

## Нелинейные волны и турбулентность в прибрежной зоне о. Коса Тузла

Представлены результаты спектральной обработки измерений трех компонент пульсаций вектора скорости течения в диапазоне частот 0,1 ... 50 Гц для условий прибрежной зоны о. Коса Тузла (центральная часть Керченского пролива). Измерения выполнены на расстоянии 0,25 м от поверхности морского дна на глубине 1,5 м. Вычислено пространственное распределение характеристик поверхностных волн при помощи прикладного пакета *SWAN*, параметры которого подстроены таким образом, чтобы период волн соответствовал данным измерений. Анализ спектров пульсаций вектора скорости показал, что динамика указанной прибрежной зоны определяется нелинейными волнами конечной амплитуды (волны Стокса) и мелкомасштабной турбулентностью. Определены скорость придонного трения (динамическая скорость) – 0,018 м/с, турбулентное напряжение – 0,33 Н/м<sup>2</sup> и коэффициент турбулентной вязкости (диффузии импульса) –  $1,89 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup>/с.

**Ключевые слова:** спектры пульсаций вектора скорости, нелинейные волны Стокса, мелкомасштабная турбулентность.

### Введение

Динамические процессы в прибрежной зоне моря на глубинах до 15 ... 20 м относятся к числу наименее изученных и наиболее актуальных для практических приложений, что связано со значительным дефицитом экспериментальных исследований динамики этой зоны, с одной стороны, и с активизацией в ней литодинамических эффектов размыва, переноса и переотложения донного материала – с другой. Наглядным примером проявления таких литодинамических эффектов является прибрежная зона о. Коса Тузла, расположенного в центральной части Керченского пролива.

Хорошо известно, что Керченский пролив играет исключительную роль в экономике Украины и России как важнейшая транспортная магистраль между портами Азовского и Черного морей с выходом в Мировой океан, зона рыболовства, рекреации, перспективный район для добычи энергетических ресурсов и строительных материалов. По этим и другим причинам проблема изменчивости рельефа дна под действием волн и течений приобрела здесь высокую актуальность, которая резко возросла после сооружения в 2003 г. дамбы от Таманского п-ова в направлении украинского о. Коса Тузла и искусственного углубления протока между оконечностью дамбы и юго-восточной частью этого острова. Эти изменения рельефа дна в значительной степени повлияли на естественное поле течений, следствием чего была интенсификация процессов размыва о. Коса Тузла. Так, на протяжении 2005 г. – первой половины 2006 г. площадь острова из-за отсутствия работ по его укреплению уменьшилась на 30 га. Огромные объемы донного материала, смываемые с

© В.З. Дыкман, В.А. Иванов, В.М. Кушнир, 2012

острова, оседают в некоторых (пока неизвестных) районах Керченского пролива, что создает потенциальную угрозу для навигации и нарушает естественную экологию этого района Азово-Черноморского бассейна.

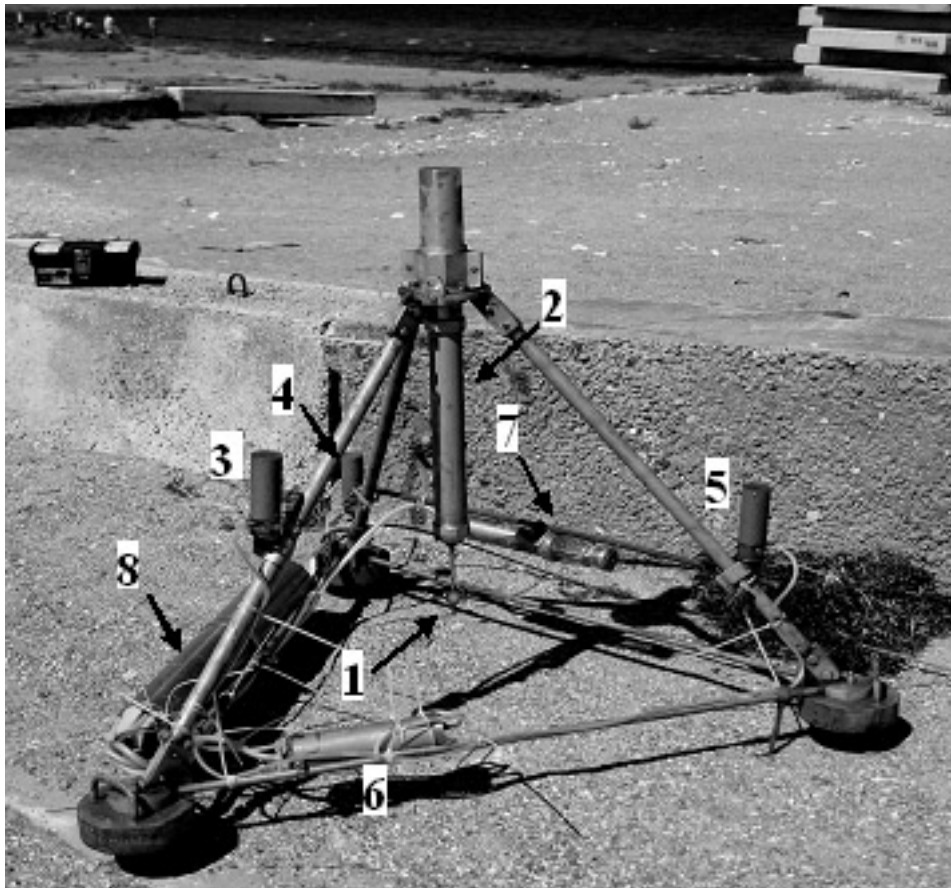
Поверхность морского дна в Керченском проливе представлена в основном слабонесущим грунтом (песок, жидкий ил), при этом возможны значительные скорости постоянных и волновых придонных течений [1, 2]. При взаимодействии этих течений с поверхностью дна формируются сложные поля скорости течения и давления в виде вихреволновых структур и мелко-масштабной турбулентности. При определенных условиях эти поля могут воздействовать на донный материал таким образом, что он начинает перемещаться вдоль поверхности дна и подниматься вверх, формируя профили взвешенных наносов. Эти процессы приводят к изменению структуры дна, причем в непосредственной близости от его неровностей могут формироваться глубокие промоины или зоны аккумуляции грунта, которые существенно изменяют поля естественных течений, температуры и других параметров морской среды. Интенсивность процессов эрозии грунта резко усиливается при штормах. С другой стороны, особенностью литодинамических процессов вблизи морского дна является интегральный эффект их постепенного развития при умеренных гидрометеорологических условиях.

Изложенные общие представления о придонных процессах основаны, главным образом, на немногочисленных и неполных экспериментальных данных, результатах лабораторных исследований и модельных представлениях.

С целью получения данных прямых измерений характеристик динамики придонной области в прибрежной зоне моря в МГИ НАН Украины был создан комплекс аппаратуры «Донная станция», в состав которого входят трехкомпонентные измерители пульсаций и среднего значения вектора скорости течения, ловушки взвешенного донного материала с дистанционным считыванием показаний, лазерный прозрачномер для определения концентрации взвеси и среднего размера частиц [3, 4]. Данные таких измерений комплексировуются результатами численных расчетов параметров поверхностных волн на основе прикладного пакета *SWAN*. Динамика придонного слоя в значительной степени определяется этими процессами, которые, по существу, формируют придонные вихреволновые структуры и турбулентность. Цель настоящей работы – анализ данных «Донной станции» в комплексе с модельными расчетами поверхностных волн для определения основных механизмов и параметров придонной динамики, а также величин механических напряжений на поверхности дна, которые вызывают горизонтальный перенос и формирование вертикальных профилей донного материала.

