

УДК 551.35, 551.46

ВЗВЕШИВАНИЕ ДОННЫХ ОСАДКОВ В УСЛОВИЯХ НЕРЕГУЛЯРНОГО ПОВЕРХНОСТНОГО ВОЛНЕНИЯ

© 2019 г. Б. В. Дивинский*, Р. Д. Косьян**

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

*e-mail: divin@ocean.ru

** e-mail: rkosyan@hotmail.com

Поступила в редакцию 31.07.2017 г.

После доработки 01.11.2018 г.

Принята к публикации 05.02.2019 г.

Статья посвящена исследованию влияния формы спектра нерегулярного поверхностного волнения на закономерности взвешивания донного материала. Проанализированы особенности распределения по частотам энергии синхронных колебаний рядов скорости водного потока и концентрации взвешенных частиц. Показано, что при широком спектре проходящего волнения максимальная взаимная энергия синхронных колебаний рядов скорости и концентраций может проявляться и на низких, и на высоких частотах. При узком спектре синхронные колебания доминируют в области основной энергонесущей частоты. Также показано, что геометрическая форма групп волн оказывает непосредственное влияние на интенсивность взвешивания донного материала. В группах волн с симметричным профилем взвешивание донных отложений происходит более интенсивно по сравнению с группами с выраженной пространственной асимметрией.

Ключевые слова: донные осадки, поверхностные волны, скорость водного потока

DOI: 10.31857/S0030-1574594533-543

ВВЕДЕНИЕ

Динамика донных осадков играет ключевую роль в формировании морфологических особенностей прибрежной зоны. В процессах взвешивания и транспорта донных осадков определяющая роль отводится течениям и поверхностному волнению. Важным свойством реального поверхностного волнения является его нерегулярность. Спектр поверхностного волнения описывается, как правило, JONSWAP — аппроксимацией, наиболее употребляемой в инженерной практике. Спектр JONSWAP получен в 1973 г. по результатам натурных наблюдений в Северном море [6] и записывается в виде:

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

где α — постоянная Филлипса ($\alpha = 0.0081$), f_m — частота максимума спектра, $\sigma \approx 0.07$ при $f \leq f_m$, $\sigma \approx 0.09$ при $f > f_m$, g — ускорение свободного падения.

Этот же спектр, представленный в параметризованной форме:

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

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

γ — коэффициент пиковатости, h_s — значительная высота волн.

Таким образом, спектр JONSWAP определяется тремя основными параметрами: значительной высотой волны h_s , частотой пика спектра f_m и параметром пиковатости γ . В исследованиях динамики донного материала параметр γ , как правило, принимается равным 3.3, что, согласно [6], всего лишь соответствует средним условиям волнообразования. Между тем параметр γ контролирует форму спектров и характеризует в значительной мере частотное распределение волновой энергии. В качестве иллюстрации приведем спектры поверхностного волнения и их JONSWAP-аппроксимации (рис. 1). Экспериментальные спектры получены на Черном море волнографом Datawell Waverider [3].

Во всех представленных случаях значительная высота волн была приблизительно равна 2.6 м,

частота пика спектра — 0.15 Гц. Спектральные плотности энергий у них практически равны, однако существуют различия в распределении энергии волн по частотам. Как следует из рис. 1, с ростом параметра γ происходит сосредоточение волновой энергии в области основного максимума спектра нерегулярного волнения.

Возникает закономерный вопрос: насколько этот факт отражается на закономерностях взвешивания и перераспределения донного материала? Вопрос о возможности такого влияния впервые был поставлен в статьях [5, 7]. В указанных работах основное внимание уделено вопросам технической реализации экспериментов, а также изложены некоторые предварительные результаты. В частности, исследована роль низкочастотных колебаний скорости потока в формировании поля взвеси. В статье [1] проведен анализ влияния особенностей спектрального состава волнения на формирование донных микроформ (рифелей). Показано, что концентрация волновой энергии в зоне основного максимума спектра, показателем чего является увеличение параметра пиковатости спектра γ , способствует росту линейных размеров донных микроформ.

Основной целью настоящей работы является продолжение исследования процессов взвешивания и перераспределения донного материала под воздействием нерегулярного поверхностного волнения с постоянными интегральными характеристиками (одинаковые значения значительной высоты волн и частоты пика спектра) и переменным частотным распределением спектральной энергии волн (изменяемое значение параметра γ). Основное внимание уделено исследованию закономерностей взвешивания в частотной области, а также в условиях группового строения нерегулярного волнения.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

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. Несмотря на некоторую условность, эксперименты, поставленные в лабораторных условиях, позволяют задавать, контролировать и воспроизводить интересующие исследователя параметры внешней гидродинамической среды.

Большой волновой канал 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 характеристиками. В условиях проведенного 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 (рис. 2). Параметры поверхностного волнения фиксировались струнным волнографом; частота опроса датчика составила 40 Гц. На расстоянии 0.75 м от начального положения твердого дна располагались акустические датчики обратного рассеивания (ABS) Aquascap 1000; в качестве рабочих использовались частоты 1.00, 2.00 и 3.84 МГц. Горизонтальные компоненты (U , V) скорости водного потока определялись с помощью электромагнитного измерителя, расположенного на расстоянии 0.2 м от дна.

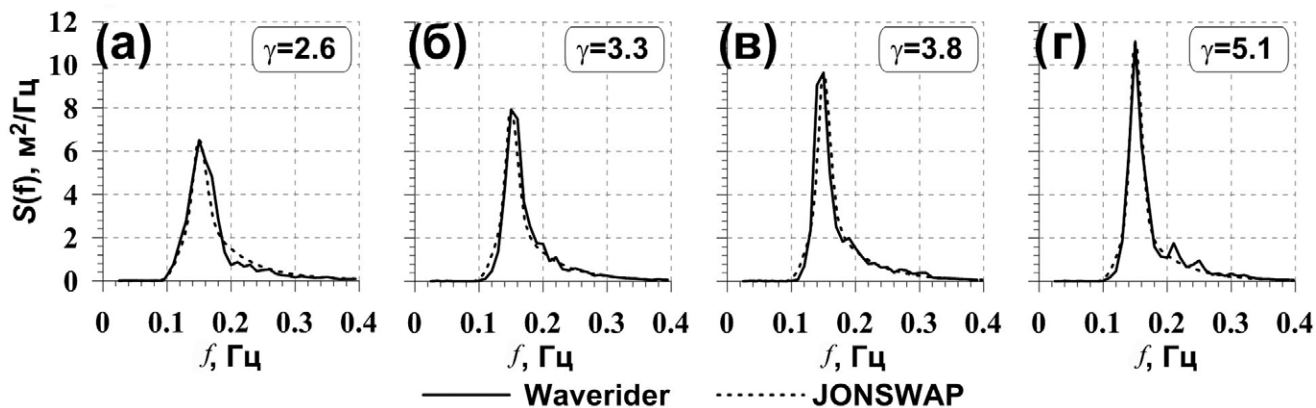


Рис. 1. Экспериментальные спектры ветрового волнения (сплошная линия) и их аппроксимации спектром JONSWAP (пунктир). Пояснения см. в тексте.

