

УДК 551.466

О ВОЗМОЖНОСТИ ПАРАМЕТРИЗАЦИИ БИФАЗЫ ПРИ ТРАНСФОРМАЦИИ ВОЛН В БЕРЕГОВОЙ ЗОНЕ МОРЯ

© 2017 г. Я. В. Сапрыкина, М. Н. Штремель, С. Ю. Кузнецов

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия
 e-mail: saprykina@ocean.ru, 6805919@mail.ru, kuznetsov@ocean.ru

Поступила в редакцию 08.04.2014 г.
 После доработки 06.04.2016 г.

По экспериментальным данным исследована возможность параметризации пространственного изменения сдвига фаз (бифазы) между первой и второй нелинейными гармониками волнового движения при трансформации волн над наклонным дном в береговой зоне моря. Установлено, что значения бифазы изменяются интервале $[-\pi/2, \pi/2]$. Изменения бифазы строго следуют флуктуациям амплитуд первой и второй гармоник и периодичности обмена энергией между ними. Обрушение влияет на значение бифазы, удерживая ее изменения в отрицательной области в интервале $[-\pi/2, 0]$. Применяемая в современной практике расчета бифазы формула, зависящая от числа Урселла, не пригодна для правильного расчета бифазы при эволюции волн в береговой зоне, поскольку не учитывает периодического обмена энергией между нелинейными гармониками. Предложена линейная аппроксимация значений бифазы от величины отношения текущего расстояния до берега к возможной пространственной длине периода обмена, определяемой по дисперсионному соотношению. Выявлена зависимость изменений бифазы от сценария трансформации волн и показана возможность построения отдельной параметризации бифазы для каждого из сценариев. Проведенные исследования и полученные параметризации бифазы могут быть использованы при моделировании волнения в береговой зоне моря, а также в задачах прогноза развития берегов под воздействием штормовых волн.

DOI: 10.7868/S0030157416060137

ВВЕДЕНИЕ

Береговая зона моря представляет собой область взаимодействия суши и моря, динамический режим и границы которой во многом определяются волнами. С точки зрения волнового воздействия верхняя граница береговой зоны определяется по линии максимального, ежегодно повторяющегося заплеска прибойного потока, а нижняя (мористая) граница береговой зоны будет зависеть от параметров волн, определяющих глубины, с которых волны начнут взаимодействовать с дном [1]. Эволюция волн в береговой зоне моря происходит над наклонным дном, на характерных относительных глубинах воды $0.05 < h/L < 0.5$, h – глубина, L – длина волны, где трансформация волн является слабо нелинейно-дисперсионным процессом и характеризуется ростом высших кратных нелинейных гармоник основного волнового движения. На таких относительных глубинах воды нелинейные волновые гармоники возникают как результат околорезонансных трехволновых нелинейных взаимодействий, характерной чертой которых является периодический обмен энергией между основной (первой) и высшими гармониками, в результате которого периодиче-

ски меняются как их амплитуды, так и относительные сдвиги фаз между ними.

Простейшая модель, описывающая возвышения свободной поверхности (ξ) при наличии первой и второй нелинейных гармоник, может быть записана в виде суммы волн, создаваемых гармониками:

$$\xi(x, t) = a_1(x) \cos(k_1 x - \omega_1 t + \varphi_1) + a_2(x) \cos(k_2 x - \omega_2 t + \varphi_2), \quad (1)$$

где $\omega_2 = 2\omega_1$, $k_2 = 2k_1 + \delta$, t – время; ω – круговая частота и k – волновое число, связанные дисперсионным соотношением; $a_{1,2}$ – амплитуда; $\varphi_{1,2}$ – фаза; индексы 1 и 2 соответствует первой и второй нелинейным гармоникам. δ – расстройка по волновым числам, определяемая дисперсионным соотношением и соответствующая околорезонансным трехволновым взаимодействиям, происходящим с пространственным периодом L_b [22]:

$$L_b = 2\pi/\delta, \quad (2)$$

$\delta \rightarrow 0$ с уменьшением глубины воды.

Сдвиг фаз $\varphi_1 - \varphi_2$ между первой и второй нелинейными гармониками зависит от выбора на-

чала отсчета времени, поэтому относительное положение гребней волн, создаваемых первой и второй гармониками, удобно описывать бифазой $\beta = 2\varphi_1 - \varphi_2$, инвариантной относительно начала отсчета времени [19].

Для нерегулярных волн бифаза может быть вычислена по формуле [21]:

$$\beta(\omega_1, \omega_2) = \arctg \left[\frac{\text{Im}\{B(\omega_1, \omega_2)\}}{\text{Re}\{B(\omega_1, \omega_2)\}} \right], \quad (3)$$

где $B(\omega_1, \omega_2) = E \left[A_{\omega_1} A_{\omega_2} A_{\omega_1 + \omega_2}^* \right]$ – биспектр, ω – круговая частота, A – комплексные Фурье-амплитуды хронограммы возвышений свободной поверхности, E – оператор осреднения. Частоты первой и второй гармоник определяются по положениям локальных максимумов спектра волн.

Бифаза характеризует изменение асимметрии волн, влияющей на направление расхода наносов в береговой зоне [10, 13]. Поэтому ее значения используются в моделях расчета транспорта наносов, учитывающих нелинейные свойства волн (например, [3, 8]).

В волнах Стокса бифаза равна нулю, поскольку положения гребней волн, создаваемых первой и второй нелинейными гармониками, совпадают [20].

Первые натурные исследования изменения бифазы в береговой зоне установили, что она слабо меняется около нуля на глубине около 9 м и близка к $-\pi/2$ вблизи берега [17]. Такое изменение бифазы соответствовало наблюдаемым изменениям симметрии волн. На глубокой воде волны были практически симметричной формы, а вблизи берега имели “пилообразную” форму – крутой передний и пологий задний фронты. Проведенное в [18] численное моделирование показало, что начальные фазы нелинейных гармоник при достаточно больших уклонах дна береговой зоны не оказывают существенного влияния на общие тенденции изменения бифазы: она близка к нулю на относительно глубокой воде и стремится к $-\pi/2$ у берега на мелкой воде. Однако данные натурных экспериментов, проведенных в условиях меньших уклонов дна, свидетельствуют, что на эволюцию бифазы оказывают влияние относительная глубина воды и относительная высота волны [12, 13]. Но четкой зависимости значений бифазы от этих параметров получено не было.

Значения бифазы используются при моделировании волнения в береговой зоне по спектральным стохастическим моделям [16], а также при моделировании спектра волн в береговой зоне методом DTA (Discrete Triad Approximation), который, например, применяется в широко известной модели волнения SWAN [23]. При этом в модели SWAN используется параметризация изменения бифазы на основе числа Урселла, которое представляет отношение крутизны волны на мел-

кой воде к относительной глубине воды и качественно отражает соотношение между нелинейными и дисперсионными процессами при трансформации волн, следующего вида [13–15]:

$$\beta = -\frac{\pi}{2} + \pi/2 \text{th} \left(\frac{m}{Ur} \right), \quad (4)$$

где $Ur = \frac{3}{4} ak / (kh)^3$ – число Урселла, m – константа, равная 0.2 [12, 16] или 0.63 [9], a – амплитуда волн, k – волновое число, h – глубина воды. При получении этой аппроксимации для вычисления бифазы использовалась формула (3).

Параметризация (4) с $m = 0.63$ основана на результатах анализа данных четырех натуральных измерений трансформации волн в 4–7 точках береговой зоны над профилями дна с разными средними уклонами, включая профиль с подводными валами [13]. Параметризация (4) с $m = 0.2$ предложена в результате анализа данных лабораторного эксперимента по трансформации волн с JONSWAP спектром с частотой пика спектра 0.2 Гц и высотой значительных волн 0.9 м над ровным наклонным дном с глубины 4.1 м [15]. Отметим, что значения бифазы, получаемые по формуле (4), всегда отрицательные и находятся интервале $[0, -\pi/2]$. При числах Урселла менее 1 они близки к нулю, а при увеличении числа Урселла они будут стремиться к $-\pi/2$.

