

О.И. Ефремов, А.М. Чухарев

*Морской гидрофизический институт НАН Украины, г. Севастополь*

**КОГЕРЕНТНЫЕ ВИХРЕВЫЕ СТРУКТУРЫ  
В ВЕТРОВЫХ ВОЛНАХ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ  
НА ЧЕРНОМОРСКОЙ ОКЕАНОГРАФИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМЕ**

Приводятся результаты специальной обработки данных измерений, выполненных на океанографической платформе с помощью комплекса аппаратуры «Сигма-1» и «Восток-М». Методика обработки нацелена на исследование когерентных низкочастотных структур, формируемых вихревой компонентой ветровых волн. В ряде случаев удается выделить доминирующие частоты когерентных образований и оценить их пространственный масштаб. Предлагается интерпретация исследуемого явления как дополнительного фактора вертикального перемешивания.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** *комплекс аппаратуры, вихревые волны, когерентные структуры, вертикальное перемешивание.*

При исследованиях дрейфовых течений важная роль отводится трению, которое не позволяет приповерхностным водным массам разгоняться до скоростей, в какой-то мере сравнимых со скоростью ветра. Рассмотрение только молекулярной вязкости, действующей на крупномасштабное движение, сильно недооценивает роль трения, и приходится учитывать флуктуации скорости промежуточных размеров, которые генерируются в результате каскадной передачи энергии от течений до масштабов, где осуществляется молекулярная диссипация. Возникает представление о вертикальной турбулентной вязкости, которая может превосходить молекулярную на четыре порядка. Кроме того, вводится горизонтальная турбулентная вязкость, превышающая вертикальную еще примерно на четыре порядка [1].

Указанная упрощенная схема обладает рядом недостатков, из которых, по-видимому, важнейшим является тот факт, что в ней напрямую не присутствуют ветровые волны. В некоторых работах дополнительно учитывается вклад радиационных волновых напряжений в горизонтальную вязкость [2]. Вместе с тем представляется недооцененной особая роль вихревых волн (волн Герстнера), на долю которых, в соответствии с кинетическими представлениями, приходится значительная часть общей волновой энергии [3]. Краткое изложение результатов теории трохлоидальных волн Герстнера приводится в третьем разделе статьи.

Установление соответствия выводов теории и натурных измерений в данном случае представляется непростой задачей. Эффекты, отличающие вихревые волны от потенциальных, являются достаточно тонкими, и для их выявления требуются сложная измерительная аппаратура и специальная методика обработки данных. Описанию аппаратуры и методики обработки посвящены соответственно второй и четвертый разделы. Характеристики выявленных в результате обработки низкочастотных когерентных структур анализируются в пятом разделе статьи, в выводах обсуждается возможная роль этих структур в процессах вертикального перемешивания.

**Состав измерительной аппаратуры.** Многофункциональный измерительный комплекс «Сигма-1», предназначенный для исследования мелко-масштабных процессов в верхнем слое моря, был создан в отделе турбулентности совместно с сотрудниками отдела гидрофизики шельфа МГИ [4].

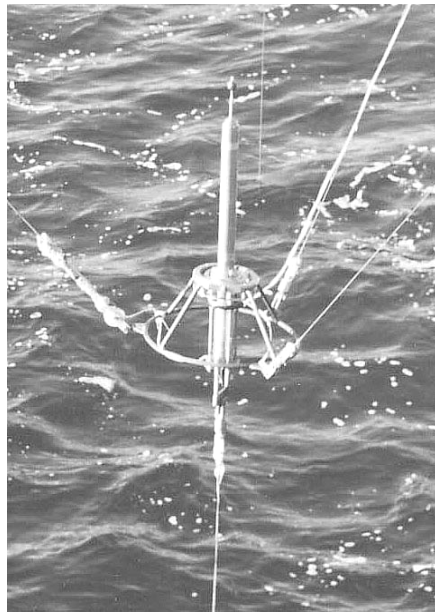


Рис. 1. Комплекс «Сигма-1» (позиционный вариант).

Общий вид комплекса, снаряженного для работы в приповерхностном слое, приведен на рис.1.

Комплекс «Сигма-1» измеряет три компоненты пульсаций вектора скорости течения  $U$ ,  $V$ ,  $W$ , температуру и электропроводность воды, пульсации температуры и электропроводности, гидростатическое давление. Характеристики измерительных каналов приведены в табл. 1. Помимо измерителей основных гидрофизических параметров комплекс снабжен также системой контроля положения его условной оси относительно магнитного меридиана (азимут) и плоскости горизонта (крен-дифферент), что позволяет учитывать движения самого прибора и однозначным образом связать измеренные величины компонент вектора скорости течения с неподвижной системой отсчета.

Чтобы максимально исключить гидродинамическое влияние корпуса прибора и оснастки на зону измерений и по возможности свести к минимуму движения самого прибора при измерениях в приповерхностном слое, была разработана и изготовлена система карданного подвеса для работы с океанографической платформой. Эта система позволяет фиксировать измеритель на выбранном горизонте, малая подвижность обеспечивается растяжкой при помощи большого груза, подвешенного на расстоянии 5 – 7 м ниже прибора.