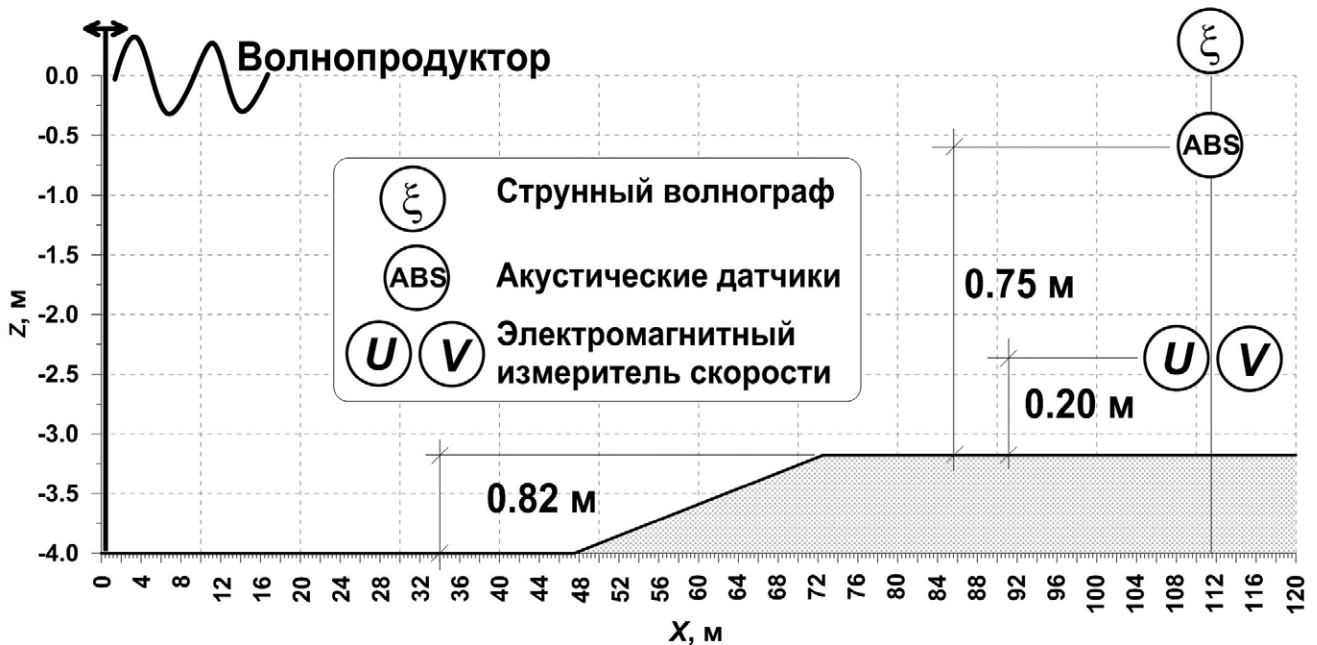


Рис. 2. Схема эксперимента. ξ — струнный волнограф.

В качестве исходного нерегулярного волнового поля задавались последовательности возвышений свободной поверхности, обладающие JONSWAP-спектрами с заданными характеристиками и случайными фазами. В нашем случае серии экспериментов соответствовали перебору спектральных параметров исходного волнового поля:

- значительная высота волны $h_s = 0.8, 1.0, 1.2$ м;
- частота пика спектра $f_m = 0.2$ Гц;
- 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 за динамикой взвешенных наносов под воздействием нерегулярного поверхностного волнения. Длина каждой серии — 1980 с (33 мин) с периодом дискретизации 0.25 с.

Результатом обработки полученных данных явились синхронные ряды:

- возвышений свободной поверхности;
- продольного U и поперечного V компонентов горизонтальной скорости водного потока;
- концентраций взвешенных наносов и средних диаметров частиц.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Закономерности взвешивания донного материала в частотной области. Полученные синхронные временные ряды концентраций взвешенного материала и скорости водного потока предо-

ставляют возможность оценить их взаимосвязи в частотной области. Для анализа выбраны ряды придонных концентраций взвешенных наносов, измеренных на уровне 0.03 м от текущего дна. Датчик скорости, напомним, располагался на расстоянии 0.20 м от дна.

Для выявления особенностей процессов, связанных с временной структурой рядов скорости воды и концентрации частиц, воспользуемся хорошо известным методом Уэлча. Все дальнейшие вычисления по периодограммному методу спектрального анализа Уэлча проведены в среде Matlab.

Для изучения взаимосвязи колебаний скорости и концентраций в частотной области воспользуемся функцией взаимной спектральной плотности, а именно коспектром, т.е. действительной частью кросс-периодограммы $Co(f)$. Коспектр характеризует распределение по частотам энергии синхронных колебаний и представляет собой меру взаимной энергии двух временных рядов (процессов).

Пример обработки рядов скорости и концентраций для экспериментальной серии с исходными параметрами ($h_s = 1.2$ м, $f_m = 0.2$ Гц, $\gamma = 8.0$) приведен на рис. 3.

Распределение спектральной плотности флуктуаций нормального берега компонента придонной скорости воды S_U характеризуются наличием двух пиков: основного на частоте 0.2 Гц и низкочастотного (0.031 Гц), связанного с инфрагравитационными волнами (рис. 3а). В спектре концентрации взвешенных твердых

частиц S_{SSC} четко проявляется три локальных максимума (рис. 3б): на основной частоте пика спектра волн (0.2 Гц), ее удвоенной частоте (0.4 Гц), поскольку взвешивание наносов происходит дважды за период волны [8], а также низкочастотный пик (0.031 Гц). Максимальные значения коспектров колебаний скорости воды и концентраций наблюдаются на двух частотах — 0.2 Гц и 0.031 Гц (рис. 3в). В нашем случае практически во всем частотном диапазоне песок перемещается от берега.

