

УДК 551.465

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФЛУКТУАЦИЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ВЗВЕШЕННЫХ НАНОСОВ НАД ГЛАДКИМ ДНОМ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВОЛНЕНИЯ С ВЫРАЖЕННОЙ ГРУППОВОЙ СТРУКТУРОЙ

© 2006 г. Р.Д. Косьян¹, К. Винсент², Б.В. Дивинский¹, М.В. Крыленко¹

В статье представлены результаты моделирования флуктуаций концентрации взвешенных песчаных наносов над гладким дном под волнами с выраженной групповой структурой. Достоверность модели проверена по лабораторным данным (эксперимент “SISTEX’99”). Рассчитанные по модели изменения концентрации взвеси хорошо согласуются с экспериментальными данными и достаточно точно передают форму пиков концентрации, их количество и длительность.

ВВЕДЕНИЕ

В связи со сложностью проведения измерений в условиях реального моря, количественная оценка и прогноз распределения взвешенных наносов в прибойной зоне производятся преимущественно методом математического моделирования с использованием параметров, полученных в лабораторных условиях. Построено сравнительно много моделей распределения осредненных по времени концентраций взвешенных наносов в волновом потоке. Достаточно полный обзор подобных моделей сделан в работе С.М. Анцыферова и Т.М. Акивис [1]. Однако подход, основанный на использовании средних по времени значений концентрации и скорости воды, не учитывает временную изменчивость потока взвешенных наносов, и результирующие расчеты могут на порядки отличаться от реальных концентраций.

Проведенные ранее натурные [2–5] и лабораторные исследования [6, 7] показали, что флуктуационная составляющая играет важную роль в формировании результирующего потока взвешенных наносов. Большое количество моделей пространственно-временной изменчивости концентрации взвешенных наносов основаны на идее приоритета турбулентной диффузии [8, 9] и не учитывают наблюдаемые в природе механизмы взвешивания осадков, что приводит к значи-

тельным отличиям между натурными и расчетными данными [2, 3, 10, 11].

В ряде моделей [8, 9, 12] пространственно-временная изменчивость концентрации взвеси в волновом потоке описывается с позиций процесса турбулентной диффузии и задания на дне граничного условия в виде функции концентрации от мгновенного значения параметра Шильдса. Эти модели дают удовлетворительное согласие с экспериментальными данными лишь для монокроматических волн и гладкой фазы движения наносов, когда движение наносов имеет место в виде узкой полосы, толщиной 1–2 см над плоским дном.

В результате натурных и лабораторных экспериментов была продемонстрирована необходимость учета осцилляционных движений воды и фазового сдвига между флуктуациями концентрации взвеси и скорости воды на различных уровнях от дна [2, 6, 7, 11]. Установлено, что длительность и частота появления пиков концентрации в значительной степени определяется периодичностью следования групп высоких волн и количеством волн в отдельных группах [13].

В настоящей работе проведено моделирование флуктуаций концентрации взвешенных песчаных наносов над гладким дном под волнами с выраженной групповой структурой. Достоверность созданной модели проверена по результатам лабораторного эксперимента “SISTEX’99”. Для моделирования и проверки результатов были отобраны серии синхронных записей концентрации взвешенных наносов, компонентов скорости воды и возвышения свободной поверхности для случая волнения с групповой структурой.

¹ Южное отделение Института океанологии Российской академии наук, Геленджик.

² Факультет наук о Земле, Университет Восточной Англии, Великобритания.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Использованные для моделирования данные получены во время проведенного в большом волновом канале Ганноверского университета в Германии лабораторного эксперимента "SIS-TEX'99" [14]. Общая длина канала 300 м, ширина 5 м, глубина 7 м. 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.

Были проведены опыты с нерегулярными волнами, волнением с четкой групповой структурой и с монохроматическим волнением. В каждом опыте измерялись вертикальный профиль концентрации взвешенных наносов, два компонента скорости воды (вертикальный и по оси потока) и возвышение свободной поверхности. Измерители концентрации взвеси и составляющих скорости жидкости 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, фиксировавшие колебания поверхности воды, размещались вдоль стены канала. Концентрация взвешенных наносов измерялась при помощи высокочастотного (2, 4, 5 МГц) акустического излучателя (ABS) [15], установленного на расстоянии 35–40 см 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.

МОДЕЛЬ ВЗВЕШЕННЫХ НАНОСОВ

В основу модели положено одномерное диффузионное уравнение для концентрации взвешенных наносов

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

где $C(z, t)$ – концентрация взвешенных наносов, ϵ_s – коэффициент турбулентной диффузии частиц взвеси, w_s – скорость оседания частиц песка, 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 (первый член правой части уравнения) и за счет потока взвеси от дна (второй правой части уравнения соответственно).

