эксперимента, проведенного в масштабе 1 : 20 к натурным условиям, исследованы закономерности локального отражения длинных волн от подводного склона разного уклона. Показано, что коэффициент локального отражения волн уменьшается с увеличением расстояния от берега. Диссипация энергии волн существенно уменьшает локальный коэффициент отражения волн как вблизи уреза, так и в самой мористой точке подводного склона. Это приводит к существованию выделенного максимума локального коэффициента отражения на некотором расстоянии от берега на границе зоны обрушения. Наличие особенностей рельефа дна в виде подводного бара или траншеи также может существенно изменять локальный коэффициент отражения и влиять на его значения в мористой части подводного склона.

DOI: 10.7868/S003015741502015X

ВВЕДЕНИЕ

Волны, распространяясь к берегу, могут отражаться не только от различных инженерных берегозащитных конструкций и особенностей подводного рельефа дна, но и непосредственно от наклонного дна береговой зоны. Значительное отражение волн от подводного склона может существенно изменять направление и величину транспорта наносов. Это особенно важно учитывать в случае, если существуют выделенные области отражения волн, вызванные, например, особенностями подводного склона или неоднородностями рельефа дна.

Отражение волн, как правило, характеризуется коэффициентом отражения, или отношением амплитуды отраженной волны к амплитуде падающей волны. Исторически изучение отражения волн было вызвано необходимостью расчета различного рода берегозащитных конструкций. Например, в случае жесткой вертикальной стенки берегозащитной структуры отражение может быть полным, т.е. практически вся энергия падающих волн отражается обратно в море, и коэффициент отражения равен единице. Для проницаемых структур или наклонных стенок берегозащитных конструкций происходит частичное отражение, и коэффициент отражения меньше единицы [20]. В большинстве задач о распространении волн в береговой зоне отражением волн от подводного склона береговой зоны пренебрегают, считая его менее 10% [9], и для очень пологого склона даже полагают его равным нулю [3].

Известно, что волны малой крутизны отражаются от подводного склона сильнее, чем более крутые волны, что связывается с процессом обрушения крутых волн и, соответственно, диссипацией их энергии. Также установлено, что чем более пологое дно, тем меньше оно отражает волны. В целом коэффициент отражения уменьшается с увеличением частоты и высоты волн (например, [2, 14]). Теоретический анализ отражения длинных волн от глубоководных склонов разной формы, проведенный в [1], показал, что отражение от подводного склона может носить распределенный характер.

Для определения коэффициента отражения используются многочисленные эмпирические формулы [2, 8, 11]. Это связано с тем, что теоретически формулы для коэффициента отражения получаются для стоячих отраженных волн без учета потерь энергии волн при их трансформации [2, 19]. Учет потерь энергии на трение, обрушение, а также учет частичного отражения достигается добавлением различных эмпирических коэффициентов или критериев. Например, существует критерий, основанный на некоторой критической крутизне волны для данного уклона, для которой происходит обрушение и диссипация энергии, и, соответственно, частичное отражение, а для волн с крутизной меньшей критической — полное отражение. В виде эмпирических коэффициентов и функций вводятся различного рода параметры

шероховатости, учитывающие потери энергии волн на трение.

Следует также отметить, что получаемые по этим многочисленным эмпирическим формулам значения коэффициента отражения волн от подводного склона рассчитываются либо на расстоянии нескольких длин волн от берега, т.е. на достаточном удалении от него, либо расчет производится только в одной точке — у подножия подводного склона волногасящей конструкции, погонная длина которого, как правило, существенно меньше длины подходящих волн [20]. В то же время, реальные волны зыби и свободные инфрагравитационные волны (далее ИГВ), возникающие в результате обрушения ветровых волн, имеют длины порядка сотен метров, что сравнимо с размерами той части береговой зоны, где происходят наиболее интенсивные процессы взаимодействия волн с дном, что является важным для оценки морфодинамических изменений в этой области. Например, в работе [18] по данным натурных наблюдений показано, что коэффициент отражения ИГВ может существенно изменяться (как возрастать, так и убывать) на расстояниях порядка 500 м от берега. В пределах этих же расстояний от берега часто находятся подводные волногасящие и берегозащитные сооружения, а также акватории различных гаваней. Поэтому детальное описание процесса отражения длинных волн от подводного склона важно с точки зрения инженерного строительства в береговой зоне. Учет правильного отражения волн от подводного склона также крайне важен для моделирования и мониторинга волнения в береговой зоне, поскольку это дает более качественное представление о его пространственной изменчивости [6].

Между тем, на сегодняшний день такое детальное описание отражения волн отсутствует. Неясно, как меняется локальный коэффициент отражения длинных волн от берега на масштабах их длины. Для каких расстояний от берега и для каких уклонов дна можно считать, что отражение длинных волн полное или пренебрежительно мало? Есть ли выделенные точки отражения волн от подводного склона или локальное отражение носит распределенный характер? Локальное отражение волн над подводным склоном практически не изучалось в натурных экспериментах. Многочисленные лабораторные эксперименты в основном касаются исследований отражающей способности подводного склона масштабных моделей различного рода гидротехнических сооружений, когда коэффициент отражения измеряется в одной точке перед конструкцией (например, [15, 20]). Эксперименты, связанные с изучением отражательной способности самого подводного склона крайне малочисленны. Среди таких работ последних лет следует отметить уникальные ла-

бораторные эксперименты по изучению отражения ИГВ при трансформации волн над наклонным дном [5, 8]. В результате этих экспериментов было установлено, что инфрагравитационные волны также могут быть подвержены процессу диссипации их энергии, как и обычные волны, вследствие чего их коэффициент отражения от подводного склона может уменьшаться, тогда как в более ранних исследованиях считалось, что ИГВ практически полностью отражаются от берега [11].

Цель данной экспериментальной работы — детальное исследование особенностей локального отражения длинных волн от подводного склона, в частности, от береговой линии, и особенностей рельефа дна на этом склоне, происходящего на масштабах порядка длины волны.

ЛАБОРАТОРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Лабораторный эксперимент проводился в гидравлическом лотке НИЦ “Морские берега”, г. Сочи, в июле 2013 г. Длина лотка — 22 метра, глубина — 1 м. Для синхронной регистрации волнения, в зависимости от конфигурации профиля дна и уровня воды, использовались от 11 до 14 цифровых емкостных датчиков. Изучалось отражение псевдомонохроматических волн от подводного склона разного угла наклона при их распространении как над ровным наклонным профилем дна, так и над рельефом дна с подводными особенностями в виде пронизываемого бара и подводной траншеи. Всего за время эксперимента было промоделировано 19 режимов волнения, соответствующих распространению длинных волн. Описание параметров используемых для анализа серий модельных данных приведено в таблице. Пример наклонного профиля дна и схемы расположения датчиков приведены на рис. 1.

