



ОКЕАНОЛОГИЯ



журналу **50** лет

<http://www.naukaran.ru>
<http://www.maik.ru>

НН
101
1000



“НАУКА”

УДК 551.35, 551.46

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПРОФИЛЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ВЗВЕСИ В УСЛОВИЯХ НЕРЕГУЛЯРНОГО ВОЛНЕНИЯ

© 2011 г. Б. В. Дивинский, Р. Д. Косьян, М. В. Крыленко, И. С. Подымов

Южное отделение Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Геленджик
e-mail: *divin@coastdyn.ru, rkosyan@hotmail.com, krylenko@mail.ru, podymov@coastdyn.ru*

Поступила в редакцию 29.03.2010 г., после доработки 14.10.2010 г.

На основе данных натуральных экспериментов, полученных в штормовых условиях, анализируются особенности изменчивости вертикального профиля концентрации взвешенных песчаных наносов в береговой зоне с дискретностью меньшей, чем период волны. Рассмотрены физические механизмы, определяющие процессы взвешивания и формирование различных типов вертикального распределения взвеси. Разработана математическая модель прогноза вертикального распределения взвешенных осадков под воздействием нерегулярного волнения, верифицированная по данным натуральных и лабораторных экспериментов.

ВВЕДЕНИЕ

Береговая зона является наиболее динамически активной частью океана. Прогнозы развития береговой зоны моря должны строиться на основе подробной достоверной информации о динамических процессах, протекающих в морской среде. Величина потоков осадков сильно влияет на скорость и интенсивность эрозионных процессов, трансформацию искусственных и естественных пляжей, на промышленные объекты и прибрежные экосистемы. Исследования по этим проблемам ведутся уже несколько десятков лет, но до сих пор нет надежных и физически обоснованных моделей для расчета потока наносов и деформаций подводного склона, что связано, в основном, с отсутствием четких знаний о механизмах и закономерностях взвешивания и перемещения песчаных наносов в натуральных условиях. Значительная часть наносов перемещается во взвешенном состоянии. Задачей настоящей работы является получение знаний о высокочастотной изменчивости поля концентрации взвешенных песчаных наносов и последующее моделирование.

Проведенные натурные и лабораторные эксперименты [6, 9, 10, 14] показали, что флуктуационная составляющая играет важную роль в формировании результирующего потока взвешенных наносов, а достоверные расчеты потоков наносов возможны только при учете всех факторов, влияющих на распределение взвеси.

В связи со сложностью проведения измерений в условиях реального моря количественная оценка и прогноз распределения взвешенных наносов в береговой зоне производятся преимущественно путем математического моделирования с использованием параметров, полученных в лабораторных условиях.

К настоящему времени построено сравнительно много моделей распределения осредненного по времени распределения концентрации взвешенных наносов в волновом потоке в береговой зоне. Очень подробный обзор подходов к построению моделей двухфазных потоков и конкретных моделей, отвечающих этим подходам, приведен в монографии С.М. Анцыферова и Р.Д. Косьяна [2]. Достаточно полный обзор подобных моделей, появившихся после появления монографии [2], сделан в работе [1]. Однако изучение концентрации взвешенных наносов с осреднением за интервалы, значительно превосходящие период волн, не позволяет понять механизмов взвешивания. Это особенно относится к случаю воздействия на дно нерегулярных волн. Подход, основанный на использовании средних по времени значений концентрации и скорости воды, не учитывает временную изменчивость потока взвешенных наносов, и результирующие расчеты могут значительно отличаться от реальных концентраций. Благодаря созданию оптических и акустических приборов для измерения мгновенных значений концентрации взвешенных наносов с дискретностью в десятые доли секунды, появилась возможность обнаружить и проанализировать особенности флуктуаций концентрации взвеси во всем диапазоне частот спектра нерегулярных волн. На основе полученных натуральных и лабораторных данных авторами разработана диффузионно-конвективная модель высокочастотной изменчивости вертикального профиля концентрации взвешенных песчаных наносов.

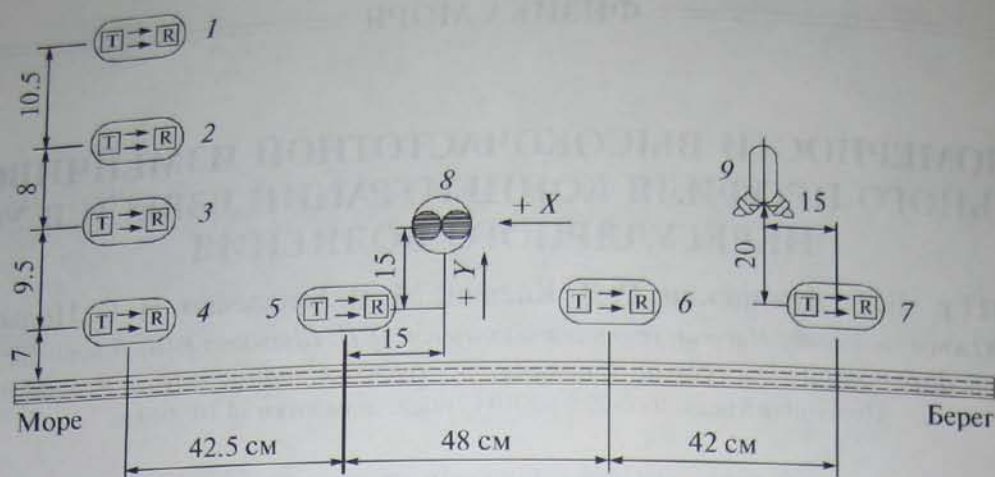


Рис. 1. Схема расположения приборов на мобильном носителе: 1–7 — оптические турбидиметры; 8 — двухкомпонентный (вертикальной и нормальной к берегу составляющих) электромагнитный измеритель скорости течения “Вектор”; 9 — акустический измеритель скорости течения “Новомихайловка-2003”.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Натурный эксперимент проводился в 2003 г. на российском участке берега Черного моря в районе пос. Новомихайловка. Подводный склон и пляж полигона сложены мелкозернистым песком с медианным диаметром 0.24 мм. Синхронная регистрация концентрации взвешенных наносов, составляющих скорости воды и возвышения свободной поверхности проводилась с эстакады длиной 300 м, на глубине от 0.5 до 1.2 м.