### Материалы и методы

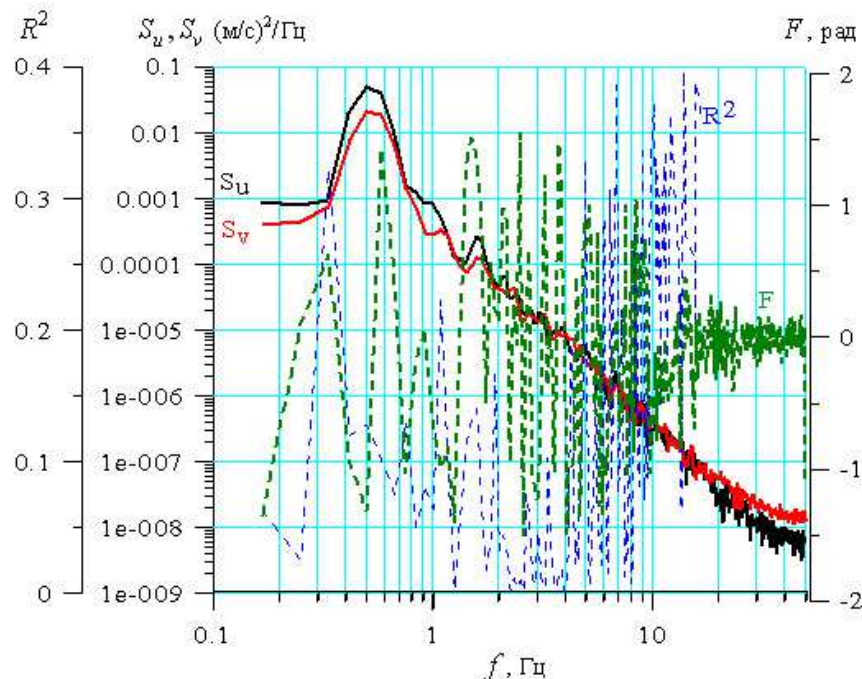
Измерения пульсаций скорости течения были выполнены трехкомпонентным электромагнитным измерителем, установленным неподвижно в специальной раме на расстоянии 0,25 м от поверхности морского дна. На этой раме смонтирована аппаратура комплекса «Донная станция» (рис. 1), который был установлен в юго-восточной части о. Коса Тузла на глубине 1,5 м и на расстоянии ~10 м от береговой линии.



**Р и с. 1.** Комплекс «Донная станция», расположенный на юго-восточной оконечности о. Коса Тузла: 1 – датчик пульсаций трех компонент вектора скорости течения  $u$ ,  $v$ ,  $w$ , температуры  $T$  и электропроводности  $C$ ; 2 – измерители виброускорений по трем осям (крен, дифферент, азимутальный угол), а также гидростатического давления; 3, 4, 5 – ловушки взвеси; 6 – электроника ловушек; 7 – измеритель показателя ослабления направленного света (лазерный прозрачномер); 8 – центральный модуль (питание, связь)

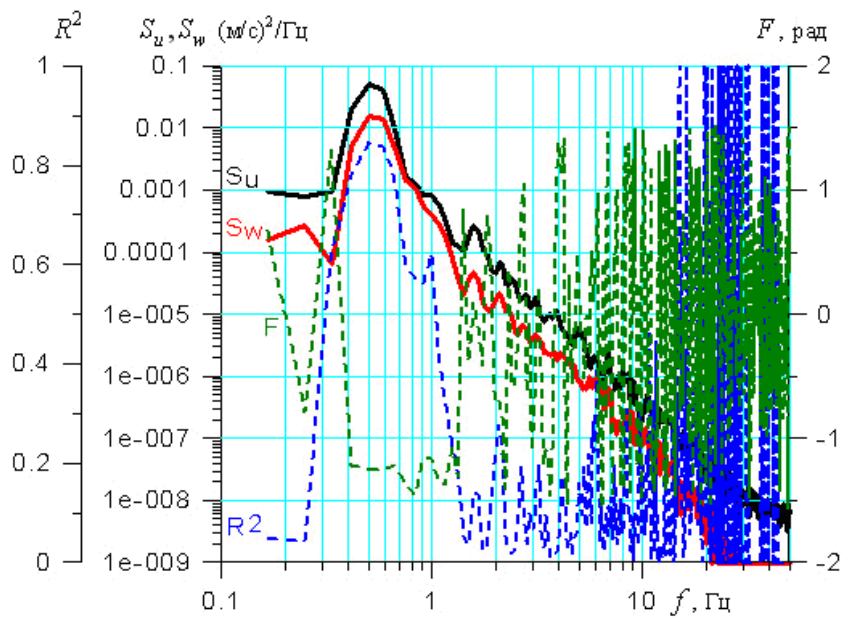
Измерения выполнялись 22 – 25 августа 2008 г. и состояли из 32 серий продолжительностью 7 ... 24 мин. Преобладал устойчивый северо-восточный ветер со средней скоростью 7 м/с. Измерительные оси датчика скорости  $ox$  и  $oy$  (соответственно  $u$ - и  $v$ -компоненты скорости течения) были установлены в горизонтальной плоскости, причем ось  $ox$  направлена вдоль меридиана на север, а третья измерительная ось  $oz$  ( $w$ -компонента) ориентирована вертикально вверх. Частота измерений 100 Гц, данные в виде физических величин пульсаций скорости течения (м/с) вводились непосредственно в память персонального компьютера. Так как характерный период поверхностных волн был равен  $\sim 2$  с, продолжительность указанных серий обеспечила высокую статистическую достоверность спектральных характеристик основных волновых возмущений и индуцированной турбулентности в диапазоне частот 0,1 ... 50 Гц. Расчеты спектральных характеристик выполнены по хорошо из-

вестным алгоритмам путем Фурье-преобразования корреляционных функций [5]. Для обработки из общих массивов измеренных данных отбирались ряды по 10000 отсчетов, длина корреляционных функций составляла 600 отсчетов, что обеспечивало спектральное окно в указанном частотном диапазоне. Число степеней свободы при оценке всех спектров равно 33, что соответствует неравенству  $-0,15 \leq \log(S_D / S) \leq 0,18$ , где  $S_D$  – действительное значение,  $S$  – выборочная оценка спектра. По оси ординат это совпадает с диапазоном выборочной изменчивости оценок спектров, равной 33% одного порядка (рис. 2 – 4).