Проведенный ранее, тщательно спланированный лабораторный эксперимент показал, что процессы отражения волн от подводного склона происходят подобно при экспериментах с короткими и длинными волнами в гидравлических лотках разной длины [19]. То есть для описания процессов отражения применимо физическое моделирование, позволяющее изучать явление на масштабной (подобной) уменьшенной модели подводного склона. В работе [10] экспериментально показано, что эволюция свободных инфрагравитационных волн при их распространении над ровным наклонным дном происходит подобно эволюции аналогичных монохроматических волн, включая проявления нелинейных процессов и обрушения. Это дает нам основания экспериментального исследования отражения длинных волн, включая ИГВ, на примере отражения монохроматических волн путем физического моделирования.

Параметры анализируемых экспериментальных волн и условия экспериментов

№ записи	h_x	T, c	$\xi_{in} = h_x / \sqrt{\frac{H_{in}}{L_{in}}}$ H_{in} – начальная высота, L_{in} – начальная длина волн	Положение точки обрушения, в метрах от волнопродуктора
28	0.043	6.25	0.8	9.97
29	0.043	–	0.72	9.17
30	0.043	–	0.62	8.8
31	0.043	–	0.52	8.37
38	0.022	5.9	0.32	9.97
39	0.022	–	0.28	9.17
40	0.022	–	0.26	8.37
41	0.022	–	0.23	7.67
42	0.022	5.2	0.22	7.67
43	0.022	5.2	0.22	12.27
65	0.022	3.1	0.132	9.17
66	0.022	–	0.14	Без обрушения на склоне
67	0.022, траншея	–	0.14	–
68	–	–	0.132	10.77
78	–	4.1	0.24	Без обрушения на склоне
79	–	–	0.19	10.77
B1	0.022, бар	4.3	0.25	Без обрушения на склоне
B18	–	4.3	0.19	–

Для проведения физического моделирования, согласно теории подобия, при изучении волнового воздействия на гидравлическую модель следует соблюдать геометрическое подобие модели натурному объекту, подобие волнового режима, подобие поверхностных и объемных сил. Такое подобие обеспечивается равенством определяющих

критериев по числам Фруда и Рейнольдса для природных и модельных условий.

Однако в общем случае выполнить эти условия одновременно невозможно, и во многих практических задачах подобие по обоим параметрам не требуется [4, 16]. Так, при волновом движении не-

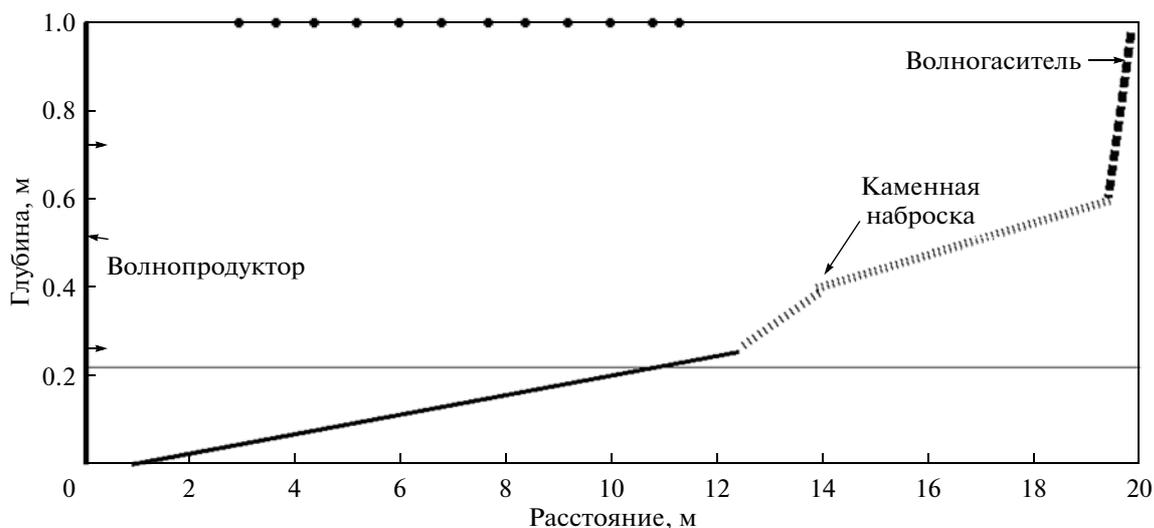


Рис. 1. Рельеф дна и схема расстановки датчиков, уклон дна 0.022, глубина воды 0.22 м.

сжимаемой жидкости, когда влияние вязкости мало, динамическое подобие модельных и натуральных процессов может определяться только равенством чисел Фруда:

$$Fr = \frac{H}{gT^2}, \quad (1)$$

где H – высота волн; g – ускорение свободного падения; T – период волн.

В лабораторном эксперименте геометрический масштаб модели (m) составлял 1 : 20.

Равенство чисел Фруда в натуральных и модельных условиях дает условие на соотношение периодов моделируемых и натуральных волн:

$$\frac{T_m}{T_n} = \sqrt{m} = 1 : 4.472, \quad (2)$$

где индекс “м” относится к модели, а “н” – к натурным величинам.

Исходя из вышеизложенного, все исследуемые в лабораторном эксперименте механизмы и особенности отражения длинных волн могут быть распространены на особенности отражения волн в реальных натуральных условиях, включая инфрагравитационные волны.

Для определения локального коэффициента отражения использовались синхронно измеренные хронограммы волнения на трех последовательных датчиках, расположенных на одной линии, параллельной направлению распространения волн, по методике, предложенной в [13].

Этот метод основан на разделении прямых и отраженных волн по вычислению их фазовой скорости на основе построения взаимных спектров на соседних датчиках и в предположении, что фазовые скорости их распространения близки к значениям линейной теории волн. В результате такого подхода получается система алгебраических уравнений для амплитуд отраженных и прямых волн, решаемая методом наименьших квадратов (подробнее метод описан в [13]). В сравнении с данными измерения отраженных волн с использованием датчиков скорости этот метод дает хорошие результаты высокой точности, с погрешностью, не превышающей 10%, для условий нерегулярного волнения.

Методика, лежащая в основе этого метода, в последние годы была усовершенствована для более точного разделения отраженных и прямых волн с использованием четырех и более датчиков [21], а также с учетом вклада в отражение высших и низших нелинейных гармоник, появляющихся в ходе трансформации волн [8, 12]. Однако, как отмечено в [12, 21], при сравнении нескольких модифицированных методов с базовой методикой [13] коэффициент отражения для основной частоты спектра получается практически одинаков для всех методов. Наличие большего числа датчиков

только повышает точность коэффициента отражения на частотах выше и ниже частоты максимума спектра волн. Поэтому для анализа коэффициента отражения монохроматических экспериментальных волн был применен метод с использованием трех датчиков [13]. При этом вычислялся коэффициент отражения, соответствующий только основной частоте, без учета вклада высших гармоник в коэффициент отражения, поскольку доля их энергии при эволюции спектра во всех анализируемых случаях была менее 10% от энергии основной гармоники.