Для дальнейшего анализа (и сравнения) особенностей взвешивания осадков при различных исходных условиях определим некоторые параметры, характеризующие энергетические свойства процессов:

- энергии низкочастотных $E_U(\text{low})$, $E_{SSC}(\text{low})$ и высокочастотных $E_U(\text{high})$, $E_{SSC}(\text{high})$ колебаний скорости воды и концентраций взвешенных наносов (рис. 3а, 3б). Разделение спектра на низко- и высокочастотные составляющие производится по спектру скорости. В приведенном примере на рис. 3 разделяющая частота составляет 0.1 Гц. Энергия высокочастотных флуктуаций концентрации $E_{SSC}(\text{high})$ включает в себя весь диапазон от частоты разделения, поскольку спектральный пик на удвоенной частоте максимума отчетливо проявляется не для всех серий наблюдений;
- величины коспектров (рис. 3в), соответствующие двум частотам — основному пику скорости $Co(f_{\text{high}})$ и низкочастотному максимуму $Co(f_{\text{low}})$. Результаты обработки всех серий наблюдений представлены на рис. 4 и включают в себя зависимости от параметра пиковатости:
- отношений энергий низко- и высокочастотных колебаний скорости воды (рис. 4а);

- отношений энергий низко- и высокочастотных колебаний придонной концентрации взвеси (рис. 4б);
- отношений абсолютных значений коспектров на низких и высоких частотах (рис. 4в);
- значений коспектров на высоких частотах (рис. 4г).

Уточним, что параметр пиковатости γ_{calc} на рис. 4 — не исходный, задаваемый на волнопродукторе, а реально наблюдаемый, вычисленный в точке измерений.

Как следует из рис. 4а, с ростом параметра γ наблюдается уменьшение отношения $E_U(\text{low})/E_U(\text{high})$, причем тем интенсивнее, чем больше значительная высота волнения. В случае узкого спектра (большие значения γ) энергия низкочастотных колебаний скорости $E_U(\text{low})$ составляет 5–6% от энергии высокочастотных составляющих $E_U(\text{high})$, при этом соотношение практически не зависит от величин h_s проходящего волнения. В целом, с ростом γ основная энергия колебаний скорости потока сосредотачивается в диапазоне высоких частот.

На закономерности взвешивания донного материала оказывает влияние множество гидро- и литодинамических факторов. По этой причине зависимость отношения $E_{SSC}(\text{low})/E_{SSC}(\text{high})$ от параметра пиковатости не может быть, по сути, однозначной. При относительно слабом волнении ($h_s = 0.8$ м) отношение $E_{SSC}(\text{low})/E_{SSC}(\text{high})$ является довольно стабильным, независимо от параметра пиковатости спектра (рис. 4б). С ростом и параметра пиковатости, и значительных высот волн вклад низкочастотных колебаний, связанных с групповой структурой волнения, падает, и при $\gamma > 5$ энергия низкочастотных колебаний концентрации взвешенных частиц составляет 30–50% от энергии

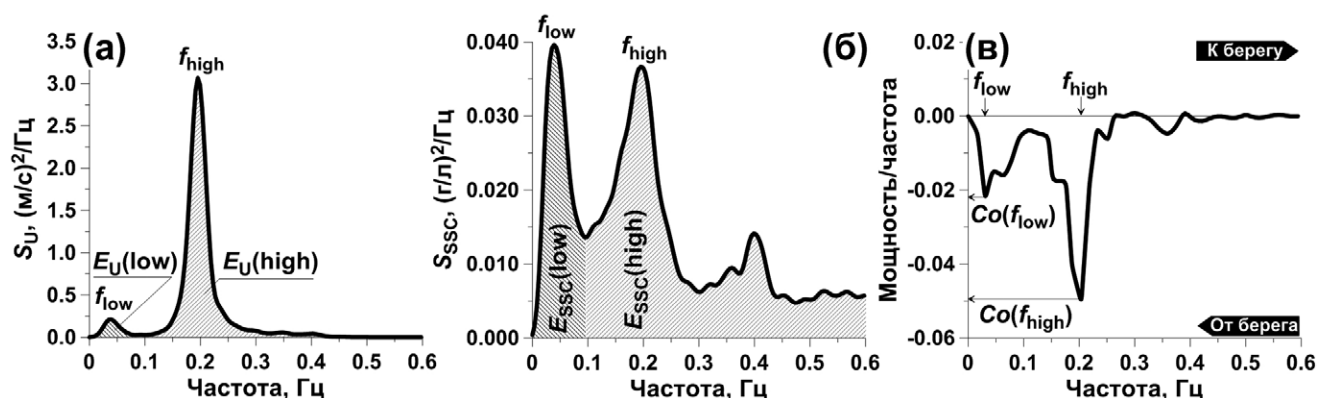


Рис. 3. Автоспектры U -компонента скорости (а) и концентрации взвешенных наносов (б), а также их коспектр (в). Параметры исходного волнения: $h_s = 1.2$ м, $f_m = 0.2$ Hz, $\gamma = 8.0$.