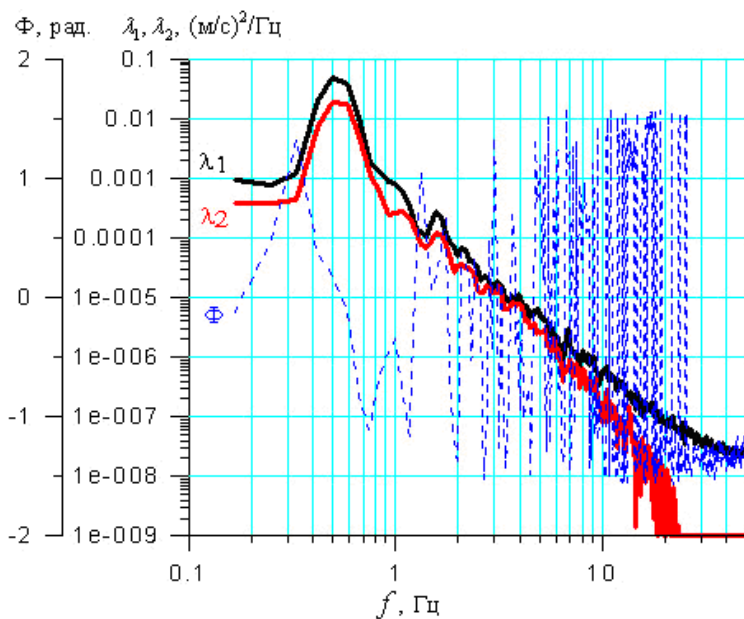


**Р и с. 2.** Спектры горизонтальных  $u, v$  составляющих пульсаций скорости течения, квадрата когерентности  $R^2$  и фазового сдвига  $F$

Основные особенности спектральных характеристик составляющих вектора скорости течения состоят в следующем (рис. 2, 3): пик спектральной плотности приходится на период 2 с, что характерно для поверхностных волн на небольших глубинах вблизи берега; резкое уменьшение когерентности соответствует частотам более 0,8 ... 1 Гц; фазовый сдвиг между вертикальной и горизонтальной составляющими вектора скорости в области высокой когерентности (0,4 ... 0,8 Гц) изменяется в пределах  $71 \dots 76^\circ$ , что близко к квадратурной зависимости между горизонтальной и вертикальной волновыми скоростями; для диапазона частот от 0,8 ... 1 до 50 Гц наблюдаются резкие, неупорядоченные колебания когерентности и фазового сдвига, характерные для мелкомасштабных турбулентных флуктуаций. Для этого диапазона частот спектры составляющих скорости изменяются как  $S_{u,v,w} \propto f^{-3}$ .



**Р и с. 3.** Спектры горизонтальной  $u$  и вертикальной  $w$  составляющих пульсаций скорости течения, квадрата когерентности  $R^2$  и фазового сдвига  $F$



**Р и с. 4.** Спектры собственных значений тензора спектральной плотности  $\lambda_1, \lambda_2$  и угла  $\Phi$  между осью  $\lambda_1$  и плоскостью меридиана

В общем случае спектральные характеристики пульсаций вектора скорости описываются тензором спектра  $S_V$ , который можно представить следующим образом [6]:

$$S_V = \begin{vmatrix} S_{uu}, S_{uv}, S_{uw} \\ S_{vu}, S_{vv}, S_{vw} \\ S_{wu}, S_{wv}, S_{ww} \end{vmatrix}, \quad (1)$$

где  $S_{uu}, S_{vv}, S_{ww}$  – автоспектры;  $S_{uv} = C_{uv} - iQ_{uv}$  – взаимный спектр;  $C_{uv}$  – ко-спектр;  $Q_{uv}$  – квадратурный спектр.

Симметричная и кососимметричная части тензора  $S_V$  равны соответственно

$$S_C = \begin{vmatrix} S_{uu}, C_{uv}, C_{uw} \\ C_{uv}, S_{vv}, C_{vw} \\ C_{uw}, C_{vw}, S_{ww} \end{vmatrix}, \quad S_K = \begin{vmatrix} 0, -iQ_{uv}, -iQ_{uw} \\ iQ_{uv}, 0, -iQ_{vw} \\ iQ_{uw}, iQ_{vw}, 0 \end{vmatrix} \quad (2)$$

и могут быть использованы для расчета тензорных инвариантов пульсаций вектора скорости, параметры которых не зависят от ориентации измерительных осей датчика скорости. В трехмерном случае эти расчеты являются весьма громоздкими, а геометрическая интерпретация – не наглядной. В связи с этим в дальнейшем анализе использован тензор спектральной плотности для горизонтальных составляющих вектора скорости:

$$S_V = \begin{vmatrix} S_{uu}, C_{uv} - iQ_{uv} \\ C_{uv} + iQ_{uv}, S_{vv} \end{vmatrix}, \quad (3)$$

$$S_C = \begin{vmatrix} S_{uu}, C_{uv} \\ C_{uv}, S_{vv} \end{vmatrix}, \quad S_K = \begin{vmatrix} 0, iQ_{uv} \\ -iQ_{uv}, 0 \end{vmatrix}. \quad (4)$$

Фазовая траектория движения частиц воды на частоте  $f$  представляет собой замкнутую фигуру (окружность, эллипс или линию возвратно-поступательных колебаний), оси  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  которой являются собственными значениями симметричной части тензора  $S_V$ , а их значения инвариантны к ориентации системы отсчета. Пространственная ориентация большой оси  $\lambda_1$  относительно оси  $ox$  определяется по соотношению

$$\varphi = \arctg \frac{2C_{uv}}{S_{uu} - S_{vv}},$$

причем

$$\lambda_{1,2} = 0,5[S_{uu} + S_{vv} \pm \sqrt{(S_{uu} - S_{vv})^2 + 4C_{uv}^2}]. \quad (5)$$

На рис. 4 представлены вычисленные спектры собственных значений ( $\lambda_1, \lambda_2$ ) симметричной части тензора, а также фазового угла между  $ox$  и

большой осью эллипса  $\lambda_1$ . Видно, что основное возмущение (период 2 с) проявляется в виде эллипса, большая ось которого направлена с северо-востока на юго-запад под углом  $10,5^\circ$  к плоскости меридиана, что соответствует среднему направлению ветра. Большая ось эллипса равна  $0,05$   $(\text{м/с})^2/\text{Гц}$ , малая ось  $0,02$   $(\text{м/с})^2/\text{Гц}$ . В области высоких частот, начиная с  $0,8 \dots 1,0$  Гц, фазовый угол изменяется хаотично, что указывает на неупорядоченные, некогерентные пульсационные движения, характерные для турбулентности.

К числу инвариантных параметров тензора спектра скорости относят индикатор вращения  $D = -2iQ_{uv}$ , характеризующий направление и интенсивность вращательных движений. Для основных возмущений с периодом 2 с действительное значение индикатора вращения по абсолютной величине равно  $0,022$   $(\text{м/с})^2/\text{Гц}$ , что соответствует вращению вектора скорости по часовой стрелке, если смотреть на измерительные оси сверху вниз.