Изложенная выше методика была применена для определения коэффициента отражения при исследовании особенностей локального отражения длинных волн (длина волны сравнима с длиной подводного склона), распространяющихся над наклонным дном. Коэффициент отражения вычислялся последовательно на всех датчиках регистрации волнения. Выбирались три последовательных датчика 1, 2, 3; далее три следующих датчика 2, 3 и 4 и т.д. Полученные значения локальных коэффициентов отражения, определенные по таким тройкам датчиков, относились к расстояниям, соответствующим среднему из трех анализируемых датчиков.

Параметры анализируемых экспериментальных волн: период (T), начальное число Ирибаррена (ξ_{in}) и условия экспериментов – рельеф дна, уклон (h_x) представлены в таблице. Все режимы волнения были с обрушением волн, которое, в зависимости от параметров волн и рельефа дна, происходило либо в различных точках подводного склона, либо только на урезе при заплеске волн на берег.

ЛОКАЛЬНОЕ ОТРАЖЕНИЕ ВОЛН ПРИ ИХ РАСПРОСТРАНЕНИИ НАД ГЛАДКИМ НАКЛОННЫМ ДНОМ

Для анализа локального отражения волн от подводного склона были выбраны режимы трансформации псевдомонохроматических волн, которые распространялись над наклонным дном с уклонами 0.043 и 0.022 (таблица). В обоих случаях наклонное дно опиралось на горизонтальный участок одной и той же длины 11.02 м, изменялся только наклон дна (рис. 1).

Локальный коэффициент отражения K_{ref} для различных уклонов дна в зависимости от относительной удаленности от берега (расстояние от линии уреза (X), деленное на длину волны (L_0)) представлен на рис. 2. Положение линии уреза определялось по уровню невозмущенной свободной поверхности перед началом эксперимента.

Изменение локального коэффициента отражения над разными уклонами происходит подобно (рис. 2). Независимо от уклона дна, для всех

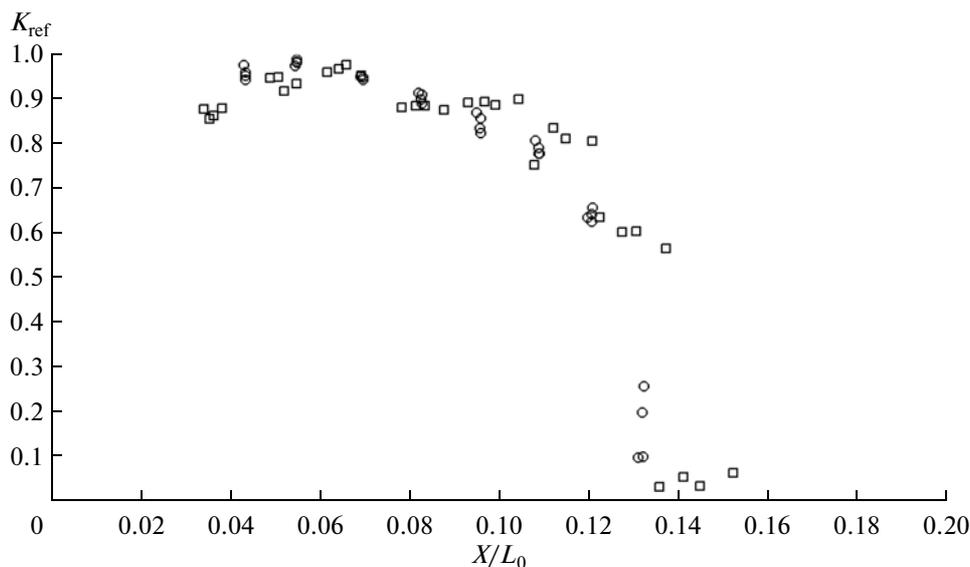


Рис. 2. Изменение локального коэффициента отражения волн K_{ref} от подводного склона в зависимости от относительной длины волны (расстояние от уреза, деленное на длину волны на глубокой воде) для волн, распространяющихся над разными уклонами дна: 0.043 (кружочки) и 0.022 (квадратики).

исследуемых волн, практически полное их отражение (локальный коэффициент отражения близок к 1) происходит вблизи уреза, на относительных расстояниях от 0.05 до 0.07 X/L_0 . По визуальным наблюдениям эти расстояния примерно соответствуют началу зоны, где волны начинают обрушаться. Однако для волн, распространяющихся над более пологим уклоном (0.022), локальный коэффициент отражения близок к единице немного дальше от уреза при $X/L_0 < 0.07$, чем для волн, распространяющихся над более крутым дном (0.043), где практически полное локальное отражение волн происходит при $X/L_0 < 0.05$.

Для всех режимов волнения, после достижения максимальных значений локальных коэффициентов отражения, на расстояниях ближе к урезу, локальный коэффициент отражения уменьшается, что связано с процессами обрушения волн у берега и уменьшением их высоты. Но для волн, распространяющихся над более пологим уклоном, уменьшение локального коэффициента отражения начинается раньше (при $X/L_0 < 0.06$), чем для волн, распространяющихся над более крутым дном (при $X/L_0 < 0.05$). Практически полное локальное отражение волн (коэффициент отражения более 0.8) для обоих уклонов происходит на расстояниях $0.12X/L_0$.

Во всех случаях локальный коэффициент отражения значительно уменьшается на самом мористом экспериментальном участке, в начале подводного склона. Для волн, распространяющихся над пологим дном, он имеет меньшие значения (менее 0.1), чем для волн, распространяющихся над более крутым склоном (от 0.27 до 0.1).

Это вполне соответствует классическим представлениям об отражении волн: чем положе склон, тем меньше коэффициент отражения, за счет возможности большего увеличения крутизны волны и, соответственно, большей диссипации энергии волн при их обрушении [2].

Наибольшее отражение волн для обоих уклонов происходит на глубинах 0.2–0.1 м, и локальный коэффициент отражения уменьшается при глубине менее 0.1 м. Максимальное отражение волн над более крутым уклоном дна происходит на больших глубинах – менее 0.16 (рис. 3). Для одной и той же глубины воды локальный коэффициент отражения при трансформации волн над более крутым склоном имеет большие значения. Те волны от крутого склона отражаются сильнее, что также соответствует классическим представлениям об отражении волн [2].