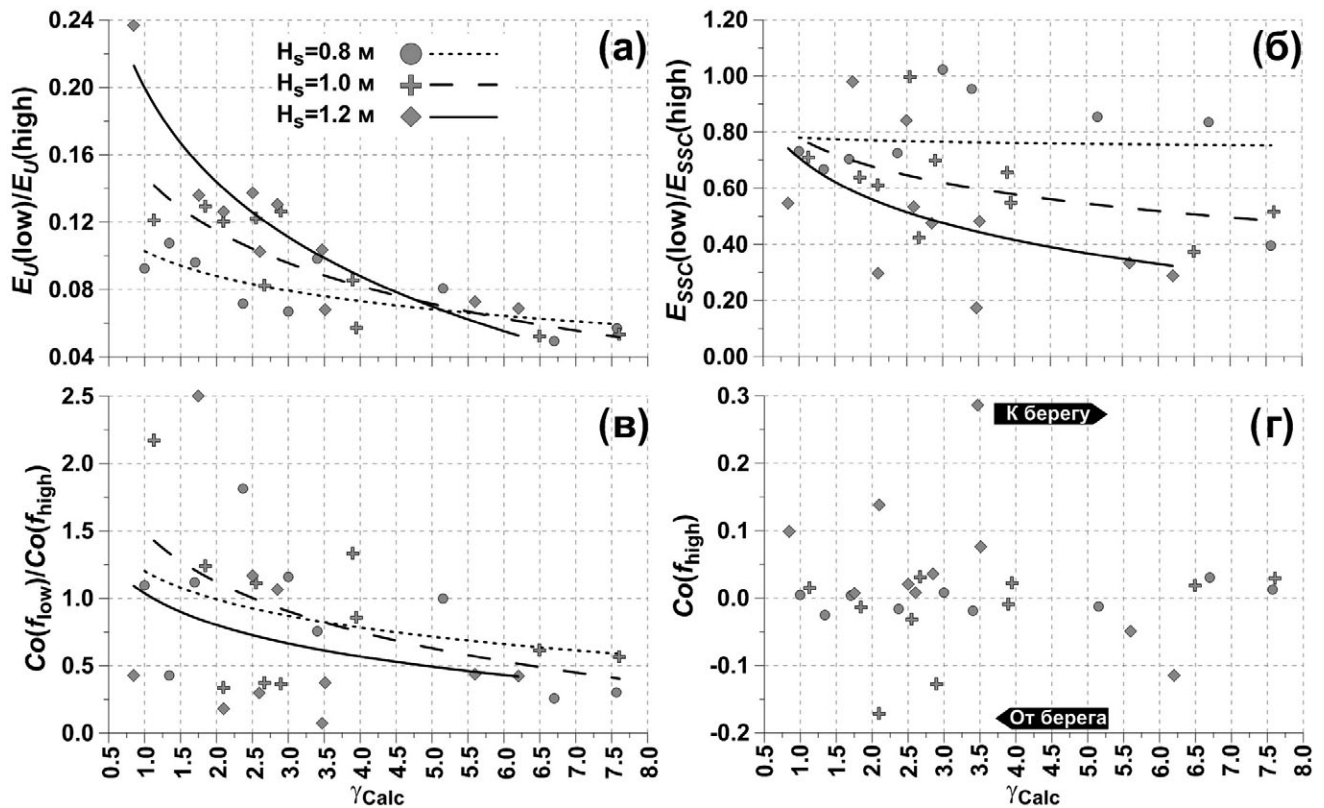


Рис. 4. Взаимосвязь спектральных характеристик синхронных рядов скорости и концентраций с параметрами пиковатости спектра поверхностного волнения. Пояснения см. в тексте.

колебаний высокочастотного диапазона. Отметим также, что независимо от величин значительных высот волн при $\gamma < 3.5$ энергии колебаний флуктуаций концентрации на низких и высоких частотах могут быть сопоставимы (отношение $E_{SSC}(\text{low})/E_{SSC}(\text{high}) \sim 1$).

При $\gamma < 5$ максимальная взаимная энергия синхронных колебаний рядов скорости и концентраций может проявляться и на низких, и на высоких частотах (рис. 4в). Об этом свидетельствует отношение $Co(f_{\text{low}})/Co(f_{\text{high}})$, которое может быть как больше, так и меньше единицы. Доминирование синхронных колебаний в области основного максимума спектра заметно при $\gamma > 5$, при этом $Co(f_{\text{low}})/Co(f_{\text{high}}) \sim 0.5$.

Как уже было отмечено, знак коспектра рядов скорости потока и концентраций взвешенных наносов определяет направление переноса донного материала. Для всех серий наблюдений низкочастотные колебания, связанные с групповой структурой волнения, имеют отрицательный знак коспектра, что указывает на перемещение песка от берега на низких частотах. Для колебаний, связанных с областью основного

максимума спектра, однозначных зависимостей знака коспектра от параметра пиковатости не обнаружено (рис. 4г). Очевидно, это может быть связано с особенностями формирования локального микрорельефа донной поверхности в каждом конкретном случае.

Таким образом, при равных интегральных параметрах волнения (высота и период волн) особенности спектрального строения поверхностного волнения определяют доминирование тех или иных физических масштабов (одиночных волн или групп) в процессах взвешивания донных осадков. С ростом параметра пиковатости уменьшается энергия флуктуаций концентрации на низких частотах, концентрируясь, таким образом, в области основного максимума спектра волнения.

Группы волн. Влияние групповой структуры волнения на формирование поля концентрации взвешенных наносов исследовалось ранее рядом авторов (см., например, [4, 9, 10, 11]). Не умаляя научной составляющей указанных работ, отметим важную деталь, их объединяющую: выводы, полученные авторами, базируются на ограни-

ченных или крайне выборочных данных. В условиях нерегулярного поверхностного волнения более полную картину могут предоставить результаты статистической обработки большого числа параметров групп волн и сопутствующих характеристик взвешенных твердых частиц.

Выделим основные характеристики групп волн, оказывающие влияние на картину взвешивания донного материала: высоты индивидуальных волн, образующих группу; положение наибольшей волны в пределах группы; количество волн в группе; длина группы.

Положение наибольшей волны определяет пространственную асимметрию группы. По этому признаку можно выделить три типа групп: (I) — положительная горизонтальная асимметрия (максимальная волна в начале группы);

(II) — отрицательная горизонтальная асимметрия (максимальная волна в конце группы); (III) — симметричная (максимальная волна в середине группы).

На рис. 5 представлены характерные профили возвышений свободной поверхности для выделенных типов групп волн, а также вертикальные распределения концентраций взвешенных частиц и их средних диаметров.

Анализ закономерностей взвешивания под воздействием групп разных типов сталкивается с проблемой корректности прямого сравнения групп, поскольку кроме пространственной асимметрии группы могут обладать разными характеристиками (количеством волн в группах,

