

УДК 551.35,551.46

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ СПЕКТРА ПОВЕРХНОСТНОГО ВОЛНЕНИЯ НА ДИНАМИКУ ДОННЫХ ОСАДКОВ

© 2014 г. Б. В. Дивинский¹, Р. Д. Косьян¹, И. Грюне²¹Южное отделение Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Геленджик, Россия
e-mail: divin@coastdyn.ru, rkosyan@hotmail.com²Прибрежный исследовательский центр, Ганновер, Германия
e-mail: gruene@fzk.uni-hannover.de

Поступила в редакцию 08.11.2012 г., после доработки 22.02.2013 г.

Статья посвящена исследованию влияния формы спектра нерегулярного поверхностного волнения на закономерности взвешивания донного материала и образование донных микроформ рельефа (рифелей). Показано, что вертикальный профиль концентрации взвешенных частиц, а также возможная частичная деформация донных рифелей связаны с особенностями частотного распределения энергии в спектре волн (при неизменной энергетической составляющей процесса).

DOI: 10.7868/S0030157414020051

ВВЕДЕНИЕ

Степень влияния поверхностного ветрового волнения на донные отложения зависит от множества факторов и определяется как параметрами волнового поля (интенсивностью, спектральной структурой, продолжительностью действия), так и механическими характеристиками грунта (гранулометрическим составом). В зависимости от внешних условий, дно может формироваться относительно плоским или с образованием микроформ рельефа (рифелей). В дополнение к этому возможен режим транспорта донных осадков высокой концентрации в тонком приповерхностном слое толщиной, как правило, в несколько сантиметров (*sheet flow* в англоязычной литературе). Состояние дна преимущественно определяет закономерности взвешивания и транспорта донных осадков.

Сложность и многофакторность процессов, протекающих во взаимосвязанной системе вода – размываемое дно, требует корректного задания исходного волнового поля. Несколько упрощенный подход предполагает представление поверхностного волнения в форме регулярных, бихроматических волн или с развитой групповой структурой. Менее изучена природа воздействия на дно реального нерегулярного волнения. В случае нерегулярного волнения его характеристиками выступают, как правило, значительная высота волн и период пика спектра [6]. Влияние частотного распределения волновой энергии в спектре поверхностных волн на транспорт донных осадков практически не исследовалось. В работе [5] впервые был поставлен вопрос о возможности такого влияния. Некоторые предварительные результаты исследований изложены в работе [7].

Основной целью предлагаемой работы является выявление отличий в реакции размываемого дна на внешнее возмущение, представленное нерегулярным поверхностным волнением с постоянными интегральными характеристиками (значительная высота волн и период пика спектра) и переменным частотным распределением энергии волн. В целом, массовое перемещение наносов и динамику рельефа прибрежной зоны следует изучать непосредственно в природных условиях. Тем не менее, анализ деталей и частных процессов возможен в рамках крупномасштабного лабораторного эксперимента, результаты которого применимы к натурным условиям [3].

Исходными материалами настоящего исследования служат данные комплексного эксперимента, проведенного в 2008 г. совместными усилиями российских и германских ученых в Большом волновом канале Прибрежного исследовательского центра Университета г. Ганновера, Германия.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Большой волновой канал в Ганновере, Германия, является крупнейшим в Европе и позволяет ставить масштабные научные эксперименты для исследований динамических процессов береговой зоны моря. Размеры лотка: длина – 307 м, ширина – 5 м, общая глубина – 7 м. Программно управляемый волнопродуктор генерирует поверхностное волнение с заданными статистическими и спектральными свойствами, в том числе:

регулярное волнение с максимальными высотами волн до 2 м и периодом до 10 с (при глубине 5 м);

нерегулярное волнение со значительными высотами волн до 1.4 м и периодами пика спектра до 8 с;

одиноким волнам (в составе волновых пакетов).

В условиях рассматриваемого эксперимента дно представляло собой слой песка толщиной 0.82 м. Измерительная аппаратура располагалась на расстоянии 111.45 м от волнопродуктора, начальная глубина при этом составила 3.18 м [5].

В ходе эксперимента был задействован целый ряд регистрирующей аппаратуры (оптические и акустические регистраторы взвешенных частиц, электромагнитные и акустические датчики скорости потока, измерители возвышений свободной поверхности и др.). В настоящем исследовании использованы данные датчика волнения в месте размещения прочей аппаратуры и акустического профилографа взвешенных веществ. В точке измерений поверхностное волнение фиксировалось струнным волнографом; частота опроса датчика составила 40 Гц. На расстоянии 0.75 м от начального положения твердого дна располагались акустические датчики обратного рассеивания (ABS). Акустические многочастотные датчики представлены приборами Aquascap 1000 фирмы Aquatech (www.aquatecsubsea.com); в качестве рабочих использовались частоты 1, 2 и 3.84 МГц. Акустические датчики обеспечивают практически мгновенные измерения вертикального профиля концентрации взвешенных частиц. К сожалению, не представилось возможным проведение инструментальных исследований геометрических параметров донных микроформ в объеме, достаточном для полноценного анализа.

Несомненным преимуществом лабораторных экспериментов является возможность задания нерегулярного волнения с контролируемыми параметрами и определенной спектральной структурой.

В качестве исходного нерегулярного волнового поля задавались последовательности возвышений свободной поверхности, обладающие JONSWAP-спектрами с заданными характеристиками (фазы случайны).

В обобщенном виде спектр JONSWAP записывается в виде [6]:

$$S(f) = \frac{ag^2}{(2\pi)^4} f^{-5} \exp\left(-\frac{5}{4}\left(\frac{f}{f_m}\right)^{-1}\right) \gamma^{\exp\left(\frac{1}{2\sigma^2}\left(\frac{f}{f_m}-1\right)^2\right)},$$

или в параметризованной форме

$$S(f) = ah_s^2 f_m^4 f^{-5} \exp\left(-\frac{5}{4}\left(\frac{f}{f_m}\right)^{-4}\right) \gamma^{\exp\left(\frac{1}{2\sigma^2}\left(\frac{f}{f_m}-1\right)^2\right)}.$$

Здесь

$$\alpha \approx \frac{0.0624}{0.230 + 0.0336\gamma - \left(\frac{0.185}{1.9 + \gamma}\right)},$$

$$\sigma \approx 0.07 \quad f \leq f_m,$$

$$\sigma \approx 0.09 \quad f > f_m,$$

γ – параметр пиковатости (peak enhancement coefficient), g – ускорение свободного падения.

Спектр JONSWAP определяется тремя параметрами: значительной высотой волны h_s , частотой пика спектра f_m и параметром γ , который характеризует частотное распределение волновой энергии внутри однопикового спектра.

В нашем случае серии экспериментов соответствовали перебору спектральных параметров исходного волнового поля:

значительная высота волны $h_s = 0.8, 1.0, 1.2$ м;

период пика спектра $t_p = 5$ с;

параметр пиковатости $\gamma = 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.3, 4.0, 6.0, 8.0, 9.9$.