Определение коэффициента диффузии. Обобщенный коэффициент диффузии осадков рассматривается переменным по вертикали и представлен в виде [16]

$$\epsilon(z) = \epsilon_1(z) + \epsilon_2(z) + \epsilon_3(z).$$

Здесь $\epsilon_1(z)$ – вклад орбитального движения,

$$\epsilon_1(z) = \frac{\pi H^2}{2\sqrt{2T}} \frac{\sinh^2 kz}{\sinh^2 kh}$$

$\epsilon_2(z)$ – вклад волнового течения,

$$\epsilon_2(z) = \frac{\pi \chi^2 H^2}{36T \sinh^2 kh} \frac{\sinh^3 2kz}{\cos^2 2kz},$$

$\epsilon_3(z)$ – вклад диффузии в придонном слое,

$$\epsilon_3(z) = \frac{b(u_g - w_s) \frac{z}{\delta}}{1 + 0,06 \frac{z}{\delta} \exp\left(\frac{z}{\delta}\right)},$$

где коэффициент b определяется как

$b = 116 \left[\frac{\rho}{\rho_s - \rho} \right] \left(\frac{v^2}{g} \right)^{1/3}$, u_g – максимальное значение донной орбитальной скорости с компонентами

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

δ – толщина пограничного слоя, определяемая из уравнения Джонсона [17]:

$$\frac{\delta}{z_0} \lg \left(\frac{\delta}{z_0} \right) = 0,6 \frac{H}{D \operatorname{sh} kh},$$

где z_0 – параметр шероховатости, $z_0 = \frac{z_N}{30}$, z_N – эффективная шероховатость дна, которая для гладкого песчаного дна принимается равной $z_N = 2,5 \bar{d}_{50}$ ($\bar{d}_{50}$ – средний 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 равным нулю:

$$\epsilon_s \frac{\partial C}{\partial z} + w_s C = 0.$$

На нижней границе концентрация взвеси описы-

вается выражением

$$C(0, t) = Ap(t),$$

где $p(t)$ – функция локального выброса взвеси (pick-up функция), определяемая выражением [18]

$$p(t) = 3,3 \left(\frac{\theta(t) - \theta_{cr}}{\theta_{cr}} \right)^{1,5} \frac{(s-1)^{0,6} g^{0,6} d^{0,8}}{v^{0,2}},$$

где $s = \frac{\rho_s}{\rho}$ – относительная плотность наносов,

g – ускорение свободного падения.

Взвешивание наносов при прохождении индивидуальной волны происходит не на протяжении всего периода, а в виде быстрого выброса облака взвеси. Анализ натурных данных показал, что выброс происходит один раз за период в фазу уменьшения горизонтальной компоненты скорости от максимума до нуля. Этот факт учитывает-

ся введением коэффициента A , который, изменяясь в пределах $0 \leq A \leq 1$, равен единице в фазу волны, когда происходит взвешивание, и нулю – в остальных случаях. Это касается как одиночной волны, так и групп волн, рассматриваемых в терминах огибающей.

Мгновенное значение параметра Шильдса отражает баланс сдвигающих и удерживающих сил:

$$\theta(t) = \frac{u_*^2(t)}{((\rho_s - \rho)/\rho)gd_{50}},$$

где d_{50} – медианный диаметр наносов; $u_*(t)$ – максимальная сдвиговая скорость, рассчитываемая по ряду скорости потока $U(t)$.

Определение $u_*(t)$. При данных волновых характеристиках находим $\omega = \frac{2\pi}{T}$, $A_{bm} = \frac{u(t)}{\omega}$.