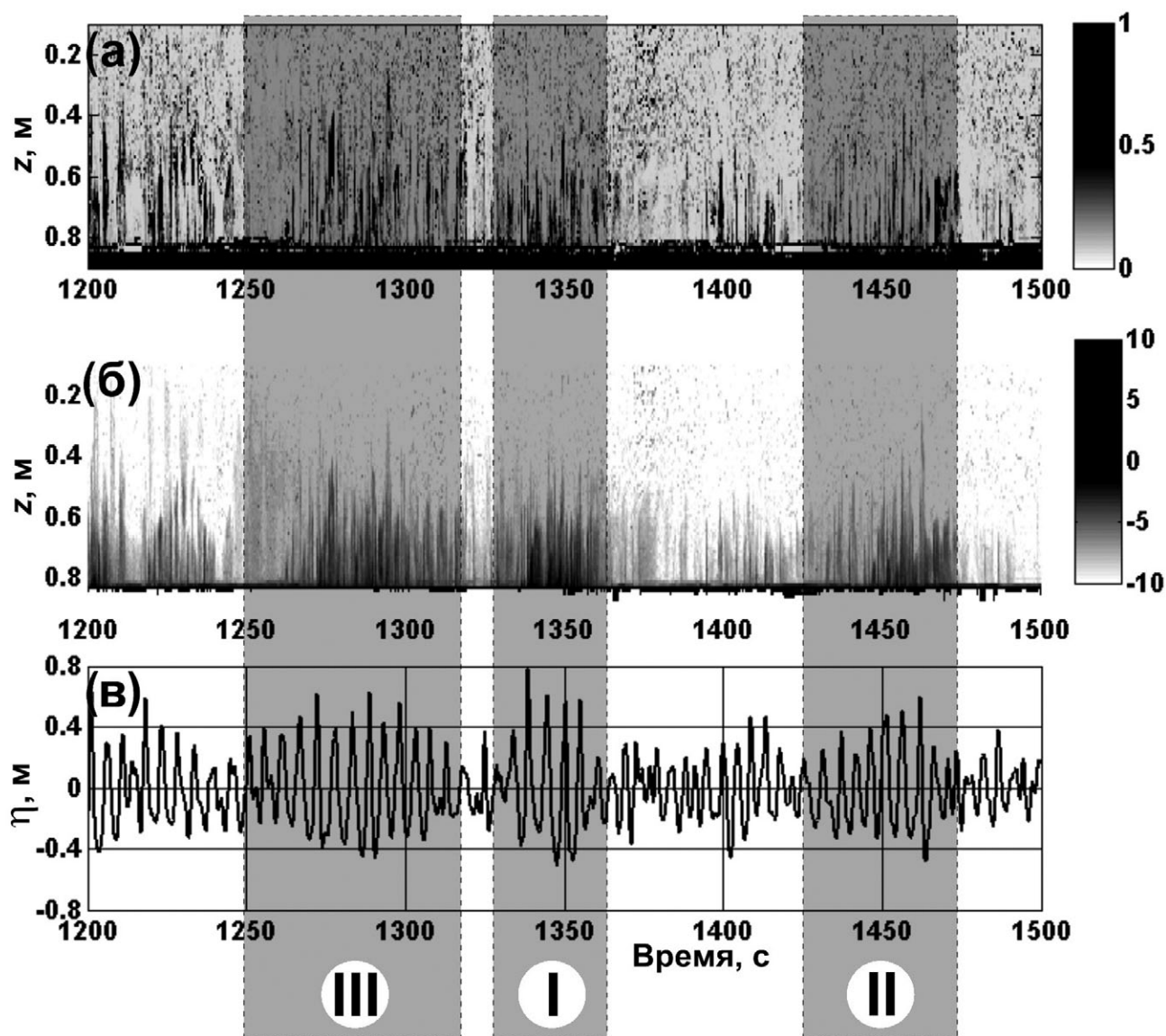


Рис. 5. Типы групп волн: (а) средние диаметры частиц, мм; (б) логарифм концентрации взвешенных наносов, г/л; (в) возвышение уровня, м.

длинами и др.) По этой причине введем в рассмотрение энергетическую волновую мощность группы как сумму мощностей отдельных волн, входящих в данную группу:

$$E = \frac{\rho g^2}{64\pi} \sum_i h_i^2 t_i \quad (\text{Вт/м}),$$

где ρ — плотность воды, h_i , t_i — высота и период индивидуальных волн, входящих в группу, i — число волн в группе.

Волновая мощность группы будет зависеть, таким образом, от высот и периодов отдельных волн, составляющих группу. Определим также поток взвешенных наносов как произведение концентрации взвешенного материала и горизонтальной компоненты скорости водного потока.

В таблице приведены средние характеристики выделенных типов групп волн.

За все время эксперимента выделено 1009 групп волн. Наиболее распространенная — симметричная группа III (65% случаев). Реже всего встречается группа II (8%). Суммарный за группу поток взвешенных наносов в средней группе III типа на 30% больше, чем во второй, и на 25% больше, чем в первой. На рис. 6 представлены суммарные за каждую серию наблюдений волновые мощности (рис. 6а), а также вклад в процентах в суммарную мощность групп волн различных типов (рис. 6б).

Промежутки между группами волн внутри одной серии для простоты трактуются как «нерегулярное» волнение. Как следует из рис. 6, преобладание групп волн III типа возрастает с ростом параметра γ поверхностного волнения. Пропуски на рис. 6, соответствующие сериям ($h_s = 0.8$ м; $\gamma = 3.0$) и ($h_s = 1.2$ м; $\gamma = 3.3$), связаны с неудовлетворительным качеством исходных данных. Обратим внимание, что суммарная мощность волнения

для серий с одинаковой исходной значительной высотой волн практически не меняется. К примеру, для $h_s = 0.8$ м и $\gamma = 1.0 \dots 9.9$ суммарная мощность волнения каждой серии составляет порядка 300 кВт/м. При этом для серии ($h_s = 0.8$ м; $\gamma = 1.0$) лишь около половины из всех волн объединены в группы, а для серии ($h_s = 0.8$ м; $\gamma = 9.9$) этот показатель составляет уже 70%.

Современные модели транспорта донных осадков оперируют, как правило, осредненными потоками взвешенных наносов, показывающими, сколько взвешенного осадка переносится за единицу времени. В этой связи оценим влияние энергетических характеристик групп волн на мгновенный поток взвешенных наносов. На рис. 7 представлены зависимости осредненных (за группу) мгновенных потоков взвешенных наносов от суммарных волновых мощностей групп волн.

Как следует из рис. 7, при слабом волнении ($h_s = 0.8$ м) средние мгновенные потоки взвешенных наносов не сильно зависят от волновой мощности групп. Кроме того, минимальны различия между типами групп. При $h_s = 1.2$ м средние потоки частиц увеличиваются с ростом мощности групп. Из рис. 7 (в) может следовать вывод о возможных различиях между типами групп волн, но будем иметь в виду разную статистическую обеспеченность процедур осреднения, поскольку группы волн II типа практически не встречаются среди групп, обладающих суммарной мощностью 16 и более кВт/м.