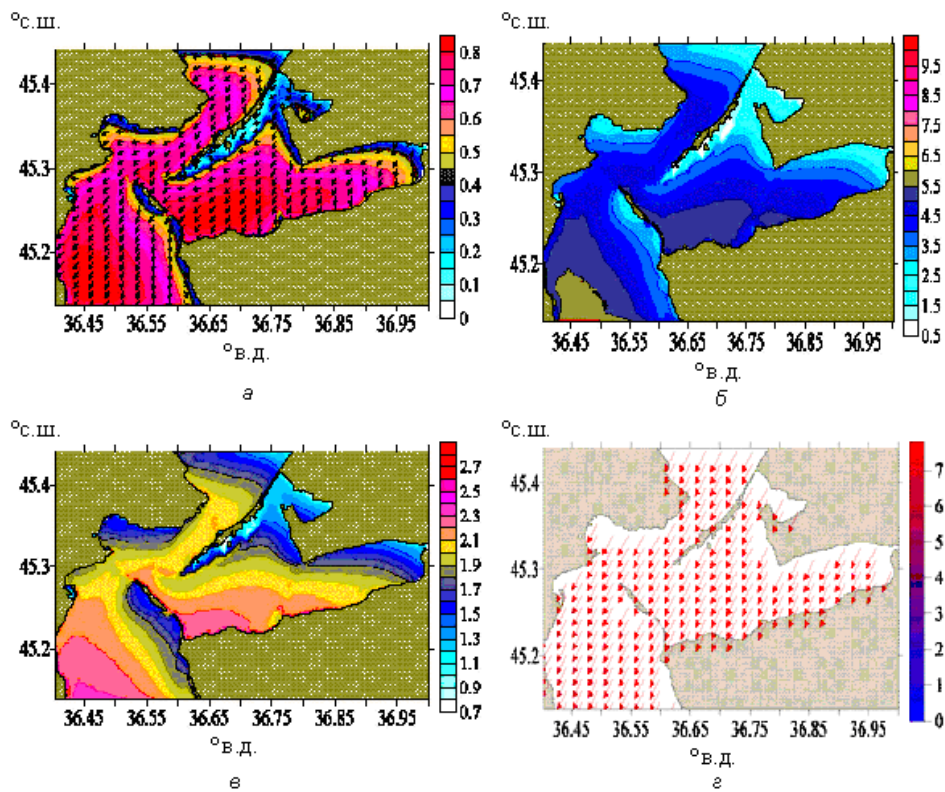
Оценки параметров поверхностных волн были выполнены по модели SWAN. Поле скорости ветра вычислено на основе натуральных данных, усвоенных в модели MM-5, расчеты проводились методом вложенных сеток [7]. Основные результаты численных расчетов показаны на рис. 5. Параметр модели SWAN (скорость диссипации энергии обрушения волн) был подобран таким образом, чтобы вычисленный период поверхностных волн  $T_w$  на восточной оконечности о. Коса Тузла был близок к 2 с, что соответствует данным измерений пульсаций скорости течения на «Донной станции». При этом длина волны  $\lambda$  равна  $\sim 5,8$  м, высота волн с обеспеченностью 3% составляет  $0,6 \dots 0,65$  м, средняя высота и амплитуда волн равны  $0,44$  и  $0,22$  м. Отношения глубины моря к длине волны  $h/\lambda$  и средней высоты волны к ее длине  $H/\lambda$  равны  $0,2586$  и  $0,07586$  соответственно. Из диаграммы применимости различных моделей поверхностных волн (рис. 6) видно, что полученные значения  $h/\lambda$  и  $H/\lambda$  относятся к области нелинейных волн Стокса, профиль которых описывается соотношением

$$\eta(x, t) = k^{-1} \sum_{n=1}^{\infty} F_n(h/\lambda) \cos[n(kx - \omega t)], \quad (6)$$

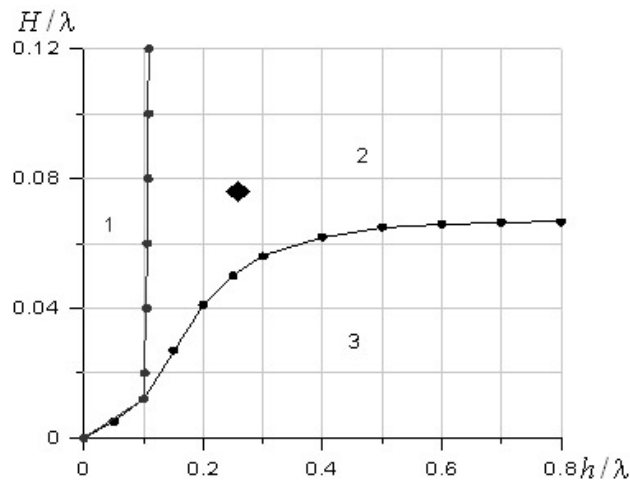
где  $F_n(h/\lambda)$  – параметр профиля волны, причем  $F_1 = a$ ,  $F_2 = a^2 F_{22} + a^4 F_{24}$ ,  $F_3 = a^3 F_{33} + a^5 F_{35}$ ,  $F_4 = a^4 F_{44}$ ,  $F_5 = a^5 F_{55}$ ,  $a$  – параметр высоты волны, который определяется из решения нелинейного уравнения

$$0,5kH = a + a^3 F_{33} + a^5 (F_{35} + F_{55}). \quad (7)$$

Для рассматриваемых условий значение параметра  $a$  получено методом последовательных приближений и равно  $0,232$ .



**Р и с. 5.** Результаты расчетов поверхностных волн: *a* – направление распространения и высоты волн 3-процентной обеспеченности (м) по данным измерений 23.08.2008 г. в 15:00; *б* – длины волн (м); *в* – периоды волн (с); *г* – скорость и направление ветра. Параметры волн показаны на цветных шкалах



**Р и с. 6.** Диаграмма применимости модели кноидальных волн (1), нелинейных волн Стокса (2) и линейных волн малой амплитуды (3).  $H/\lambda$  – отношение высоты волны к ее длине,  $h/\lambda$  – отношение глубины к длине волны [8, 9]. Значком показано положение параметров поверхностных волн в прибрежной зоне о. Коса Тузла



Горизонтальная  $v_x$  и вертикальная  $v_y$  составляющие скорости волнового течения вычисляются по следующим соотношениям [8, 9]:

$$v_x = \frac{\omega}{k} \sum_{n=1}^5 G_n \frac{\cosh(nky)}{\sinh(nkh)} \cos[n(kx - \omega t)], \quad (8)$$

$$v_y = \frac{\omega}{k} \sum_{n=1}^5 G_n \frac{\sinh(nky)}{\sinh(nkh)} \sin[n(kx - \omega t)],$$

где  $G_1 = aG_{11} + a^3G_{13} + a^5G_{15}$ ,  $G_2 = 2(a^2G_{22} + a^4G_{24})$ ,  $G_3 = 3(a^3G_{33} + a^5G_{35})$ ,  $G_4 = 4a^4G_{44}$ ,  $G_5 = 5a^5G_{55}$ . Зависимости  $F_{ij}(h/\lambda) = f(h/\lambda)$  для волн первых пяти порядков приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

**Зависимости параметров формы волны Стокса от  $z = h/\lambda$  при достоверности аппроксимации  $R^2$**

Зависимость $F_{ij} = f(z = h/\lambda)$	Диапазон	$R^2$
$F_{22} = 0,2z^{-1,1}$	$0,10 \leq z \leq 0,6$	0,854
$F_{24} = 0,505z^{-0,51}$	$0,15 \leq z \leq 0,6$	0,950
$F_{33} = 0,077z^{-1,87}$	$0,10 \leq z \leq 0,6$	0,835
$F_{35} = 0,469z^{-1,26}$	$0,15 \leq z \leq 0,6$	0,877
$F_{44} = 0,09z^{-1,70}$	$0,10 \leq z \leq 0,6$	0,822
$F_{55} = 0,062z^{-2,15}$	$0,10 \leq z \leq 0,6$	0,822

Параметры скорости волны зависят от  $z = h/\lambda$ , соотношения для их расчета приведены в табл. 2. Вертикальная координата  $y$  в соотношениях (8) отсчитывается от поверхности дна.

Дисперсионное соотношение для нелинейных волн Стокса записывается как

$$\omega^2 = gk(1 + a^2C_1 + a^4C_2) \operatorname{tgh}(kh), \quad (9)$$

где  $C_1 = f_1(h/\lambda)$ ;  $C_2 = f_2(h/\lambda)$  – параметры частоты волны и давления из [8, 9]. Использование для анализа модели нелинейных волн Стокса в данном случае обеспечивает наиболее точное воспроизведение реальных характеристик поверхностных волн.