Измерения концентрации взвешенных наносов выполнялись 7 турбидиметрами, разнесенными по вертикали и горизонтали на горизонтах от 2 до 35 см от дна. Измерения нормальной к берегу, вдольбереговой и вертикальной составляющих скорости воды проводились при помощи электромагнитного измерителя скорости течения и трехкомпонентного акустического измерителя скорости течения “Век-

тор”. Частота опроса турбидиметров и электромагнитных датчиков — 18.2 Гц, акустического измерителя течений “Вектор” — 15.92 Гц. Для установки измерительной аппаратуры был изготовлен специальный мобильный носитель в виде разборной конструкции [3]. Схема размещения приборов представлена на рис. 1.

В результате были проведены высокочастотные синхронные измерения изменчивости концентрации взвешенных наносов и гидродинамических параметров в береговой зоне.

Лабораторный эксперимент был проведен сотрудниками Университета Восточной Англии (UEA) в Большом волновом канале Ганноверского университета в Германии [13]. Общая длина канала — 300 м, ширина — 5 м, глубина — 7 м (рис. 2). Песчаное дно канала сформировано хорошо сортированным песком со средним диаметром 0.24 мм. Волнение в канале генерируется при помощи системы подвижных волновых пластин с динамической обратной связью, снижающей влияние отраженных волн.

В течение эксперимента были проведены опыты с нерегулярными волнами, волнением с четкой групповой структурой и с монохроматическим волнением. В каждом опыте измерялись вертикальный профиль концентрации взвешенных наносов, две составляющие скорости воды и возвышение свободной поверхности. Измерители концентрации взвеси и составляющих скорости воды крепились к расположенной в середине канала раме. Измерение скорости воды производилось на расстоянии 10–15 см от дна при помощи доплеровского акустического измерителя (ADV). Струнные волнографы, фиксирующие колебания поверхности воды, размещались вдоль стены канала. Концентрация взвешенных наносов измерялась при помощи высокочастотного (2, 4, 5 МГц) акустического излучателя ABS [12], установленного на расстоянии 35–40 см



Рис. 2. Большой волновой канал в Ганновере.

Краткая характеристика экспериментальных данных

Эксперимент	Место проведения	Аппаратура	Полученные материалы
Натурный	пос. Новомихайловка Туапсинского р-на, Черное море	Турбидиметры Электромагнитный датчик течений Акустический измеритель течений "Вектор" Струнные волнографы	Концентрации взвешенных наносов на расстоянии 4, 7, 13 и 32 см от дна Возвышения свободной поверхности Составляющие вектора скорости течения Параметры донных микроформ Гранулометрический состав осадков
Лабораторный	Большой волновой канал Ганноверского университета, Германия	Допплеровский акустический измеритель течений Струнные волнографы Акустический излучатель ABS	Концентрации взвешенных наносов в 101 точке по вертикали через 5 мм Возвышения свободной поверхности Составляющие вектора скорости течения Параметры донных микроформ Гранулометрический состав осадков

от дна. Концентрация взвешенных наносов определялась в 101 точке по вертикали через 5 мм с частотой 3.133 Гц. Синхронные измерения концентрации взвешенного песка, компонент скорости воды и возвышений свободной поверхности выполнены в виде серий, каждая из которых содержит по 2050 отсчетов.

Основной целью проведенных экспериментальных исследований было получение синхронных записей наблюдений за параметрами водного потока и вертикальных профилей концентрации взвешенных частиц (таблица). Количество и качество экспериментальных данных позволило выполнить исследование и выявить некоторые закономерности взвешивания песчаных наносов штормовыми волнами в широком частотном диапазоне.

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЧИВОСТИ ВЕРТИКАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ВЗВЕСИ

При визуальных наблюдениях с эстакады процесса взвешивания песка под деформированными волнами было установлено, что вертикально вытянутые облака взвеси срываются с гребней рифелей при прохождении крупных волн и колеблются вблизи точки взвешивания в течение периода данной волны. Диаметр закругления верхней части облака взвеси, как правило, больше, чем диаметр закругления вблизи гребня рифеля. Время жизни облаков взвеси приблизительно совпадает с периодом волны.

Анализ записей пульсаций концентрации взвеси на близких ко дну горизонтах (2–5 см от дна) показал, что взвешивание осадков происходит в виде серий пиков концентрации длительностью от 1 до 5 секунд. Значения концентрации взвеси в моменты появления пиков резко увеличиваются в несколько раз. С увеличением расстояния от дна ча-

стота появления пиков концентрации и их величина снижаются.

Основываясь на экспериментальных данных, были построены последовательные по времени (с частотным интервалом 18.2 Гц) вертикальные профили концентрации взвешенных наносов. Установлено, что форма вертикального профиля концентрации взвешенных наносов очень быстро изменяется во времени и значительно отличается от среднего за запись вертикального распределения концентрации (рис. 3). На этом и последующих рисунках: c — концентрация взвешенных веществ, z — расстояние от дна. Анализируя форму профиля, величину и знак градиента функции распределения вертикальной концентрации взвешенных наносов было выделено четыре характерных типа вертикального распределения концентрации (рис. 4).