Вообще корректное сравнение закономерностей взвешивания между типами групп волн возможно лишь при полной идентичности сравниваемых групп. Будем полагать группы идентичными, если они обладают одинаковым числом волн N , равной продолжительностью L и одинаковой суммарной волновой мощно-

Таблица. Средние характеристики выделенных типов групп волн

Тип группы волн	Количество групп волн за все время эксперимента	Среднее число волн в группе	Средняя длина группы, с	Средняя макс. высота волн в группе, м	Средняя волновая мощность группы, кВт/м	Средняя суммарная волновая мощность за группу, кВт/м	Средний поток взвешенных наносов в группе, кг/м ² с	Средний суммарный поток взвешенных наносов за группу, кг/м ²
I	265	5.5	24.6	1.16	1.49	8.08	0.00712	0.176
II	81	5.5	23.7	1.13	1.26	6.90	0.00683	0.166
III	663	6.8	30.5	1.18	1.58	10.56	0.00773	0.235
Всего	1009	6.3	28.4	1.17	1.53	9.61	0.00749	0.214

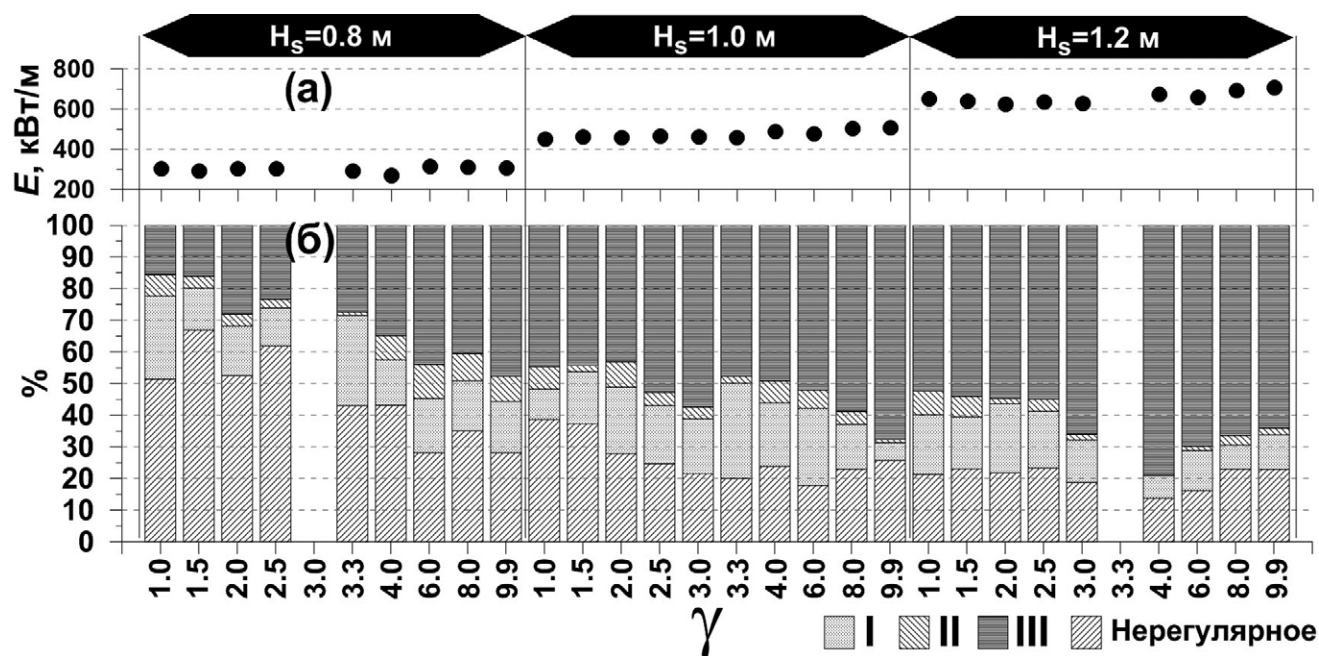


Рис. 6. Энергетические характеристики серий наблюдений. Пояснения см. в тексте.

стью E . Кроме того, число этих идентичных групп должно быть достаточным для статистических оценок. К примеру, среди 1009 групп волн обнаружено 20 групп волн с одинаковыми параметрами: $N = 4-5$, $L = 18-19$ с, $E = 5$ кВт/м. 6 из этих 20 групп относятся к группе I, 5 — к группе II, 9 — к группе III. Выберем еще несколько идентичных по этим показателям групп волн. За период каждой группы осредним по времени вертикальные профили потоков взвешенных наносов (рис. 8).

Как видно из рис. 8, в группах волн с симметричным профилем взвешивание донных отложений происходит более интенсивно по сравнению с группами с выраженной пространственной асимметрией. В абсолютных величинах поток взвешенных наносов внутри групп III типа может на порядок превосходить поток в группах I или II.

Несмотря на все разнообразие групп волн, предоставляемых нерегулярным волнением, обобщим некоторые закономерности:

- начальный процесс вовлечения в пределах погранслоя происходит на масштабах одиночных волн, перераспределение в толще вод — в масштабе групп волн;
- закономерности взвешивания внутри группы в значительной степени определяются параметрами донной шероховатости и наличием (отсутствием) рифелей;

- в случае прохождения симметричной группы волн с одинаковыми характеристиками индивидуальных волн для первой и второй половин группы концентрация взвешенных наносов во второй половине группы всегда больше;
- возможны ситуации, когда следствием прохождения группы волн концентрация взвешенных наносов в волновом пограничном слое уменьшается. Этот механизм реализуется в случае перестройки донных микроформ, а именно стирания крутых рифелей и уменьшения эффекта вихреобразования в подветренной части рифелей [2].

В целом, взвешивание донного материала под воздействием групп волн характеризуется комплексным характером и определяется сочетанием гидро- и литодинамических факторов: мощностью волнения, последовательностью волн в группе, размером и устойчивостью форм рельефа дна.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе продолжены исследования процессов взвешивания и перераспределения донного материала под воздействием нерегулярного поверхностного волнения с постоянными интегральными характеристиками (одинаковые значения значительной высоты волн и частоты пика спектра) и переменным частотным распределением спектральной энергии волн (изменяемое значение параметра γ).