При выводе зависимости (4) было отмечено, что не все экспериментальные данные хорошо соответствовали данной аппроксимации и, кроме того, нередко наблюдались положительные значения бифазы [13, 15]. Разброс значений бифазы при $Ur < 1$ в натуральных данных был от $-\pi/6$ до $\pi/3$, а в лабораторных – от $-\pi/3$ до $\pi/3$. При $Ur \geq 10$ отклонения экспериментальных данных от параметризации (4) были в интервале $[-\pi/18, \pi/18]$ от предельного значения $-\pi/2$. Тем не менее, несмотря на такие существенные отклонения, именно формула (4) с константой $m = 0.2$ используется в современной модели SWAN для вычисления значений бифазы при $Ur > 1$, а при $Ur \leq 1$ бифаза полагается равной 0 [23].

Существование положительных значений бифазы и отклонение от параметризации (4) может быть объяснено наличием периодического обмена энергией между первой и второй нелинейными гармониками за счет околорезонансных трехволновых взаимодействий. Характерное изменение бифазы во время одного периода околорезонансного взаимодействия на примере трансформации монохроматических волн на постоянной глубине над ровным горизонтальным дном, полученное в результате моделирования на основе уравнений Буссинеска с улучшенными дисперсионными характеристиками [22], приведено на рис. 1.

Видно, что вторая гармоника возникает со сдвигом фаз $-\pi/2$ относительно первой и некото-

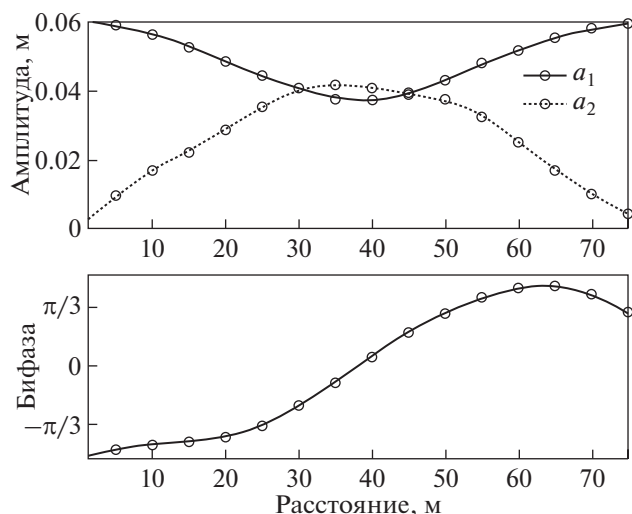


Рис. 1. Изменение амплитуд гармоник a_1 и a_2 и бифазы при эволюции монохроматической волны с периодом 4 с и высотой 12 см над ровным дном на глубине 70 см, численное моделирование.

рое время, пока преобладают нелинейные процессы и амплитуда второй гармоники растет, а первой уменьшается, бифаза остается близкой к этому значению. По мере роста амплитуды второй гармоники, влияние дисперсионных процессов усиливается, что приводит к отставанию волн второй гармоники от волн первой и изменению значения бифазы с отрицательного на положительное. Когда амплитуда второй гармоники максимальна, бифаза равна нулю. Положительные значения бифазы соответствуют процессу обратной передачи энергии от второй гармоники к первой, когда дисперсионные и нелинейные процессы действуют в одном направлении, замедляя распространение второй гармоники по сравнению с первой, в результате чего бифаза постепенно становится близкой к $\pi/2$, а амплитуда второй гармоники — к нулю. Таким образом, видно, что периодический обмен энергией между нелинейными гармониками может существенно влиять на эволюцию бифазы, а ее изменения при этом происходят в более широком интервале — от $-\pi/2$ до $\pi/2$, чем задано параметризацией (4).

Наличие периодического обмена энергией между первой и второй нелинейными гармониками при трансформации волн в береговой зоне моря было подтверждено данными натурного эксперимента и подробно исследовано в [4, 5].

Цель данной работы — по экспериментальным данным выявить закономерности эволюции бифазы в волнах, трансформирующихся над наклонным дном под воздействием окорезонансных трехволновых взаимодействий с периодическим обменом энергией между первой и второй

нелинейными гармониками, и возможность параметризации ее значений.

ИЗМЕНЕНИЕ БИФАЗЫ ПРИ ТРАНСФОРМАЦИИ ВОЛН НАД НАКЛОННЫМ ДНОМ

1. Натурный эксперимент. Трансформация волн с характерным периодическим обменом между амплитудами нелинейных гармоник наблюдалась в натурном эксперименте “Шкорпиловцы 2007” при распространении волн над наклонным профилем дна со средним уклоном 0.022, включающим подводный вал (рис. 2). Волнение синхронно измерялось в 15 точках береговой зоны с частотой дискретизации 5 Гц, длина серий измерений составляла от 20 минут до 1 часа. В работе [4] в результате анализа данных этого эксперимента и численного моделирования для участков береговой зоны со средними уклонами дна от 0.01 до 0.1, начинающихся от берега до относительных глубин (h/L), удовлетворяющих на мористой границе соотношению

$$0.095 < h/L < 0.3, \quad (5)$$

где h — глубина воды, L — длина волны на этой глубине, было выделено четыре характерных сценария для положения максимума амплитуды второй гармоники: 1) амплитуда второй гармоники существенно вырастает только ближе к берегу; 2) амплитуда второй гармоники достигает максимального значения внутри рассматриваемого участка береговой зоны и наблюдается ярко выраженный полный обмен энергией между первой и второй нелинейными гармониками; 3) амплитуда второй гармоники слабо меняется во всей береговой зоне; 4) значительные по амплитуде вторые гармоники уже существуют на мористой границе рассматриваемой части береговой зоны и наблюдается половина обратного периода обмена энергией между второй и первой гармониками. Было показано, что реализация сценариев зависит от соотношения между локальным числом Иррибаррена

$$\xi = \alpha / \sqrt{H/L}, \quad (6)$$

где α — средний уклон дна (тангенс угла среднего уклона подводного склона), H — локальная высота волны, L — локальная длина, и крутизной волны (H/L) на мористой границе, определяемой соотношением (5). В работе [4] не удалось установить однозначного соответствия между числом Иррибаррена и сценарием трансформации волн. Однако по известной локальной крутизне волн, определенной в некоторой точке береговой зоны, удовлетворяющей по глубине критерию (5), получена качественная оценка возможности реализации сценариев при трансформации волн на расстоянии между этой точкой и берегом с ярко

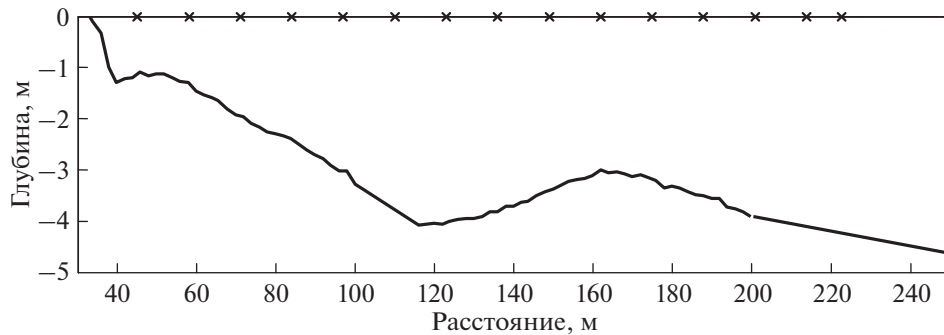


Рис. 2. Профиль дна и расстановка волнографов в натурном эксперименте “Шкорпиловцы 2007”. Крестики – положение волнографов.

выраженным периодическим обменом энергии между нелинейными гармониками (2 и 4), если

$$\xi < 7H/L. \quad (7)$$

При

$$\xi > 7H/L \quad (8)$$

будут реализовываться сценарии 1 и 3.

Сценарий 1 наблюдался 16 сентября 2007 г., сценарий 2—28 сентября 2007 г. и 11 октября 2007 г., сценарий 3—27 сентября 2007 г., сценарий 4—10 октября 2007 г. В течение каждого из указанных дней параметры волнения менялись слабо, поэтому сценарий трансформации волн сохранялся, а изменение бифазы происходило в соответствии со сценарием. Поэтому изменение бифазы для разных сценариев будем рассматривать на примере одного характерного режима волнения. Параметры анализируемых серий измерений приведены в табл. 1.

В качестве высоты волн рассматривалась высота значительных волн, вычисляемая как

$$H_{\text{sig}} = 4\sqrt{m_0}, \quad (9)$$

где $m_0 = \int_0^\infty S(\omega)d\omega$, S – спектр волн.

Период определялся как период спектрального максимума.