Таким образом, всего на рассматриваемом этапе было проведено 30 серий наблюдений динамики взвешенного вещества под воздействием нерегулярного поверхностного волнения.

Отбор материала для определения гранулометрического состава осадков был произведен в районе расположения измерительной аппаратуры дважды. Соответствующие гранулометрические кривые приведены на рис. 1.

Сортировка песка по крупности обычно описывается в терминах логнормального распределения диаметров частиц d с функцией распределения в виде

$$F(d) = 0.5 \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\log(d/d_{50})}{\sqrt{2} \log \sigma_d} \right) \right],$$

где erf – функция ошибок, d_{50} – медианный размер частиц, σ_d – геометрическое стандартное отклонение, определяемое как $(d_{84}/d_{16})^{0.5}$.

Для пробы 1 медианный размер песка d_{50} равен 0.225 мм, коэффициент однородности, определяемый отношением d_{60}/d_{10} , составляет 2.38. Проба 2 характеризуется значениями: $d_{50} = 0.233$ мм, $d_{60}/d_{10} = 2.24$. Полученные данные в дальнейшем используются при анализе закономерностей взвешивания донного материала.

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ

Геометрические размеры волнового экспериментального канала позволяют реализовывать фактически полномасштабные процессы начала движения, взвешивания и осаждения донного материала под воздействием реального нерегу-

лярного волнения. Отличие от природных условий связано с отсутствием комбинированного воздействия ветрового волнения и основного течения. Тем не менее, преимуществами лабораторных исследований можно считать возможность полноценного развертывания инструментальной базы, не всегда достижимой в естественных условиях, а также контроль исходных условий.

В ходе эксперимента получено 30 серий измерений возвышений свободной поверхности, соответствующих своему набору спектральных параметров (h_s, t_p, γ). Длина каждой записи – 2200 с. Поскольку записи охватывают период с момента запуска волнопродуктора до фактического затухания волновых процессов, дальнейшая статистика строилась по усеченным (с 50 по 2030 секунду) сериям общей продолжительностью 1980 секунд.

Параметры волн, получаемые путем обработки волнограмм:

h_{avg} – средняя высота волн, м;

$h_{1/3}$ – средняя из трети наибольших высот волн ранжированного ряда, м;

$h_{1/10}$ – средняя из десятой части наибольших высот волн ранжированного ряда, м;

h_{max} – максимальная высота волн, м;

t_{avg} – средний период волн, с;

$t_{1/3}$ – средний из трети наибольших периодов волн ранжированного ряда, с;

$t_{1/10}$ – средний из десятой части наибольших периодов волн ранжированного ряда, с;

t_{max} – период волны, соответствующий волне максимальной высоты, с.

Характер динамического отклика поверхности дна на внешнее возмущение выражается в терминах параметра мобильности [2]:

$$\psi = \frac{U^2}{(s-1)gd_{50}}$$

где U – придонная орбитальная волновая скорость, $s = \rho_s/\rho$ – относительная плотность осадков, d_{50} – медианный диаметр частиц. Придонные волновые скорости находятся на основании линейной волновой теории:

$$U = \frac{hgt}{2L} \frac{\cosh\left(2\pi\frac{z+d}{L}\right)}{\cosh\left(2\pi\frac{d}{L}\right)},$$

где h, t, L – соответственно высота, период и длина волны, z – вертикальная координата, d – глубина. В табл. 1 приведены статистические характеристики высот и периодов волн, а также значения параметра мобильности, соответствующие значениям орбитальных скоростей ($U_{avg}, U_{1/3}, U_{1/10}$).

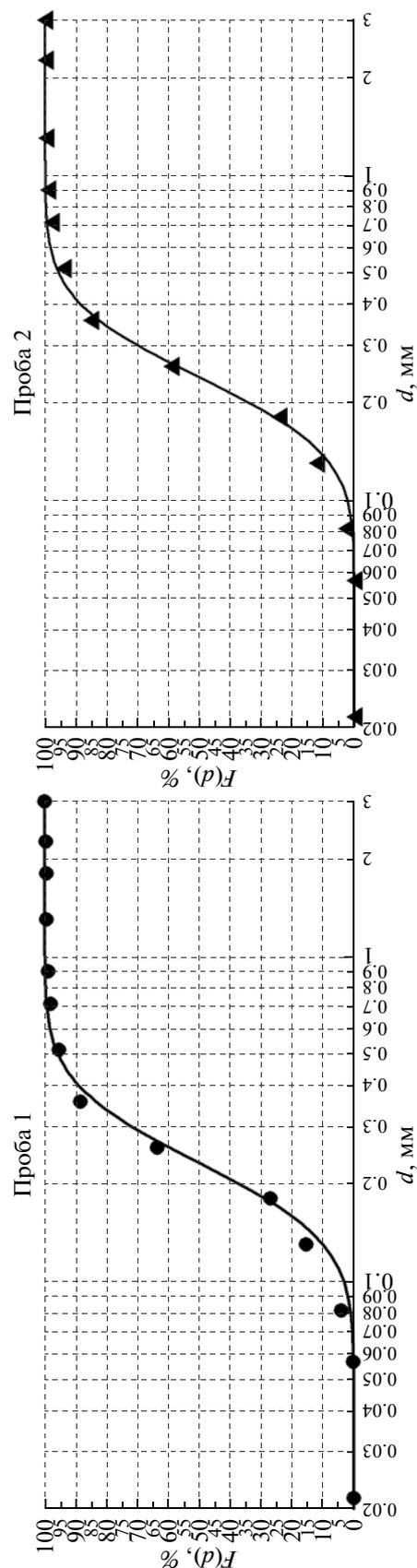


Рис. 1. Гранулометрические кривые донного материала.