Как уже отмечалось, высокочастотная часть спектра пульсаций скорости течения (начиная с частоты 0,8 ... 1 Гц) имеет структуру, характерную для мелкомасштабной турбулентности. Известно [10], что колмогоровские масштабы длины, скорости и времени при этом равны соответственно

$$l_K = \nu^{0,75} \varepsilon_0^{-0,25}, \quad \nu_K = (\nu \varepsilon_0)^{0,25}, \quad t_K = \nu^{0,5} \varepsilon_0^{-0,5}, \quad (10)$$

где  $\varepsilon_0$  – скорость диссипации энергии турбулентности:

$$\varepsilon_0 = 2\nu \int_0^{\infty} k^2 S_V(k) dk, \quad (11)$$

$\nu$  – молекулярная вязкость ( $\nu \cong 1,0 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с),  $k$  – волновое число. Оценка  $\varepsilon_0$  выполнена по известному соотношению А. Бенилова для развитого волнения и при  $kh > 1$ , что соответствует условиям проведения измерений [11]:

$$\varepsilon_0 = \gamma \frac{V_w^3}{\lambda} \left(\frac{H}{\lambda}\right)^3 [\exp(-\frac{6\pi z}{\lambda})], \quad (12)$$

где  $\gamma \cong 1$  – постоянная;  $V_w$  – фазовая скорость;  $z$  – глубина установки датчика. Для рассматриваемых условий  $\varepsilon_0 = 3,17 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с<sup>3</sup>, что совпадает с диапазоном известных оценок этого параметра [11].

Т а б л и ц а 2

**Зависимости параметров скорости волны Стокса от  $z = h/\lambda$  при достоверности аппроксимации  $R^2$  в диапазоне  $0,1 \leq z \leq 0,6$**

Зависимость $G_{ij} = f(z = h/\lambda)$	$R^2$
$G_{11} = 1$	1,000
$G_{13} = -369,23z^4 + 614,11z^3 - 384,57z^2 + 105,01z - 11,29$	0,996
$G_{15} = 3621,3z^5 - 7535,6z^4 + 6167,1z^3 - 249z^2 + 499,2z - 41$	0,950
$G_{22} = 0,0004z^{-4,02}$	0,982
$G_{24} = -36640z^6 + 84299z^5 - 78843z^4 + 38349z^3 - 10224z^2 + 1414,6z - 78,54$	0,999
$G_{33} = -1085,2z^5 + 2154,6z^4 - 1658,7z^3 + 617,46z^2 - 110,81z + 7,63$	0,994
$G_{35} = 0,0135z^{-2,637}$	0,934
$G_{44} = 187,5z^5 - 393,02z^4 + 323,52z^3 - 130,8z^2 + 25,99z - 2,0292$	0,999
$G_{55} = -6626,3z^6 + 15178z^5 - 14118z^4 + 6820,9z^3 - 1803,9z^2 + 247,4z - 13,73$	0,999

Микромасштаб турбулентности  $l_K$  равен 0,43 мм на частоте 5,6 Гц. Граница равновесного интервала турбулентности определена по положению безразмерного параметра  $kl_K$ , соответствующего максимуму спектра диссипации турбулентной энергии. По данным [12], этот параметр приближенно ра-

вен 0,1, что совпадает с граничным масштабом равновесного интервала  $\cong 2,5$  см.

### Результаты

По результатам расчетов волнового поля вблизи о. Коса Тузла по модели SWAN получены следующие данные: период волны  $T_w = 2$  с, длина волны  $\lambda = 5,8$  м, средняя высота и амплитуда  $H = 0,44$  м и  $a_w = 0,22$  м соответственно. Амплитуды горизонтальной  $V_x$  и вертикальной  $V_y$  составляющих волновой скорости на поверхности моря равны:

$$V_x = \frac{2\pi H \cosh(kh)}{T_w \sinh(kh)} = 0,74 \text{ м/с}, \quad V_y = \frac{2\pi H}{T_w} = 0,69 \text{ м/с}. \quad (13)$$

Для расчета аналогичных параметров по модели нелинейных волн Стокса пятого порядка использован предварительно определенный параметр высоты волны  $a = 0,232$ .

Амплитуды горизонтальной  $V_{Sx}$  и вертикальной  $V_{Sy}$  составляющих волновой скорости течения для первой гармоники волны Стокса вычислены на основе соотношений (8):

$$V_{Sx} = \frac{\omega}{k}(aG_{11} + a^3G_{13} + a^5G_{15}) \frac{\cosh kh}{\sinh kh} = 0,69 \text{ м/с}, \quad (14)$$

$$V_{Sy} = \frac{\omega}{k}(aG_{11} + a^3G_{13} + a^5G_{15}) = 0,64 \text{ м/с}.$$

Относительные расхождения значений амплитуды горизонтальной составляющей скорости по кинематическим соотношениям и по модели волн Стокса пятого порядка составляют 6,8 и 6,9% соответственно для горизонтального и вертикального компонентов скорости волнового течения.

Расчет указанных амплитуд составляющих скорости по модели волн Стокса пятого порядка на глубине 1,25 м выполнен по соотношениям (8). Результаты для первых трех гармоник таких волн приведены в табл. 3.

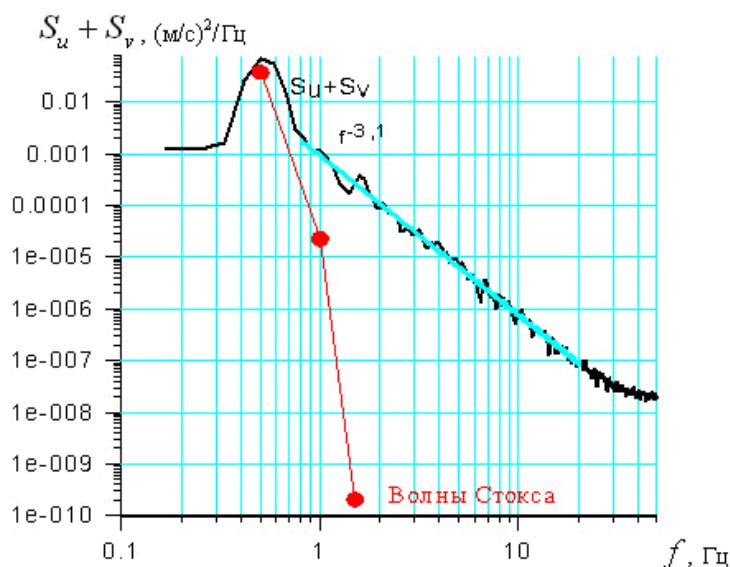
Т а б л и ц а 3

#### Параметры трех первых гармоник волн Стокса пятого порядка

Номер гармоники	Период, с	Частота, Гц	$V_{Sx}$ , м/с	$V_{Sy}$ , м/с	$\sigma_{Sx}^2$ , (м/с) <sup>2</sup>	$\sigma_{Sy}^2$ , (м/с) <sup>2</sup>
1	2,000	0,5	0,270	0,0714	0,0363	0,00253
2	1,000	1,0	$4,53 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$1,01 \cdot 10^{-5}$	$2,4 \cdot 10^{-6}$
3	0,667	1,5	$1,59 \cdot 10^{-5}$	$1,07 \cdot 10^{-5}$	$1,25 \cdot 10^{-10}$	$5,68 \cdot 10^{-11}$

Спектральные компоненты первых трех гармоник показаны на рис. 7. Видно, что первая гармоника совпадает с измеренным спектром пульсаций скорости, однако, начиная с частоты 0,8 ... 1 Гц, наблюдается значительное

расхождение по экспериментальным данным между моделью волн Стокса и спектром скорости. В диапазоне частот 0,8 ... 1 – 10 ... 15 Гц спектр пульсаций пропорционален  $f^{-3,1}$ , что, как уже было отмечено, соответствует турбулентности.