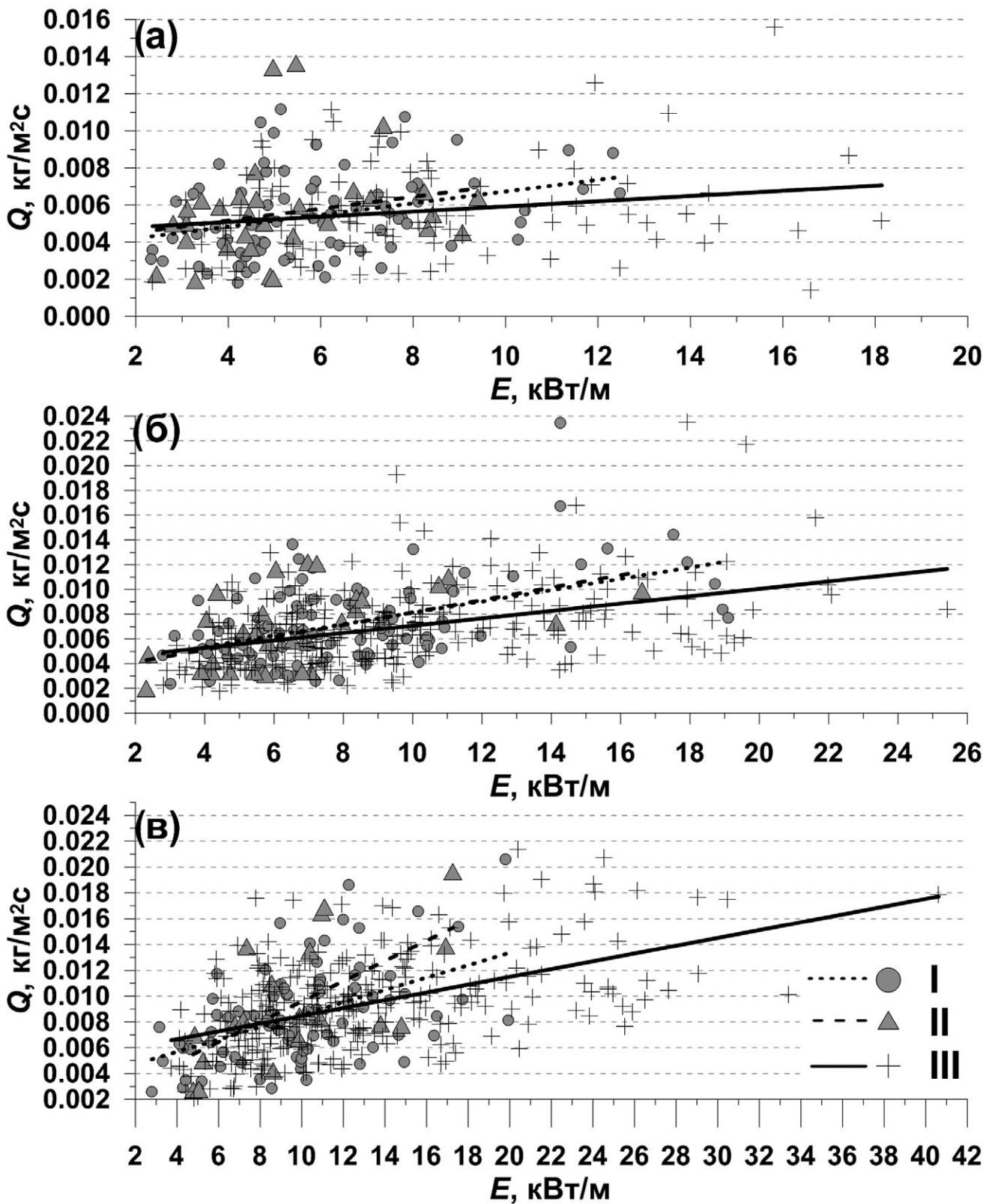


Рис. 7. Средние мгновенные потоки взвешенных наносов (Q , $\text{кг/м}^2\cdot\text{с}$) в зависимости от суммарной мощности групп волн: (а) $h_s = 0.8$ м, (б) $h_s = 1.0$ м, (в) $h_s = 1.2$ м.

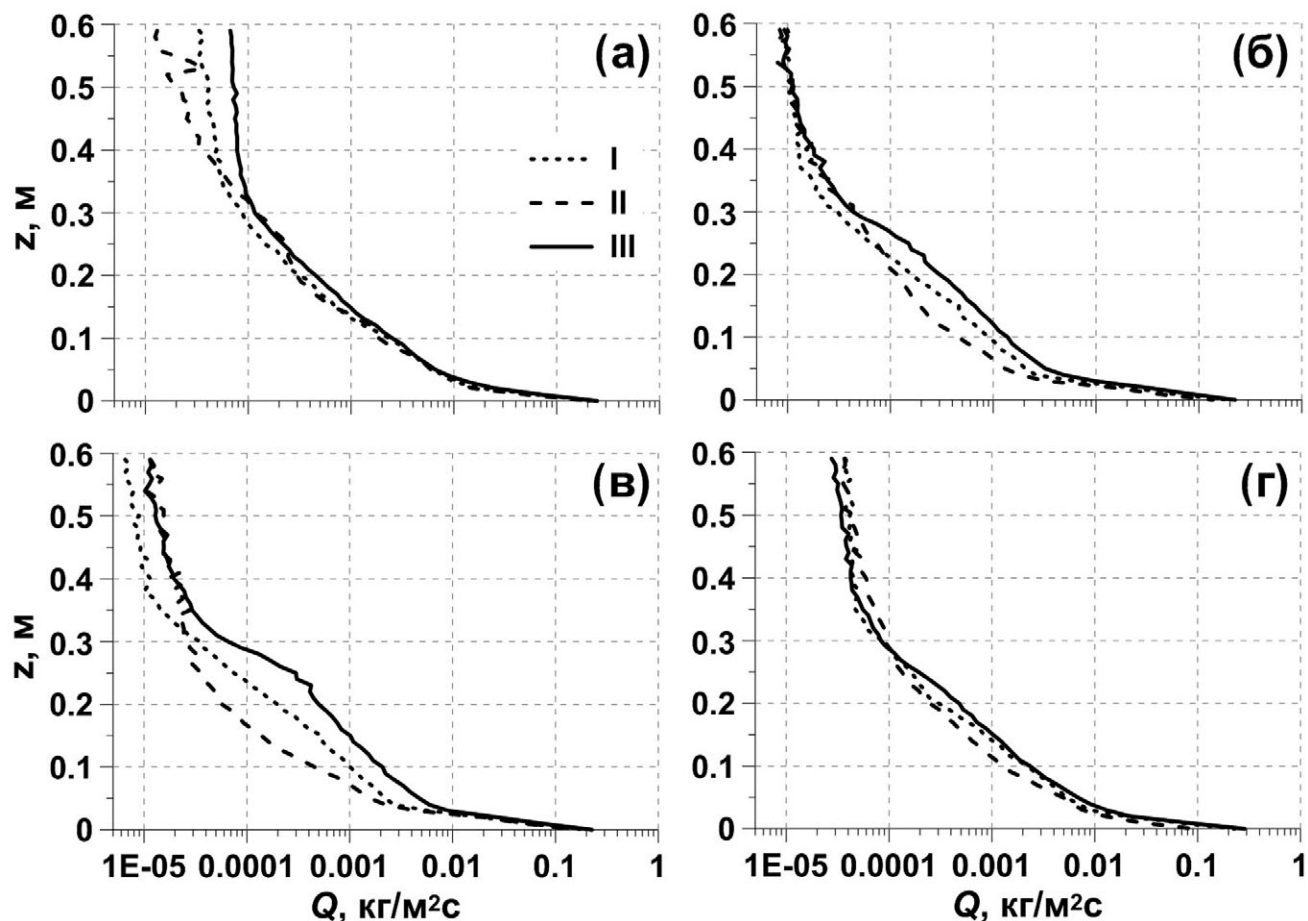


Рис. 8. Вертикальные профили потоков взвешенных наносов для разных типов групп волн. Параметры групп: (а) — $N = 4-5$, $L = 18-19$ с, $E = 5$ кВт/м; (б) — $N = 6-7$, $L = 25-26$ с, $E = 5$ кВт/м; (в) — $N = 7$, $L = 26-27$ с, $E = 5$ кВт/м; (г) — $N = 4-5$, $L = 21-22$ с, $E = 6$ кВт/м.