Таблица 1. Параметры волн в точке измерений

Исходные параметры		Расчетные параметры (по волнограммам)										
h_s , м	γ	h_{avg} , м	$h_{1/3}$, м	$h_{1/10}$, м	h_{max} , м	t_{avg} , с	$t_{1/3}$, с	$t_{1/10}$, с	t_{max} , с	Ψ_{avg}	$\Psi_{1/3}$	$\Psi_{1/10}$
0.8	1.0	0.51	0.80	1.00	1.22	3.76	5.18	6.03	4.69	25	87	150
	1.5	0.50	0.78	0.97	1.33	3.80	5.17	5.78	3.75	25	84	140
	2.0	0.52	0.80	0.96	1.32	3.97	5.40	6.17	4.41	28	90	142
	2.5	0.52	0.80	1.01	1.37	3.98	5.31	5.96	4.33	28	89	152
	3.0	0.52	0.80	0.98	1.24	4.08	5.31	5.82	4.66	30	90	143
	3.3	0.50	0.79	0.98	1.27	3.96	5.25	5.84	4.91	27	85	142
	4.0	0.50	0.76	0.92	1.23	4.20	5.38	5.95	5.19	28	81	127
	6.0	0.54	0.82	0.99	1.27	4.26	5.37	5.91	5.45	33	95	146
	8.0	0.54	0.82	1.04	1.42	4.40	5.47	6.05	4.55	34	96	164
9.9	0.52	0.82	1.02	1.28	4.34	5.39	5.90	4.47	32	96	154	
1.0	1.0	0.63	0.98	1.19	1.58	3.87	5.28	6.06	5.66	40	133	214
	1.5	0.65	1.01	1.22	1.46	4.14	5.48	6.19	4.51	47	145	227
	2.0	0.64	0.99	1.20	1.92	4.16	5.52	6.24	4.73	46	141	222
	2.5	0.66	1.00	1.21	1.81	4.30	5.64	6.40	4.76	50	146	229
	3.0	0.65	1.01	1.22	1.71	4.29	5.58	6.24	4.76	49	146	227
	3.3	0.65	0.99	1.22	1.63	4.12	5.36	5.99	4.93	46	137	223
	4.0	0.68	1.04	1.23	1.44	4.36	5.54	6.14	5.11	54	154	229
	6.0	0.66	1.02	1.25	1.56	4.28	5.44	5.97	5.08	50	147	235
	8.0	0.70	1.06	1.29	1.59	4.55	5.51	6.02	4.67	60	161	252
9.9	0.70	1.06	1.31	1.56	4.55	5.50	6.00	4.66	59	161	256	
1.2	1.0	0.78	1.18	1.39	1.72	4.14	5.57	6.31	4.36	68	201	298
	1.5	0.77	1.18	1.41	1.62	4.21	5.59	6.33	4.45	67	201	310
	2.0	0.76	1.15	1.38	1.74	4.21	5.56	6.17	4.21	66	191	291
	2.5	0.78	1.17	1.40	1.73	4.31	5.63	6.27	4.18	70	198	300
	3.0	0.78	1.17	1.39	1.93	4.35	5.61	6.21	4.28	71	196	295
	3.3	0.77	1.17	1.43	1.86	4.34	5.51	6.14	4.86	70	197	313
	4.0	0.80	1.21	1.40	1.66	4.40	5.59	6.26	4.97	75	210	301
	6.0	0.79	1.20	1.47	1.89	4.39	5.56	6.14	5.25	73	208	328
	8.0	0.81	1.23	1.47	1.74	4.49	5.51	6.00	4.96	80	218	324
9.9	0.82	1.25	1.50	1.93	4.54	5.50	5.95	4.64	83	222	338	

Нерегулярность исходного поверхностного волнения приводит к случайному характеру воздействия на дно. Рассчитанные по зарегистрированным возвышениям свободной поверхности соответствующие ряды высот и периодов волн позволили получить “мгновенные” значения параметра мобильности и оценить временную изменчивость динамического воздействия на песчаное дно. На рис. 2 представлены графики возвышений свободной поверхности (рис. 2а), высот (рис. 2б) и периодов волн (рис. 2в, для них по оси x – номер волны), а также “мгновенного” значения параметра мо-

бильности (рис. 2г) для двух серий наблюдений: $h_s = 1.2$ м, $t_p = 5$ с, $\gamma = 1.0$ и $h_s = 1.2$ м, $t_p = 5$ с, $\gamma = 9.9$.

Условия формирования донных рифелей, основанные на соотношении амплитуды придонных волновых колебаний A к медианному диаметру песка d_{50} и параметре Шильдса, приведены в работе [2].

Параметры Шильдса и мобильности связаны соотношением:

$$\theta_w = 0.5 f_w \psi,$$

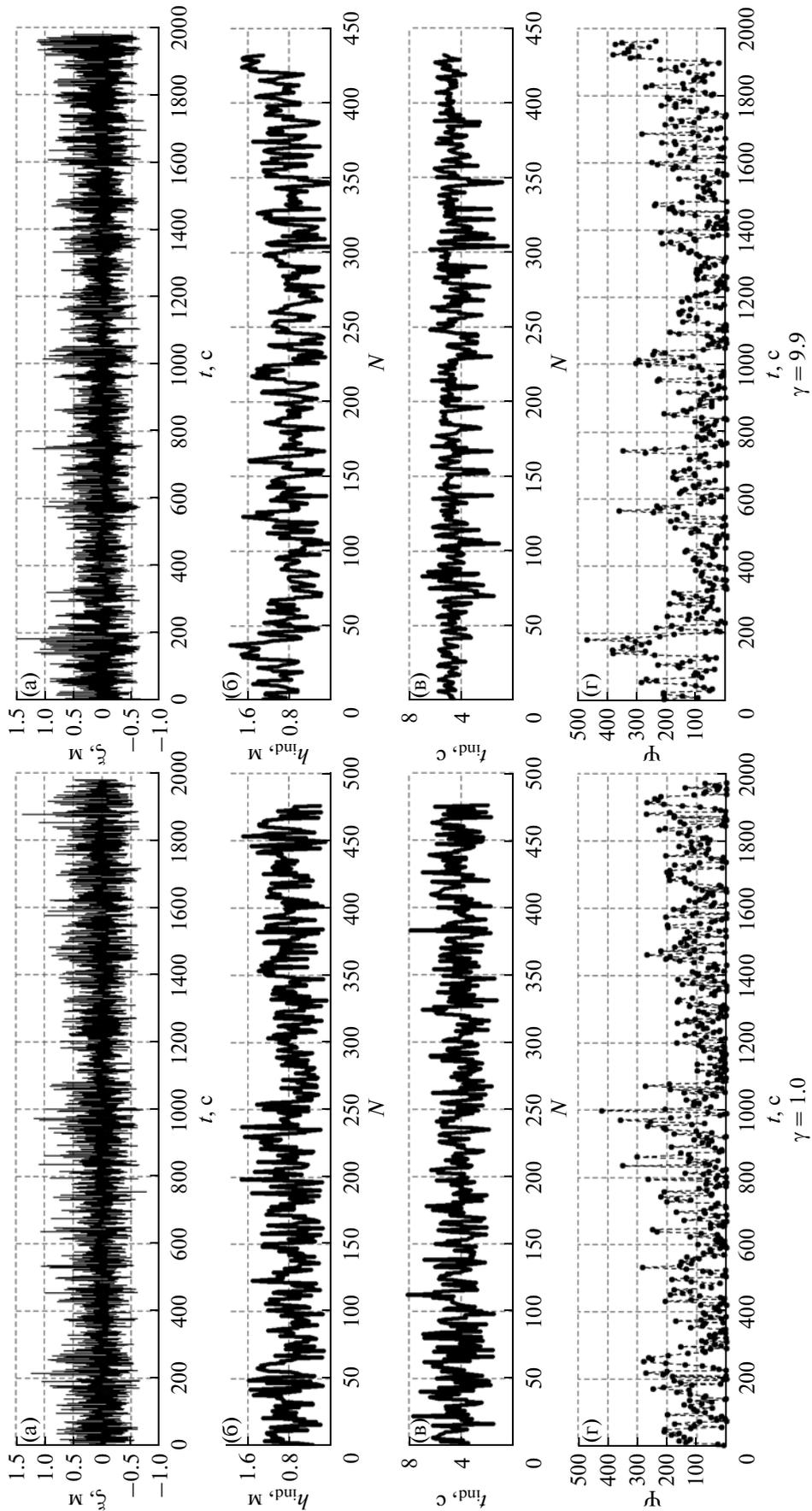


Рис. 2. Возвышения свободной поверхности (а), высоты (б) и периоды (в) волн, а также параметр мобильности (г).