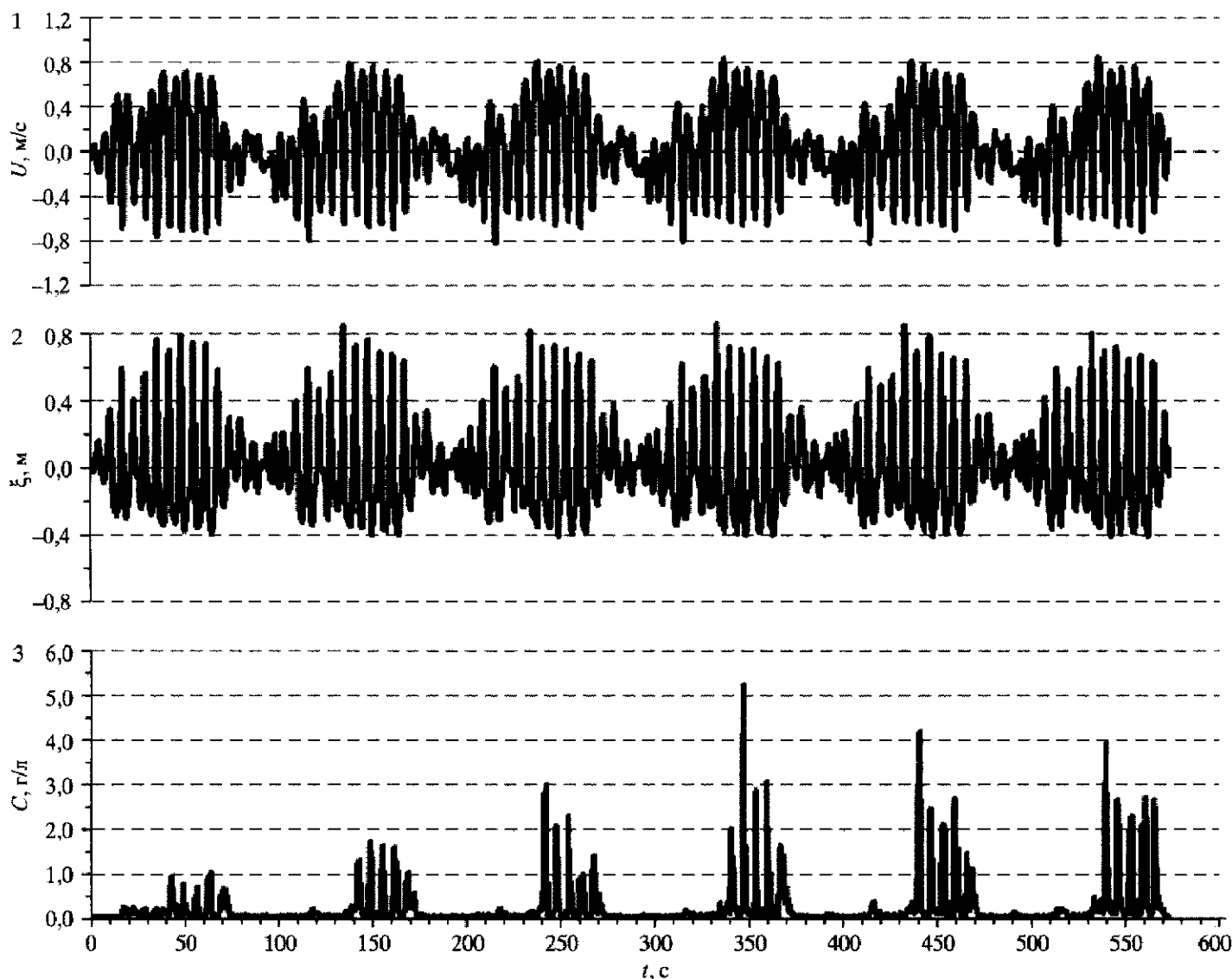


Рис. 1. Серия CGA01 эксперимента SISTEX'99: 1 – горизонтальная компонента скорости потока; 2 – возвышение свободной поверхности; 3 – концентрация взвешенных частиц на расстоянии 5–6 см от дна

В предположении сильной турбулентности волнового пограничного слоя $k_n = D$ выполняется итеративная процедура [19]

$$\frac{1}{x^{(n+1)}} = \left(\lg \frac{A_{bm}}{k_n} - 0,17 \right) - \lg \frac{1}{x^{(n)}} + 0,24 x^{(n)}$$

при начальном значении $x^{(0)} = 0,4$. В приведенном выражении $x = 4\sqrt{f_\omega}$, где f_ω – волновой фактор трения.

Решение уравнения дает значение волнового фактора трения $f_\omega = \left(\frac{x^{(m)}}{4} \right)^2$ и максимальной сдвиговой скорости $u_*(t) = \sqrt{\frac{f_\omega}{2}} u(t)$.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В качестве исходных данных приняты результаты измерений профилей скорости, возвышения уровня и концентраций взвешенных осадков при выраженной групповой структуре волнения (серия CGA01 эксперимента "SISTEX'99", рис. 1).

Средние параметры волнения, необходимые для проведения расчетов, получены путем определения спектральных характеристик волнения.

Рассчитанная спектральная плотность ординат свободной поверхности содержит два основных (характерных для групповой структуры волнения) пика на частотах 0,13 и 0,25 Гц.

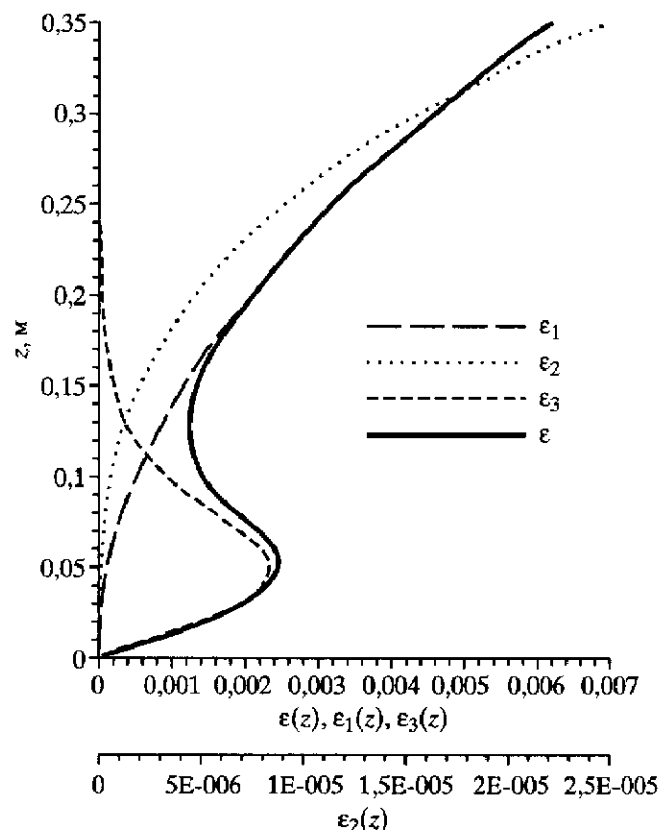


Рис. 2. Вертикальный профиль коэффициента диффузии и его слагаемых

Спектральные моменты (математическое ожидание m_0 и дисперсия m_2), представляемые в виде $m_n = \int f^n S(f) df$, составляют $m_0 = 0,0686$, $m_2 = 0,1262$.