Т а б л и ц а 1. Технические характеристики измерительного комплекса «Сигма-1».

Измеряемые параметры	Диапазон	Разрешение	Точность	Частота измерений
1. Три компоненты пульсаций скорости.	$\pm 2$ м/с	$10^{-3}$ м/с	$\pm 10\%$	для всех каналов 100 Гц
2. Температура	0 – 30°C	0,001°C	$\pm 5\%$	
3. Относительная электропроводность	0 – 0,9	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$\pm 5\%$	
4. Три компоненты линейных ускорений	$\pm 2g$	0,002 м/с <sup>2</sup>	0,002 м/с <sup>2</sup>	
5. Крен и дифферент	$\pm 20^\circ$	0,01°	$\pm 1^\circ$	
6. Азимут	0 – 360°	10°	$\pm 5^\circ$	
7. Давление	0 – 1 МПа	$5 \cdot 10^{-4}$	$\pm 1\%$	

Для статистической обработки информации, полученной измерительным комплексом «Сигма-1», создан набор программ, объединенных графическим пользовательским интерфейсом. Эти программы позволяют производить предварительную обработку данных (сглаживание, фильтрацию и т.д.), применять спектральный анализ. Программы работают в диалоговом режиме, реализована удобная визуализация анализируемых данных и спектральных характеристик.

В результате проведенной модернизации за счет повышения разрядности измерительных преобразователей было устранено деление каналов температуры и электропроводности на средние и пульсационные и принята одинаковая для всех измерительных каналов комплекса «Сигма-1» дискретность 100 Гц.

Для регистрации фоновых значений гидрофизических полей во время исследований турбулентности в приповерхностном слое моря использовался измерительный комплекс «Восток-М» (МГИ-1306). Внешний вид комплекса приведен на рис. 2, технические характеристики приведены в табл. 2.

Отличительная особенность этого измерителя скорости течения – наличие трех вертушек (импеллеров), равноудаленных от центра прибора и расположенных друг относительно друга под углом  $120^\circ$  [5]. Основная цель такой конструкции – уменьшение некосинусидальности диаграммы направленности импеллеров. Это также дает возможность определять модуль и направление горизонтального вектора скорости течения при любом положении прибора относительно магнитного меридиана, что позволяет использовать его для регистрации параметров в режиме реального времени, без применения не всегда надежных скользящих электроразъемов.

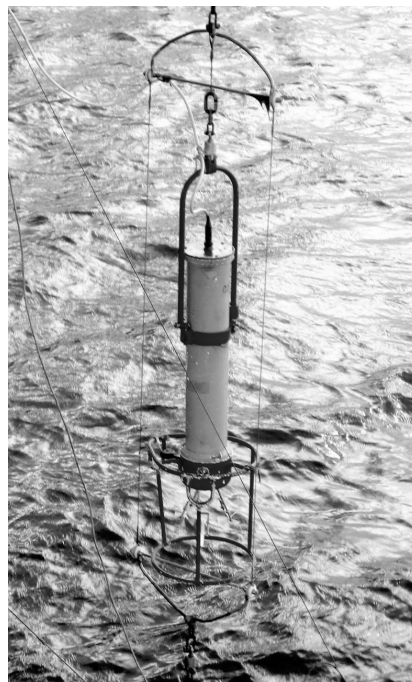


Рис. 2. Прибор «Восток-М».

Т а б л и ц а 2. Технические характеристики измерительного комплекса «Восток-М».

Измеряемые параметры	Диапазон	Точность	Дискретность
1. Модуль скорости течения $V_R$ .	0 – 1,8 м/с	$\pm (1 - 4 V_R) \cdot 10^{-2}$ м/с	дискретность измерений по всем каналам составляет 15; 30 или 60 с
2. Направление вектора скорости (азимут).	0 – $360^\circ$	$\pm (\arctg(4 + 1/V_R) \cdot 10^{-2} + 3)$	
3. Температура.	-2 – $35^\circ\text{C}$	$\pm 0,05^\circ\text{C}$	
4. Относительная электрическая проводимость.	0 – 1,6	$\pm 1,25 \cdot 10^{-3}$	

Каналы измерения температуры и электропроводности «Востока-М» обладают хорошей точностью и высокой стабильностью, что позволяет проводить дополнительный контроль средних параметров, полученных комплексом «Сигма-1».

При модернизации прибора (изготовленного в 1989 г.) в него добавлены устройства для записи и хранения цифровой информации (энергонезависимая твердотельная память). Для получения информации с прибора в режиме реального времени была произведена доработка устройства ввода-вывода и сделано дистанционное управление. При сохранении функции работы прибора в автономном режиме, появилась возможность его использования с подачей питания и выводом информации через кабель.

По методике использования на океанографической платформе «Сигма-1» и «Восток-М» составляют единый аппаратный комплекс. При смене горизонта измерения оба прибора перемещаются одновременно, с сохранением разнесения по горизонтали 4 м. Синхронизация измерений обеспечивается одновременным запуском таймеров приборов на каждом горизонте.