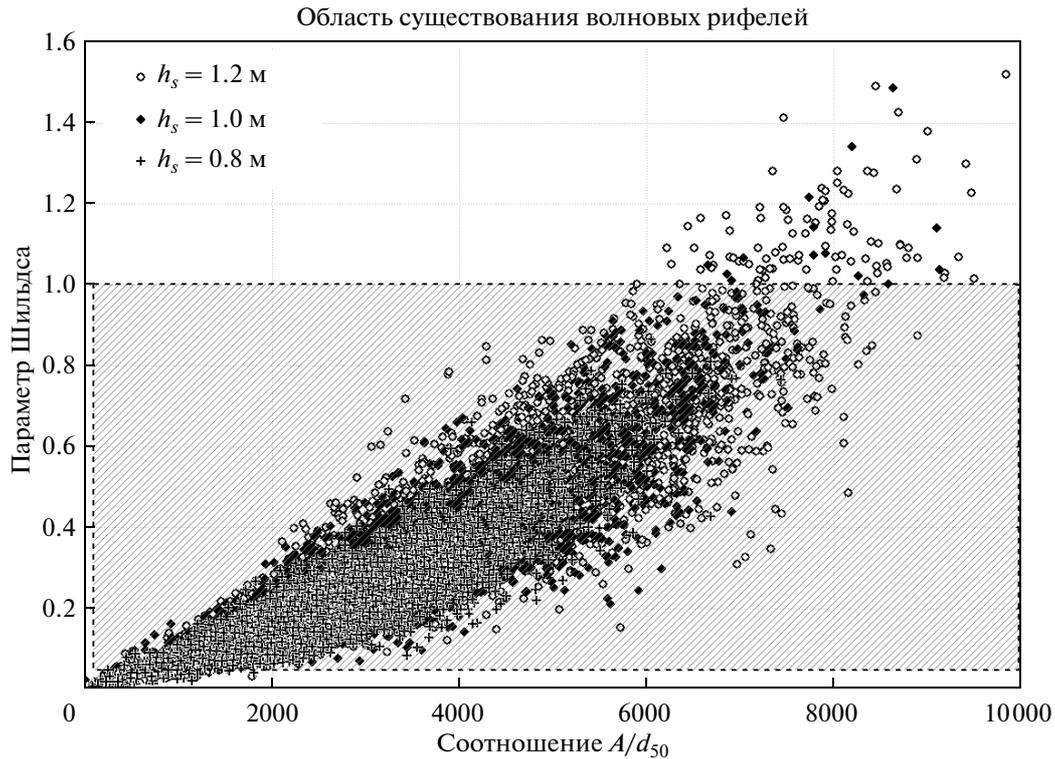


Рис. 3. Область существования волновых рифелей согласно [2].

где $f_w = \exp \left[5.5 \left(\frac{2.5d_{50}}{A} \right)^{0.2} - 6.3 \right]$ — коэффициент волнового трения, $A = Ut/2\pi$ — амплитуда придонных колебаний.

Заштрихованный прямоугольник на рис. 3 соответствует условиям, при которых экспериментально наблюдалось формирование рифелей. Преимущественное положение наших точек внутри прямоугольника подтверждает преобладающую рифельную природу дна в условиях эксперимента.

Таким образом, анализ всех тридцати серий наблюдений показал, что при воздействии поверхностного волнения со значительными высотами волн в 0.8, 1.0, 1.2 м и при данной глубине (3.18 м) режим дна в целом соответствует рифельному. В силу нерегулярности волнения наблюдаются промежутки времени с выходом на режим плоского дна. При этом максимальные зафиксированные промежутки времени составили порядка 60–70 с, что оценочно соответствовало 12–15 подряд идущим волнам.

Процессы формирования и трансформации донных рифелей находятся во взаимосвязи с общей динамикой потока, их линейные геометрические размеры существенно влияют на общую картину взвешивания. В целом, механизмы взвешивания осадков в случаях рифельного или плоского дна существенно различны. В присутствии

рифелей взвешивание осадков определяется вихрями, формирующимися за счет неустойчивости при обтекании потоком воды их гребней. Возникающие вихри достигают наибольшей интенсивности в фазы торможения и ускорения потока, а их отрыв от дна и выброс в толщу воды происходит в моменты смены знака скорости воды у дна. При распространении волн над плоским дном турбулентность волнового потока и взвешивание со дна твердых частиц генерируется за счет неустойчивости потока в донном пограничном слое.

В настоящее время существует множество моделей, позволяющие оценить геометрические параметры рифелей, из которых можно выделить две как наиболее часто упоминаемые и используемые:

1. Грант и Мадсен [4] разработали метод определения параметров донных рифелей, который основан на рассмотрении балансовых соотношений между внешними силами, действующими на частицы:

$$\frac{\eta}{\lambda} = 0.16 \left(\frac{\theta}{\theta_{cr}} \right)^{-0.04}, \quad \frac{2\eta}{A} = 0.22 \left(\frac{\theta}{\theta_{cr}} \right)^{-0.16}, \quad (1)$$

где λ , η — длина и высота рифелей соответственно;

$\theta_{cr} = \frac{0.3}{1 + 1.2D_*} + 0.55[1 - \exp(-0.022D_*)]$ — критическое значение параметра Шильдса;

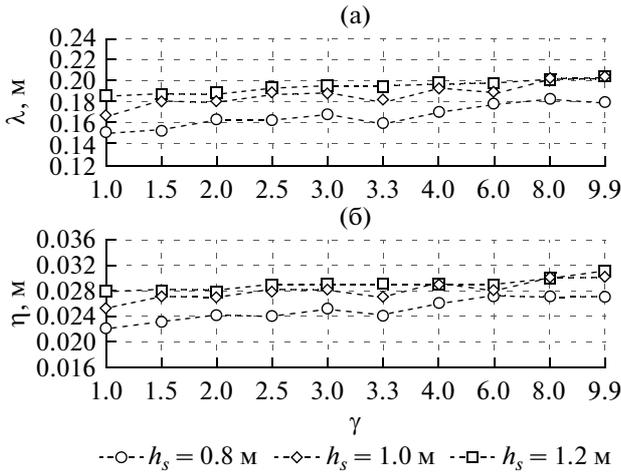


Рис. 4. Длины (а) и высоты (б) волновых рифелей, рассчитанные по модели Вайберга и Харриса [9].