На рис. 3а. хорошо видно, что значения бифазы для рассматриваемых режимов натурного экс-

перимента близки к аппроксимации (4) с константой 0.63 только для чисел Урселла больших 1 (сценарии трансформации 1, 2 и 4). Значения бифазы при $Ur < 1$ не описываются данной аппроксимацией. Изменение бифазы в сценарии 3 полностью не совпадает с аппроксимацией (4). При $Ur < 1$ наблюдаются положительные значения бифазы, связанные с периодическим обменом энергией, не описывающиеся формулой (4).

Изменение бифазы в зависимости от параметра нелинейности a/h и от дисперсионного параметра kh приведены на рис. 3б и 3в. Амплитуда волн (a) оценивалась как половина высоты значительных волн по формуле (9). Ярко выраженной однозначной зависимости от нелинейного или дисперсионного параметров не наблюдается. Однако хорошо видно, что для всех сценариев трансформации волн значения бифазы изменяются в диапазоне $[-\pi/2, \pi/2]$ при $a/h < 0.3$ и отрицательные при $a/h > 0.3$. При $a/h > 0.4$, когда относительная высота волн близка к предельной $H = 2a \sim 0.78h$ [11], при превышении которой волны начинают обрушаться, значения бифазы для сценариев 2 и 4 близки к $-\pi/2$ (рис. 3б). При $kh < 0.5$ значения бифазы также отрицательные для всех сценариев трансформации волн и стремятся к $-\pi/2$ при дальнейшем уменьшении kh . Можно заметить, что отрицательные значения бифазы для сценария 1 наблюдаются, начиная с $kh < 0.55$, а для сценариев 2, 3 и 4 – начиная с kh , меньших 0.5, 0.75 и 0.65 соответственно. При $0.5 < kh < 0.8$ би-

Таблица 1. Параметры волн натурного эксперимента

№ серии измерений	Период, T , с	Высота, H , м	Крутизна, H/L	Число Ирбаррена, ξ	Средний уклон дна, α	Сценарий трансформации волн
7	5.9	0.55	0.014	0.194	0.022	1
28	4.5	0.64	0.0212	0.156	0.022	3
34	6.9	1.16	0.0252	0.144	0.022	2
60	5.9	1.27	0.0322	0.127	0.022	4

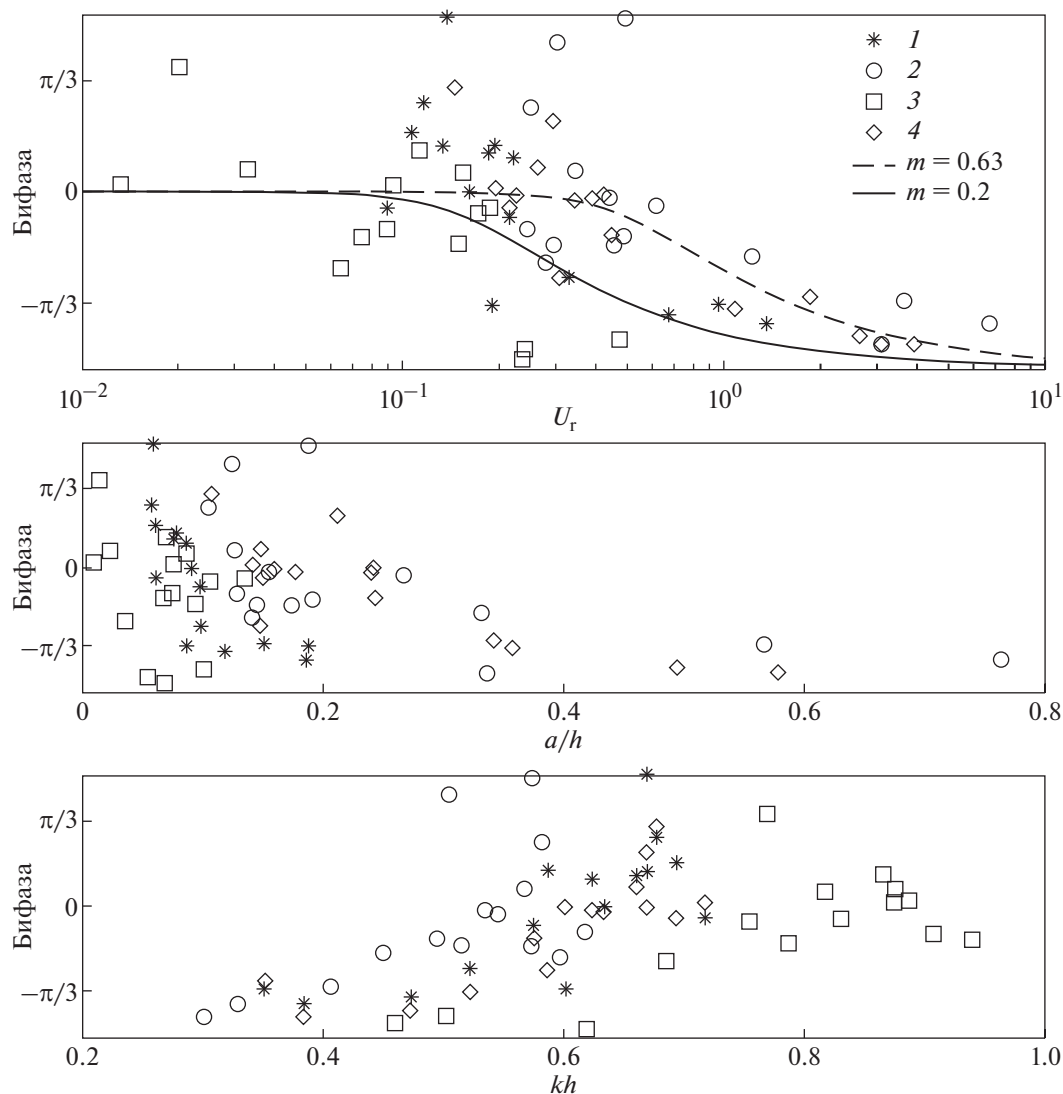


Рис. 3. Зависимость бифазы от числа Урсселя и параметризации с различными константами m ($m = 0.2$ – сплошная линия, $m = 0.63$ – крупный пунктир) (вверху), параметра нелинейности a/h (посередине) и дисперсионного параметра kh (внизу) для разных сценариев трансформации волн (сценарии: 1, 2, 3 и 4). Натурный эксперимент “Шкорпиловцы 2007”.

фаза меняется в интервале $[-\pi/2, \pi/2]$. При $kh > 0.8$ интервал изменений бифазы сужается до $[-\pi/6, \pi/6]$.

2. Лабораторный эксперимент. Для получения дополнительных экспериментальных данных с другими начальными волновыми параметрами и уклонами дна, необходимых для подробного исследования эволюции бифазы при наличии периодического обмена энергией между первой и второй нелинейными гармониками при трансформации волн над наклонным дном, был проведен лабораторный эксперимент. 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 струнных емкостных дат-

чиков с полностью цифровой системой опроса. Частота опроса датчиков составляла 50 Гц, длина записей измеренных серий – от 2 до 3 минут. Физическое моделирование трансформации волн исследовалось на уменьшенной модели подводного склона в масштабе 1 : 20. Пример наклонного профиля дна и схема расстановки датчиков приведены на рис. 4. Длина наклонной части подводного склона, над которой трансформировались волны, была 11 м, что, учитывая масштаб моделирования, соответствовало 220 м для натуральных условий. Динамическое подобие модельных и натуральных процессов соблюдалось равенством чисел Фруда [7].

Изучалось распространение псевдомонохроматических волн над ровным наклонным дном с уклонами 0.043 (крутой подводный склон) и 0.022

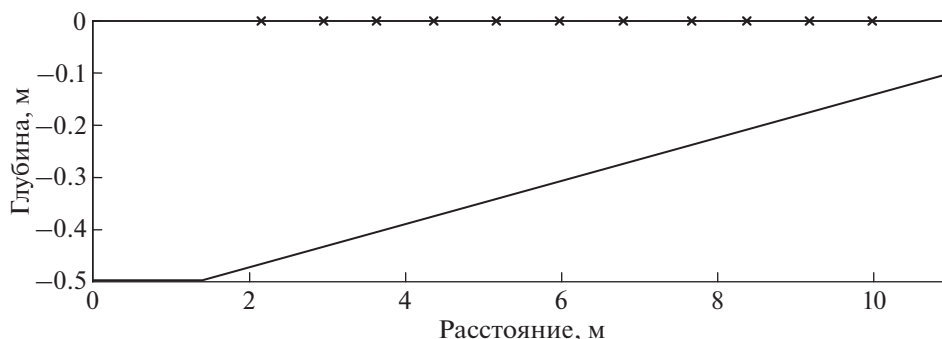


Рис. 4. Профиль дна и расстановка волнографов (крестики) для уклона дна 0.043.