**Р и с. 7.** Спектральные характеристики горизонтальных составляющих пульсаций скорости  $S_u + S_v$ , первых трех гармоник нелинейных волн Стокса (красные кружки) и придонной турбулентности  $f^{-3,1}$

Определение скорости придонного трения  $u_*$  (динамическая скорость на дне) выполнено путем суммирования коспектров  $C_{u,w}(f)$  пульсаций скорости  $u, w$  в указанном диапазоне частот равновесного интервала придонной турбулентности  $0,9 \leq f \leq 5,55$  Гц:

$$u_* = \sqrt{\sum_{f_T}^{f_R} C_{u,w}(f) \Delta f}, \quad (15)$$

где интервал дискретности 0,01 с; длина корреляционной функции 600 точек;  $\Delta f = 1/12$  Гц;  $u_* = 0,018$  м/с, что является типичным значением для аналогичных условий. Турбулентное напряжение  $\tau_t$  на поверхности дна равно  $\rho u_*^2 = 0,33$  Н/м<sup>2</sup>.

Представляет интерес сопоставление этой оценки на основе данных прямых измерений с результатами известных модельных оценок для волнового придонного пограничного слоя [13]. Известны различные модели типа  $(u_* / U_{mo}) = F(p_i, i = 1, 2...)$ , где  $p_i$  – параметры придонного пограничного слоя, в том числе величины, характеризующие неровность морского дна;

$U_{mo}$  – амплитуда волновой скорости вблизи поверхности дна. Рассмотрим наиболее известные модели такого типа.

1. В работе [14]

$$\frac{u_*}{U_{mo}} = 0,5 \sqrt{f_w \left( \frac{a_w}{d_H} \right)}, \quad (16)$$

$$f_w = \exp[-5,977 + 5,213(a_w / d_H)^{-0,194}] \quad \text{при } 1,47 < a_w / d_H < 300,$$

$$f_w = 0,32 \quad \text{при } 1,47 > a_w / d_H,$$

где  $d_H = 4d$  – масштаб неровности дна или эквивалент шероховатости Никурадзе;  $d$  – средний размер фракций донного материала;  $a_w = T_w U_{mo} / 2\pi$  – амплитуда горизонтальных волновых колебаний вблизи поверхности дна. В рассматриваемом случае  $U_{mo} = 0,26$  м/с,  $a_w = 0,083$  м,  $u_* = 0,0165$  м/с.

2. В работе [15]

$$\frac{u_*}{U_{mo}} = \frac{\kappa}{\ln(1,6 \frac{a_w}{d} + 1)}, \quad (17)$$

где  $\kappa = 0,41$  – постоянная Кармана;  $u_* = 0,0184$  м/с.

3. В работе [16]

$$\frac{u_*}{U_{mo}} = 0,104 \left( \frac{H}{d_H} \right)^{-0,182}, \quad (18)$$

где  $u_* = 0,0084$  м/с.

4. В работе [17]

$$\frac{u_*}{U_{mo}} = \frac{\kappa}{\ln\left(\frac{3\pi}{4} \sqrt{\frac{2}{\text{Re}}} \frac{a_w}{d} + 5\right)}, \quad (19)$$

где  $\text{Re} = \sqrt{\frac{\pi}{\nu T_w}} \frac{H}{\sinh(kh)}$ ;  $u_* = 0,023$  м/с.

5. В работе [18]

$$\frac{u_*}{U_{mo}} = \frac{0,5\kappa}{[\text{ker}^2(2\sqrt{\zeta_0}) + \text{kei}^2(2\sqrt{\zeta_0})]^{0,5}}, \quad (20)$$

где  $\zeta_0 = d_H / l = 4d / l$ ;  $l = \kappa \nu_* / \omega$  – масштаб высоты неровностей дна;  $\text{ker}(z)$ ,  $\text{kei}(z)$  – функции Кельвина нулевого порядка. После аппроксимации

$$N_0(z) = [\text{ker}^2(z) + \text{kei}^2(z)]^{0,5} = Az^{-n}, \quad A = 0,5355, \quad n = 0,2594, \quad 5,5 < z < 0,55,$$

$$\frac{u_*}{U_{mo}} = \left( \frac{0,5\kappa^{1-n}}{A} \right)^{1/(1+n)} \left( \frac{a_w}{d} \right)^{-n/(n+1)}, \quad u_* = 0,041 \text{ м/с.}$$

6. В работе [19]

$$\frac{u_*}{U_{mo}} = 0,122 \left( \frac{a_w}{H} \right)^{0,1665} \left( \frac{a_w}{d_H} \right)^{-0,1665}, \quad (21)$$

где  $u_* = 0,0108$  м/с.

Среднее значение динамической скорости по этим оценкам составляет  $\langle u_* \rangle = 0,0196$  м/с, что примерно на 8,5% отличается от данных прямых измерений. Наиболее близкие значения к данным по экспериментальным спектрам дают модели из работ [14, 15], при этом относительное расхождение не превышает 3%.

Полученное значение скорости трения  $u_*$  использовано для определения возможности применения модели переменного логарифмического пограничного слоя для рассматриваемых условий. При этом, учитывая, что характерное время формирования волнового ламинарного и турбулентного пограничных слоев (толщины 0,8 мм и 3,5 см) значительно (по крайней мере в 10 и более раз) меньше периода волны, орбитальную волновую скорость можно рассматривать как «медленное» внешнее течение. Известно [17], что профиль амплитуды средней скорости в таком слое равен

$$u(y) = u_* \left( 5,52 \log \frac{yu_*}{\nu} + 5,84 \right) \quad (22)$$

при  $u_* = 0,018$  м/с,  $y = 0,25$  м,  $\nu = 1,0 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с,  $u(0,25) = 0,468$  м/с. С другой стороны, по данным вычисленного экспериментального спектра горизонтальных составляющих скорости течения (рис. 7) дисперсия пульсаций скорости равна 0,096 (м/с)<sup>2</sup>, стандартное отклонение  $\sigma_v = 0,31$  м/с, а амплитуда скорости течения  $\sqrt{2} \cdot 0,31 = 0,438$  м/с, что достаточно хорошо соответствует модельной оценке.

Согласно [17], коэффициент турбулентной вязкости (диффузии импульса) в логарифмическом пограничном слое имеет вид

$$K_T = \kappa u_* y, \quad (23)$$

где  $\kappa = 0,42$ ;  $y$  – расстояние от поверхности дна. При  $u_* = 0,018$  м/с  $y = 0,25$  м,  $K_T = 1,89 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup>/с, или 18,9 см<sup>2</sup>/с, что соответствует оценкам аналогичных параметров, полученным различными методами [20].

Подвижность различных фракций донного материала существенно зависит от их размеров [7, 15]. Поэтому гранулометрический состав играет важную роль в динамике изменений рельефа дна под действием волн и течений. В настоящей работе использованы осредненные данные инженерных геологических изысканий в нескольких зонах Керченского пролива [7]. В табл. 4

представлено распределение основных фракций донного материала по их размерам  $d$ , а также других параметров. В их числе безразмерный параметр  $D_* = d(g\gamma'v^{-2})^{0,33}$ ; число Шильдса (*Shields numbers*)  $Y = u_*^2 / gd\gamma'$ ,  $\gamma' = (\rho_s - \rho_w) / \rho_w$ ; критическое число Шильдса  $Y_{cr}$ , которое определяется по функциональной зависимости  $Y_{cr} = f(D)$  [7, 15]; критическая скорость трения  $u_{*cr} = (Y_{cr}gd\gamma')^{0,5}$ . Также определена безразмерная концентрация взвеси на дне  $C_b = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_b - \rho_w} = 0,035 \left( \lg \frac{u_* D_*^{0,7}}{W_b} \right)^{3,75}$ , где  $\rho_s$ , кг/м<sup>3</sup> – плотность взвеси в воде,  $\rho_w$  – плотность воды,  $\rho_b \cong 2600$  кг/м<sup>3</sup> – плотность донного грунта.