Будет ли меняться положение максимального локального коэффициента отражения при увеличении глубины воды и, соответственно, увеличении длины подводного склона по отношению к линии уреза? На рис. 4 приведены локальные коэффициенты отражения для монохроматической волны с периодом 5.2 с, распространяющейся над уклоном 0.022 с разной глубиной воды: 0.22 и 0.33 м (серии 42 и 43 соответственно). Обрушение волн в серии 42 было на расстоянии 3.33 м от уреза, а в серии 43 – на расстоянии 1.5 м. Видно, что при увеличении глубины воды максимальный локальный коэффициент отражения находится примерно на том же расстоянии от берега 3.35 м. Он также уменьшается к берегу, как и на меньшей глубине, но его значения несколько больше, по-

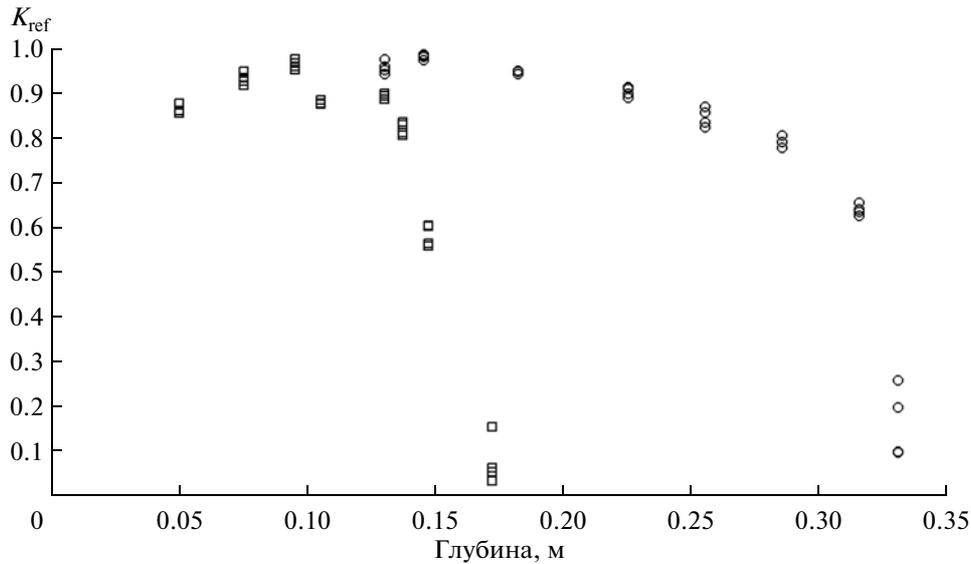


Рис. 3. Изменение коэффициента отражения волн от подводного склона в зависимости от глубины воды для волн, распространяющихся над разными уклонами дна: 0.043 (кружочки) и 0.022 (квадратики).

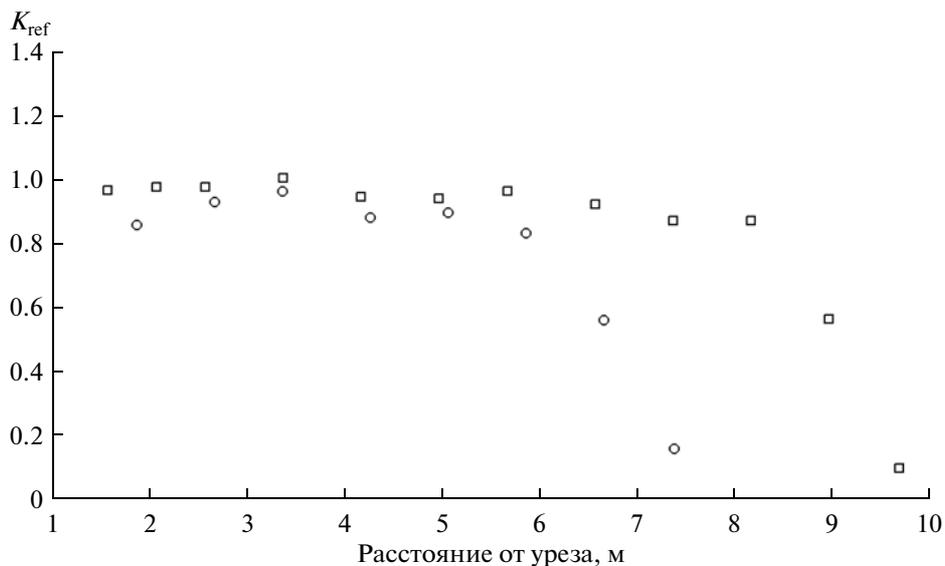


Рис. 4. Сравнение локальных коэффициентов отражения при увеличении глубины воды (длины склона) для одинаковых режимов волн, трансформирующихся над уклоном 0.022. Квадратики – серия 43, кружочки – серия 42.

скольку за счет увеличения глубины воды диссипация энергии волн при их обрушении происходит слабее. Однако в самой мористой точке склона локальный коэффициент отражения меньше, что может быть связано с диссипацией энергии волн за счет трения, т.к. длина склона в этом случае больше.

Общие тенденции изменения локального коэффициента отражения при распространении волн над подводным склоном могут быть объяснены действием физических процессов, влияющих на диссипацию и отражение волн. Диссипа-

ция волн при их распространении по склону и, как следствие, уменьшение высоты происходят за счет: а) нелинейных процессов (рост высших гармоник и уменьшение энергии основной частоты волны, [17]), б) трения и в) процессов обрушения волн. Первые два процесса происходят примерно одинаково равномерно на всем протяжении распространения волн и являются причиной увеличения локального коэффициента отражения к берегу или, другими словами, уменьшения локального коэффициента отражения с расстоянием от берега. Процесс непрерывного обрушения волн

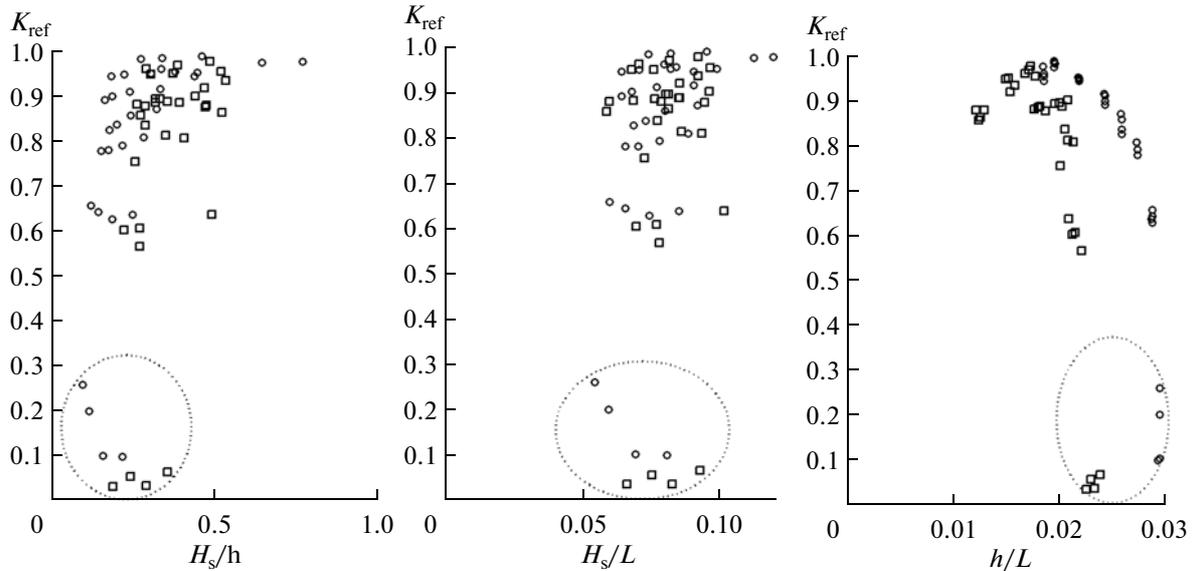


Рис. 5. Локальный коэффициент отражения волн в зависимости от локальных параметров волн. Кружочки – серии 28, 29, 30, 31, уклон дна 0.043; квадратики – серии 38, 39, 40, 41, уклон дна 0.022. Овалом выделены данные, относящиеся к мористой части подводного склона.