Вертикальный профиль, близкий к логарифмической кривой (рис. 4а), как правило, присутствует под небольшими волнами между группами больших волн, когда скорости воды невелики и в формировании поля взвешенных наносов преобладают диффузионные процессы. Во втором случае (рис. 4б) наблюдаются высокие значения концентрации взвеси в пределах 4 см от дна. Они резко убывают по направлению к поверхности. Градиент концентрации составляет до 1 г/л на см подъема. Взвешивание происходит только в придонном слое, и в вышележащие слои песок не распространяется. Третий тип (рис. 4в) вертикального распределения концентрации, когда вертикальный профиль приближается к линейному виду, наблюдается при прохождении крупных волн или при обрушении волны. Взвешенный песок может подниматься на высоту нескольких десятков сантиметров от дна. Максимальные вертикальные градиенты концентрации смещаются в слой 20–30 см от дна. На рисунке 4г показан четвертый вид вертикального распределения взвеси. Вертикальный профиль имеет форму ломаной линии. Концентрация взвешенных наносов в более

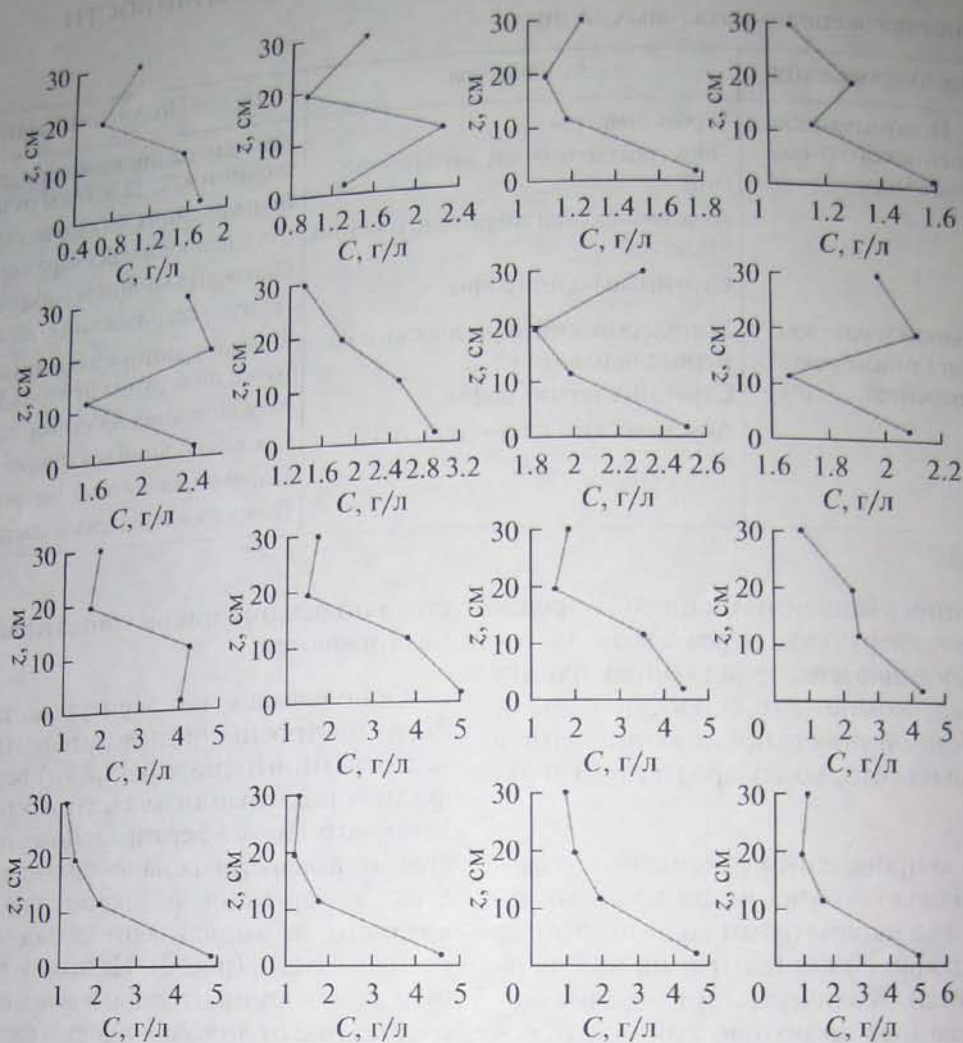


Рис. 3. Пример высокочастотной изменчивости вертикального профиля концентрации взвешенных наносов в течение секунды (частота 18.2 Гц). Натурный эксперимент "Новомихайловка-2003".

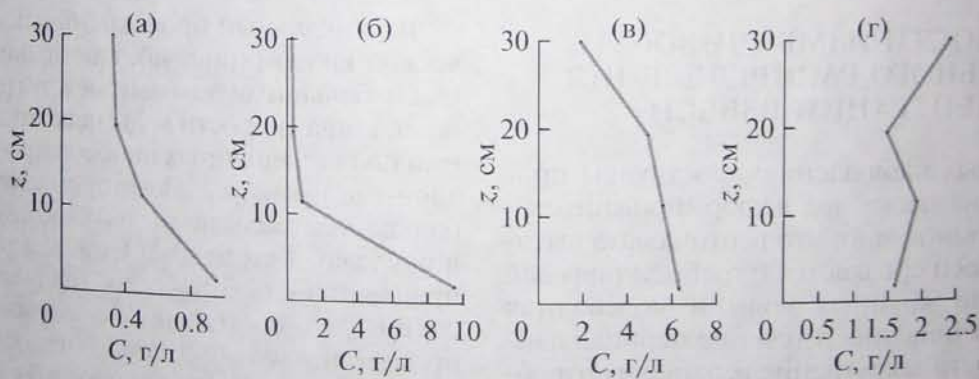


Рис. 4. Четыре характерных типа вертикального распределения концентрации взвеси.