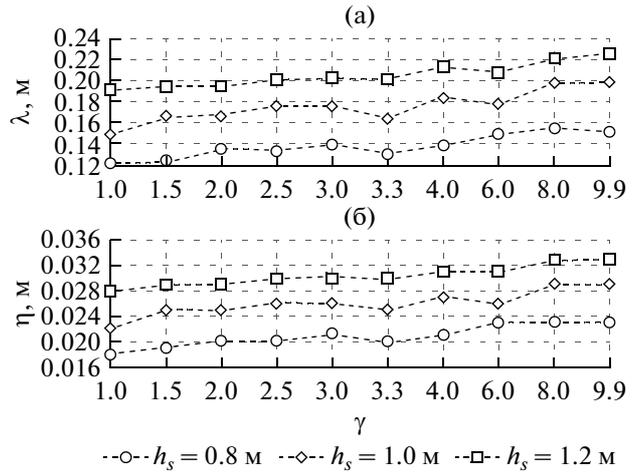


Рис. 5. Длины (а) и высоты (б) волновых рифелей, рассчитанные по модели Гранта и Мадсена [4].

$$D_* = \left(\frac{g(s-1)}{v^2} \right)^{1/3} d_{50} - \text{безразмерный параметр;}$$

v – кинематический коэффициент вязкости.

Т.к. характеристики рифелей зависят от параметра Шильдса, данный метод может рассматриваться как динамический.

2. Вайберг и Харрис [9], основываясь на многочисленных лабораторных и полевых наблюдениях, вывели эмпирические соотношения для параметров рифелей (длин и высот):

$$\frac{\lambda}{A} = \left[1 + 187 \times 10^{-3} \Delta (1 - \exp\{-(2.0 \times 10^{-4} \Delta)^{1.5}\}) \right]^{-1},$$

$$\frac{\eta}{\lambda} = 0.15 \left[1 - \exp\{-(5000/\Delta)^{3.5}\} \right]. \quad (2)$$

Параметр Δ определяется соотношением $\Delta = A/d_{50}$.

Поскольку характеристики рифелей являются функцией от параметра Δ , данный метод является кинематическим.

С помощью моделей (1) и (2) для каждого набора отдельных высот и периодов волн (h_{ind}, t_{ind}) определим геометрические параметры донных рифелей ($\lambda_{ind}, \eta_{ind}$). Осреднение за серию значений ($\lambda_{ind}, \eta_{ind}$) даст геометрические параметры рифелей, образующихся под воздействием нерегулярного поверхностного волнения. В табл. 2 и на рисунках 4, 5 и 6 приведены значения осредненных за серии параметров волновых рифелей. Абсолютные величины, рассчитанные по двум моделям, несколько различны, тем не менее, общая тенденция такова, что с ростом параметра γ длины рифелей увеличиваются при неизменной, в общем, крутизне.

В работе [7] исследуются вопросы влияния нерегулярности поверхностного волнения на раз-

мер и форму волновых рифелей. Отмечено, что рифели, возникающие под воздействием нерегулярного волнения, в целом короче и более плоские по форме, чем рифели, образованные регулярными волнами.

В нашем случае показателем регулярности волнения выступает параметр пиковатости спектра γ . Заметим, что в реальных условиях при распространении волн зыби значения γ могут достигать 20–30, а сами волны зыби в этом случае становятся практически двумерными (монохроматическими).

Таким образом, при одинаковых интегральных характеристиках волнения ($h_s, t_p = \text{const}$) особенности частотного распределения волновой энергии (переменная γ) определяют специфику волнового воздействия на песчаное дно. Рост пара-

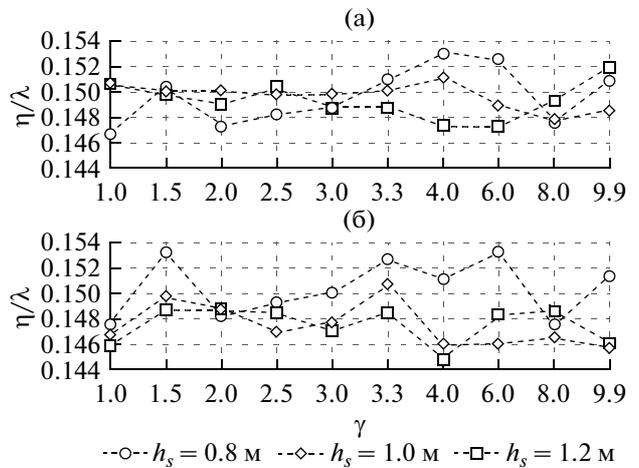


Рис. 6. Крутизна волновых рифелей по модели Вайберга и Харриса [9] (а) и Гранта и Мадсена [4] (б).

Таблица 2. Рассчитанные по волнограммам параметры волновых рифелей

Исходные параметры		Параметры рифелей			
		Вайберг и Харрис [9]		Грант и Мадсен [4]	
h_s , м	γ	λ , м	η , м	λ , м	η , м
0.8	1.0	0.150	0.022	0.122	0.018
	1.5	0.153	0.023	0.124	0.019
	2.0	0.163	0.024	0.135	0.020
	2.5	0.162	0.024	0.134	0.020
	3.0	0.168	0.025	0.140	0.021
	3.3	0.159	0.024	0.131	0.020
	4.0	0.170	0.026	0.139	0.021
	6.0	0.177	0.027	0.150	0.023
	8.0	0.183	0.027	0.156	0.023
	9.9	0.179	0.027	0.152	0.023
1.0	1.0	0.166	0.025	0.150	0.022
	1.5	0.180	0.027	0.167	0.025
	2.0	0.180	0.027	0.168	0.025
	2.5	0.187	0.028	0.177	0.026
	3.0	0.187	0.028	0.176	0.026
	3.3	0.180	0.027	0.166	0.025
	4.0	0.192	0.029	0.185	0.027
	6.0	0.188	0.028	0.178	0.026
	8.0	0.203	0.030	0.198	0.029
	9.9	0.202	0.030	0.199	0.029
1.2	1.0	0.186	0.028	0.192	0.028
	1.5	0.187	0.028	0.195	0.029
	2.0	0.188	0.028	0.195	0.029
	2.5	0.193	0.029	0.202	0.030
	3.0	0.195	0.029	0.204	0.030
	3.3	0.195	0.029	0.202	0.030
	4.0	0.197	0.029	0.214	0.031
	6.0	0.197	0.029	0.209	0.031
	8.0	0.201	0.030	0.222	0.033
	9.9	0.203	0.030	0.226	0.033

метра γ со значения 1.0 до 9.9 обеспечивает увеличение средней длины рифелей на 10–15%.

К сожалению, в условиях лабораторного эксперимента не всегда представляется возможным провести исследования в объеме, достаточном для статистических обобщений. В какой-то степени этот недостаток можно компенсировать с помощью методов математического моделирования. В настоящем исследовании используется современная волновая модель, основанная на численном решении уравнений Навье–Стокса в приближении Буссинеска [1]. Модель реализует распространение нерегулярных поверхностных

волн над неоднородным дном с учетом возможного забурунивания, обрушения, а также нелинейных взаимодействий в спектре волн. Геометрия расчетной области полностью соответствует параметрам волнового канала. Для каждого набора параметров ($h_s = 1.2$ м, $t_p = 5$ с, $\gamma = 1.0 \dots 9.9$) сгенерировано по пять тридцатиминутных серий возвышений свободной поверхности со случайной начальной фазой. Каждая серия подается на вход модельного волнопродуктора и прогоняется до точки измерений (111.45 м). Результаты расчетов параметров волновых рифелей представлены на рис. 7.