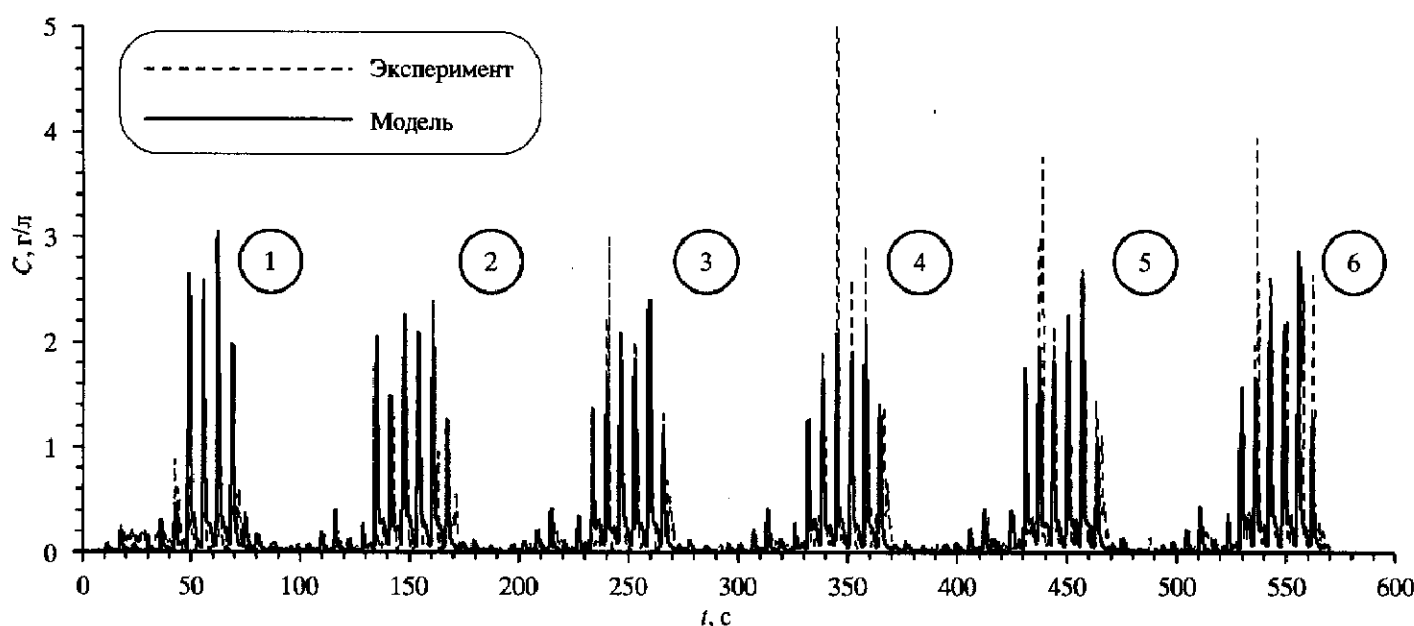


Рис. 3. Концентрация взвешенных наносов на расстоянии 5,5 см от дна. Экспериментальные и рассчитанные по модели данные (цифрами обозначены группы волн)