при их распространении в виде бора дополнительно уменьшает локальный коэффициент отражения. Это приводит к тому, что локальный коэффициент отражения достигает выделенного максимума (близок к 1) на некотором расстоянии от берега на границе зоны обрушения волн. В зависимости от интенсивности обрушения волн, локальный коэффициент отражения ближе к берегу либо уменьшается, либо остается максимальным до самого берега (рис. 3, 4).

Рассмотрим зависимость локального коэффициента отражения от локальных параметров волн. На рис. 5 видно, что для самой мористой точки подводного склона существует зависимость коэффициента отражения от относительной высоты волны или крутизны волны на мелкой воде (H_s/h – отношение высоты значительных волн к глубине) и от локальной крутизны волны (H_s/L – отношение высоты значительных волн к ее длине). Чем круче волны на входе на склон, тем меньше для них локальный коэффициент отражения в начале подводного склона (рис. 5а и 5б). Эта зависимость более ярко выражена для волн, распространяющихся над крутым дном.

Практически полное локальное отражение волн происходит при $H_s/h > 0.6$, т.е. на очень мелкой воде, где волны уже обрушаются. Согласно визуальным наблюдениям, обрушение волн в лабораторном эксперименте наступало при $H_s/h > 0.4$. Наибольшее локальное отражение волн (коэффициент отражения около 1) происходит вблизи уреза, на глубинах менее 2.5 локальных высот волн. Примерно такие же оценки глубин, на которых

происходит практически полное отражение волн от берега, приведены в [2].

Яркой зависимости коэффициента отражения от локальной крутизны волны H_s/L вблизи уреза нет. И крутые, и некрутые волны отражаются от берега практически полностью.

Наибольшее отражение волн от берега происходит, как уже отмечалось, на очень мелкой воде при $0.013 < h/L < 0.02$. Для этих глубин локальный коэффициент отражения незначительно уменьшается с уменьшением h/L , что связано с диссипацией энергии при обрушении волн с уменьшением глубины. Аналогично и для мористой части подводного склона: чем больше h/L , тем больше локальный коэффициент отражения (рис. 5в, отмечено овалом). Однако заметим, что при одном и том же отношении h/L , локальный коэффициент отражения на мористой границе может быть в 3 раза меньше локального коэффициента отражения вблизи уреза. По-видимому, только длина волны не является определяющим параметром для характеристики локальных процессов отражения. Приведенные выше зависимости показывают, что локальная высота волны также является важным параметром.

В работе [10] для характеристики коэффициента отражения длинных и инфрагравитационных волн был введен нормализованный уклон дна

$$B = \frac{h_x}{\omega} \sqrt{\frac{g}{H_c}}, \quad (3)$$

где h_x – уклон дна, ω – круговая частота, g – ускорение свободного падения, H_c – характеристиче-

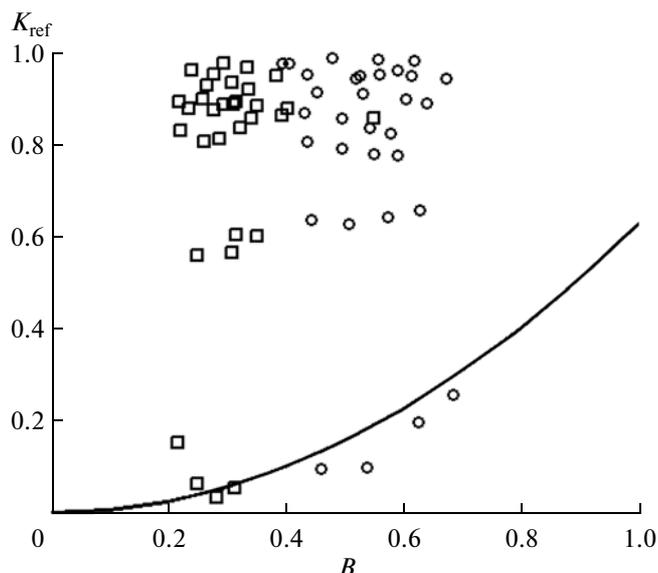


Рис. 6. Зависимость локального коэффициента отражения от нормализованного уклона дна B . Сплошная кривая соответствует соотношению (5) $0.2\pi B^2$.

ская высота волны, например, начальная высота волн на подводном склоне или средняя высота неотраженных падающих волн около берега [10]. Этот параметр напрямую связан с параметром подобия береговых зон (числом Ирибаррена) ξ [7]:

$$\xi = h_x / \sqrt{\frac{H_c}{L}} \quad (4)$$

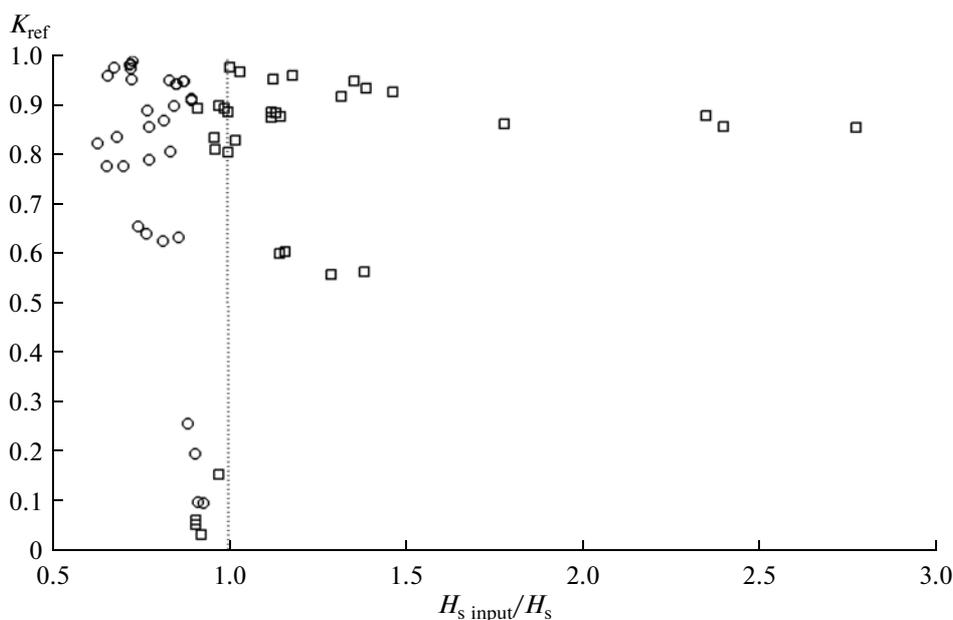


Рис. 7. Изменение локального коэффициента отражения в зависимости от изменения локальной высоты волн. Кружочки – серии 28, 29, 30, 31, уклон дна 0.043; квадратики – серии 38, 39, 40, 41, уклон дна 0.022.