“Ящики с усами”, приведенные на рис. 7а, дают представление о статистике распределения длин рифелей при одинаковых условиях волнообразования. Таким образом, анализ результатов моделирования показывает, что выводы, сделанные ранее на основе экспериментальных данных, можно считать статистически достоверными. Также отметим, что в настоящем исследовании не ставится задача проверки и уточнения той или иной модели рифельного дна, поскольку в ходе эксперимента не проводились прямые измерения параметров донных рифелей. Предполагается, что систематические ошибки (или физические упрощения), характерные для каждого метода, во всех сериях наблюдений являются величинами одного порядка.

Необходимо обратить внимание на один важный момент. Параметризация волнового спектра в форме JONSWAP применима для однопиковых спектров. В случае распространения волн над реальным дном под влиянием донного трения, обрушения, нелинейных внутриволновых взаимодействий происходит трансформация волнового спектра. В подобных условиях использование аппроксимации JONSWAP возможно с некоторыми оговорками. Анализ всех спектров, полученных как в эксперименте, так и модельным путем, позволил оценить изменение параметра γ при распространении поверхностного волнения вдоль канала от области генерации до точки измерений (табл. 3).

Данные табл. 3 показывают, что с ростом значительной высоты волны происходит более существенная трансформация спектров поверхностного волнения (связанная, вероятнее всего, с обрушением волн). При этом наблюдается перенос волновой энергии из области основного максимума и выполаживание формы спектра, показателем чего является уменьшение параметра $\gamma_{JONSWAP}$. Тем не менее, целью проведенных исследований является анализ закономерностей взвешивания в зависимости от начальных условий. Более детальные рассмотрения указанных процессов составят дальнейшие этапы исследований.

ДИНАМИКА ДОННОГО МАТЕРИАЛА

Натурные исследования процессов взвешивания, транспорта и осаждения донных осадков под воздействием поверхностного волнения и течений проводятся с использованием разнообразных методов, основанных либо на регистрации рассеянного сигнала (акустического или оптического), либо с помощью механического отбора проб. В настоящее время высокой функциональностью обладают акустические методы, реализованные на современной элементной базе. Основной принцип бесконтактных акустических измерений основан на установленных соотношениях между

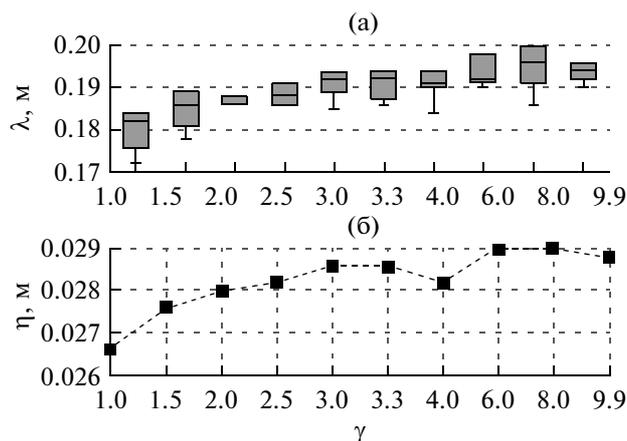


Рис. 7. Параметры модельных волновых рифелей: (а) – “ящики с усами” для длин рифелей, (б) – высоты рифелей.

мощностью отраженного сигнала и характеристиками взвешенного материала [8]. Не вдаваясь в описание методов интерпретации акустических эхо-сигналов, отметим, что использование двух и более частот дает информацию о вертикальных распределениях как непосредственно концентрации взвеси, так и средних диаметров частиц. Важным также является тот факт, что относительная чувствительность несущих частот к состоянию взвеси является калибровочной характеристикой прибора и не зависит от условий эксперимента.

В настоящем эксперименте продолжительность каждой записи, выполненной с помощью ABS, составила порядка 35 мин; вертикальное разрешение профиля – 0.01 м, дискретность – 0.25 с.

На рис. 8 и 9 приведены примеры обработки результатов измерений, выполненных с помощью ABS, для случая нерегулярного поверхност-

Таблица 3. Исходное значение параметра γ и значение в точке измерений

γ исходное значение	γ в точке измерений		
	$h_s = 0.8$ м	$h_s = 1.0$ м	$h_s = 1.2$ м
1.0	1.05	1.13	0.85
1.5	1.34	1.85	1.75
2.0	1.71	2.10	2.09
2.5	2.37	2.55	2.49
3.0	2.47	2.91	2.85
3.3	3.03	2.67	2.62
4.0	3.42	3.92	3.51
6.0	5.15	3.95	3.49
8.0	6.71	6.52	5.62
9.9	7.62	7.61	6.21

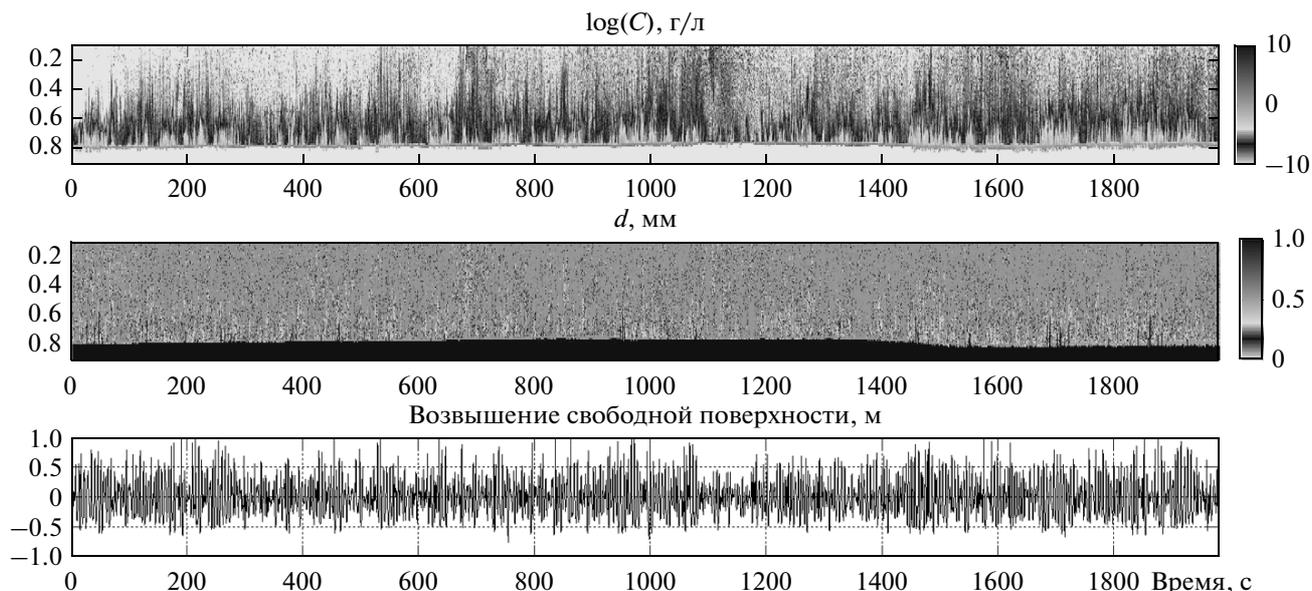


Рис. 8. Концентрация взвешенных веществ (г/л, верхний рисунок), диаметр частиц песка (мм, средний рисунок) и возвышение свободной поверхности (м, нижний рисунок) при $h_s = 1.2$ м, $t_p = 5$ с, $\gamma = 1.0$. По оси x – время, с, по оси z – расстояние от излучателей, м.