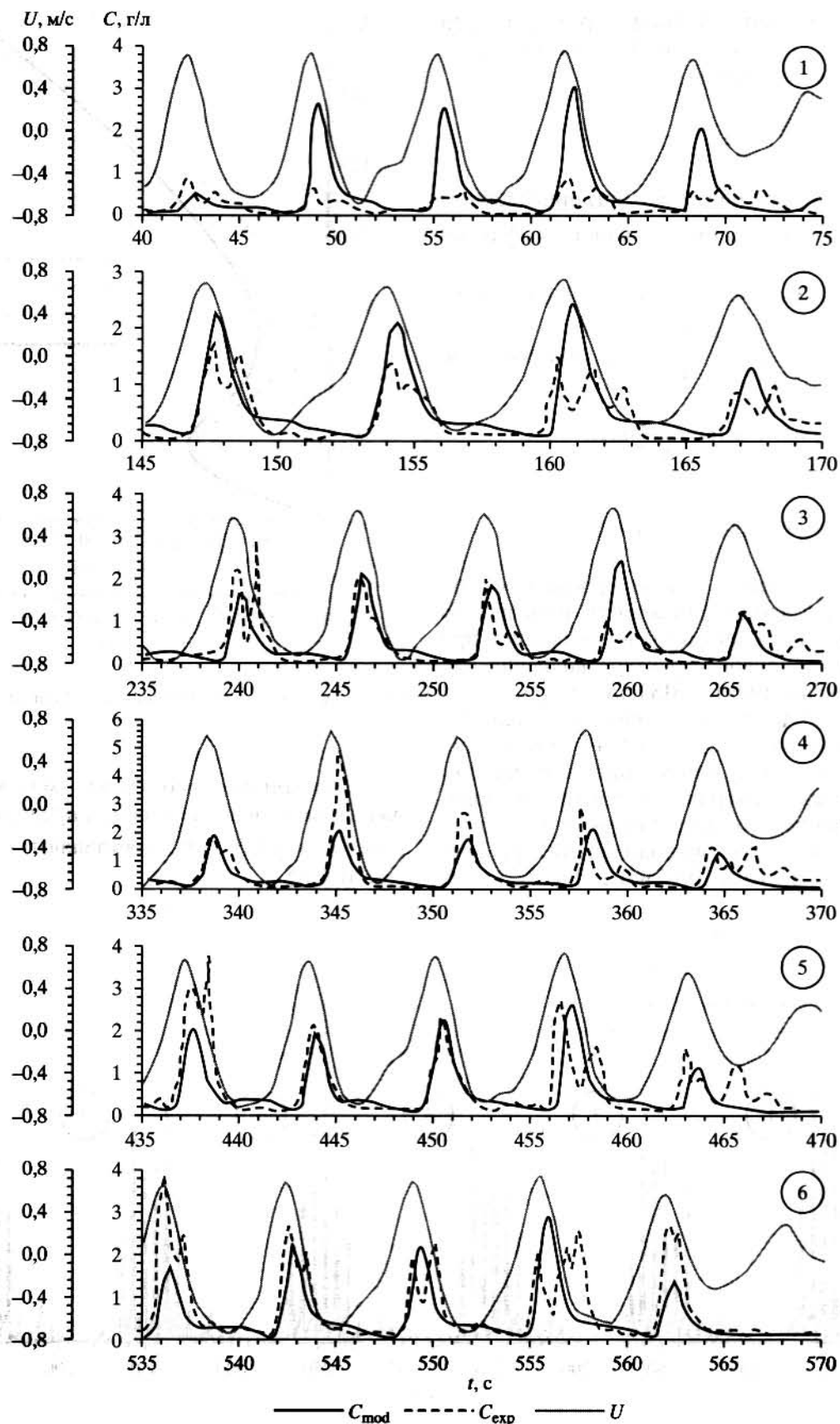


Рис. 4. Экспериментальные и модельные концентрации взвешенных наносов под выделенными группами волн (цифрами обозначены группы волн)

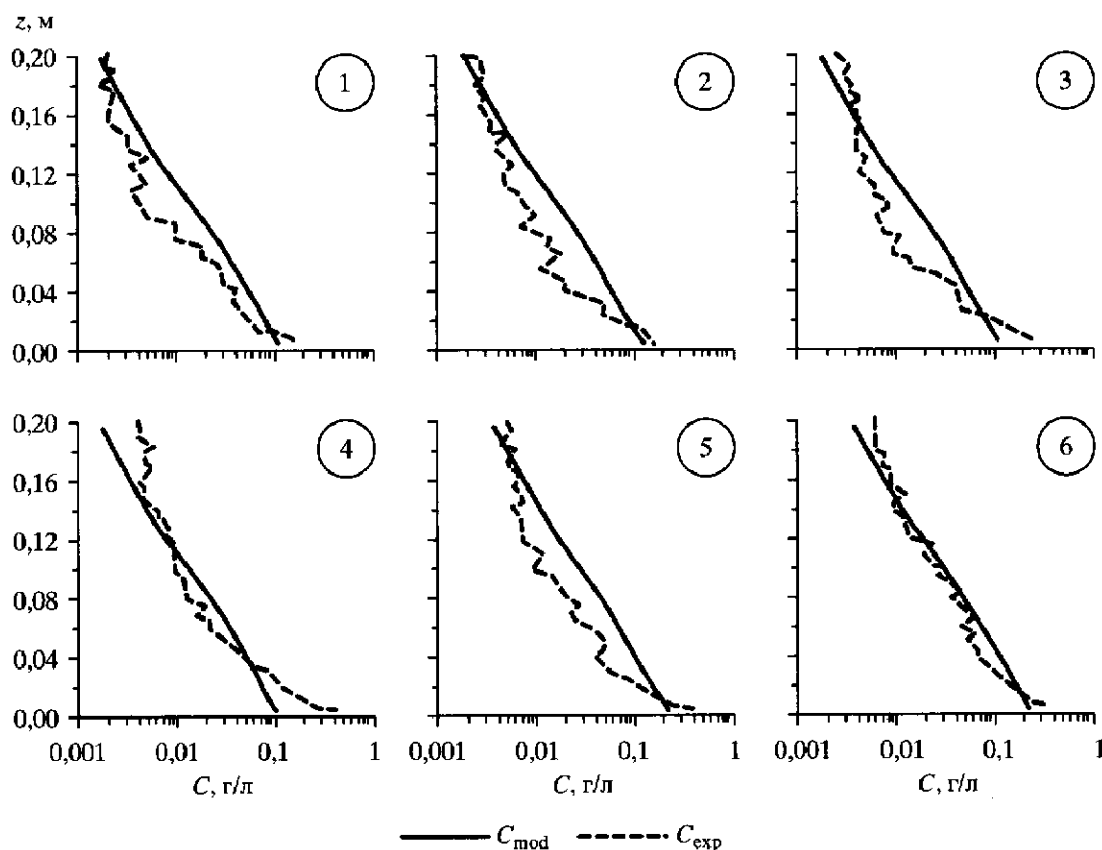


Рис. 5. Осредненные для групп волн вертикальные профили концентраций. Экспериментальные и модельные данные (цифрами обозначены группы волн)

Для рассматриваемой записи, приведенной на рис. 1, значительная высота волн $H_s = 4\sqrt{m_0} = 1,10$ м (средняя высота 0,69 м) и средний период $T_z = 2\pi\sqrt{\frac{m_0}{m_2}} = 4,66$ с.