Описываемая аппаратура разрабатывалась для исследования мелко-масштабной и, соответственно, высокочастотной турбулентности в подповерхностном слое моря. Прибору «Восток-М», как уже указывалось, изначально отводилась вспомогательная роль регистратора фоновых значений гидрофизических полей. Необходимость использования полученных данных для изучения эффектов, связанных с вихревыми волнами, привела к значительному смещению акцентов в методике обработки. Данные прибора «Восток-М» потребовались для исследования низкочастотных когерентных структур и приобрели самостоятельное значение, в связи с чем понадобились более длинные ряды, пригодные для спектральной обработки. При выбранной ранее преимущественной дискретности 60 с отбирались непрерывные серии измерений продолжительностью не менее пяти часов. Данные комплекса «Сигма-1» осреднялись по 50 и 100 отсчетам для анализа собственно волновой части спектра и по 6 000 точек для совместной обработки с данными прибора «Восток-М».

**Трохоидальные волны Герстнера.** Математическое описание плоских вихревых волн конечной амплитуды на поверхности жидкости бесконечной глубины как точное решение лагранжевых уравнений гидродинамики было указано Герстнером в начале позапрошлого века. Координаты  $x$ ,  $z$  жидкой частицы как функции лагранжевых параметров  $\alpha$  и  $\beta$  меняются со временем по закону [6]

$$x = \alpha - ae^{-k\beta} \sin(k\alpha - \omega t), \quad z = \alpha + ae^{-k\beta} \cos(k\alpha - \omega t). \quad (1)$$

Здесь  $k$  – волновое число,  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  – частота волны, параметры  $\alpha$  и  $\beta$  обычно выбираются совпадающими с координатами центра круговой орбиты частицы,  $\alpha = x_0$ ,  $\beta = z_0$ ,  $a$  – амплитуда колебаний поверхности воды ( $z_0 = 0$ ). Ось  $z$  направлена вниз, так что  $\beta$  увеличивается с глубиной. Продольная и вертикальная составляющие скорости являются производными по времени от координат:

$$u = \partial x / \partial t = \omega ae^{-k\beta} \cos(k\alpha - \omega t), \quad w = \partial z / \partial t = \omega ae^{-k\beta} \sin(k\alpha - \omega t). \quad (2)$$

Профиль волны имеет форму трохойды и отличается от синусоиды большей заостренностью гребней. При значениях крутизны  $ak < 1$  форма трохойдальной волны практически неотличима от синусоиды, если  $ak = 1$  (предельное значение), профиль вырождается в циклоиду.

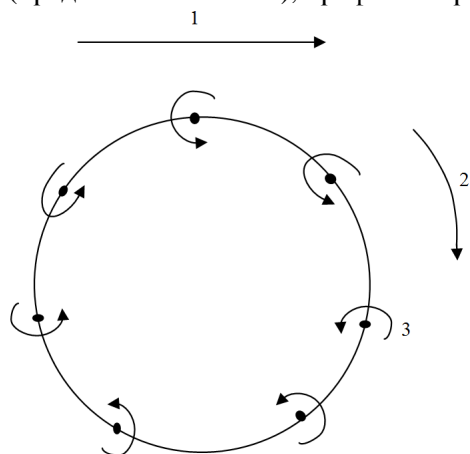


Рис. 3. Траектория и вихревое движение частицы жидкости в волне Герстнера. 1 – направление движения волны; 2 – траектория; 3 – вихрь.

Для волны предельной крутизны  $ak = 1$  ротор  $\zeta = \partial u / \partial z - \partial w / \partial x$  дается выражением

$$\zeta = \frac{2kce^{-2k\beta}}{1 - e^{-2k\beta}}. \quad (3)$$

Здесь  $c = \omega / k$  – фазовая скорость волны. Характер завихренности иллюстрируется рис. 3. Частицы жидкости в процессе кругового орбитального движения сами поворачиваются в противоположном направлении [7]. Размер такого индуцированного вихря примерно равен радиусу орбиты частицы и не превышает амплитуды волны. Ротор максимален на поверхности и экспоненциально уменьшается с глубиной.

Давление в циклоидальной волне определяется следующим выражением:

$$\frac{p}{\rho} = \frac{1}{k^2} (\omega^2 - gk) e^{-k\beta} \cos(k\alpha - \omega t) + \frac{\omega^2}{2k^2} e^{-2k\beta} + g\beta + const. \quad (4)$$

Здесь  $\rho$  – плотность воды,  $g$  – ускорение свободного падения. Для частиц, участвующих в волновом движении,  $\omega^2 = gk$ , и член в правой части (4), зависящий от времени, выпадает. В результате получается

$$\frac{p}{\rho} = \frac{g}{2k} e^{-2k\beta} + g\beta + const. \quad (5)$$

Для всех частиц жидкости с одинаковым  $\beta$  (среднее положение по вертикали) давление имеет постоянное, не зависящее от времени значение. Кроме того, волновые добавки к давлению в трохойдальной волне убывают с глубиной значительно быстрее, чем в синусоидальной волне на глубокой воде, а законы изменения скоростей и радиусов орбит частиц жидкости в обоих случаях одинаковы [8]. Это обстоятельство служит основой излагаемого в следующем разделе метода определения относительного вклада вихревых и потенциальных волн в суммарную энергию волновых смещений.