(пологий подводный склон). Начальная глубина воды около волнопродуктора в экспериментах составляла 0.55 м для уклона дна 0.043 и 0.34 м для уклона 0.022. Основное внимание в эксперименте было уделено получению сценариев трансформации волн с ярко выраженным периодическим обменом энергией между нелинейными гармониками (2 и 4) для более широкого набора начальных параметров волн, чем в натурном эксперименте, с целью подробного анализа изменения бифазы. Для всех экспериментальных режимов начальные условия, определяемые в точке начала трансформации волн над подводным склоном так же, как и в натуральных данных, соответствовали условию (5).

Сценарии трансформации лабораторных волн, как и в натурном эксперименте, определялись визуальным анализом пространственной эволюции над подводным склоном амплитуд первой и второй нелинейных гармоник, определяемых методами спектрального анализа. Все выбранные для анализа сценарии лабораторных волн визуально соответствовали сценариям трансформации волн, выделяемым в натурном эксперименте, одновременно удовлетворяя критериям по числу Ирибаррена и крутизне волн по формулам (7) и (8), чем также обеспечивалось качественное подобие условий лабораторных исследований натурным [6]. Параметры лабораторных волн, используемых для анализа, приведены в табл. 2.

На рис. 5 приведены изменения бифазы для различных сценариев трансформации волн над крутым уклоном дна 0.043 в зависимости от числа Урселла, дисперсионного (kh) и нелинейного (a/h) параметров волн.

Хорошо видно, что вычисленные значения бифазы в целом плохо описываются аппроксимацией по формуле (4) для всех сценариев трансформации волн. Наблюдаются как положительные, так и отрицательные значения бифазы при $0.02 < Ur < 0.9$. Только для сценария 1 при $Ur > 1$ значения бифазы качественно следуют аппроксимации (4) с $m = 0.63$. Изменение бифазы для всех сценариев практически не зависит от нелинейно-

го параметра a/h . Можно только отметить, что, как и в данных натурального эксперимента, при $a/h > 0.37$, когда высота волн близка к их предельной высоте, значения бифазы всегда отрицательные.

Для всех сценариев прослеживается общая тенденция изменения бифазы в зависимости от дисперсионного параметра kh : при $kh < 0.6$ бифаза отрицательная и находится в интервале от $-\pi/2$ до 0. Ярко выраженной зависимости от типа сценария трансформации волн нет, можно только заметить, что для сценария 2 и 4 бифаза становится отрицательной, начиная примерно с $kh < 0.7$ и 0.9 соответственно.

При трансформации волн над пологим дном с уклоном 0.022 эволюция бифазы происходит несколько иначе. Отметим, что при выбранных начальных параметрах экспериментальных волн (табл. 2), сценарии их трансформации 1 и 3 не наблюдались, и чаще всего реализовывался сценарий 2, с одним полным периодом обмена энергией между первой и второй нелинейными гармониками. Зависимости бифазы от числа Урселла, дисперсионного (kh) и нелинейного (a/h) параметров волн для уклона дна 0.022 приведены на рис. 6. Значения бифазы, так же, как и в случае крутого уклона дна, плохо описываются зависимостью (4). Значения бифазы могут быть положительными при $0.1 < Ur < 2$.

Так же, как и в случае трансформации волн над крутым дном с уклоном 0.043, изменение бифазы практически не зависит от нелинейного параметра a/h , кроме как для волн, близких к предельной высоте, для которых при $a/h > 0.37$ бифаза будет отрицательной.

Наблюдается некоторая зависимость бифазы от дисперсионного параметра: при $kh < 0.35$ бифаза отрицательная и находится в интервале от $-\pi/2$ до 0. В случае пологого дна с уклоном 0.022 эти значения бифазы будут наблюдаться при kh меньших, чем при трансформации волн над крутым дном. При $0.6 < kh < 0.4$ бифаза, наряду с отрицательными значениями, имеет существенные положительные значения, что связано с периодично-

Таблица 2. Параметры волн лабораторного эксперимента

№ серии измерений	Период, T , с	Высота, H , м	Крутизна, H/L	Число Ирибаррена, ξ	Уклон дна, α	Сценарий трансформации и волн
6	2.56	0.09	0.0151	0.3494	0.043	1
7	1.86	0.15	0.0347	0.2307	0.043	2
8	1.46	0.276	0.0814	0.1507	0.043	2
9	1.08	0.22	0.0877	0.1452	0.043	4
10	0.93	0.153	0.0709	0.1615	0.043	4
11	1.07	0.228	0.0918	0.1419	0.043	2
12	1.37	0.189	0.0594	0.1764	0.043	4
13	1.7	0.172	0.0436	0.2060	0.043	2
15	2.56	0.119	0.0200	0.3039	0.043	1
17	1.71	0.13	0.0327	0.2376	0.043	2
18	1.365	0.11	0.0346	0.2312	0.043	2
19	1.08	0.15	0.0598	0.1758	0.043	2
20	0.99	0.07	0.0305	0.2464	0.043	3
48	1.86	0.157	0.0462	0.1023	0.022	2
49	1.86	0.13	0.0383	0.1124	0.022	2
50	1.86	0.1	0.0295	0.1282	0.022	2
51	1.86	0.12	0.0353	0.1170	0.022	2
53	1.46	0.16	0.0600	0.0898	0.022	4
54	1.46	0.13	0.0488	0.0996	0.022	2
55	1.46	0.114	0.0428	0.1064	0.022	2
56	1	0.12	0.0657	0.0858	0.022	4
58	2.3	0.15	0.0357	0.1164	0.022	2

стью обмена энергией между гармониками. При значениях kh , близких к 1, бифаза близка к нулю.

Таким образом, формула (4) плохо описывает изменения бифазы в случае распространения волн над наклонным дном для всех сценариев их трансформации. Для правильной параметризации бифазы необходимо учитывать периодичность обмена энергией между гармониками, т.е. сценарий трансформации волн может играть значительную роль. Для всех уклонов дна, эволюция бифазы зависит от kh : можно сказать, что при $kh < 0.35$ бифаза – отрицательная и находится в интервале от $-\pi/2$ до 0, а при $kh > 1$ – средние значения бифазы близки к нулю. Независимо от уклона дна, бифаза при $a/h > 0.37$ (волны предельной высоты и обрушающиеся волны) становится отрицательной. По данным лабораторного эксперимента, изменения бифазы в зависимости от нелинейного параметра при $a/h < 0.37$ не выявлено. Уклон дна и сценарий трансформации волн влияют на зависимость изменения бифазы от дисперсионного параметра kh .

Отметим, что во всех исследуемых экспериментальных случаях изменение бифазы происхо-

дило в интервале от $-\pi/2$ до $\pi/2$ (рис. 2, 3, 5, 6). Важным следствием такого изменения бифазы является то, что волновая компонента расхода наносов в моделях, основанных на энергетической концепции Бэгнольда [8], оценивающих расход наносов на основе асимметрии волновых скоростей (например, в [3]), будет всегда направленной к берегу, поскольку ее величина пропорциональна косинусу бифазы.