удаленном от дна слое может быть выше, чем вблизи дна. Характерно чередование слоев с высокими и низкими значениями концентрации взвешенных наносов. Такой вид вертикального профиля концентрации преобладает после прохождения высоких волн, когда оторвавшееся от дна облако взвеси перемещается в потоке и постепенно разрушается.

На рис. 5 видно, что под ложбиной волны на протяжении секунды мимо датчиков проходит облако взвешенных наносов выше 15 см от дна. Выброса песка со дна в этот момент не происходит. Значительную роль в формировании такого вертикального распределения наносов играют адвективные процессы.

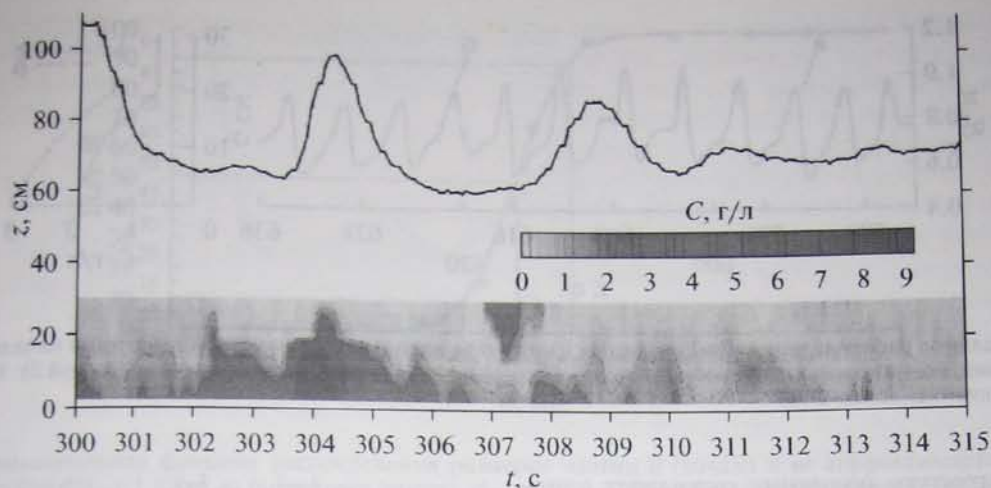


Рис. 5. Хронограмма временной изменчивости поля концентрации взвешенных наносов и положения свободной поверхности относительно дна (сплошная линия). Натурный эксперимент "Новомихайловка-2003".

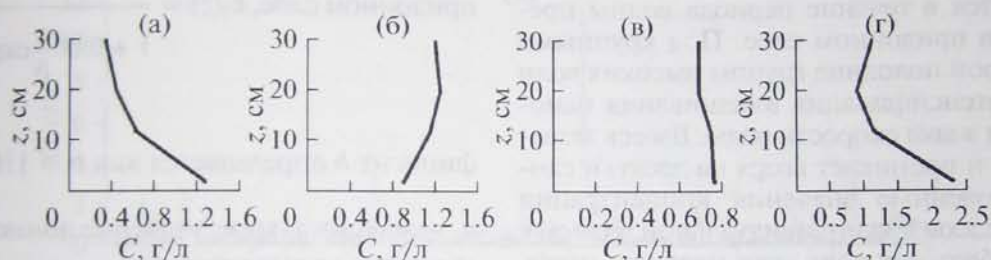


Рис. 6. Формирование выделенных типов вертикального профиля концентрации взвеси во время развития и разрушения пика концентрации в течение 10 с ((а) – начало пика, (б, в) – середина, (г) – окончание).

На рис. 6 показано изменение во времени профиля концентрации взвешенного песка во время быстрого развития пика концентрации взвеси: от вогнутого профиля в начале прохождения пика (рис. 6а), до выпуклого профиля в моменты наибольшей концентрации в пике (рис. 6б) с последующим более плавным снижением концентрации и выравниванием градиентов концентрации взвеси по вертикали (рис. 6в). Выпуклая форма вертикального профиля концентрации взвеси говорит о конвективном характере процессов взвешивания. Это подтверждает гипотезу Нильсена [11] о том, что взвешивание песка со дна и дальнейшее распределение в толще воды происходит за счет захвата и переноса материала формирующимися под проходящими волнами вихрями.

Однако имеющиеся данные не позволили установить однозначных зависимостей между формой вертикального профиля и механизмом его формирования. Как правило, при взвешивании и распределении песка по вертикали наблюдается совместное влияние конвективных, диффузионных и адвективных процессов.

Анализ экспериментальных данных показал, что групповая структура волнения также оказывает зна-

чительное воздействие на процесс формирования вертикального профиля под отдельными волнами внутри группы. Факт влияния групповой структуры волнения на формирование поля концентрации взвеси под отдельными волнами отмечался и ранее рядом авторов [13, 16].

Интенсификация процесса взвешивания наносов под группами больших волн происходит только после прохождения максимальных волн в группе и плавно затухает по достижению ложбины геометрической огибающей группы. Вследствие этого, вертикальное распределение концентрации взвеси под волнами одной высоты в группе может существенно отличаться в зависимости от положения волны в группе. На рис. 7 показан характерный случай возникновения пика концентрации взвеси после прохождения гребня группы волн. Представлены осредненные за период волны вертикальные профили распределения концентрации взвеси под двумя волнами приблизительно одной высоты. Видно, что средние значения концентрации взвеси под индивидуальной волной в конце группы больших волн в несколько раз больше, чем под такой же по высоте волной в начале группы.