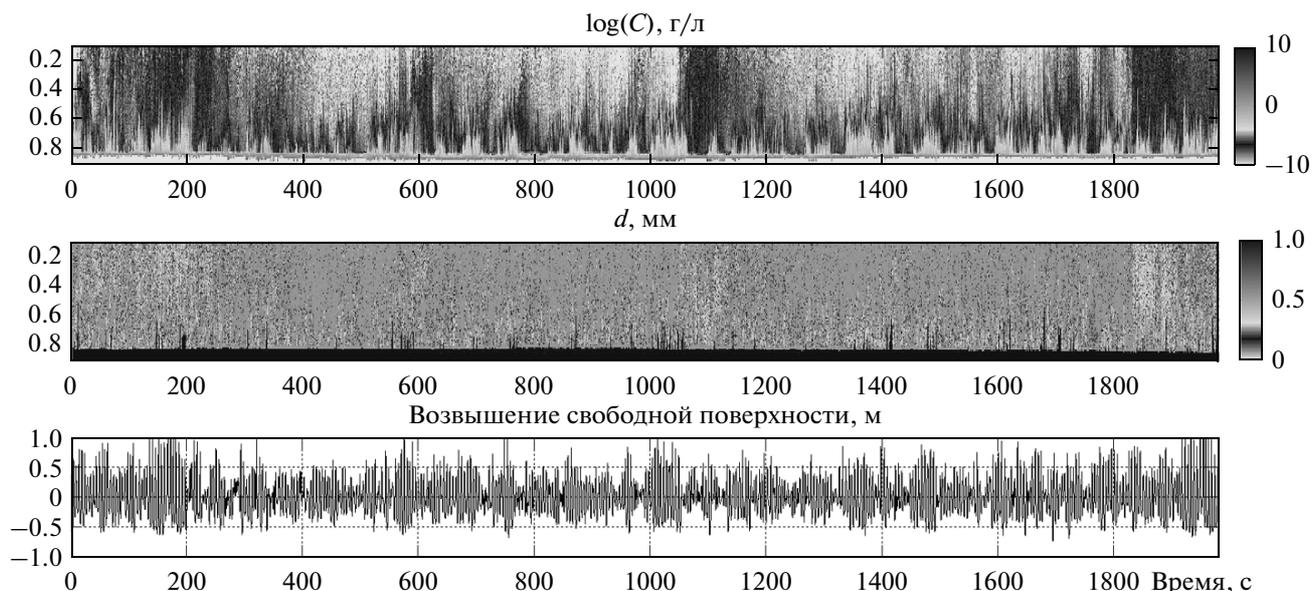


Рис. 9. Концентрация взвешенных веществ (г/л, верхний рисунок), диаметр частиц песка (мм, средний рисунок) и возвышение свободной поверхности (м, нижний рисунок) при $h_s = 1.2$ м, $t_p = 5$ с, $\gamma = 9.9$. По оси x – время, с, по оси z – расстояние от излучателей, м.

ного волнения с параметрами $h_s = 1.2$ м, $t_p = 5$ с, $\gamma = (1.0 \dots 9.9)$. Возвышение свободной поверхности синхронно регистрировалось струнным волнографом. Участки начала и конца записей, приходящиеся на моменты нарастания и затухания поверхностного волнения, отсекались. Полученные таким образом реализации длиной в 1980 с соответствовали развитому волнению с заданными пара-

метрами. Твердое дно в записи детектируется как резкое усиление эхо-сигнала. Хорошо различим слой эрозии донных отложений мощностью в несколько сантиметров, который может трактоваться как приповерхностный поток осадков.

Осредненные профили концентрации взвешенных веществ и среднего диаметра частиц песка для серий наблюдений с $h_s = 1.2$ м, $t_p = 5$ с и пе-