ВЛИЯНИЕ ОБРУШЕНИЯ ВОЛН НА ЭВОЛЮЦИЮ БИФАЗЫ

Обрушение волн является сильно нелинейным процессом и характеризуется уменьшением их высоты. Как показано в работе [2], при обрушении может наблюдаться ярко выраженная частотная избирательность диссипации энергии волн – обрушение изменяет спектр волн, компенсируя нелинейный рост высших гармоник, вызывая интенсивное уменьшение амплитуд вторых гармоник, что может сказываться и на изменении бифазы. Согласно наиболее распространенной концепции эволюции волн в береговой зоне моря, волны перед обрушением становятся

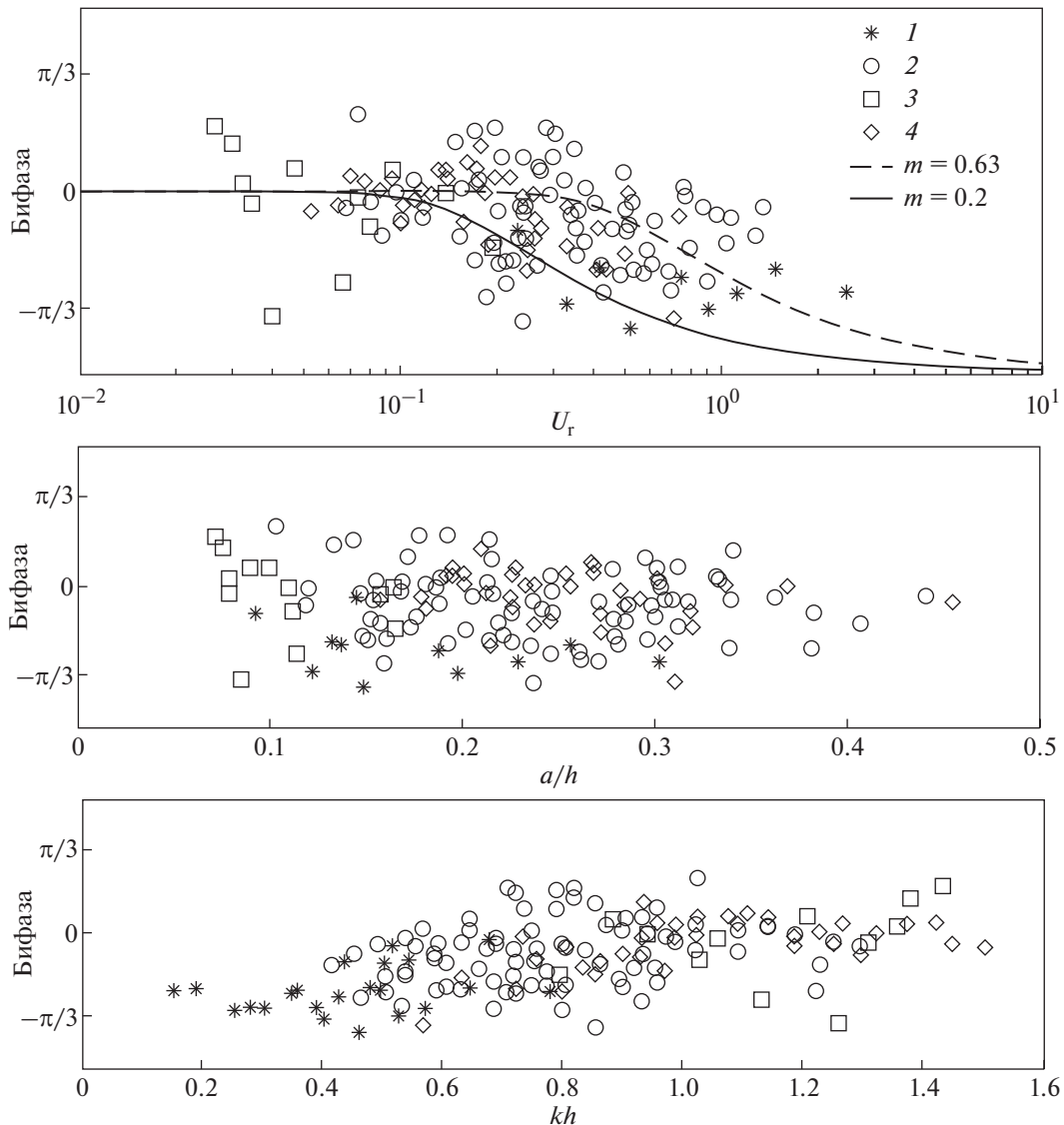


Рис. 5. Изменение бифазы в зависимости от числа Урелла и параметризации с различными константами m ($m = 0.2$ – сплошная линия, $m = 0.63$ – крупный пунктир) (вверху), параметра нелинейности a/h (посередине) и дисперсионного параметра kh (внизу) для различных сценариев: 1, 2, 3 и 4. Уклон дна 0.043.

“пилообразными” и бифаза в них близка к $-\pi/2$ [17, 18]. Действительно, как было установлено выше, бифаза волн с относительной высотой $H/h > 0.78$, т.е. обрушающихся волн, отрицательная, однако ее наблюдаемые в экспериментах значения больше $-\pi/2$. Обрушение волн, как правило, связано с уменьшением глубины воды и уменьшением kh . Для малых kh , по экспериментальным данным, также наблюдаются только отрицательные значения бифазы (рис. 5, 6).

Для оценки влияния обрушения на изменение бифазы и возможности параметризации бифазы в обрушающихся волнах было проведено сравнение режимов трансформации волн одного и того же периода, но с разными начальными высотами,

распространяющимися над одинаковым уклоном дна с обрушением в различных точках подводного склона. Рассматривались серии измерений 48, 49 и 50. В серии 48 обрушение волн начиналось на 7.6 м от волнопродуктора, затем ослабевало на расстоянии 11.2 м и возобновлялось на урзе (12.27 м). В серии 49 волны начинали обрушаться на расстоянии 9.9 м от волнопродуктора, и непрерывное их обрушение продолжалось до уреза. Волны в серии 50 распространялись без обрушения на подводном склоне, оно происходило только вблизи уреза, на расстоянии 12.27 м от волнопродуктора. В выбранных сериях волны обрушались по типу скользящего буруна (в англоязычной литературе – *spilling*), но на разных расстояниях

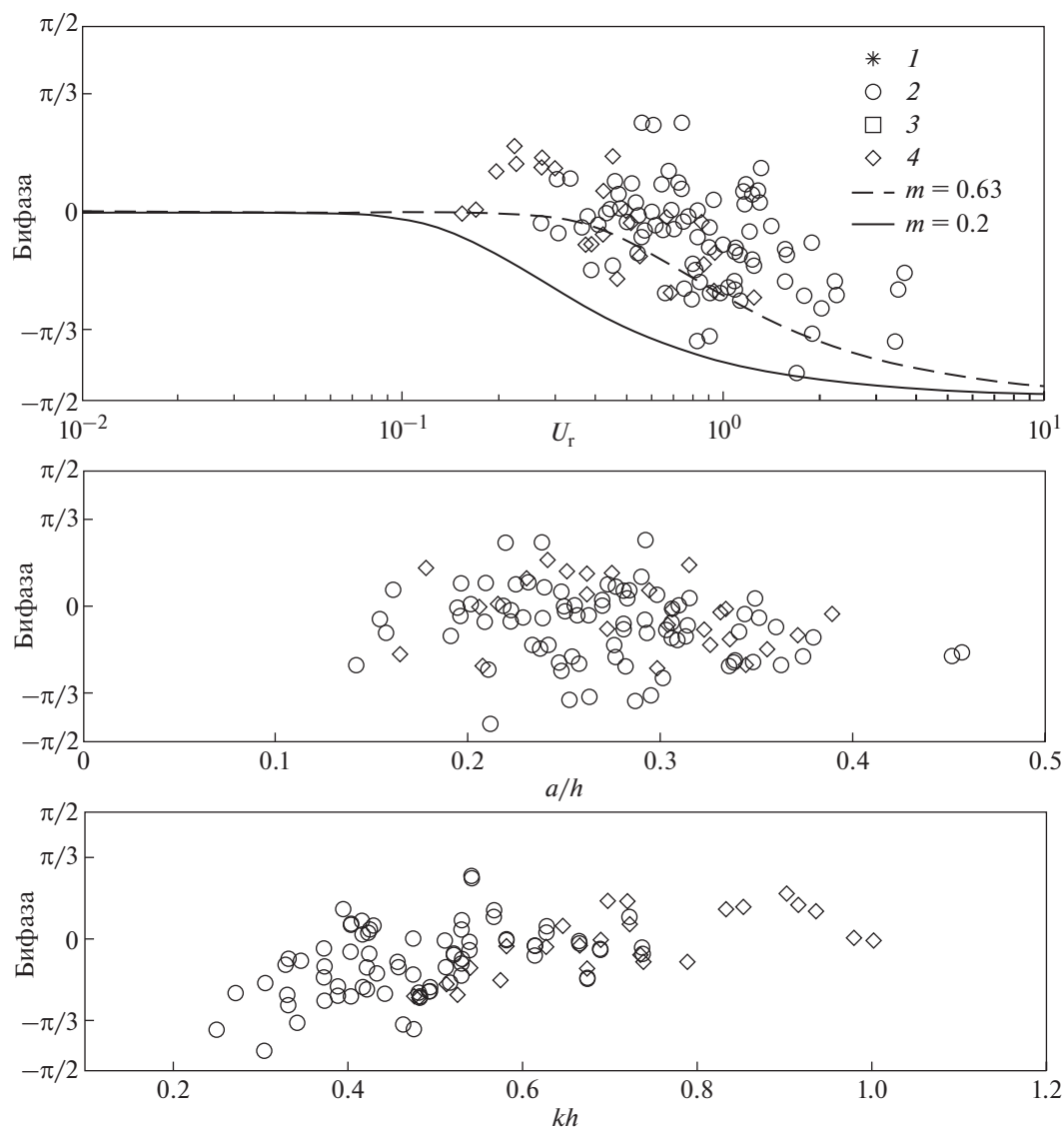


Рис. 6. Изменение бифазы в зависимости от числа Урселла и параметризации с различными константами m ($m = 0.2$ – сплошная линия, $m = 0.63$ – крупный пунктир) (вверху), параметра нелинейности a/h (посередине) и дисперсионного параметра kh (внизу) для различных сценариев: 1, 2, 3 и 4. Уклон дна 0.022.

