

# Экспериментальные и экспедиционные исследования

УДК 551.465.752

А.М. Чухарев, И.А. Репина

## Взаимодействие пограничных слоев моря и атмосферы на малых и средних масштабах в прибрежной зоне

Приведены результаты детальных натурных измерений турбулентных характеристик в сопряженных слоях моря и атмосферы в прибрежной зоне Черного моря. Использовалась современная высокоточная аппаратура, наблюдения велись по большому числу параметров в течение трех экспедиционных периодов в 2005 – 2009 гг. Обнаружены периодичности различных масштабов в интенсивности атмосферной и морской турбулентности, прослежена эволюция турбулентной энергии в разных условиях и на разных масштабах, а также реакция приповерхностного слоя моря на атмосферные возмущения. Показано, что при слабых ветрах существенное влияние на морскую турбулентность начинает оказывать поток тепла.

**Ключевые слова:** взаимодействие атмосферы и моря, турбулентность, натурные измерения, вейвлет-анализ.

Постоянно растущий интерес к задачам взаимодействия атмосферы и океана объясняется важнейшей ролью обменных процессов между двумя средами в исследованиях климата и погоды на планете, повышением внимания к экологическим проблемам. Несмотря на значительный прогресс в понимании сложнейших явлений, происходящих в пограничных слоях моря и атмосферы, их изученность еще остается неудовлетворительной. Большинство имеющихся на сегодняшний день моделей для описания этого взаимодействия используют упрощенные схемы, в которых фигурируют осредненные гидрометеорологические характеристики. Одним из основных параметров, характеризующих динамическое взаимодействие, является коэффициент сопротивления поверхности  $c_D$ , введенный Чарноком [1]. Дальнейшие исследования показали, что зависимость этого коэффициента от скорости ветра и состояния морской поверхности имеет более сложный характер. Разными исследователями были предприняты попытки ввести другую параметризацию [2, 3]. Кроме степени развития ветрового волнения важную роль в передаче импульса и энергии от ветра к поверхностному слою моря играет также взаимное направление ветра и волнения и наличие зыби [3]. До сих пор слабо изученными остаются процессы взаимодействия в штилевую погоду и при шторме, не до конца понятен механизм передачи импульса ветровым волнам и их обратное воздействие на приводный слой. Актуальнейшей проблемой остается и выбор наилучших способов параметризации турбулентных потоков в атмосфере.

© А.М. Чухарев, И.А. Репина, 2012

В последние годы сформировалось устойчивое мнение, что для адекватного описания взаимодействия необходимо создание объединенных моделей, включающих в себя основные физические характеристики обеих сред. Сравнительно недавно стала ясна и важность связи исследований мелкомасштабных процессов, в которых изучается обмен теплом, влагой, импульсом и различными компонентами через водно-воздушную поверхность раздела, с крупномасштабными задачами изменений глобального климата и океанской циркуляции.

Совместные исследования, проводящиеся в последние годы Морским гидрофизическим институтом (МГИ) НАН Украины и Институтом физики атмосферы имени А.М. Обухова (ИФА) РАН, ориентированы на синхронное получение натуральных данных во взаимодействующих слоях моря и атмосферы современными средствами наблюдений с последующей комплексной обработкой и анализом. Экспериментальные результаты, полученные с помощью высокоточной аппаратуры, дают новые знания о турбулентном режиме, возможность детального изучения процессов формирования и эволюции гидрофизических полей.

Цель настоящей работы – описание совместно полученных натуральных данных о турбулентных характеристиках пограничных слоев моря и атмосферы и некоторых предварительных результатов их комплексного анализа.

Эксперименты проводились с 2005 г. в прибрежной зоне Черного моря на стационарной океанографической платформе Экспериментального отделения Морского гидрофизического института (СОП ЭО МГИ) в пос. Кацивели. В период проведения экспедиций происходило самое тесное сотрудничество с группами исследователей из отделов дистанционных методов исследований (ОДМИ) и гидрофизики шельфа (ОГШ) МГИ и Института космических исследований (ИКИ) РАН. Обширные программы и задачи этих групп в данной работе не рассматриваются, освещены только работы отдела турбулентности МГИ и лаборатории взаимодействия атмосферы и океана ИФА.