как

$$\xi = \sqrt{2\pi}B.$$

На основе параметра ξ коэффициент отражения для коротких ветровых волн, может быть вычислен по эмпирической формуле, предложенной в [7]:

$$K_{ref} = 0.1\xi^2 = 0.2\pi B^2. \quad (5)$$

Это соотношение справедливо для инфрагравитационных волн при $B < 1.25$ [10].

Согласно анализу наших экспериментальных данных зависимость локального коэффициента отражения от нормализованного уклона дна (5) справедлива только для его значений в самой морской части в начале подводного склона (рис. 6). Для локальных коэффициентов отражения вблизи берега такой зависимости нет.

Максимальные значения локальных коэффициентов отражения наблюдаются как при возрастании высот волн при их трансформации над наклонным дном за счет резко уменьшающейся глубины, что более характерно для волн над крутым дном, так и при уменьшении их высот за счет нелинейных процессов передачи энергии в высшие нелинейные гармоники и обрушения, что более типично для волн, распространяющихся над пологим дном (рис. 7). В целом происходит практически полное отражение волн у берега (коэффициент локального отражения от 0.9 до 1) для волн, высота которых, увеличивается к берегу или уменьшается не более чем в полтора раза. У тех волн, высота которых при обрушении уменьши-

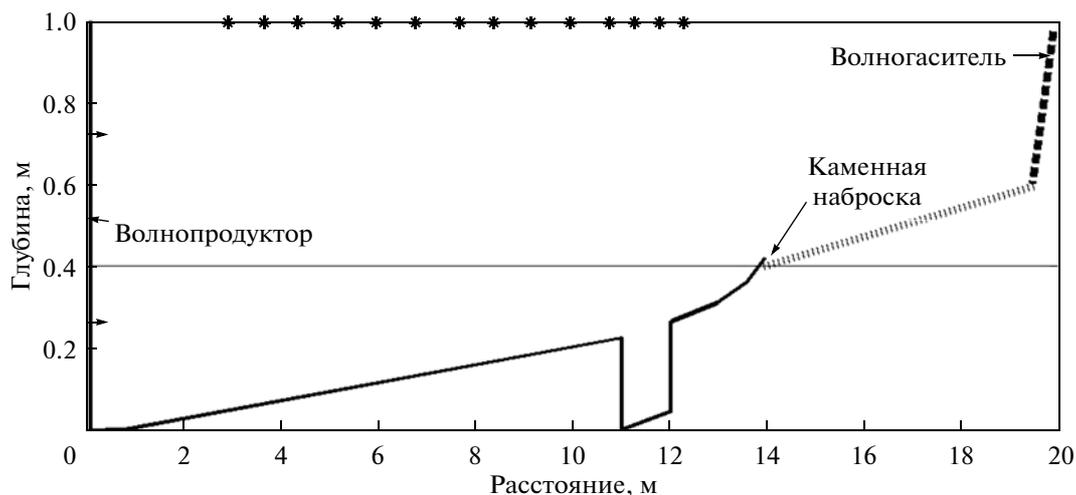


Рис. 8. Профиль дна с подводной траншеей и схема расположения датчиков. Глубина воды 0.37 м.

лась более чем в полтора раза, по сравнению с начальной, локальный коэффициент отражения вблизи берега будет меньше, чем внутри зоны обрушения (рис. 7).

Таким образом, обнаружено, что локальный коэффициент отражения уменьшается с расстоянием от берега за счет процессов диссипации энергии волн, вызванных трением, и за счет уменьшения локальной высоты волн, вызванного нелинейными процессами их трансформации. Обрушение волн дополнительно влияет на величину локального коэффициента отражения, уменьшая его как вблизи уреза, так и в самой мористой части подводного склона. При этом максимальное значение локального коэффициента отражения достигается на некотором расстоянии от уреза примерно на границе зоны обрушения. Наибольшие коэффициенты отражения наблюдаются в диапазоне глубин, составляющих около 2.5 локальных высот волн. Зависимость локального коэффициента отражения от локальных параметров волн существует только на мористой границе подводного склона.

ВЛИЯНИЕ ПОДВОДНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ РЕЛЬЕФА ДНА НА ОТРАЖЕНИЕ ВОЛН

Особенности подводного рельефа дна, например, траншея или подводный риф (бар), которые часто предлагаются в качестве подводных конструкций для снижения волновых нагрузок, могут изменять локальное отражение волн.

Для оценки изменения локального коэффициента отражения в этом случае были построены типичные модельные конструкции: траншея из жесткого непроницаемого материала (длина 1 м, глубина 0.2 м) и подводный бар из тетраподов (длина 0.4 м, высота 0.145 м). Соответствующие

профили дна и расстановка волнографов приведены на рис. 8, 9.

На рис. 10 даны значения локальных коэффициентов отражения для волн с периодом 3.1 с, распространяющихся без обрушения (серии 65 и 68, рис. 10а) и с обрушением на мористом краю траншеи (серии 66 и 67, рис. 10б). Видно, что траншея влияет на локальное отражение волн. Для волн, распространяющихся с обрушением на мористой границе траншеи (рис. 10а), локальный коэффициент отражения уменьшается на мористом крае траншеи и немного увеличивается на ее краю у берега. Для волн, распространяющихся без обрушения (рис. 10б), локальный коэффициент отражения при наличии траншеи на мористом участке больше (и более 1, за счет множественного отражения от обеих границ траншеи), чем без нее (расстояние 10 м). Он также больше и около уреза, чем в случае необрушающихся волн, распространяющихся без траншеи, но существенно меньше в самой траншее. Во всех случаях, наличие траншеи уменьшает коэффициент отражения в начале подводного склона.