от берега. Сравнения эволюции амплитуд нелинейных гармоник и бифазы при трансформации волн с обрушением на подводном склоне и без него, приведены на рис. 7.

Хорошо видно, что в необрушающихся волнах рост второй гармоники (расстояние 7–9 м) сопровождается изменением бифазы от отрицательных величин до нуля, а ее уменьшение (расстояние 3–4.5 м) и, соответственно, увеличение амплитуды первой гармоники – ростом бифазы от нуля до положительных значений (рис. 7а и 7г). При максимальном значении амплитуды второй гармоники значение бифазы близко к нулю. Т.е. при трансформации волн над наклонным дном изменение бифазы зависит от периодиче-

ского обмена энергией между первой и второй нелинейными гармониками, в соответствии с направлением передачи энергии между ними так же, как было показано во введении для “идеального” модельного примера нелинейно-дисперсионной трансформации монохроматической волны (рис. 1). Бифаза резко становится отрицательной при обрушении волн на урезе.

Видно, что обрушение волн, начавшееся в серии 48 на расстоянии 7.6 м, а в серии 49 – на расстоянии 9.9 м, не прекращает взаимодействие между гармониками. На качественном уровне бифаза меняется так же периодически, следуя изменениям амплитуд гармоник, как и в волнах без обрушения. Однако значения бифазы при обру-

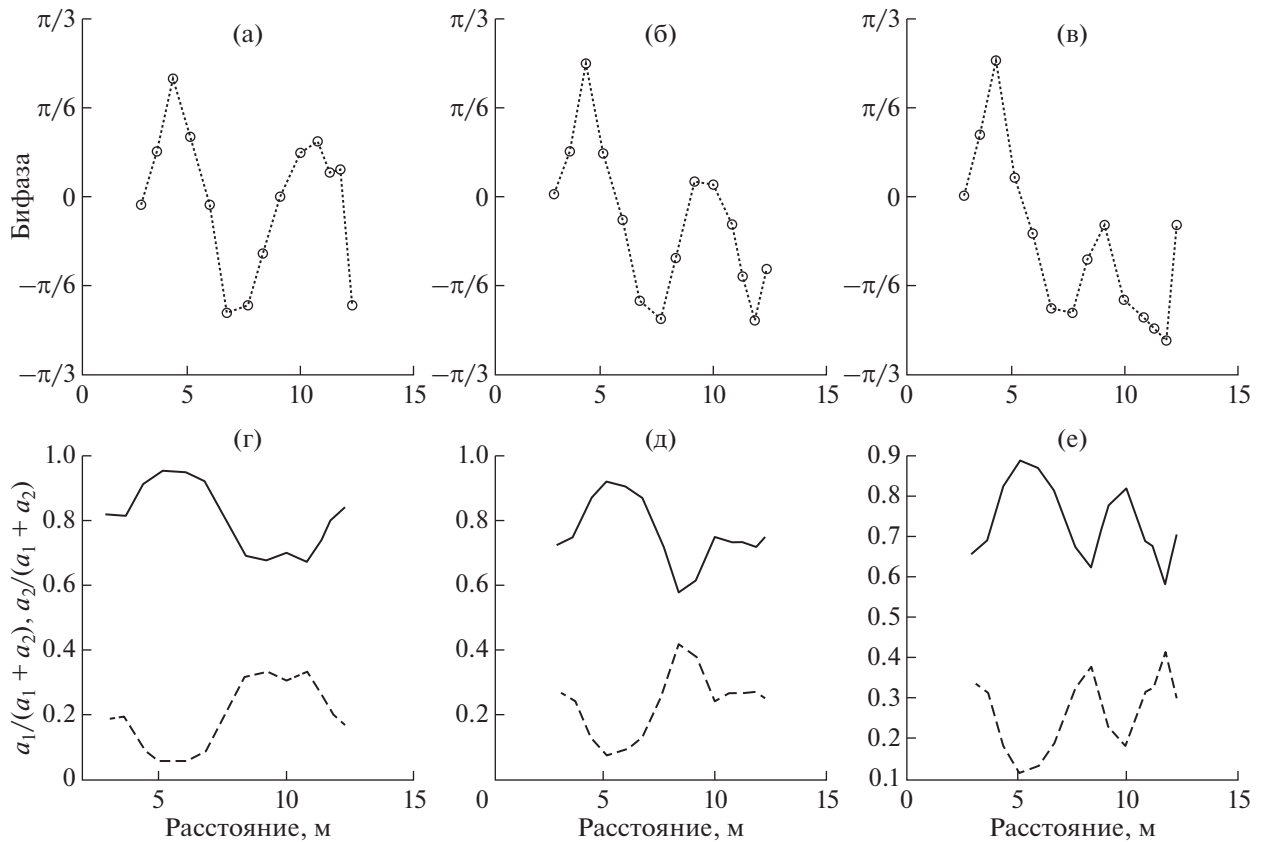


Рис. 7. Изменения бифаз (вверху) и амплитуд первой и второй гармоники (внизу) для экспериментальных волн серии 50 (а, г, обрушение на урезе, 12.27 м), 49 (б, д, обрушение 9.1–10 м), 48 (в, е, обрушение 7.6 м).

шении волн изменяются преимущественно в отрицательной области (рис. 7б, 7в, 7е, 7д), а интервал изменения бифазы в целом сужается и становится от 0 до $-\pi/2$. Т.е. обрушение интенсифицирует нелинейные процессы трансформации волн, подавляя, но не прекращая, дисперсионные. Как только обрушение ослабевает, дисперсионные процессы трансформации волн опять начинают проявляться, происходит периодический обмен энергией между амплитудами гармоник и бифаза также периодически меняется, несмотря на продолжающееся обрушение волн (рис. 7в и 7е). По-видимому, только в случае распространения волн на очень мелкой глубине воды при полном отсутствии влияния дисперсионных процессов, когда вторая гармоника постоянно будет находиться в фазе роста, можно ожидать, что бифаза все время будет около $-\pi/2$.

Таким образом, в обрушающихся волнах значения бифазы отрицательные. Они изменяются в интервале $[0, -\pi/2]$ в соответствии с периодическим изменением амплитуд первой и второй нелинейных гармоник при околорезонансных трехволновых взаимодействиях.

ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ ИЗМЕНЕНИЙ БИФАЗЫ С УЧЕТОМ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ОБМЕНА ЭНЕРГИЕЙ МЕЖДУ ГАРМОНИКАМИ

Анализ изменений бифазы в экспериментальных данных показал, что ее эволюция строго следует изменениям амплитуд гармоник, в соответствии с направлением передачи энергии между ними. Как было показано во введении, периодический обмен энергией между первой и второй нелинейными гармониками определяется трехволновыми околорезонансными взаимодействиями и зависит от расстройки по волновому числу δ . Пространственный период обмена энергией происходит на расстоянии $L_b(2)$, которое увеличивается по мере уменьшения глубины воды, поскольку величина расстройки уменьшается. Рассмотрим эволюцию бифазы от параметра, учитывающего возможное количество периодических обменов при распространении волн над наклонным дном с некоторой текущей глубины воды. В качестве такого параметра возьмем отношение расстояния или длины максимально возможного пробега волн до берега (h/α) к ожидаемой пространственной длине периода обмена