Т а б л и ц а 4

**Процентное содержание фракций донного материала по их размерам и некоторые другие параметры**

Средний размер $d$ , мм	Процентное содержание	Безразмерный параметр $D_*$	Гидравлическая крупность взвешенных частиц $W_s$ , м/с	Гидравлическая крупность частиц на поверхности дна $W_b$ , м/с	Показатель степени $m = W_s / kv_s$	Число Шильдса $Y \cdot 10^3$	Критическое число Шильдса $Y_{cr} \cdot 10^3$	Критическая скорость трения $u_{*cr}$ , м/с
3,5	12,7	67,95	0,18	0,26	23,78	5,89	44,0	1,11
1,5	25,8	29,12	0,14	0,17	18,66	13,8	34,5	0,82
0,75	12,5	14,56	0,087	0,096	11,5	27,5	30,6	0,62
0,375	13,8	7,28	0,046	0,052	6,11	55,0	39,0	0,39
0,175	31,2	3,40	0,015	0,017	2,0	118	70,6	0,20
0,075	4,1	1,46	0,0028	0,0036	0,39	275	164	0,082

Решение уравнения для концентрации взвеси на расстоянии  $z$  от поверхности дна в логарифмическом придонном пограничном слое можно записать следующим образом [7]:

$$C(z) = C_b \left( \frac{z}{z_0} \right)^{-W_s / kv_s} = C_b \left( \frac{z}{z_0} \right)^{-m}, \quad (24)$$

где  $z_0 = dY/6$  – минимальный размер неоднородностей на дне, равный для всех фракций  $3,44 \cdot 10^{-6}$  м.

Безразмерная концентрация взвеси на расстоянии 0,25 м от поверхности дна для всех фракций донного материала, за исключением самых мелких частиц ( $d = 0,075$  мм), является исчезающе малой величиной. Для указанных мелких частиц  $C(0,25) = 8,44 \cdot 10^{-6}$  или в размерном виде  $C_p = 13,5$  г/м<sup>3</sup>. При средней скорости течения  $U_g = 0,1 \dots 0,15$  м/с удельный перенос взвеси составляет 1,69 г/м<sup>2</sup>·с.

Амплитуда горизонтальной скорости волнового течения основной гармоники равна 0,28 м/с (табл. 3) при толщине слоя вертикальных колеба-

ний 0,18 м. Интегральный перенос взвеси в этом слое вычисляется по соотношению

$$C_I = C_b \int_{z_1}^{z_2} \left(\frac{z}{z_0}\right)^{-m} dz = \frac{C_b}{1-m} \left[ z_2 \left(\frac{z_2}{z_0}\right)^{-m} - z_1 \left(\frac{z_1}{z_0}\right)^{-m} \right], \quad (25)$$

где  $z_1 = 0,16$  м,  $z_2 = 0,34$  м. Удельный перенос мелкодисперсной взвеси в слое установки ловушки для рассматриваемых условий равен  $1,54 \cdot 10^{-6}$  или в размерном виде  $2,95 \cdot 10^{-4}$  кг/с·м ( $1,84 \cdot 10^{-7}$  м<sup>3</sup>/м·с). Учитывая, что размер отверстия  $L_l$  вертикальной ловушки равен 0,016 м, средняя скорость горизонтального переноса взвеси  $U_g = 0,12$  м/с, скорость вертикального опускания частицы  $W_s = 0,0028$  м/с, объем взвеси  $Q_V$ , попадающей в ловушку из указанного слоя, составляет

$$Q_V = C_I L_l (W_s / U_g) = 6,87 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/\text{с} \quad (26)$$

или  $1,48 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup> за 6 ч экспозиции ловушки. При площади ловушки  $1,256 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup> толщина слоя взвеси за указанное время составит  $\sim 1 \dots 1,2$  мм.

Другой, независимый, метод оценки толщины  $h_v$  слоя взвеси основан на соотношении [15]

$$\frac{\partial h_v}{\partial t} = -\frac{\partial q}{\partial x}, \quad (27)$$

где  $q = q_m \sin(\omega t - kx) = 1,84 \cdot 10^{-7}$  м<sup>3</sup>/с·м – удельный перенос взвеси в слое 0,16 – 0,34 м. При отрицательных значениях  $\partial q / \partial x$  толщина слоя взвеси увеличивается за счет осаждения частиц грунта, при положительных – уменьшается за счет увеличения интенсивности размыва. С учетом экранирующего действия ловушки при интенсификации размыва, т. е. в моменты времени, когда  $\partial q / \partial x > 0$ , использовано среднее отрицательное значение  $\partial q / \partial x$ .

Опуская вычисление интеграла  $\frac{kq_m}{0,5T_w} \int_0^{0,5T_w} \sin(\omega t - kx) dt$ , находим:

$$\Delta h_v = \frac{kq_m}{\pi} \Delta T = 6,34 \cdot 10^{-8} \Delta T, \quad (28)$$

где  $\Delta T$  – время экспозиции. При  $\Delta T = 6$  ч  $\Delta h_v \cong 1,4$  мм, что совпадает с приведенной выше оценкой.

Как известно [7, 15], перенос донного материала осуществляется в двух формах: в виде взвеси, соотношение (24), и в виде движения частиц непосредственно на поверхности дна. Первая форма переноса рассмотрена выше, для второй формы использованы основные соотношения модели Ван Райна (*Van Rijn*). В соответствии с этой моделью удельный перенос донного материала зависит от соотношения эффективной и критической скоростей трения, т. е. от отношения  $u_{*ef} / u_{*cr}$ . В рассматриваемом случае  $u_{*ef}$  для всех фрак-



ций равна нулю (критическая скорость трения больше действительной), и поэтому эта составляющая транспорта донного материала отсутствует.

## Выводы

1. Спектральная обработка данных измерений пульсаций скорости течения в диапазоне частот 0,1 ... 50 Гц показала, что при средней скорости устойчивого ветра 7 м/с в прибрежной зоне о. Коса Тузла (глубина 1,5 м) формируется сложная динамика поля скорости течения. Ее основными составляющими являются нелинейные поверхностные волны Стокса и мелкомасштабная турбулентность, индуцированная этими волнами. Согласно расчетам параметров нелинейных волн, выполненным по модели пятого порядка, амплитуда первой гармоники волновой скорости по данным измерений соответствует модельным расчетам с относительным расхождением не более 7%. Амплитуды второй и третьей гармоник волновой скорости на расстоянии от дна 0,25 м значительно меньше амплитуд турбулентных пульсаций на этих же частотах.

2. В диапазоне частот от 0,8 ... 1,0 до 12 ... 15 Гц спектры пульсаций скорости изменяются пропорционально  $f^{-3,1}$ , что по характеру изменчивости спектров когерентности и фазы соответствует режиму мелкомасштабной турбулентности. Скорость диссипации турбулентной энергии при использовании известного соотношения А. Бенилова равна  $3,17 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}^3$ . Микромасштаб турбулентности и соответствующая граничная частота  $f_r$  составляют 0,42 мм и 5,5 Гц.