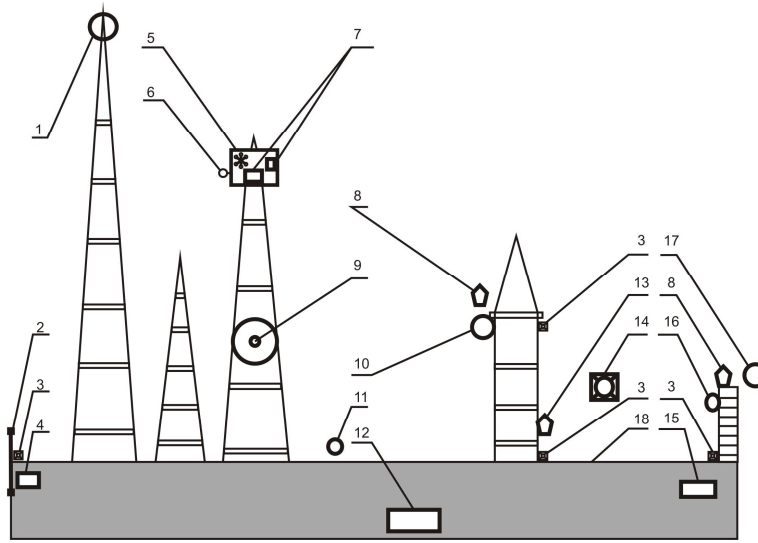
Описание сложных процессов вблизи границы раздела требует одновременного измерения большого количества параметров в обеих средах, что и являлось главной причиной объединения усилий разных организаций. На рис. 1 приведены схема размещения приборов на СОП и перечень аппаратуры в экспериментах 2009 г., включая средства измерения и других групп. Более подробно измерительные средства и аппаратура, использованные в экспериментах, описаны в работе [4].

Все данные записывались в бортовые компьютеры в реальном времени, должным образом синхронизировались и обрабатывались в соответствии с наработанными методиками каждой группой исследователей.

Для комплексного анализа взаимодействующих слоев сотрудниками ОДМИ были предоставлены данные о возвышениях поверхности, полученные с помощью струнного волнографа, и о скорости ветра на высоте 23 м, сотрудниками ОГШ – данные о скорости течения на разных глубинах в районе платформы, полученные комплексами МГИ-1308.

Группой ИФА проводились следующие измерения в атмосфере: пульсаций температуры, горизонтальной и вертикальной компонент скорости ветра на высотах 1 и 5 м; пульсаций концентрации водяного пара и углекислого

газа; метеорологических параметров (температуры, влажности, давления, скорости и направления ветра) на горизонтах 5 и 12 м; профиля температуры в атмосферном пограничном слое до высоты 1000 м. Также осуществлялся видеоконтроль за состоянием морской поверхности.



**Р и с. 1.** Схема расположения приборов на океанографической платформе во время экспериментов в 2009 г.: 1 – струнный волнограф (МГИ НАН Украины); 2 – оптический измеритель волнения, стереофото съемка (МГИ); 3 – струнный волнограф, 4 шт. (ИО РАН); 4 – локатор (МГИ); 5 – акустический анемометр *USA-1, METEK* (ИФА РАН); 6 – измеритель  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ , газоанализатор *LiCorr 7500* (ИФА); 7 – блоки регистрации (ИФА); 8 – чашечный анемометр *AMC ANDEERA*, 2 шт. (ИФА); 9 – измерительный комплекс «Сигма-1» (МГИ); 10 – измерительный комплекс «Восток-М» (МГИ); 11 – измерители МГИ-1308, 5 шт. (МГИ); 12 – метео-комплекс (МГИ); 13 – акустический анемометр *Wind-Sonic* (ИФА); 14 – измеритель скорости течения, гидрологический зонд *FSI* (ИФА); 15 – метеорологический температурный профилимер (ИФА); 16 – видеокамера (ИФА); 17 – измерительный комплекс «Восток-М» (МГИ); 18 – океанографическая платформа; 19 – гидрологический комплекс «Траверс» (ИКИ РАН)