РЕЗУЛЬТАТЫ

При расчетах использовался равномерный шаг сетки по глубине и по времени, составляющий $\Delta z = 0,005$ м и $\Delta t = 0,228$ с. В рассматриваемой модели использовались следующие значения параметров, полученные ранее [13]: $w_s = 0,025$ м/с для песка со средним диаметром 0,24 мм; $\theta_{cr} = 0,045$ – критическое значение параметра Шильдса для начала движения донных наносов. Кинематическая вязкость воды $\nu = 10^{-6}$ м²/с.

Оценки вертикального профиля обобщенного коэффициента диффузии показали, что вклад в него коэффициента $\varepsilon_2(z)$ на два порядка меньше, чем от остальных слагаемых (рис. 2). При проведении расчетов вкладом $\varepsilon_2(z)$ в коэффициент диффузии можно пренебречь.

Сравнение хронограмм концентраций, рассчитанных по модели, с измеренными для горизонта 5,5 см от дна приведено на рис. 3. Расхождения в абсолютных значениях пиков концентрации, полученных экспериментально и модельным путем, можно объяснить тем, что в модели заложено постоянство гранулометрического состава взвеси по вертикали, в частности медианного диаметра частиц взвеси. Это сказывается на корректности описания скорости осаждения частиц. Экспериментально подтверждено [20], что медианный диаметр частиц взвеси при удалении от дна уменьшается, следовательно, снижается и значение скорости оседания.

На рис. 3 явно выделяются шесть областей взвешивания, соответствующие группам волн (отмечены цифрами 1–6). Хронограммы горизонтальных скоростей (U), экспериментальных (C_{exp}) и модельных концентраций (C_{mod}) для этих групп приведены на рис. 4.

В пределах каждой группы проведено осреднение вертикальных профилей концентраций как для экспериментальных, так и модельных данных (рис. 5). Полученные профили аппроксимируются экспоненциальной функцией

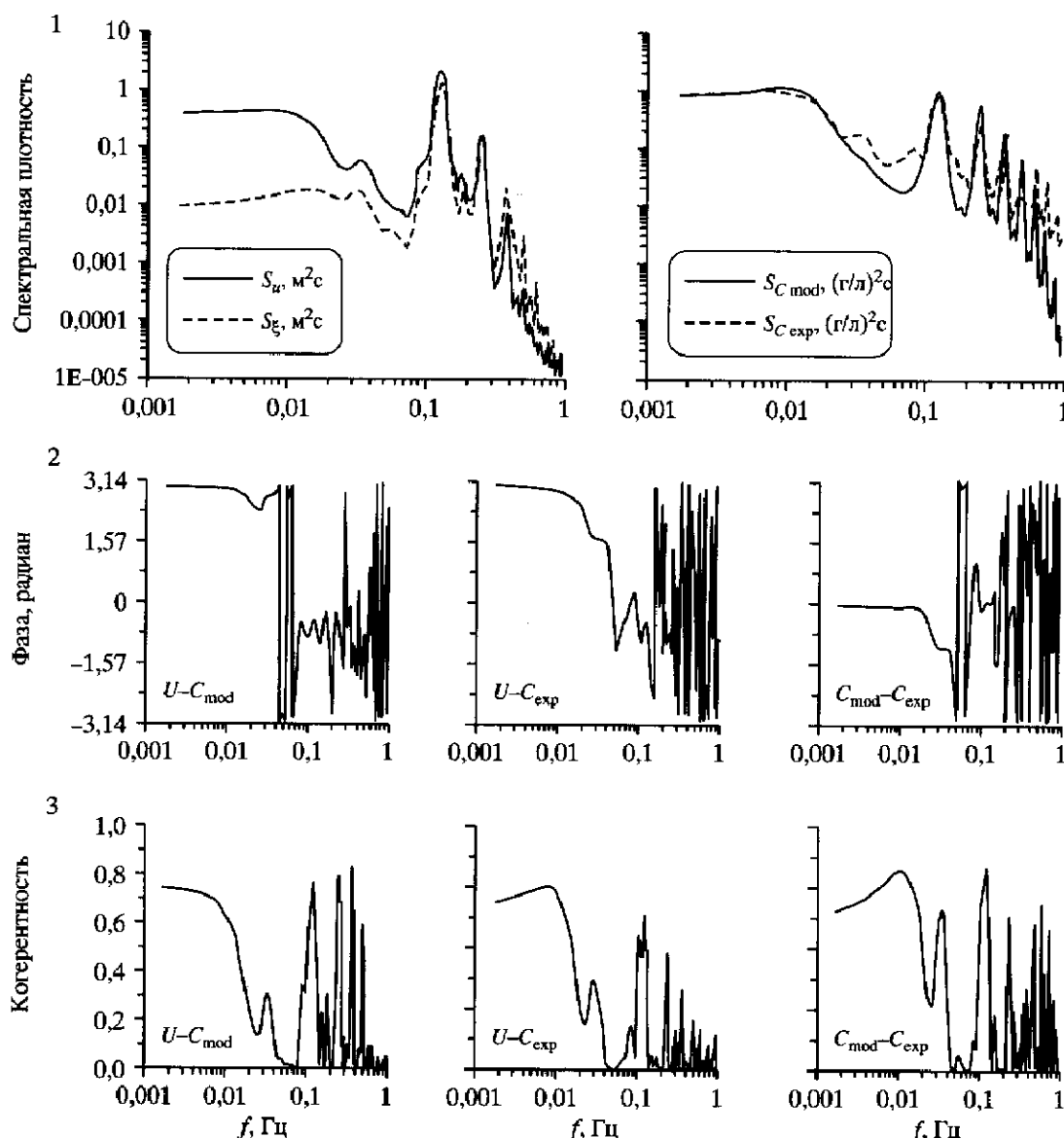


Рис. 6. Спектральный анализ хронограмм горизонтальной компоненты скорости потока, возвышения уровня и концентраций взвеси (экспериментальной и модельной)

вида

$$C(z) \propto a \exp(-bz),$$

где a и b – параметры формы.