Вихрь для трохойдальных волн произвольной крутизны  $ak$  рассчитал Монин [9]:

$$\zeta_1 = \frac{2ca^2k^3e^{-2k\beta}}{1 - a^2k^2e^{-2k\beta}}. \quad (6)$$

В соответствии с моделью (см. рис. 3), можно сделать вывод, что при  $ak < 1$  угловая скорость вращения жидких частиц в трохоидальной волне  $\Omega$  меньше круговой частоты волны  $\omega$ :

$$\Omega = \frac{\zeta_1}{2} = \frac{\omega a^2 k^2 e^{-2k\beta}}{1 - a^2 k^2 e^{-2k\beta}}. \quad (7)$$

Реальное поле волн под ветром на глубокой воде может характеризоваться спектром возвышений [10]

$$\zeta(k) = Bk^{-3}, \quad (8)$$

где  $k$  – модуль волнового числа,  $B = 4 \cdot 10^{-3}$ . Квадрат крутизны волн  $s^2 = a_k^2 k^2$  в этом случае рассматривается как интегральный параметр

$$s^2 = \overline{a_k^2 k^2} = 2 \int_{k_1}^{k_2} \frac{B}{k} dk = 2B \ln \frac{k_2}{k_1}, \quad (9)$$

где  $k_1$  и  $k_2$  – границы участка спектра, дающего вклад в суммарную крутизну волн. В последнем равенстве полагается  $a_k^2 = 2\zeta(k)dk$ . Благодаря тому, что получаемая зависимость имеет логарифмический характер, ширина спектра влияет не очень сильно. В [3] используется модель, в которой  $k_2/k_1 = 70$ , и тогда  $s^2 = 3,4 \cdot 10^{-2}$ , в [10] считается, что крутизну определяют волны более узкого диапазона,  $k_2/k_1 = 16$ , и в этом случае  $s^2 = 2,2 \cdot 10^{-2}$ .

Таким образом, вихревые поверхностные волны, являясь составной частью поля ветровых волн, в процессе своего распространения должны непрерывно генерировать сравнительно низкочастотные вращательные движения частиц жидкости. Эти индуцированные вихри имеют радиусы порядка амплитуды волн, а их частота, в соответствии с приведенными модельными оценками средней крутизны волн, примерно в 30 или 45 раз меньше частоты спектрального максимума. Так, волны с характерным периодом пять секунд должны порождать волно-вихревые образования, имеющие периоды в диапазоне от двух до четырех минут. Такие динамические структуры могут быть исследованы с помощью данных прибора «Восток-М», необходимость привлечения которых связана с тем обстоятельством, что комплекс «Сигма-1» не может регистрировать флуктуации скорости течения с частотами меньше 0,1 Гц. Это обусловлено конструктивными особенностями электромагнитного измерителя (использование постоянных магнитов).

**Методика обработки данных.** Прибор «Восток-М» регистрирует флуктуации только горизонтальных компонент скорости, в то же время наибольший интерес представляет вертикальная компонента индуцированного волнами вихревого движения. Доля вихревой энергии в волнах Герстнера оценивается как четвертая степень их крутизны  $ak$  [3] и в соответствии с модельным выражением (9) не может превышать  $10^{-3}$ . По схеме на рис.3, симметрия орбитального движения должна приводить к равенству энергий горизонтальной и вертикальной составляющих скорости в индуцированных вихрях.

В результате малый вклад низкочастотных волно-вихревых движений оказывается незаметным в спектрах горизонтальных компонент скорости

течения на фоне сравнительно крупномасштабных флуктуаций прибрежных потоков с такими же периодами. Однако сопряженная вертикальная составляющая индуцированных волнами низкочастотных вращений частиц жидкости должна обеспечивать дополнительную когерентность между регистрируемыми прибором «Восток-М» флуктуациями скорости и скалярными параметрами среды – температурой и электропроводностью – именно на временных масштабах исследуемых волно-вихревых движений.

Расчет когерентности между модулем горизонтальной скорости и значениями температуры и электропроводности, измеряемыми прибором «Восток-М», выбран основным методическим приемом обнаружения индуцированных волнами вихрей. Дополнительно для этой же цели используются данные каналов температуры и электропроводности комплекса «Сигма-1», осредненные соответствующим образом (по 6 000 точек). Когерентность между указанными скалярными величинами, измеренными с помощью датчиков двух различных приборов, используется для оценки размеров исследуемых вихревых структур.

Данные комплекса «Сигма-1» позволяют детально исследовать структуру поверхностных волн на основе анализа энергетических спектров трех компонент скорости течения и спектров волновых смещений, получаемых с помощью канала давления. В частности, указанное в предыдущем разделе более быстрое затухание с глубиной волновых флуктуаций давления, присущее вихревым волнам по сравнению с потенциальными, позволяет считать их относительные вклады в суммарную энергию ветровых волн.

На рис. 4 приведены спектры трех компонент скорости течения, рассчитанные по данным комплекса «Сигма-1», полученным при измерениях на океанографической платформе 21 июня 2007 г. Сферический датчик электромагнитного измерителя скорости располагался на глубине  $z = 1,1$  м.