С увеличением длины волны (серии 78 и 79) значения локального коэффициента отражения чуть больше на всем участке от мористого края траншеи и существенно больше в начале подводного склона для необрушающихся волн, по сравнению с более короткими волнами (период 3.1 с). Т.е. длинные волны имеют больший коэффициент отражения. Большой коэффициент отражения для этих волн и в самой траншее, и у берега. Его значения сравнимы с локальными коэффициентами отражения волн, распространяющимися без траншеи (65 и 66). Слабое влияние траншеи на локальный коэффициент отражения длинных волн в этом случае может быть объяснено небольшими относительными размерами траншеи по

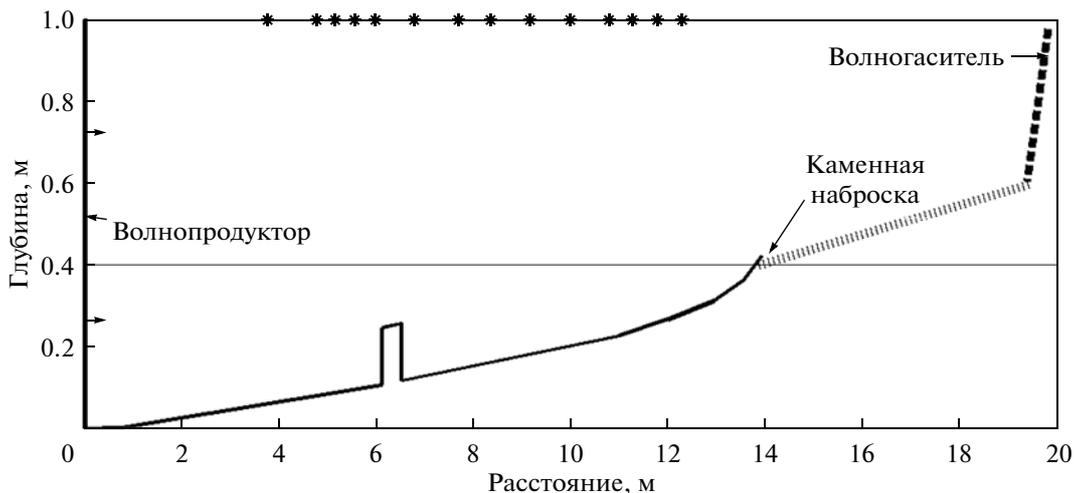


Рис. 9. Профиль дна с подводным баром и расположение датчиков. Глубина воды 0.40 м.

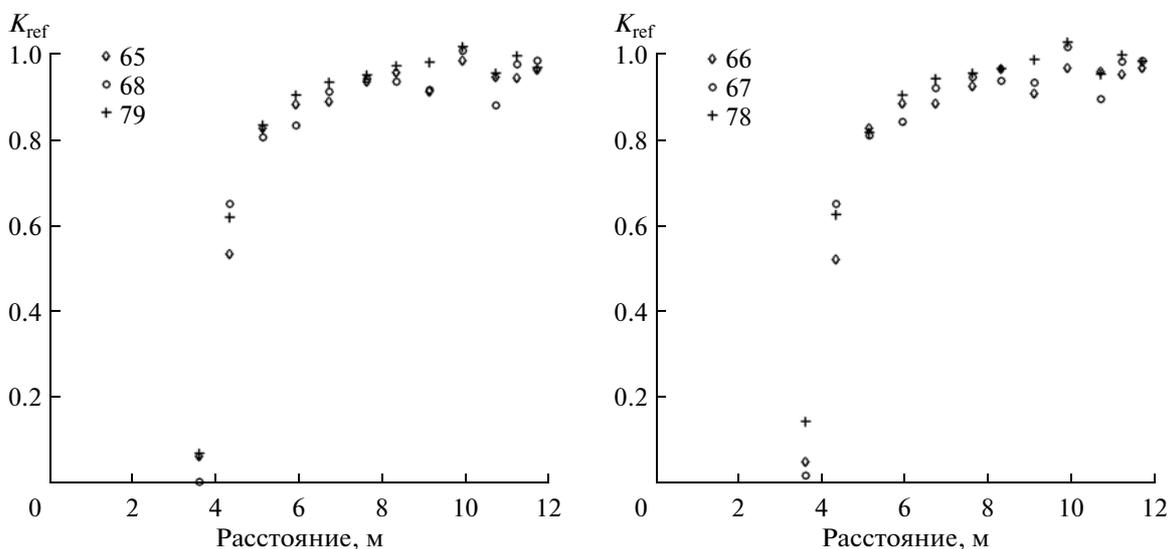


Рис. 10. Сравнение влияния подводной траншеи на локальный коэффициент отражения волн. Серии 67, 68 (с обрушением волн) – период волн 3.1 с, серии 78, 79 (с обрушением волн) – период волн 4.1 с. Серии 66, 65 (с обрушением волн) – параметры волн, аналогичные сериям 67 и 68 соответственно, но волны распространяются над наклонным дном без траншеи.

отношению к длине волны: 0.04 длины траншеи к длине волны на глубокой воде (0.07 – для более коротких волн) и 0.0088 ее глубины к длине волны на глубокой воде (0.016 для более коротких волн). Те с увеличением длины волны траншея становится менее “различима” как препятствие и локальное отражение происходит подобно отражению от наклонного дна без особенностей.

На рис. 11 приведено изменение локального коэффициента отражения для волн с периодом 4.3 с и разными начальными высотами волн 0.05 (запись В1, таблица), и 0.09 м (запись В18, таблица), распространявшимися без обрушения. Видно, что волны, имеющие меньшую начальную

высоту, имеют больший локальный коэффициент отражения над баром и, соответственно, больший коэффициент отражения в самой мористой точке (начале подводного склона). Сразу за баром локальный коэффициент отражения существенно меньше для волн меньшей высоты и, соответственно, крутизны. Т.е. наличие подводного бара увеличивает локальный коэффициент отражения у пологих волн (отношение высоты волны к высоте бара 0.34). Для крутых волн (отношение высоты волны к высоте бара 0.62) наличие бара как особенности рельефа не приводит к увеличению локального коэффициента отражения.

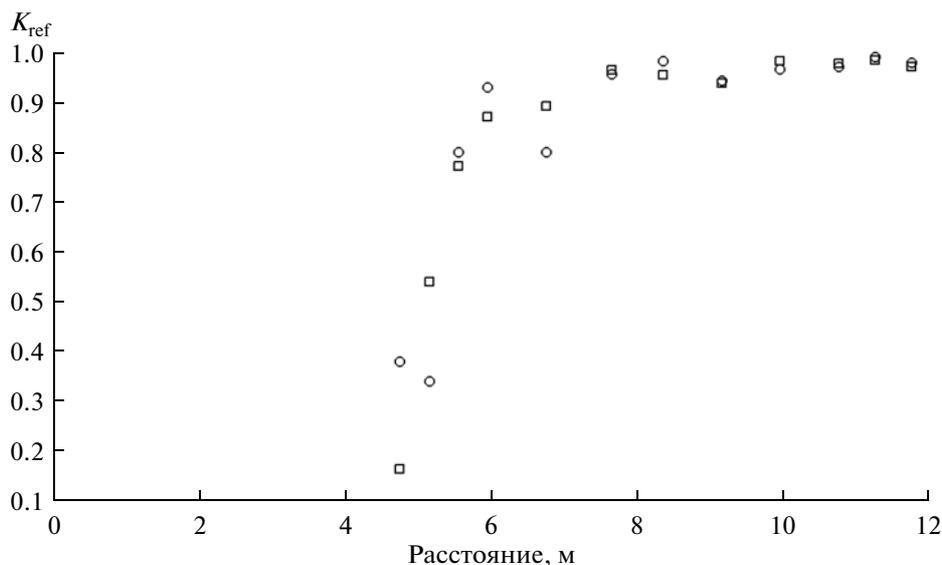


Рис. 11. Локальный коэффициент отражения от наклонного дна с проницаемым подводным баром. Кружочки — запись В1, высота волн — 0.05 м, квадратики — запись В18, высота волн — 0.09 м.