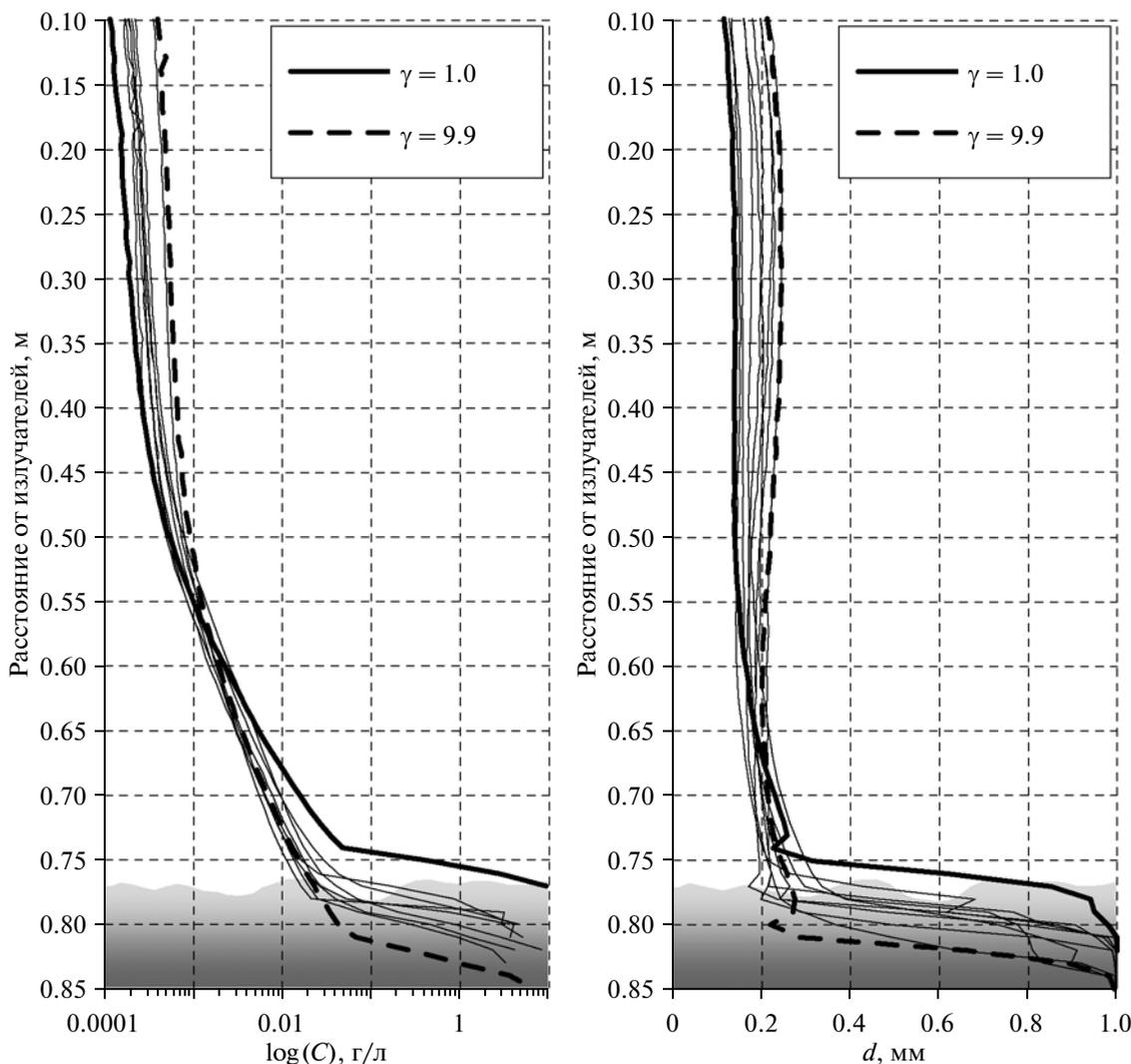


Рис. 10. Осредненные профили концентрации взвешенных веществ и среднего диаметра частиц песка при $h_s = 1.2$ м, $t_p = 5$ с, $\gamma = 1.0 \dots 9.9$. Начальное положение дна – на расстоянии 0.75 м от излучателей.

ременным параметром γ представлены на рис. 10. В серии с $\gamma = 1.0$ твердое дно в среднем определяется на расстоянии 0.77 м от излучателей, при $\gamma = 9.9$ это расстояние составляет 0.84 м. Напомним, что изначально акустические датчики обратного рассеивания располагались на расстоянии 0.75 м от твердого дна.

Как следует из рис. 10, увеличение параметра γ с 1.0 до 9.9 и связанное с этим формирование более крупных форм рифелей увеличивает общую глубину эрозии и обеспечивает доставку донного материала на большие расстояния от дна. Уменьшение по вертикали среднего диаметра частиц характерно для небольших значений γ , с ростом параметра пиковатости гранулометрический состав при удалении от дна практически не меняется. Большие значения среднего диаметра в слое эрозии донного материала могут проявляться как

следствие влияния физических факторов (вымыванием в первую очередь более легких фракций), так и возникающих неопределенностей при интерпретации отраженного акустического сигнала.

Необходимо отметить, что корректное описание результатов исследований с применением акустических методов возможно при соблюдении некоторых условий, в том числе:

диаметр частиц донных отложений заключен в пределах от десятков до нескольких сотен микрон; предварительно проведена системная калибровка прибора;

излучатели располагаются вне зоны обрушения поверхностных волн.

Приведенные ограничения требуют крайне аккуратного подхода при анализе отраженного акустического сигнала и выборе метода его преобразования в реальные концентрации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основной задачей выполненного исследования являлся анализ влияния частотного распределения волновой энергии на динамику взвешивания донного материала. Установлены различия в реакциях размываемого дна на внешнее возмущение, представленное нерегулярным поверхностным волнением с постоянными интегральными характеристиками (значительная высота волн и период пика спектра) и переменным частотным распределением энергии волн.

ВЫВОДЫ

1. В проведенном эксперименте воздействие внешних гидродинамических условий на твердое дно выражается в преимущественном формировании донных рифелей, определяющих картину взвешивания. Концентрация волновой энергии в зоне основного максимума спектра, показателем чего является увеличение параметра пиковатости спектра γ , способствует росту линейных размеров донных микроформ.

2. Рост параметра γ со значения 1.0 до 9.9 обеспечивает увеличение средней длины рифелей на 10–15%. Увеличение геометрических размеров рифелей способствует более активной инжекции донного материала в верхние слои, сопровождающейся ростом концентрации взвешенных частиц.

3. При небольших значениях γ с удалением от дна наблюдается уменьшение величины среднего диаметра частиц. С ростом параметра пиковатости гранулометрический состав взвеси при удалении от дна практически не меняется.

Таким образом, можно заключить, что при одинаковых интегральных характеристиках нерегулярного поверхностного волнения ($h_s, t_p = \text{const}$) специфику волнового воздействия на песчаное дно определяют именно особенности частотного распределения волновой энергии. Концентрация

волновой энергии в области частоты максимума спектра способствует переходу от нерегулярного к регулярному волнению и, в общем, упорядочению динамического воздействия на твердое дно. Физически это приводит к реализации более устойчивых внешних условий для развития донных микроформ рельефа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дивинский Б.В., Косьян Р.Д., Куклев С.Б. Параметры ветрового волнения на защищенных акваториях // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2010. № 4. С. 5–16.
2. Косьян Р.Д., Пыхов Н.В. Гидрогенное перемещение осадков в береговой зоне моря. М.: Наука, 1991. 280 с.
3. Лонгинов В.В. Динамика береговой зоны бесприливных морей. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 379 с.
4. Grant W.D., Madsen O.S. Movable bed roughness in unsteady oscillatory flow // *J. Geophys. Res.* 1982. V. 87(C1). P. 469–481.
5. Grüne J., Kos'yan R., Oumeraci H. et al. Large-Scale Laboratory Modeling of Suspended Sand Concentration Fluctuations under Irregular Waves // *Coastal Sediments 07*, ASCE, New Orleans, 2007. P. 211–219.
6. Hasselmann K., Barnett T., Bouws E. et al. Measurements of Wind-Wave Growth and Swell Decay during the Joing North Sea Wave Project (JONSWAP) // *Deutsche Hydrograph. Zeit., Ergänzungsheft Reihe*, 1973, A(8⁰), № 12. P. 95.
7. Kos'yan R., Grüne J., Divinskiy B. et al. The dependence of suspended sand concentration on the degree of storm development // 32nd International Conference on Coastal Engineering ICCE2010, 30 June–5 July 2010. Shanghai, China. P. 94–101.
8. Thorne P.D., Hanes D.M. A review of acoustic measurement of small-scale sediment processes // *Continental Shelf Research*. 2002. V. 22. P. 603–632.
9. Wiberg P.L., Harris C.K. Ripple geometry in wave-dominated environments // *J. Geophys. Res.* 1994. V. 99 (C1). P. 775–789.

The Influence of Wave Spectrum Form on the Bottom Sediment Dynamics

B. V. Divinsky, R. D. Kos'yan, J. Gruene

The wave spectrum form influence on the regularities of the bottom sediment suspension and bed ripples formation is described in this paper. It is shown that the profile of the sediment concentration and the possible partial deformation of bottom ripples are related to the peculiarities of the frequency distribution of energy in the wave spectrum (at the constant energy of the process).