Исходные данные осреднялись по 50 точкам, так что максимальная частота  $f$  в спектре составляет 1 Гц. Спектры обнаруживают дублетную структуру, правый максимум соответствует периоду 1,6 с и длине волны 4 м, волна левого максимума имеет период 4 с и длину 25 м. Такая структура характерна для летнего периода в районе измерений, когда короткая ветровая волна присутствует на фоне сравнительно более длинной зыби. Соотношение амплитуд горизонтальных компонент скорости в низкочастотной и высокочастотной частях спектра имеет противоположный характер, поэтому можно считать, что эти две системы волн распространяются в разных направлениях.

Спектр вертикальной компоненты скорости течения  $S_w(f)$  и спектр волновых смещений  $S_h(f)$ , рассчитанный по каналу давления, приведены на рис. 5.

Датчик давления в комплексе «Сигма-1» по конструктивным причинам располагается на расстоянии  $\Delta z = 1$  м глубже сферического электромагнитного датчика, измеряющего компоненты скорости, поэтому в данном случае спектр смещений относится к горизонту  $z + \Delta z = 2,1$  м, и высокочастотные мелкомасштабные составляющие волнового спектра на этой глубине сильно ослаблены.

Будем считать, что частотный спектр волновых возвышений  $S_z(f)$  является суммой двух составляющих  $S_{II}(f)$  и  $S_B(f)$ , относящихся соответственно к потенциальным и вихревым волнам:

$$S_z(f) = S_{II}(f) + S_B(f). \quad (10)$$

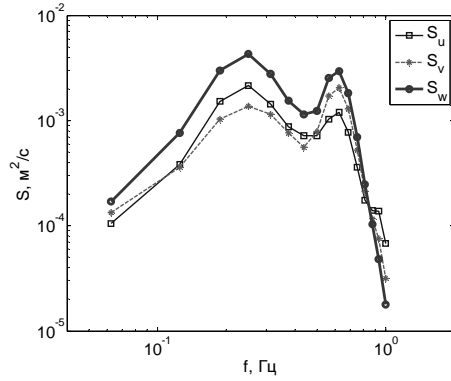


Рис. 4. Спектры продольной  $S_U(f)$ , поперечной  $S_V(f)$  и вертикальной  $S_W(f)$  компонент скорости течения.

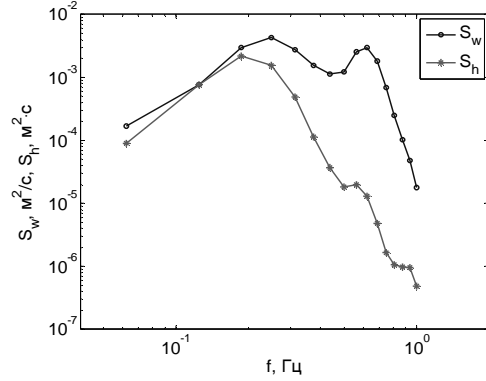


Рис. 5. Спектр вертикальной компоненты скорости течения  $S_W(f)$  и спектр волновых смещений  $S_h(f)$  по каналу давления по измерениям 21 июня 2007 г.

В дальнейшем методика разделения относительных вкладов потенциальной и вихревой составляющих в суммарную энергию волн излагается для отдельной спектральной полосы с частотой  $f$ , при этом  $\omega = 2\pi f$  и волновое число  $k = \omega^2/g$ .

Если ввести суммарное значение спектра компонент скорости (в полосе частот  $f$ ) на горизонте измерения  $z$ ,  $S_\Sigma(z) = S_U + S_V + S_W$ , то с учетом соотношений (2) можно определить значение спектра волновых смещений на этом горизонте:

$$S_h(z) = S_\Sigma(z) / \omega^2. \quad (11)$$

Поскольку волновые скорости затухают с глубиной одинаковым образом для потенциальных и вихревых волн, значение спектра (11) может быть представлено следующим выражением:

$$S_h(z) = (S_\Pi + S_B) e^{-2kz}. \quad (12)$$

Значение спектра волновых смещений на горизонте  $z + \Delta z$ , рассчитываемое по флуктуациям давления, формируется слагаемыми с различными показателями затухания с глубиной:

$$S_h(z + \Delta z) = S_\Pi e^{-2k(z+\Delta z)} + S_B e^{-4k(z+\Delta z)}. \quad (13)$$

Составляя отношение (13) и (12), получим:

$$\frac{S_h(z + \Delta z)}{S_h(z)} = e^{-2k\Delta z} \left[ \frac{S_\Pi}{S_\Pi + S_B} + \frac{S_B}{S_\Pi + S_B} e^{-2k(z+\Delta z)} \right]. \quad (14)$$

Введем обозначения относительных долей потенциальных и вихревых волн:

$$M_\Pi = \frac{S_\Pi}{S_\Pi + S_B}, \quad M_B = \frac{S_B}{S_\Pi + S_B}, \quad M_B = 1 - M_\Pi. \quad (15)$$

Теперь (14) можно переписать в виде



$$\frac{S_h(z + \Delta z)}{S_h(z)} = e^{-2k\Delta z} \left[ M_{\Pi} + (1 - M_{\Pi})e^{-2k(z+\Delta z)} \right] = \frac{1}{N} \quad (16)$$

и разрешить относительно  $M_{\Pi}$ :

$$M_{\Pi} = \frac{e^{2k\Delta z} - Ne^{-2k(z+\Delta z)}}{N \left[ 1 - e^{-2k(z+\Delta z)} \right]}. \quad (17)$$

Изложенная методика разделения потенциальных и вихревых поверхностных волн основывается на предположении, что в выбранной спектральной полосе энергия определяется именно волнами, а вклад аппаратных шумов или других явлений относительно мал. Одним из показателей доминирования волн является уровень когерентности между вертикальной скоростью и флуктуациями давления. Указанная когерентность, соответствующая спектрам, приведенным на рис. 5, представлена на рис. 6.