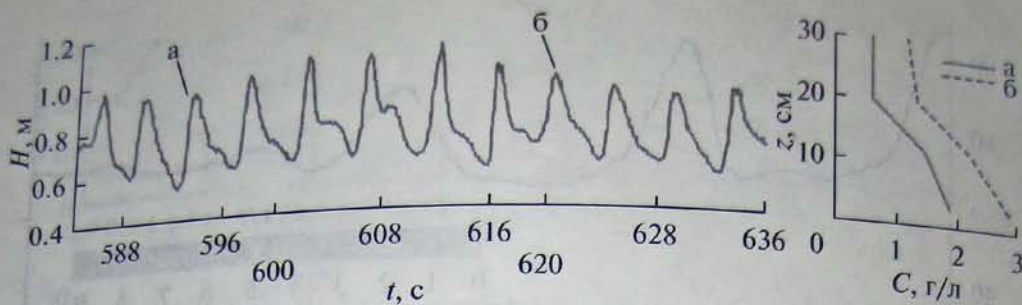


Рис. 7. Вертикальное распределение концентрации взвеси под волнами с одинаковой высотой в начале группы волн (сплошная линия, волна отмечена буквой а) и в конце (прерывистая линия, волна отмечена буквой б). Натурный эксперимент "Новомихайловка-2003".

Групповая структура волнения оказывает влияние также на изменчивость вертикального профиля концентрации взвеси на масштабах, меньших периодов отдельных волн. В случае, когда волна находится в начале группы больших волн, концентрация взвеси изменяется в течение периода волны преимущественно в придонном слое. Под крупными волнами во второй половине группы высоких волн наблюдается интенсификация взвешивания наносов после смены знака скорости воды. Взвесь захватывается со дна и проникает вверх на десятки сантиметров. Мгновенные значения концентрации взвешенных наносов под индивидуальной волной в начале группы больших волн, как правило, ниже, чем под такой же по высоте волной в конце.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

В основу модели положено одномерное диффузионное уравнение:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = w_s \frac{\partial C}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_s \frac{\partial C}{\partial z} \right), \quad (1)$$

где $C(z, t)$ – концентрация взвешенных наносов; ε_s – коэффициент турбулентной диффузии частиц взвеси; w_s – гидравлическая крупность песчаных частиц; t – время, z – вертикальная координата.

Согласно этому уравнению, изменение концентрации во времени на любом горизонте от дна определяется изменением по вертикали локального баланса потока взвеси за счет оседания частиц и за счет потока взвеси от дна.

Обобщенный коэффициент диффузии осадков рассматривается переменным по вертикали и представлен в виде [8]:

$$\varepsilon(z) = \varepsilon_1(z) + \varepsilon_2(z) + \varepsilon_3(z). \quad (2)$$

Здесь $\varepsilon_1(z)$ – вклад орбитального движения, $\varepsilon_1(z) = \frac{\pi H^2 \text{sh}^2 kz}{2\sqrt{2} T \text{sh}^2 kh}$; $\varepsilon_2(z)$ – вклад волнового течения,

$$\varepsilon_2(z) = \frac{\pi \chi^2 H^2}{36 T \text{sh}^2 kh} \frac{\text{sh}^3 2kz}{\text{ch}^2 2kz}; \quad \varepsilon_3(z) \text{ – вклад диффузии в}$$

$$\text{придонном слое, } \varepsilon_3(z) = \frac{b(u_g - w_s) \frac{z}{\delta}}{1 + 0.06 \frac{z}{\delta} \exp\left(\frac{z}{\delta}\right)}, \text{ где коэф-}$$

фициент b определяется как $b = 116 \left[\frac{\rho}{\rho_s - \rho} \right] \left(\frac{v}{g} \right)^{\frac{1}{3}}$; u_g – максимальное значение донной орбитальной скорости с компонентами

$$U = \frac{HTg}{2\lambda} \frac{\text{ch}\left(2\pi \frac{\delta+h}{\lambda}\right)}{\text{ch}\left(2\pi \frac{h}{\lambda}\right)}, \quad W = \frac{HTg}{2\lambda} \frac{\text{sh}\left(2\pi \frac{\delta+h}{\lambda}\right)}{\text{ch}\left(2\pi \frac{h}{\lambda}\right)}; \quad (3)$$

δ – толщина пограничного слоя, определяемая из уравнения Джонсона [7]:

$$\frac{\delta}{z_0} \lg\left(\frac{\delta}{z_0}\right) = 0.6 \frac{H}{D \text{sh} kh}, \quad (4)$$

где z_0 – параметр шероховатости, $z_0 = \frac{z_N}{30}$, z_N – эффективная шероховатость дна, которая для гладкого песчаного дна принимается равной $z_N = 2.5 \bar{d}_{50}$ (\bar{d}_{50} – медианный диаметр частиц песка на дне); H , T , λ – высота, период и длина волны соответственно, h – глубина.