Присутствующие расхождения в абсолютных значениях концентрации взвеси, возможно, обусловлены тем, что данная модель не учитывает адвективный перенос взвеси, изменчивость гранулометрического состава твердых частиц и изменение физических свойств потока при повышении концентрации взвеси.

Результаты спектрального анализа хронограмм горизонтальной компоненты скорости потока, возвышения уровня и концентраций взвеси (экспериментальной и модельной) приведены на рис. 6. Все автоспектры характеризуются выра-

женными локальными максимумами на частотах 0,13 и 0,26 Гц (рис. 6.1). На этих же частотах фазовый сдвиг между экспериментальными концентрациями взвеси C_{exp} и рассчитанными C_{mod} близок к нулю и приблизительно равен $-\pi/4$ между горизонтальной компонентой скорости U и концентрациями взвеси (рис. 6.2). Рисунок 6.3 демонстрирует довольно высокую когерентность между всеми рассматриваемыми параметрами (U , C_{exp} , C_{mod}) как на низких частотах, так и на частотах максимумов спектральных плотностей. Таким образом, модельный ряд концентраций взвеси статистически соответствует экспериментальному.

ВЫВОДЫ

Разработана модель для расчета флуктуаций концентрации взвешенных наносов над плоским дном под воздействием групп волн. Она учитывает влияние групповой структуры волнения и фазы индивидуальных волн на взвешивания осадков, что очень важно при моделировании флуктуаций концентрации взвеси. Модель хорошо отражает все качественные особенности взвешивания наносов в рассматриваемых условиях волнения.

Реальные процессы взвешивания наносов сложнее заложенных в модель механизмов. Представленная модель взвешивания донных осадков будет совершенствоваться с привлечением дополнительных экспериментальных данных и теоретических исследований.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 05-05-64145) и гранта NATO CLG98/587.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анцыферов С.М., Акивис Т.М. Модель транспорта наносов, взвешенных приливным течением в береговой зоне моря // *Океанология*. 2002. Т. 29. № 4. С. 502–512.
2. Kos'yan R., Kunz H., Kuznetsov S. Yu., Pykhov N.V. 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.
3. Kos'yan R., Kunz H., Kuznetsov S. Yu., Pykhov N.V., Krylenko M.V. Sand suspension and intermittence of turbulence in the surf zone // *Proc. of the 25 Int. Conference on Coastal Engineering '96*. American Society of Civil engineering. New York, 1997. P. 4111–4119.
4. 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. Geophysical Research*. 1999. V. 104. P. 11 215–11 224.
5. 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*. 2002. 42. P. 173–197.
6. Villaret C., Perrier G. Transport of fine sand by combined waves and currents: an experimental study // *Electricite de France Report № HE-42/92.68*. 1992. 81 p.
7. Van Rijn L.C. Principles of sediment transport in rivers, estuarine and coastal seas. Aqua Publication. Netherlands. 1993. 860 p.
8. Hagatun K., Eidsvik K.L. Oscillating turbulent boundary layers with suspended sediment // *J. Geophys. Res.* 1988. V. 91. P. 13045–13055.
9. Davies A.G., Li Z. Modeling sediment transport beneath regular symmetrical waves above a plane bed // *Cont. Shelf. Res.* 1997. 17 (5). P. 555–582.
10. Soulsby R.L. The "Bailard" sediment transport formula: comparisons with data and models // *MAST 68-M Final Workshop*. Gdansk. 1985. P. 2–46 – 2–51.
11. Kuznetsov S. Yu., Pykhov N.V. Spectral test of energetic approach for suspended sand transport in the surf zone // *Proc. of International Conference "Coastal Dynamics'97"*, ASCE. 1997. P. 227–234.
12. Fredsoe J., Andersen O.H., Silberg S. Distribution of suspended sediment in large waves // *J. Waterways. Port, Coast. and Ocean Eng.* 1985. V. 111. P. 1041–1059.
13. Косьян Р.Д., Подымов И.С., Пыхов Н.В. Динамические процессы береговой зоны моря. М.: Научный мир, 2003. 326 с.
14. 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.
15. Vincent C.E., Green M.O. Field measurements of the suspended sand concentration profiles, and of the resuspension coefficient over a rippled bed // *Journal Geophysical Research*. 1990. 95. P. 15591–15601.
16. Kos'yan R. Vertical distribution of suspended sediment concentrations seawards of the breaking zone // *Coastal Engineering*. 1985. 9. P. 171–187.
17. Jonsson J.G. On the existence of universal velocity distributions in an oscillatory, turbulent boundary layer // *Basic Res. Progress Rep. Coastal Eng. Lab. Tech., Univ. of Denmark*, 1966. 12.
18. 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. Paper number: 186.
19. 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.
20. Онищенко Э.Л., Косьян Р.Д. О применении оптического метода определения концентрации взвешенных наносов в природных водоемах // *Водные ресурсы*. 1989. Вып. 3. С. 94–101.