Превышение модуля когерентности над уровнем 0,9 наблюдается для средней части спектра, обозначаемой точками с третьей по десятую. Именно для этих спектральных полос расчеты по формуле (17) дают репрезентативные значения относительных долей потенциальных и вихревых волн в диапазоне от 0 до 1. Результаты расчета для доли вихревых волн  $M_B$  представлены на рис. 7.

В рассматриваемом случае вклад вихревых волн, если не учитывать крайние точки представленного диапазона, колеблется около уровня 40 %. Среднее значение  $M_B$  по всем точкам рис. 7 составляет 0,41.

**Когерентность на низких частотах.** Прибрежная зона характеризуется большой изменчивостью гидрологических ситуаций, и обнаружить на этом фоне генерируемые волнами низкочастотные когерентные структуры легче, если сами волны достаточно интенсивны. В этом смысле более предпочтительными являются данные осенних измерений на океанографической платформе, когда сильные ветры случаются чаще. На рис. 8, аналогичном по свое-

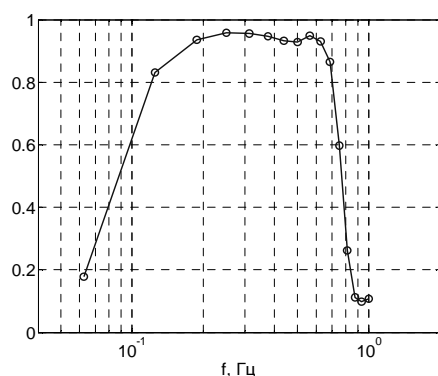


Рис. 6. Когерентность между вертикальной скоростью  $W$  и волновым смещением  $h$ , рассчитанным по каналу давления.

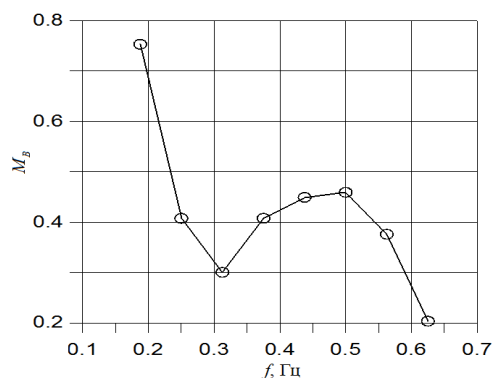


Рис. 7. Относительная доля вихревых волн в суммарной энергии поля поверхностных волн по измерениям на платформе 21 июня 2007 г.

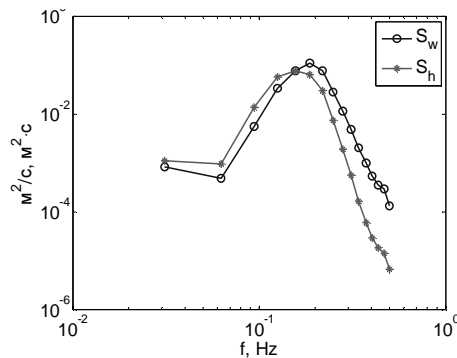


Рис. 8. Спектры вертикальной скорости  $S_w$  и волновых смещений  $S_h$  по измерениям 20 июня 2006 г. на глубине 5 м.

му содержанию рис. 5, представлены спектры вертикальной скорости и волновых смещений, рассчитанные по данным измерений в октябре 2006 г. на глубине 5 м.

Исходные данные комплекса «Сигма-1» осреднялись по 100 точкам, так что правая граница спектров составляет 0,5 Гц. Более высокочастотные волны на указанной глубине практически не проявляются. По сравнению со спектрами, показанными на рис. 5, уровень энергии значительно выше, период волны в максимуме спектра вертикальной компоненты скорости

составляет 5,3 с, соответствующая длина волны примерно 44 м.

Относительная доля вихревых волн в этом случае, как можно видеть на рис. 9, в среднем несколько больше, чем на рис. 7. В низкочастотной области она колеблется около 40%, затем при увеличении частоты достигает уровня примерно 70%. В среднем по данным рис. 9 относительная доля вихревых волн составляет 0,59.

Как уже говорилось, основным методом обнаружения низкочастотных вихревых структур является расчет когерентности между модулем горизонтальной скорости  $V$  и данными каналов измерения температуры  $T$  и электропроводности  $R$ . На рис. 10 представлены результаты таких расчетов для прибора «Восток-М».