Граничные условия:

– на свободной поверхности воды поток взвеси принимается нулевым:

$$\varepsilon_s \frac{\partial C}{\partial z} + w_s C = 0; \quad (5)$$

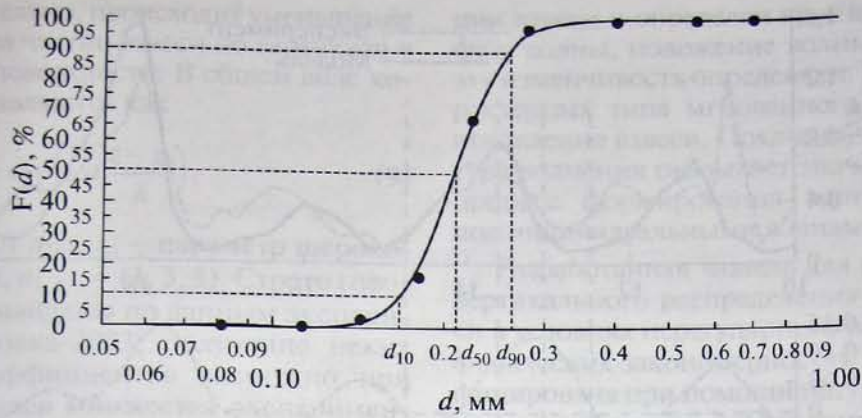


Рис. 8. Экспериментальная функция распределения размеров частиц d (точки) и ее аппроксимация выражением $F(d) = 0.5(1 + \operatorname{erf}(\lg(d/d_{50})/1.41\lg\sigma_d))$ (сплошная линия). d_{10} , d_{50} и d_{90} – размеры частиц, соответствующие 10, 50 и 90 процентам функции распределения.

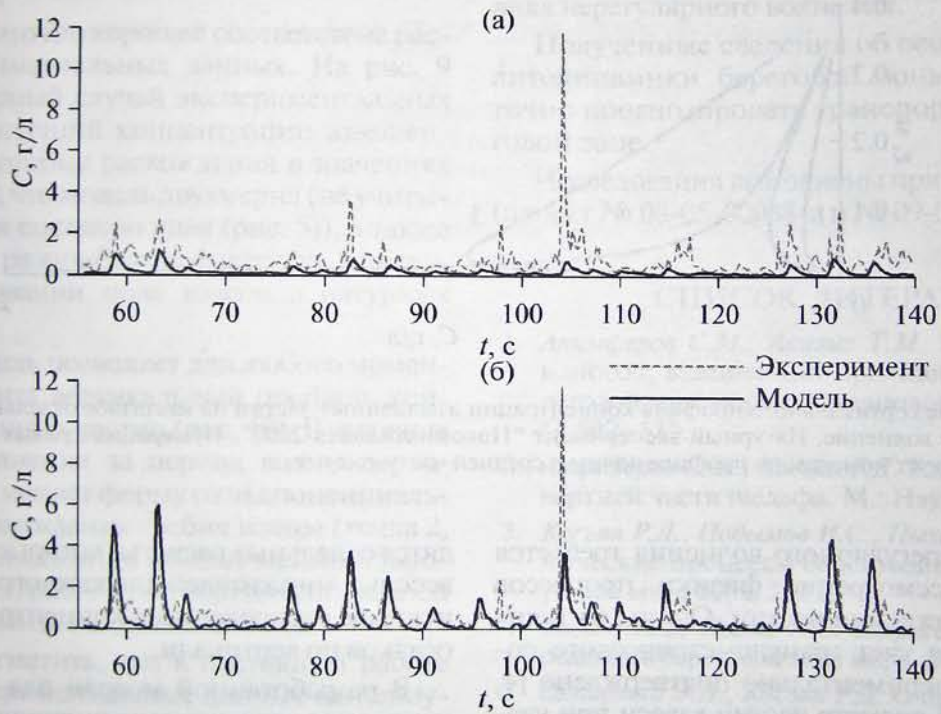


Рис. 9. Экспериментальные и модельные концентрации взвешенных частиц на расстоянии 7 см от дна. Нерегулярное ветровое волнение. Натурный эксперимент “Новомихайловка-2003”: (а) – без учета фракционного состава, (б) – с учетом фракционного состава.

– на нижней границе z_0 концентрация взвеси определяется функцией локального выброса взвеси [17]:

$$C(z_0, t) = 3.3 \left(\frac{\theta(t) - \theta_{cr}}{\theta_{cr}} \right) \frac{(s-1)^{0.6} g^{0.6} d^{0.8}}{v^{0.2}}, \quad (6)$$

где $s = \frac{\rho_s}{\rho}$ – относительная плотность наносов, g – ускорение свободного падения.

Мгновенное значение параметра Шильдса отражает баланс сдвигающих и удерживающих сил:

$$\theta(t) = \frac{u_*^2(t)}{((\rho_s - \rho)/\rho)g\bar{d}_{50}}, \quad (7)$$

где $u_*(t)$ – максимальная сдвиговая скорость, рассчитываемая по методике, изложенной в [15].

Приведенная выше модель хорошо себя зарекомендовала для условий регулярного волнения и волн с выраженной групповой структурой. В усло-