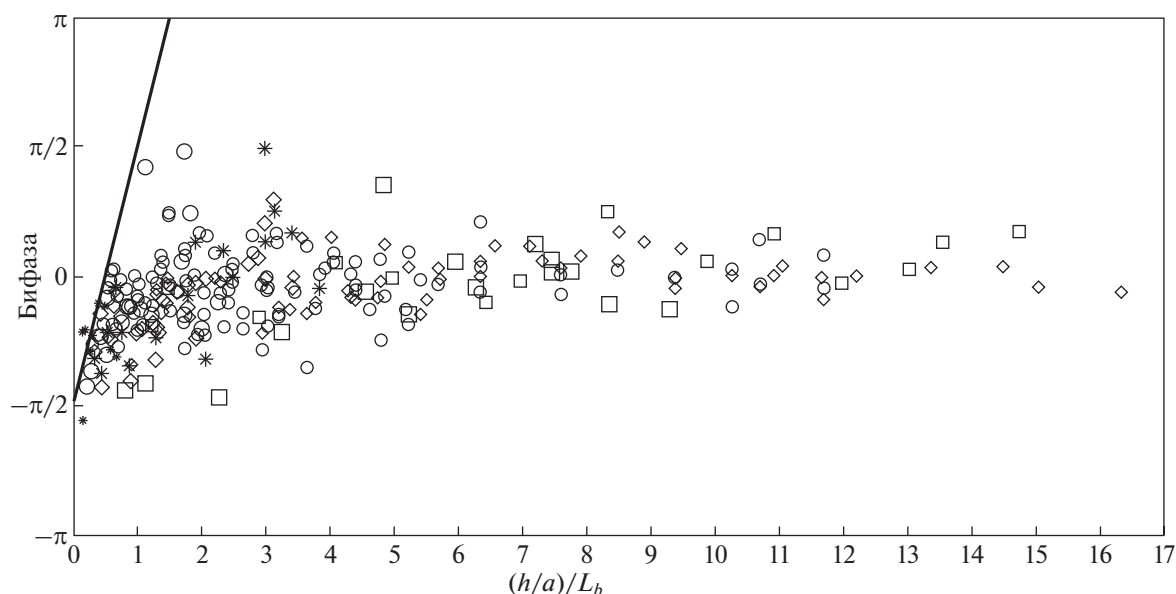


Рис. 8. Изменения бифазы в зависимости от относительного пробега волн $\Delta l = (h/\alpha)/L_b$ для различных сценариев: 1, 2, 3 и 4, крупные символы соответствуют натурным данным, мелкие – лабораторным. Прямая линия $\beta = \pi/2 \Delta l - \pi/2$.

энергией между первой и второй нелинейными гармониками (L_b):

$$\Delta l = (h/\alpha)/L_b, \quad (10)$$

где h – локальная глубина воды, α – локальный средний уклон дна, L_b вычисляется по формуле (2).

Для определения расстройки по волновым числам $\delta = k_2 - 2k_1$ волновые числа первой (k_1) и второй нелинейной гармоники (k_2) рассчитывались по дисперсионному соотношению линейной теории волн:

$$\omega^2 = gk \operatorname{th} kh. \quad (11)$$

На рис. 8 представлены изменения рассчитанной по экспериментальным данным бифазы от предлагаемого параметра Δl . Видно, что для всех анализируемых случаев происходит примерно одинаковое изменение бифазы: слабые флуктуации относительно нуля на расстояниях до берега, больших, чем пять периодов обмена (L_b), далее постепенное расширение диапазона изменений бифазы до интервала $[-\pi/2, \pi/2]$ на расстояниях до берега в пределах от одного до трех предполагаемых периодов обмена (L_b), и последующее сужение этого интервала до изменений преимущественно в отрицательной области в интервале $[-\pi/2, 0]$ на расстояниях до берега порядка одного L_b . Наибольший диапазон возможных значений бифазы в интервале от $[-\pi/2, \pi/2]$ будет наблюдаться при $1 < \Delta l < 3$. При $\Delta l < 0.5$ бифаза для всех сценариев экспериментальных данных стро-

го отрицательная, стремится к $-\pi/2$ и существует аппроксимация верхнего предела ее изменений:

$$\beta = \pi/2 \Delta l - \pi/2. \quad (12)$$

Таким образом, на основе параметра Δl возможна приблизительная общая аппроксимация значений бифазы при распространении волн над наклонным дном: при $\Delta l > 5$ бифаза принимается равной нулю; при $\Delta l < 1$ бифаза приблизительно определяется по изменению ее верхних предельных значений по формуле (12). При $1 < \Delta l < 5$ общая формула для параметризации изменений бифазы невозможна.

При анализе имеющихся экспериментальных как лабораторных, так и натурных данных, наблюдалась зависимость изменений бифазы от параметра Δl и от сценария трансформации волн (рис. 9). Например, для сценария 2, бифаза меняется в отрицательной области при $\Delta l < 1$, и она может быть аппроксимирована линейной зависимостью вида $\beta = \pi^* \Delta l - \pi/2$. Для сценария 3 отрицательные изменения бифазы начинаются при $\Delta l < 4$ и могут быть аппроксимированы зависимостью $\beta = \pi/9 \Delta l - \pi/2$. Для сценария 4 отрицательные изменения бифазы начинаются при $\Delta l < 2.5$ и могут быть аппроксимированы зависимостью $\beta = \pi/5 \Delta l - \pi/2$. Однако зависимость изменений бифазы от сценария трансформации и предложенные аппроксимации требуют дальнейшей верификации по данным натурных измерений.

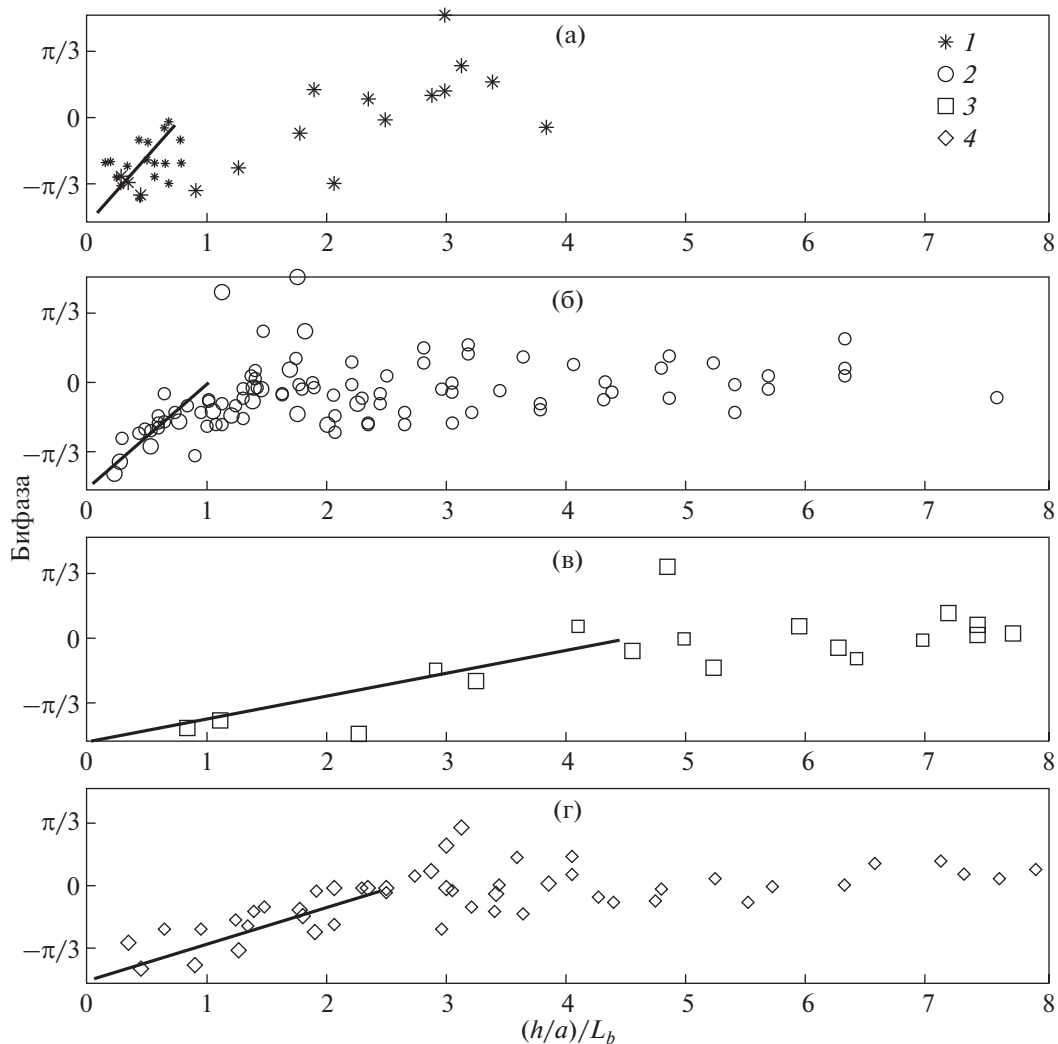


Рис. 9. Изменения бифазы в зависимости от относительного пробега волн $\Delta l = (h/\alpha)/L_b$ для различных сценариев: 1, 2, 3 и 4, крупные символы соответствуют натурным данным, мелкие – лабораторным. Прямая линия: (а) $\beta = \pi/2\Delta l - \pi/2$, (б) $\beta = \pi\Delta l - \pi/2$, (в) $\beta = \pi/9\Delta l - \pi/2$, (г) $\beta = \pi/5\Delta l - \pi/2$.