Основные выводы касаются особенностей взвешивания в частотной области, а также в условиях группового строения поверхностного волнения:

1. С ростом параметра пиковатости γ основная энергия колебаний скорости водного потока сосредотачивается в диапазоне высоких частот. Это приводит к тому, что с уменьшением ширины спектра (большие значения γ) энергия низкочастотных колебаний скорости составляет 5–6% от энергии высокочастотных составляющих (при $\gamma < 5$ — 10–15%). Указанные соотношения практически не зависят от величин h_s проходящего волнения.
2. При $\gamma > 5$ энергия низкочастотных колебаний концентрации взвешенных частиц составляет 30–50% от энергии колебаний высокочастотного диапазона; при $\gamma < 5$ характерной величиной этой доли является 70%.
3. При $\gamma < 5$ максимальная взаимная энергия синхронных колебаний рядов скорости и концентраций может проявляться и на низких, и на высоких частотах. При $\gamma > 5$ доминируют синхронные колебания в области основной энергонесущей частоты (0.2 Гц в нашем случае).
4. Для всех экспериментальных серий наблюдений низкочастотные колебания, связанные с групповой структурой волнения, имеют отрицательный знак коспектра. Это говорит о том, что перемещение песка на этих частотах происходит от берега. Для колебаний, связанных с областью основного максимума спектра, однозначных зависимостей знака коспектра от параметра пиковатости не обнаружено.
5. Геометрическая форма групп волн (их пространственная асимметрия относительно максимальной волны в группе) оказывает непосредственное влияние на интенсивность взвешивания донного материала. В группах

волн с симметричным профилем взвешивание донных отложений происходит более интенсивно по сравнению с группами с выраженной пространственной асимметрией. Кроме того, с ростом параметра γ спектра поверхностного волнения именно группы волн с симметричным профилем становятся доминирующими. Средний поток взвешенных наносов в характерной (средней) группе волн симметричного типа на 25–30% больше, чем в группах с выраженной пространственной асимметрией.

Дальнейшие исследования будут связаны с анализом фазовых спектров и спектров когерентности рядов скорости водного потока и концентрации взвешенных частиц, что позволит получить более качественную картину взвешивания в частотно-временной области.

Источник финансирования. Постановка задачи выполнена в рамках программы № 0149-2019-0014, анализ экспериментальных данных, математическое моделирование и вычислительная часть — при поддержке грантов РФФИ (проекты № 18-05-80035 и № 17-05-00183).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дивинский Б. В., Косьян Р. Д., Грюне И. Влияние формы спектра поверхностного волнения на динамику донных осадков // *Океанология*. 2014. Т. 54. № 2. С. 149-160.
2. Косьян Р. Д., Пыхов Н. В. Гидрогенное перемещение осадков в береговой зоне моря. М.: Наука, 1991. 280 с.
3. Divinsky B. V. Results of wave measurements around Gelendzhik / Eds. Kosyan R. D. et al. Dynamic processes of a coastal zone. Scientific World. Moscow, 2003. P. 70-91.
4. Dohmen-Janssen C., Hanes D. Sheet flow and suspended sediment due to wave groups in a large wave flume // *Continental Shelf Res.* 2005. V. 25. P. 333-347. doi:10.1016/j.csr.2004.10.009.
5. Grüne J., Kos'yan R., Oumeraci et al. Large-Scale Laboratory Modeling of Suspended Sand Concentration Fluctuations under Irregular Waves // *Coastal Sediments 07*, ASCE, New Orleans, 2007.
6. Hasselmann et al. Measurements of Wind-Wave Growth and Swell Decay During the Joing NorthSea Wave Project (JONSWAP) // *Deutsches Hydrograph. Inst., Reihe*, 1973, A (8°), No. 12.
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.
8. Kos'yan R., Kunz H., Kuznetsov S. et al. Physical regularities of suspended sand concentration and transport under irregular waves based on field data // *Die Küste*. 1999. V.64. P. 161-200.
9. Murray R., Hodgson D., Thorne P. Wave groups and sediment resuspension processes over evolving sandy bedforms // *Continental Shelf Res.* 2012. V. 46. P. 16-30. doi:10.1016/j.csr.2012.02.011.
10. Vincent C. E., Hanes D. The accumulation and decay of near-bed suspended sand concentration due to waves and wave groups // *Continental Shelf Res.* 2002. V. 22. P.1987-2000.
11. Williams J. J., Rose C. P., Thorne P. D. Role of wave groups in resuspension of sandy sediments // *Marine Geology*. 2002. V. 183. P. 17-29.

THE BOTTOM SEDIMENT SUSPENSION UNDER IRREGULAR SURFACE WAVE

© 2019 B. V. Divinsky*, R. D. Kosyan**

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*e-mail: divin@ocean.ru

** e-mail: rkosyan@hotmail.com

Received July 31, 2017

Revised version received November 01.2018

After revision February 05, 2019

The paper is devoted to the study of the of the maximum mutual energy influence of the irregular surface wave spectrum shape on the bottom sediment suspension. Features of the energy frequency distribution of synchronous fluctuations of the series of water flow velocity and concentration of suspended particles are analyzed. It is shown, that in a wide range of passing waves the maximum mutual energy of the synchronous oscillation velocities spectrum and concentrations may occur at low and at high frequencies. In the narrow spectrum of synchronous fluctuations, the maximum mutual energy dominates in the area of basic energy frequency. It is, also, shown, that the geometric shape of the wave groups has a direct impact on the intensity of the suspension. In groups of waves with a symmetrical profile, suspension is more intense compared to groups with a pronounced spatial asymmetry.

Keywords: bottom sediment, surface wave, the speed of the water flow