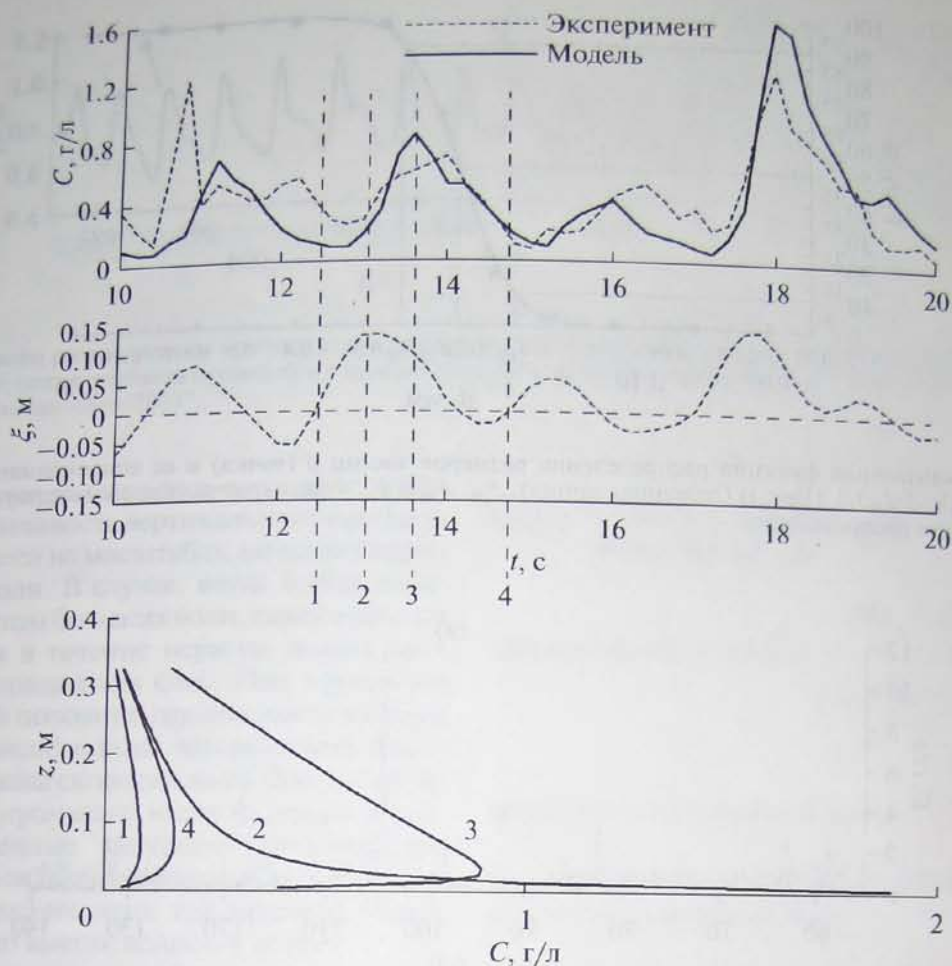


Рис. 10. Изменение вертикального профиля концентрации взвешенных частиц на масштабе отдельной волны. Нерегулярное ветровое волнение. Натурный эксперимент "Новомихайловка-2003". Нумерация кривых на нижней части рисунка соответствует номерам на профиле волны в средней части рисунка.

виях реального нерегулярного волнения требуется более полное рассмотрение физики процессов взмучивания и осаждения частиц. Одним из таких моментов является учет гранулометрического состава взвеси. Экспериментально подтверждено [4, 5], что медианный диаметр частиц взвеси при удалении от дна уменьшается. Следовательно, снижается и значение гидравлической крупности.

Гранулометрический состав взвешенных веществ может быть учтен следующим образом. На основе экспериментальных данных строится аппроксимативная функция распределения размеров частиц, пример которой приведен на рис. 8 (эксперимент Новомихайловка-2003).

В случае многомодального распределения за характерные размеры частиц, поступающих во взвесь, берутся размеры, соответствующие модам распределения. В нашем случае распределение одномодально, поэтому за характерные размеры фракций принимаются размеры, соответствующие 10, 50 и 90 процентам функции распределения. Таким образом, полагается, что во взвешивании участвуют три фракции осадков. Для каждой фракции произво-

дятся отдельные расчеты, которые в сумме (с учетом весовых множителей для каждого слагаемого) дают искомое распределение концентрации взвешенных осадков по вертикали.

В разработанной модели для каждой фракции наносов рассчитываются индивидуальные параметры: коэффициент диффузии, скорость осаждения и параметр Шильдса. В условиях реального потока мелкие частицы могут как увлекаться более тяжелыми, так и притормаживать их осаждение. Кроме того, мелкие фракции легче отрываются от дна и переносятся на большие расстояния, чем тяжелые. Учет взаимодействия между фракциями осуществляется путем введения весовых коэффициентов:

$$C(z, t) = \sum_{i=1}^n A_i(z) C_i(z, t). \quad (8)$$

Коэффициенты $A_i(z)$ определяются на основе экспериментальных данных и отражают интенсивность вовлечения в процесс наносов разной гидравлической крупности. Мелкие фракции легче увлекаются потоком и доставляются на большее расстоя-

ние от дна. Следовательно, происходит уменьшение медианного диаметра частиц взвеси по вертикали в сторону свободной поверхности. В общем виде коэффициенты представляются как

$$A_i(z) = \exp\left(-a_i \frac{z-z_0}{h}\right), \quad (9)$$

где z – расстояние от дна, z_0 – параметр шероховатости, h – глубина, $a_{1,2,3} = (1, 3, 8)$. Строго говоря, коэффициенты найдены по данным эксперимента Новомихайловка-2003; получение неких универсальных коэффициентов возможно при обобщении результатов множества экспериментов (с обязательным синхронным измерением).

Таким образом, в основу модели положены следующие экспериментальные данные: моменты и мощность начальных выбросов, распределение по вертикали, изменчивость по вертикали гранулометрического состава.

Получено достаточно хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных. На рис. 9 приведен характерный случай экспериментальных и модельных флуктуаций концентрации взвешенных веществ. Некоторые расхождения в значениях возникают потому, что модель двумерна (не учитывается адвективная составляющая (рис. 5)), а также сложно учесть все разнообразие факторов, участвующих в формировании поля взвеси в природных условиях.

Созданная модель позволяет для любого момента времени получить вертикальный профиль концентрации взвешенных частиц (рис. 10). В условиях нерегулярного волнения за период волны вертикальный профиль меняет форму от экспоненциального в момент прохождения гребня волны (точка 2, рис. 2) до параболического в момент максимального выброса (точка 3, рис. 3), что хорошо согласуется с результатами анализа натуральных данных.