Длина рядов составляла 548 точек, дискретность измерений 1 мин. Можно отметить три максимума на нижних кривых, соответствующих спектральной корреляции флуктуаций скорости с температурой и электропровод-

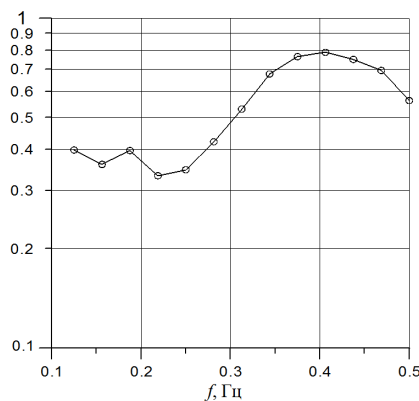


Рис. 9. Относительная доля вихревых волн в суммарной энергии поверхностных волн по измерениям на платформе 20 октября 2006 г.

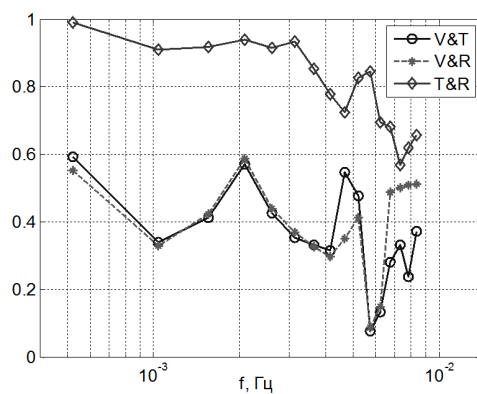


Рис. 10. Когерентность между модулем горизонтальной скорости, температурой и электропроводностью, измеренными прибором «Восток-М» 20 октября 2006 г.

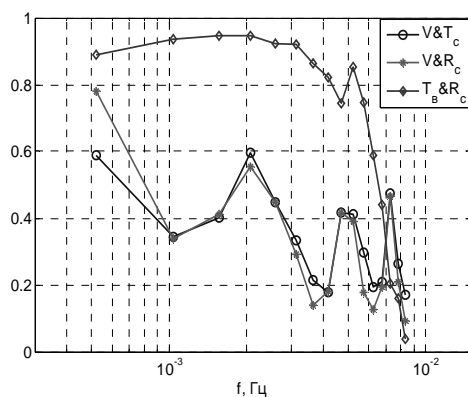


Рис. 11. Когерентность между модулем скорости и температурой, измеренными прибором «Восток-М», и температурой и электропроводностью, измеренными комплексом «Сигма».

кривых практически сохраняется, лишь максимумы когерентности оказываются более четко выраженными в случае, когда используются данные по температуре и электропроводности, полученные комплексом «Сигма-1». Эти данные формируются в результате осреднения исходных измерений, выполняемых с большой детальностью (16 разрядов), и в силу этого имеют малый уровень аппаратных шумов.

Каналы температуры и электропроводности «Востока-М» являются менее чувствительными (12 разрядов), поэтому выделяемые флуктуации могут содержать искажения, вызванные сравнительно грубым квантованием по уровню. По данным рис. 11, самый высокочастотный максимум когерентности характеризуется периодом 137 с, средний максимум имеет период 212 с, низкочастотный 480 с.

Провалы на графиках когерентности между температурой и электропроводностью определяются совместным действием двух факторов: разнесением датчиков по горизонтали и размерами имеющихся в потоке пространственных неоднородностей. В приборе «Восток-М» датчики температуры и электропроводности разнесены примерно на 0,25 м, а расстояние до комплекса «Сигма-1» составляет 4 м. Тот факт, что на верхней кривой (см. рис. 10) присутствуют минимумы когерентности на периодах 137 и 212 с, означает, что размеры соответствующих пространственных структур сравнимы с указанной выше величиной 0,25 м.

Глубокий спад в крайней правой области верхней кривой (см. рис. 11) в свою очередь означает, что неоднородности, соответствующие высокочастотному максимуму когерентности, по своим размерам много меньше 4 м. Наоборот, отсутствие провала на периоде 480 с должно свидетельствовать о наличии здесь структур с горизонтальными масштабами, намного превышающими 4 м.

Таким образом, представленные на рис. 10 и рис. 11 высокочастотные максимумы когерентности между горизонтальной скоростью, температурой и электропроводностью по своей структуре соответствуют механизму гене-

ностью. Два высокочастотных максимума сопровождаются минимумами на кривой когерентности между указанными скалярными параметрами.

На рис. 11 представлены результаты аналогичных расчетов когерентности между параметрами, измеренными различными приборами: температурой  $T_B$ , измеренной «Востоком-М», и электропроводностью  $R_C$ , измеренной «Сигмой-1», осредненной по 6 000 отсчетов, а также между горизонтальной скоростью от «Востока-М» и температурой и электропроводностью от «Сигмы-1».

Сравнение показывает, что структура когерентности на двух нижних

рации вихрей (см. рис. 3). Частоты наблюдаемых максимумов находятся в диапазоне, определяемом модельными оценками суммарной крутизны ветровых волн, а оценки пространственных размеров неоднородностей на этих частотах дают величины порядка амплитуд волн. Низкочастотный максимум когерентности в эту схему не укладывается и, по-видимому, определяется сравнительно крупномасштабными процессами.