MODELLING OF FLUCTUATIONS OF SUSPENDED SEDIMENTS' CONCENTRATION OVER A FLAT BED UNDER THE INFLUENCE OF WAVES OF PRONOUNCED GROUP STRUCTURE

R.D. Kosyan, C. Vincent, B.V. Divinsky, M.V. Krylenko

Results of suspended sandy sediment concentration fluctuations modeling over a flat bed under the influence of waves of pronounced group structure are presented in this paper. Reliability of the model has been checked in accordance with laboratory data (experiment SISTEX'99). Suspended sediment simulation fluctuations, calculated on the basis of the model, correlate very well with the experimental data and reproduce form, number and duration of concentration peaks rather precisely.

REFERENCES

1. Antsyferov S.M., Akivis T.M. 2002. Model' transporta nanosov, vzveshennykh prilivnym techeniem v beregovoy zone moray. [Model of sediment transport suspended tidal current in the coastal zone of the sea]. *Okeanologiya. (Oceanology)*. 29(4): 502–512. (In Russian).
2. Kos'yan R., Kunz H., Kuznetsov S. Yu., Pykhov N.V. 1996. Suspended sediment transport in the surf zone of the Nordeney Island. Hydrodynamics, Theory and Applications. In: *Proc. 2-nd Internal Conference on Hydrodynamics*. Rotterdam, A.A. Balkema Publ.: 1119–1123.
3. Kos'yan R., Kunz H., Kuznetsov S. Yu., Pykhov N.V., Krylenko M.V. 1997. Sand suspension and intermittence of turbulence in the surf zone. In: *Proc. of the 25 Int. Conference on Coastal Engineering "COASTAL ENGINEERING 96"*. New York, American Society of Civil engineering: 4111–4119.
4. Vincent C.E., Marsh S.V., Webb M.P., Osborne P.D. 1999. Spatial and temporal structures of suspension and transport over mega-ripples on the shore face. *J. Geophysical Research*. 104: 11215–11224.
5. Black K., Vincent C.E. 2002. High-resolution field measurements and numerical modeling of intra-wave sediment suspension on plane beds under shoaling waves. *Coastal Engineering*. 42: 173–197.
6. Villaret C., Perrier G. 1992. Transport of fine sand by combined waves and currents: an experimental study. *Electricite de France Report N HE-42/92.68*. 81 p.
7. Van Rijn L.C. 1993. *Principles of sediment transport in rivers, estuarine and coastal seas*. Aqua Publication. Netherlands: 860 p.
8. Hagatun K., Eidsvik K.L. 1988. Oscillating turbulent boundary layers with suspended sediment. *J. Geophys. Res.* 91: 13045–13055.
9. Davies A.G., Li Z. 1997. Modeling sediment transport beneath regular symmetrical waves above a plane bed. *Cont. Shelf. Res.* 17(5): 555–582.
10. Soulsby R.L. 1985. The "Bailard" sediment transport formula: comparisons with data and models. *MAST 68-M Final Workshop*. Gdansk, 2-46 – 2-51.
11. Kuznetsov S.Yu., Pykhov N.V. 1997. Spectral test of energetic approach for suspended sand transport in the surf zone. In: *Proc. of International Conference "Coastal Dynamics '97"*, ASCE. P. 227–234.
12. Fredsoe J., Andersen O.H., Silberg S. 1985. Distribution of suspended sediment in large waves. *J. Waterways. Port, Coast. and Ocean Eng.* 111: 1041–1059.
13. Kos'yan R.D., Podymov I.S., Pykhov N.V. 2003. *Dinamicheskie protsessy beregovoy zony morya*. [Dynamic processes of the coastal zone of the sea]. Moscow, "Nauchnyy mir" Publ.: 326 p. (In Russian).
14. Vincent C.E., Hanes D. 2002. The accumulation and decay of near-bed suspended sand concentration due to waves and wave gropes. *Continental shelf research*. V. 22.
15. Vincent C.E., Green M.O. 1990. Field measurements of the suspended sand concentration profiles, and of the resuspension coefficient over a rippled bed. *Journal Geophysical Research*. 95: 15591–15601.
16. Kos'yan R. 1985. Vertical distribution of suspended sediment concentrations seawards of the breaking zone. *Coastal Engineering*. 9: 171–187.
17. Jonsson J.G. 1966. On the existence of universal velocity distributions in an oscillatory, turbulent boundary layer. In: *Basic Res. Progress Rep. Coastal Eng. Lab. Tech., Univ. of Denmark*, 12.
18. Zou S., Dalrymple R., ASCE F., Rogers B. 2005. Smoothed particle hydrodynamics simulation on sediment suspension under breaking waves. In: *Ocean waves measurement and analysis, Fifth Inter. Symposium Waves 2005*. Madrid, Spain: 186.
19. Walton T. 2002. 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.
20. Onishchenko E.L., Kos'yan R.D. 1989. O primenении opticheskogo metoda opredeleniya kontsentratsii vzveshennykh nanosov v prirodnykh vodoemakh. [On the application of the optical method of determining the concentration of suspended sediment in natural water bodies]. *Vodnye resursy. (Water resources)*. (3): 94–101. (In Russian).