Необходимо отметить, что в настоящей работе полученные экспериментальные данные используются в диагностических целях и рассматриваются как инструмент для построения картины взвешивания (выделения моментов взвешивания, определения временных сдвигов между флуктуациями возвышения свободной поверхности и концентрациями взвеси, получения профилей концентрации), а также непосредственно настройки модели. В дальнейшем работающая диагностическая модель позволит перейти уже к прогностическим расчетам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе впервые рассмотрены особенности изменчивости поля концентрации взвеси с дискретностью меньшей, чем период волн. Основываясь на экспериментальных данных, доказано, что существует высокочастотная (несколько раз в секунду) изменчивость вертикального профиля concentra-

ции взвеси и определен круг параметров (высота и фаза волны, положение волны в группе), которые эту изменчивость определяют. Выделено четыре характерных типа мгновенного вертикального распределения взвеси. Показано, что групповая структура волнения оказывает значительное влияние на процесс формирования вертикального профиля под индивидуальными волнами внутри группы.

Разработанная модель для расчета мгновенного вертикального распределения концентрации взвеси в условиях нерегулярного волнения основана на физических закономерностях взвешивания и верифицирована при помощи натуральных и лабораторных данных наблюдений. Она учитывает параметры отдельных волн и гранулометрический состав наносов, что очень важно при моделировании флуктуаций концентрации взвеси. Модель хорошо отражает изменения вертикального профиля концентрации взвеси в течение периода отдельной волны в условиях нерегулярного волнения.

Полученные сведения об особенностях гидродинамики береговой зоны позволят более точно прогнозировать транспорт наносов в береговой зоне.

Исследования выполнены при поддержке РФФИ (проект № 08-05-00088-а и № 09-05-96503-р_юг_а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Анциферов С.М., Акивис Т.М.* Модель транспорта наносов, взвешенных приливным течением в береговой зоне моря // *Океанология*. 2002. Т. 29. № 4. С. 502–512.
2. *Анциферов С.М., Косьян Р.Д.* Взвешенные наносы в верхней части шельфа. М.: Наука, 1986. 223 с.
3. *Косьян Р.Д., Подымов И.С., Пыхов Н.В.* (ред.) Динамические процессы береговой зоны моря. М.: Научный мир, 2003. 326 с.
4. *Косьян Р.Д., Пыхов Н.В.* Гидрогенные перемещения осадков в береговой зоне моря. М.: Наука, 1991. 280 с.
5. *Опищенко Э.Л., Косьян Р.Д.* О применении оптического метода определения концентрации взвешенных наносов в природных водоемах // *Водные ресурсы*. 1989. Вып. 3. С. 94–101.
6. *Black K., Vincent C.E.* High-resolution field measurements and numerical modeling of intra-wave sediment suspension on plane beds under shoaling waves // *Coastal Engineering*. 2001. V. 42. P. 173–197.
7. *Jonsson J.G.* On the existence of universal velocity distributions in an oscillatory, turbulent boundary layer // Report No. 12, Coast. Eng. Lab/Hydraul. Lab., Tech. Univ. Denmark, 1966. P. 2–10.
8. *Kos'yan R.* Vertical distribution of suspended sediment concentrations seawards of the breaking zone // *Coastal Engineering*. 1985. V. 9. P. 171–187.
9. *Kos'yan R., Kunz H., Kuznetsov S., Pykhov N.* Suspended sediment transport in the surf zone of the Nordeney Island. Hydrodynamics, Theory and Applications // Proc. 2nd Internal Conference on Hydrodynamics, Rotterdam, A.A. Balkema Publ. 1996. P. 1119–1123.

10. *Kos'yan R.D., Kunz H., Kuznetsov S.Yu. et al.* Sand suspension and intermittence of turbulence in the surf zone // Proc. of the 25th Int. Conference on Coastal Engineering, American Society of Civil engineering, New York, 1997. P. 4111–4119.
11. *Nielsen P.* Coastal bottom boundary layers and sediment transport // World Scientific Publ., Hong-Kong, New Jersey, London, Singapore, 1991. 324 p.
12. *Vincent C.E., Green M.O.* Field measurements of the suspended sand concentration profiles, and of the resuspension coefficient over a rippled bed // *J. Geophys. Res.* 1990. V. 95. P. 15591–15601.
13. *Vincent C.E., Hanes D.* The accumulation and decay of near-bed suspended sand concentration due to waves and wave groups // *Continental shelf research.* 2002. V. 22. P. 1987–2000.
14. *Vincent C.E., Marsh S.V., Webb M.P., Osborne P.D.* Spatial and temporal structures of suspension and transport over mega-ripples on the shore face // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. P. 11215–11224.
15. *Walton T.* Coastal Engineering Manual, Part III, Coastal Sediment Processes, Chapter III-6, Engineer Manual 1110-2-1100. 2002. U.S. Army Corps of Engineers. Washington, DC. P. 72.
16. *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.
17. *Zou S., Dalrymple R., Asce F., Rogers B.* Smoothed particle hydrodynamics simulation on sediment suspension under breaking waves // *Ocean waves measurement and analysis, Fifth Inter. Symposium Waves-2005, Madrid, Spain.* 2005. P. 186–192.

High-Frequency Variability of the Vertical Distribution of Suspended Sediment Concentration under Irregular Waves

B. V. Divinsky, R. D. Kos'yan, M. V. Krylenko, I. S. Podymov

The peculiarities of the suspended sediment concentration profile fluctuations in the coastal zone are analyzed with the discreteness less than the wave period on basis of the field data obtained in storm conditions in the course of the field experiments. Physical mechanisms of sediment suspension and formation of different types of the vertical distribution of suspended sediment are considered. A mathematical model of the prediction of the vertical distribution of the suspended sediment under the irregular waves has been elaborated. This model is verified on the data of field and laboratory experiments.