Во всех случаях изменение локального коэффициента отражения ближе к берегу и около уреза происходит примерно одинаково, без видимого влияния бара.

Проведенное экспериментальное исследование позволяет сделать следующие выводы о локальном отражении длинных волн:

— Локальный коэффициент отражения уменьшается с расстоянием от берега за счет процессов диссипации, вызванных трением, и уменьшения локальной высоты волны, вызванной нелинейными процессами ее трансформации. Обрушение волн дополнительно влияет на величину локального коэффициента отражения, уменьшая как около берега, так и в самой мористой части подводного склона. При этом на некотором расстоянии от берега (на границе зоны обрушения) будет достигаться максимальное значение локального коэффициента отражения, близкое к 1 (полное отражение).

— Наибольшие коэффициенты отражения наблюдаются в диапазоне глубин, составляющих около 2.5 высот локальных волн.

— На мористой границе подводного склона локальный коэффициент отражения зависит от крутизны входящих волн и нормализованного уклона дна и может быть определен по формуле (5).

— Особенности рельефа дна в виде подводной траншеи или бара могут существенно менять локальный коэффициент отражения в области этих особенностей, что влияет на значение коэффициента отражения в мористой точке подводного склона.

— С учетом того, что лабораторный эксперимент проводился в масштабе 1 : 20, все обнаруженные закономерности также могут быть распространены на длинные волны натуральных масштабов с периодами от 28 до 14 секунд.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 12-05-00965).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Диденкулова И.И., Пелиновский Е.Н. Об отражении длинной волны от подводного склона // *Океанология*. 2011. Т. 51. № 4. С. 606–611.
2. Лакомб А. *Физическая океанография*. М.: Мир, 1974. 495 с.
3. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов): СП 38.13330.2012. М.: Минрегионразвития РФ, 2012. 142 с.
4. Харлеман Д. *Механика жидкости*. Пер. с англ. М.: Энергия, 1971. 480 с.
5. Bakker A., Tissier M., Marieu V. et al. Infragravity wave propagation and dissipation on a low-sloping laboratory beach // *Proceedings of 7th International conference on Coastal dynamics*, 24–18 June, Arcachon, France, 2013. P. 443–452, http://www.coastaldynamics2013.fr/pdf_files/040_de_Bakker_Anouk_p.pdf
6. Ardhuin F., Roland A. Coastal wave reflection, directional spread, and seismoacoustic noise sources // *J. of Geophys. Res.* 2012. V. 117, C00J20. 16 p.
7. Battjes J.A. Surf similarity // *Proceedings of Coastal Engineering*. 1974. P. 466–480.
8. Battjes J.A., Bakkenes H.J., Janssen T.T., van Dongeren A.R. Shoaling of subharmonic gravity waves // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109, C02009. 15 p.

9. *Coastal Engineering Manual*. U.S. Army Corps of Engineers, Technical Report. 2003. (Part II) Chapter 3 EM 1110-2-1100.
10. *Dongeren A. Van, Battjes J., Janssen T. et al.* Shoaling and shoreline dissipation of low-frequency waves // *J. of Geophys. Res.* 2007. V. 112, C02011. 15 p.
11. *Elgar S., Herbers T.H.C., Guza R.T.* Reflection of ocean surface gravity waves from natural beach // *J. of Phys. Oceanogr.* 1994. V. 24. P. 1503–1511.
12. *Lin Chun-Yuan, Ching-Jer Huang.* Decomposition of incident and reflected higher harmonic waves using four wave gauges // *Coastal Engineering*. 2004. V. 51. P. 395–406.
13. *Mansard E.P.D., Funke E.R.* The measurement of incident and reflected spectra using a least squares method // *Proceedings 17th Coastal Engineering Conference*. 1980. ASCE, Sidney. P. 154–172.
14. *Massel S.R.* *Hydrodynamics of Coastal Zones*. Elsevier Science Publ. Amsterdam, 1989. 336 p.
15. *Mendoza-Baldwin E., Silva-Casarin R., Enriquez-Ortiz C. et al.* An Experimental evaluation of wave energy dissipation due to submerged structures // *Coastal Structures 2011. Proceedings of the 6th International Conference on Coastal Structures Yokohama, Japan, September 5–9, 2011* / Ed. by Shigeo Takashi, Masahiko Isobe, Nobuhisa Kobayashi and Kenichiro Shimozaki, World Scientific. P. 95–106.
16. *Payne G.* Guidance for the experimental tank testing of wave energy converters. The University of Edinburgh. Version: 01b. 2008. http://www.supermarine.org.uk/drupal/files/reports/WEC_tank_testing.pdf
17. *Saprykina Ya.V., Kuznetsov S.Yu.* Fluctuations of energy flux of waves // *Maritime Industry, Ocean Engineering and Coastal Resources*. 2007. V. 2. / Eds. Guedes Soares & Kolev. 2007 Taylor & Francis Group, London, P. 811–817.
18. *Sheremet A., Guza R.T., Elgar S., Herbers T.H. C.* Observations of nearshore infragravity waves: 1. Seaward and shoreward propagating component // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107(C8), 3095, doi:10.1029/2001JC000970.
19. *Taira K., Nagata Y.* Experimental study of wave reflection by a sloping beach // *J. Oceanogr. Soc. Japan*. 1968. V. 24. P. 242–252.
20. *Zanuttigh B., van der Meer J.W.* Wave reflection from coastal structures in design conditions // *J. of Coastal Engineering*. 2008. V. 55. P. 771–779.
21. *Zelt J.A., Skjelbreia J.E.* Estimating incident and reflected wave fields using an arbitrary number of wave gauges // *Coastal Engineering 1992: Proceedings of the Twenty-Third International Conference* / Ed. Edge B.L. 1992. P. 777–789.

Experimental Investigation of Local Reflection of Long Wave from Sloping Underwater Bottom

Ya. V. Saprykina, S. Yu. Kuznetsov, A. N. Kovalenko

On the data of the laboratory experiment performed in a scale of 1 : 20 to full-scale conditions, the regularities of the local reflection of long waves from different underwater slope are investigated. It is shown that local reflection occurs independently of the processes of wave transformation. Dissipation of wave energy significantly reduces local reflection coefficient as waves near the shoreline and in the most seaward point of the underwater slope. The presence of singularities of bottom topography such as underwater bar or trench could also significantly change the local reflection coefficient and to influence on its values in the seaward part of the underwater slope.