Для вычисления потоков в приводном слое использовался прямой метод:

$$\tau_a = \rho_0 \left[ \overline{u'w'^2} + \overline{v'w'^2} \right]^{1/2} = \rho_0 u_*^a, \quad (1)$$

$$Q = c_p \rho_0 \overline{w'T'}, \quad (2)$$

$$L_E = \rho_0 \overline{w'q'} L_s, \quad (3)$$

$$F_{\text{CO}_2} = \overline{w'c'}, \quad (4)$$

формулы (1) – (4) выражают поток импульса, явный и скрытый потоки тепла и поток углекислого газа соответственно. Используются следующие обозначения:  $\rho_0$  – плотность;  $u_*^a$  – динамическая скорость в воздухе;  $c_p$  – теплоем-

кость при постоянном давлении;  $u', v', w'$  – компоненты пульсаций скорости;  $T'$  – пульсации температуры;  $q'$  – пульсации влажности;  $L_s$  – удельная теплота парообразования;  $c'$  – пульсации концентрации углекислого газа.

Отделом турбулентности МГИ регистрировались следующие величины в морской среде: три компоненты пульсаций скорости; пульсации температуры и электропроводности; давление; скорость и направление среднего течения; средние температура и электропроводность. Кроме указанных величин измерялись температура и соленость поверхностного слоя на глубине 1 м. Проводились как долговременные записи гидрофизических турбулентных характеристик и средних значений на каком-либо одном горизонте (длительностью от нескольких часов до четырех суток) для выяснения их временной изменчивости, так и кратковременные (10 – 20 мин на каждом горизонте) – для определения зависимости турбулентных величин от глубины.

Как один из основных параметров, характеризующих интенсивность турбулентности в море, рассматривалась скорость диссипации турбулентной кинетической энергии

$$\varepsilon = \mu \left( \frac{dv'_i}{dx_k} \right)^2, \quad (5)$$

где  $\mu$  – коэффициент вязкости;  $v'$  – пульсации скорости. Величина  $\varepsilon$  рассчитывалась по спектрам пульсаций скорости, как было предложено в [5]. В основе метода лежит гипотеза Колмогорова, в соответствии с которой спектральная плотность пульсаций скорости может быть представлена в виде

$$E(k) = \varepsilon^{1/4} \nu^{5/4} F(\lambda), \quad (6)$$

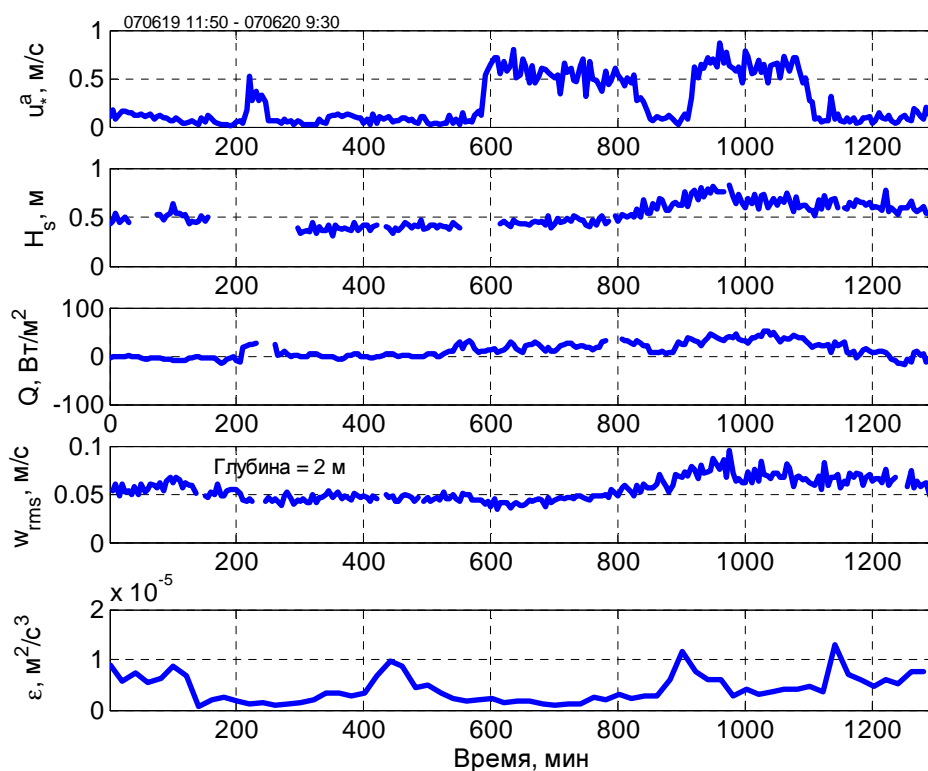
где  $k$  – волновое число;  $\nu$  – кинематическая вязкость;  $F(\lambda)$  – универсальная функция (модельный спектр);  $\lambda = k / (\varepsilon^{1/4} \nu^{-3/4})$  – безразмерное волновое число. Метод позволяет оценить значения  $\varepsilon$  по наилучшему совпадению эмпирических спектров пульсаций скорости с модельным спектром турбулентности, в качестве которого использовался спектр Насмита. При этом искажения, вносимые в сигнал волнением и колебаниями прибора с подвеской, не оказывают существенного влияния на результат. Этот способ применялся также в работах [6, 7].