3. По данным экспериментальных спектров пульсаций скорости течения определены динамическая скорость (скорость трения) на дне (0,018 м/с) и турбулентные напряжения (0,33 Н/м<sup>2</sup>), под действием которых происходит перемещение и взмучивание донного материала – формирование профилей взвеси. Обычно аналогичные оценки находят на основе полуэмпирических моделей. Выполненные расчеты для шести моделей показали, что указанные параметры имеют такой же порядок величины, как и вычисленные на основе экспериментальных спектров. Относительное отклонение среднего значения по результатам расчетов по шести моделям и полученной оценки не превышает 8,5%, для двух моделей – 3%.

4. При  $u_* = 0,018 \text{ м/с}$ ,  $y = 0,25 \text{ м}$  и  $\nu = 1,0 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  модельная оценка амплитуды скорости течения для логарифмического пограничного слоя  $u(0,25) = 0,468 \text{ м/с}$  согласуется с аналогичной оценкой по данным экспериментального спектра горизонтальных пульсаций вектора скорости  $u = 0,438 \text{ м/с}$ . Коэффициент турбулентной вязкости (диффузии импульса) равен 18,9 см<sup>2</sup>/с, что в целом совпадает с оценками аналогичного параметра, полученными различными методами.

5. Анализ транспорта донного материала при рассмотренных условиях показал, что подвижной является самая мелкая фракция со средним размером 0,075 мм. Под действием турбулентных напряжений эти частицы образуют профили взвеси, концентрация которой на расстоянии 0,25 м от поверхности

дна равна  $13,5 \text{ г/м}^3$ . Двумя независимыми методами определена толщина слоя взвеси в ловушках за период экспозиции 6 ч. Она равна 1 ... 1,5 мм, что соответствует фактическим данным.

Авторы выражают благодарность С.В. Федорову за выполненные расчеты характеристик поверхностных волн на основе прикладного пакета SWAN и О.И. Ефремову – за полезное обсуждение и рекомендации при подготовке статьи.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Спиридонова Е.О. Оценка влияния гидрометеорологических факторов на распределение донных осадков в Керченской бухте // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2007. – С. 235 – 239.
2. Ломакин П.Д., Спиридонова Е.О., Чепыженко А.И. и др. Антропогенные и природные источники взвешенного вещества в водах Керченского пролива // Морской экологический журнал. – 2008. – 7, № 4. – С. 51 – 59.
3. Иванов В.А., Дыкман В.З., Ефремов О.И. и др. Современные методы и средства контроля морской среды / Под ред. В.А. Иванова. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006. – 112 с.
4. Дыкман В.З., Маньковский В.И., Маньковская Е.В. Прозрачномер для определения параметров крупной взвеси в море методом измерения флуктуаций показателя ослабления направленного света // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. – Вып. 16. – С. 236 – 242.
5. Коняев К.В. Спектральный анализ случайных океанологических полей. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 207 с.
6. Бельшев А.П., Клеванцов Ю.П., Рожков В.А. Вероятностный анализ морских течений. – Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 264 с.
7. Иванов В.А., Кушнир В.М., Федоров С.В. Динамика изменений рельефа дна в Керченском проливе по данным космических съемок оптическими сканерами // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010. – Вып. 22. – С. 127 – 155.
8. Доусон Т. Проектирование сооружений морского шельфа. – Л.: Судостроение, 1986. – 286 с.
9. Skjelbreia L., Hendrickson A. Fifth order gravity wave theory // Proc. VII Conference on Coastal Engineering, 1961. – P. 184 – 196.
10. Филлипс О.М. Динамика верхнего слоя океана. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – 319 с.
11. Монин А.С., Ozmidov P.B. Океанская турбулентность. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 320 с.
12. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. – М.: Наука, 1967. – 720 с.
13. Кушнир В.М. Структура волнового пограничного слоя над ровным и неровным дном // Морской гидрофизический журнал. – 2005. – № 6. – С. 188 – 202.
14. Bijker E.W. Longshore current computation // Proc. ASCE. J. Waterway. Harborsand Coastal Engineering Division, 1971.
15. Иванов В.А., Михинов А.Е. Прогноз динамики наносов в прибрежной зоне моря (Практические рекомендации и примеры расчетов). – Севастополь, 1991. – 50 с. (Препринт / АН УССР. МГИ).
16. Faria A.F., Thornton E.B., Stanton T.P. et al. Vertical profiles of longshore currents and related bed shear stress and bottom roughness // J. Geophys. Res. – 1998. – 103, № C2. – P. 3217 – 3232.

17. *Прандтль Л.* Гидроаэромеханика. – М.: Иностранная литература, 1949. – 520 с.
18. *Grant W.D., Madsen O.S.* Combined wave and current interaction with a rough bottom // *J. Geophys. Res.* – 1979. – 84, № С4. – P. 1797 – 1808.
19. *Ninomiya K., Tagaya K., Murase Y.* A study on suction and securing of sit-on-bottom type offshore structure // *ОТС.* – 1972. – P. 873 – 886.
20. *Кушнир В.М.* Придонный пограничный слой в Черном море: экспериментальные данные, турбулентная диффузия, потоки // *Океанология.* – 2007. – 47, № 1. – С. 39 – 48.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,  
Севастополь  
E-mail: vdykman@alpha.mhi.iuf.net,  
vaivanov@alpha.mhi.iuf.net,  
kushnirv@yahoo.com

Материал поступил  
в редакцию 21.02.11  
После доработки 18.04.11

**АНОТАЦІЯ** Представлені результати спектральної обробки вимірювань трьох компонент пульсацій вектора швидкості течії в діапазоні частот 0,1...50 Гц для умов прибережної зони о. Коса Тузла (центральна частина Керченської протоки). Вимірювання виконані на відстані 0,25 м від поверхні морського дна на глибині 1,5 м. Обчислено просторовий розподіл характеристик поверхневих хвиль за допомогою прикладного пакету *SWAN*, параметри якого підстроєні так, щоб період хвиль відповідав даним вимірювань. Аналіз спектрів пульсацій вектора швидкості показав, що динаміка вказаної прибережної зони визначається нелінійними хвилями кінцевої амплітуди (хвилі Стокса) і дрібномасштабною турбулентністю. Визначені швидкість придонного тертя (динамічна швидкість) – 0,018 м/с, турбулентна напруга – 0,33 Н/м<sup>2</sup> і коефіцієнт турбулентної в'язкості (дифузії імпульсу) –  $1,89 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup>/с.

**Ключові слова:** спектри пульсацій вектора швидкості, нелінійні хвилі Стокса, дрібномасштабна турбулентність.

**ABSTRACT** Results of spectral processing of measurements of three components of fluctuations of the current velocity vector in the frequency band 0.1 ... 50 Hz are represented for the conditions of the coastal zone of the island Kosa Tuzla (the central part of the Kerch strait). The measurements are carried out at 0.25 m distance from the bottom on the depth 1.5 m. Spatial distribution of the surface waves' characteristics are calculated due to application of the software *SWAN* whose parameters are adjusted in such a way that the waves' period corresponds to the measurement data. Analysis of the spectra of current vector fluctuations shows that dynamics of the indicated coastal zone is conditioned by nonlinear waves of final amplitude (the Stokes waves) and small-scale turbulence. Defined are the velocity of near-bottom friction (dynamic speed) – 0.018 m/s, turbulent stresses – 0.33 N/m<sup>2</sup> and the turbulent viscosity coefficient (diffusion of momentum) –  $1.89 \cdot 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s.

**Keywords:** spectra of velocity vector fluctuations, nonlinear Stokes waves, small-scale turbulence.