ВЫВОДЫ

Проведенный анализ экспериментальных данных показал, что:

1. В нелинейно дисперсионных волнах, распространяющихся над наклонным дном, изменение бифазы строго следует изменениям амплитуд первой и второй гармоник и периодичности обмена энергией между ними. При этом бифаза изменяется в интервале от $-\pi/2$ до $\pi/2$.

2. Обрушение влияет на значение бифазы, удерживая ее в отрицательной области, но при этом не отменяет ее флуктуации в интервале от 0 до $-\pi/2$, в соответствии с периодическим изменением амплитуд гармоник.

3. Применяемая в современной практике формула (4) зависимости бифазы от числа Урселла не пригодна для правильного расчета бифазы при распространении волн над наклонным дном в бе-

реговой зоне, поскольку не учитывает периодического обмена энергией между нелинейными гармониками при трехволновых околорезонансных взаимодействиях. В качестве другого подхода может быть предложена простая линейная аппроксимация значений бифазы от Δl – отношения текущего расстояния до берега к возможной пространственной длине периода обмена. При $\Delta l < 1$ бифаза приблизительно равна $\pi/2\Delta l - \pi/2$, при $\Delta l > 5$ бифаза равна нулю. При $1 < \Delta l < 5$ бифаза не может быть однозначно параметризована.

4. По имеющимся экспериментальным данным наблюдается зависимость изменений бифазы от сценария трансформации волн и возможность построения параметризации бифазы от Δl для каждого из сценариев. Однако наблюдающиеся закономерности требуют дальнейшей тщательной верификации.

Проведенные исследования и полученные параметры бифазы могут быть использованы при моделировании волнения в береговой зоне моря и в задачах прогноза развития берегов под воздействием штормовых волн.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РФФИ № 14-50-00095, участие в работе М.Н. Штремель было поддержано проектом РФФИ № 14-05-00696.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гогоберидзе Г.Г., Жамойда В.А., Нестерова Е.Н. и др. Глоссарий по Кадастру береговой (прибрежной) зоны. СПб.: Изд. РГГМУ, 2008. 95 с.
2. Кузнецов С.Ю., Сапрыкина Я.В. Частотная зависимость диссипации энергии при обрушении нерегулярных волн // Водные ресурсы. 2004. Т. 31. № 4. С. 422–430.
3. Леонтьев И.О. Прибрежная динамика: волны, течения, потоки наносов. М: ГЕОС, 2001. 272 с.
4. Сапрыкина Я.В., Кузнецов С.Ю., Андреева Н.К., Штремель М.Н. Сценарии нелинейной трансформации волн в береговой зоне моря // Океанология. 2013. Т. 53. № 4. С. 476–485.
5. Сапрыкина Я.В., Кузнецов С.Ю., Чернева Ж., Андреева Н.К. Пространственно-временная изменчивость амплитудно-фазовой структуры штормовых волн в береговой зоне моря // Океанология. 2009. Т. 49. № 2. С. 198–208.
6. Сапрыкина Я.В., Кузнецов С.Ю., Штремель М.Н., Сундар В. Метод оценки уязвимости береговой зоны под воздействием волнения на примере южного побережья полуострова Индостан // Процессы в геосредах. М.: ИПМех РАН, 2015. № 3. С. 76–88.
7. Харлеман Д. Механика жидкости. Пер. с англ. М.: Энергия, 1971. 480 с.
8. Antsyferov S.M., Kosyan R.D., Kuznetsov S.Yu., Saprykina Ya.V. Physical Grounds for the Formation of the Sediment Flux in the Coastal Zone of a Nontidal Sea // Oceanology, 2005. V. 45. Suppl. 1. P. S183–S190.
9. Bagnold R.A. An approach to the sediment transport problem from general physics // US Geological Survey, Professional paper 422_I. 1966. 37 p.
10. Bailard J.A., Inman D.L. An energetic bedload model for a plane sloping beach: Local transport // J. Geoph. Res. 1981. V. 86. P. 2035–2043.
11. Battjes J.A., Janssen J.P.F.M. Energy loss and set-up due to breaking of random waves // Proc. 16th Coastal Eng. Conf. 1978. P. 569–587.
12. Doering J.C., Bowen A.J. Shoaling surface gravity waves: A bispectral analysis // Proc., of 20th Conf. on Coastal Eng., Taipei, ASCE. 1986. P. 150–162.
13. Doering J.C., Bowen A.J. Parametrization of orbital velocity asymmetries of shoaling and breaking waves using bispectral analysis // Coastal Eng. 1995. № 26. P. 15–33.
14. Eldeberky Y. Nonlinear Transformation of Wave Spectra in the Nearshore Zone // Communication on Hydraulic and Geotechnical Engineering. 1996. Report № 96-4. TUDelft. 200 p.
15. Eldeberky Y., Battjes J. Parametrization of triad interactions in wave energy models // Proc. Coastal Dynamics Conference 95. 1995. P. 140–148.
16. Eldeberky Y., Madsen P.A. Deterministic and stochastic evolution equations for fully dispersive and weakly nonlinear waves // Coastal Engineering. 1999. V. 38. P. 1–24.
17. Elgar S., Guza R.T. Observation of bispectra of shoaling surface gravity waves // J. Fluid Mechanics. 1985. V. 161. P. 425–448.
18. Elgar S., Guza R.T. Nonlinear model predictions of bispectra of shoaling surface gravity waves // J. Fluid Mechanics. 1986. V. 167. P. 1–18.
19. Elgar S., Guza R.T. Shoaling gravity waves: Comparison between field observations, linear theory and a nonlinear model // J. Fluid Mechanics. 1985. V. 158. P. 47–70.
20. Hasselmann K., Munk W., MacDonald G. Bispectra of ocean waves // Proceedings of the Symposium on Time Series Analysis. 1963. P. 125–139.
21. Kim Y., Powers E. Digital bispectral analysis and its application to non-linear wave interaction // IEEE Trans. Plasma Science. 1979. V. 1. P. 120–131.
22. Madsen P.A., Sorensen O.R. Bound Waves and Triad Interactions in Shallow Water // J. Ocean Engineering. 1993. V. 20. № 4. P. 359–388.
23. SWAN. Technical documentation. 2006. 105 p. www.swan.tudelft.nl.

About Possibility of Parametrization of Evolution of Biphase in Coastal Zone

Ya. V. Saprykina, M. N. Shtremel, S. Yu. Kuznetsov

On experimental data a possibility of parametrization of spatial change of shift of phases (biphase) between the first and second nonlinear harmonics of the wave movement at transformation of waves above an inclined bottom in a coastal zone is investigated. It is revealed that values of a biphase change an interval $[-\pi/2, \pi/2]$. Changes of a biphase strictly follow fluctuations of amplitudes of the first and second harmonics and periodical exchange of energy between them. The wave breaking influences on values of a biphase, “holding” its changes in negative area in the range of $[-\pi/2, 0]$. The formula applied in modern practice of calculation of a biphase depending on Ursell’s number isn’t valid for the correct calculation of a biphase at evolution of waves in a coastal zone as doesn’t consider a periodic exchange of energy between nonlinear harmonics. Linear approximation of values of a biphase based on the relation of the current distance to the coast to the possible spatial length of the period of an exchange determined by a dispersive relation is suggested. Dependence of changes of a biphase on the scenario of transformation of waves is revealed and possibility of creation of separate parametrization of a biphase for each of scenarios is shown. Obtained results can be used in wave modeling in a coastal zone, and also in tasks of the forecast of development of coast under the influence of storm waves.