Главные задачи, которые решались в проведенных экспериментах:

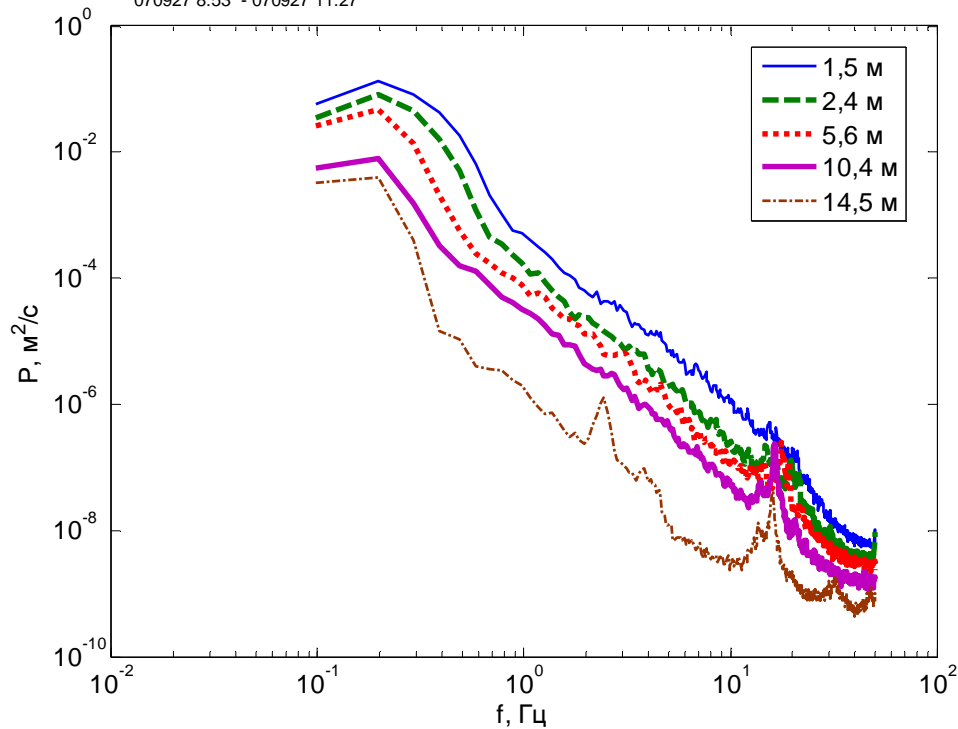
- исследование энергообмена и газообмена атмосферы и подстилающей поверхности при различных типах морского волнения с помощью инструментальных измерений потоков тепла, влаги, углекислого газа и импульса в приповерхностном слое атмосферы;
- исследование взаимодействия моря и атмосферы при наличии локальных неоднородностей подстилающей поверхности;
- измерение турбулентных характеристик основных гидрофизических параметров в приповерхностном слое моря;
- измерение фоновых средних значений этих параметров и их трендов;

– исследование влияния на турбулентный режим состояния морской поверхности и приводного слоя атмосферы.