**Выводы.** Используемый на океанографической платформе аппаратный комплекс, составленный из приборов «Восток-М» и «Сигма-1», позволяет исследовать эффекты, связанные с завихренностью поля ветровых волн. В частности, совместная обработка информации каналов измерения давления и трех компонент скорости течения в волновом диапазоне частотного спектра флуктуаций этих параметров дает возможность рассчитать относительные доли вихревой и потенциальной составляющих в общей волновой энергии. Анализ когерентности между модулем горизонтальной скорости и температурой и электропроводностью позволяет определить характерные периоды и оценить размеры структурных неоднородностей в низкочастотном диапазоне, соответствующем модели генерации вихрей трохoidalными волнами Герстнера.

Предпринятые в последнее время меры по дополнительному комплексованию измерительных средств, применяемых на океанографической платформе, позволят более детально исследовать структуру низкочастотных вихрей, индуцированных ветровыми волнами. В частности, объединение в единый информационный файл данных комплекса «Сигма-1», прибора «Восток-М» и струнного волнографа предоставляет возможность непосредственно сравнивать параметры когерентных структур с синхронно рассчитываемыми значениями средней крутизны волн. Однако уже полученные предварительные результаты позволяют отметить некоторые особенности исследуемого явления, важные для оценки его свойств как дополнительного агента перемешивания водных масс.

По сравнению с представлениями о классической турбулентности, которая возникает в результате гидродинамической неустойчивости среднего течения и характеризуется потоком энергии по спектру масштабов, индуцированные волнами вихри отличаются большей упорядоченностью. Здесь мы имеем дело не со спонтанной, а с вынужденной генерацией низкочастотных вихрей, периоды и размеры которых целиком определяются параметрами ветровых волн. Вместе с тем индивидуальное поведение отдельных вихрей имеет в большой мере случайный характер, диктуемый вероятностной структурой поля поверхностных волн, которое при заметных ветрах может описываться как слабая турбулентность [3]. С учетом дополнительного влияния мелкомасштабной турбулентности степень случайности генерируемых волнами вихревых движений может оказаться достаточной, чтобы обеспечить эффективный перенос импульса, тепла, соли и различных примесей.

Решающим фактором для оценки перемешивающего воздействия индуцированной волнами завихренности является средний размер вихря, который в этом случае сравним с характерной амплитудой волн и более чем на порядок превосходит средний масштаб турбулентности в подповерхностном слое. Поскольку энергия индуцированных вихрей и энергия обычной

мелкомасштабной турбулентности оцениваются здесь как величины одного порядка, указанное преимущество в размерах вихрей заставляет считать низкочастотные волно-вихревые структуры важнейшим перемешивающим агентом при наличии ветра.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Педлоски Дж.* Геофизическая гидродинамика. – М.: Мир, 1984. – том 1. – 398 с.
2. *Фомин В.В., Иванов В.А.* Совместное моделирование течений и ветрового волнения в Керченском проливе // *Морской гидрофизический журнал.* – 2007. – № 5. – С. 3-30.
3. *Современные методы и средства контроля морской среды /* Под ред. В.А. Иванова. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2006. – 113 с.
4. *Самодуров А.С., Дыкман В.З., Барабаш В.А., Ефремов О.И., Зубов А.Г., Павленко О.И., Чухарев А.М.* Измерительный комплекс «Сигма-1» для исследования мелкомасштабных характеристик гидрофизических полей в верхнем слое моря // *Морской гидрофизический журнал.* – 2005. – № 5. – С. 60-71.
5. *Дудников Г.П., Ефремов О.И., Мязин В.В., Ячменев В.Е.* Модернизированный векторно-осредняющий измеритель параметров течения «Восток-М» // *Системы контроля окружающей среды.* – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика». – 2002. – С. 35-38.
6. *Сретенский Л.Н.* Теория волновых движений жидкости. – М.: Наука, 1977. – 816 с.
7. *Бернар Ле Меоте* Введение в гидродинамику и теорию волн на воде.– Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 368 с.
8. *Павленко Е.Г.* Основы механики жидкости. – Л.: Судостроение, 1988. – 240 с.
9. *Монин А.С.* Лагранжево описание установившихся волн // *ДАН СССР.* – 1972. – том 203, № 4. – С.769-771.
10. *Филлис О.М.* Динамика верхнего слоя океана. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – 320 с.

Материал поступил в редакцию 27.10.2011 г.

**АНОТАЦІЯ** Наводяться результати спеціальної обробки даних вимірювань, виконаних на океанографічній платформі за допомогою комплексу апаратури «Сигма-1» і «Восток-М». Методика обробки націлена на дослідження когерентних низькочастотних структур, що формуються вихровою складовою вітрових хвиль. У ряді випадків вдається виділити домінуючі частоти когерентних утворень і оцінити їх просторовий масштаб. Пропонується інтерпретація досліджуваного явища як додаткового чинника вертикального перемішування.

**ABSTRACT** The results of special processing of measuring data obtained by hydro-physical instrument complexes «Sigma-1» and «Vostok-M» on oceanographic tower are presented. The processing technique aims at study of low frequency coherent structures formed by eddy component of wind waves. In certain cases we can distinguish the dominant frequencies of coherent formations and evaluate its spatial scale. We propose to interpret this phenomenon as additional factor of vertical mixing.