На рис. 2 приведены некоторые осредненные по 5-минутным интервалам параметры, полученные в результате синхронных наблюдений, на рис. 3 – стандартные энергетические Фурье-спектры вертикальных пульсаций скорости на различных глубинах. Узкие пики, появляющиеся на отдельных спектрах, были вызваны вибрациями подвески измерительного комплекса, они устранялись в процессе обработки данных [8]. Большую сложность при интерпретации данных измерений турбулентных пульсаций скорости в приповерхностном слое моря вызывает, как правило, проблема разделения турбулентных и волновых составляющих. В комплексе «Сигма-1» пульсации скорости измеряются в координатах прибора, затем пересчитываются в неподвижную систему координат. Чтобы устранить влияние волновых компонент на оценки энергии морской турбулентности, во всех расчетах, представленных в работе, использовались данные измерений вертикальной компоненты скорости (наименее подверженной влиянию собственных движений измерительной системы), которые предварительно обрабатывались фильтром верхних частот с пороговой частотой 1 Гц.



**Р и с. 2.** Осредненные за 5 мин величины (сверху вниз): динамическая скорость в воздухе  $U_s^a$ ; высота значительных волн  $H_s$ ; поток тепла  $Q$ ; среднеквадратические вертикальные пульсации скорости в воде  $w_{rms}$ ; скорость диссипации турбулентной энергии  $\epsilon$  на глубине 2 м (рассчитана по 20-минутным интервалам)



Р и с. 3. Фурье-спектры вертикальной компоненты пульсаций скорости на различных глубинах

Для анализа данных наблюдений, кроме обычных корреляционных и спектральных оценок, применялся вейвлет-анализ, позволяющий выявлять распределение энергии измеряемых величин по масштабам и проследить ее эволюцию [9]. Использовалось непрерывное вейвлет-преобразование

$$W(a, b) = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} \xi(t) \varphi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (7)$$

где  $W$  – вейвлет-коэффициенты;  $a$  – масштаб вейвлет-преобразования;  $b$  – сдвиг по оси времени;  $\xi$  – исходный сигнал;  $\varphi$  – материнский вейвлет;  $t$  – время. В качестве материнского был выбран вейвлет Морле

$$\varphi(t) = \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) \cos(rt). \quad (8)$$

Эта функция удобна при исследовании спектрального состава преобразуемого ряда и его изменения со временем, так как ее Фурье-образом является гауссиана, что обеспечивает хорошую частотную локализацию. Чтобы для вейвлета Морле выполнялось условие допустимости (существование обратного преобразования и выполнение равенства Парсеваля), величину  $r$  обычно

принимают равной 5 или 6. Для вейвлет-преобразования существует аналог теоремы Парсеваля, т. е. полная энергия сигнала может быть записана через коэффициенты  $W(a,b)$ :

$$E_{\xi} = C_{\varphi}^{-1} \iint W^2(a,b) \frac{dadb}{a^2}, \quad (9)$$

где  $C_{\varphi}$  – нормирующая константа, которая находится через Фурье-образ вейвлета:

$$C_{\varphi} = \int_{-\infty}^{\infty} |\hat{\varphi}(\omega)|^2 |\omega|^{-1} d\omega. \quad (10)$$

Плотность энергии сигнала определяется как

$$E_w(a,b) = W^2(a,b). \quad (11)$$

Соответствующим интегрированием (11) по масштабам или по сдвигам можно получить оценки изменения энергии со временем или глобального спектра энергии, т. е. распределение энергии по масштабам. Глобальный спектр энергии является аналогом спектра плотности энергии в гармоническом анализе, причем считается, что методика вейвлет-преобразования вполне надежна для выявления спектральных пиков, хотя и уступает преобразованию Фурье по спектральной разрешающей способности [10]. Глобальный спектр рассчитывался по формуле

$$P_w(a) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} |W_i(a)|^2, \quad (12)$$

где  $n$  – число отсчетов в ряду. Средняя в определенном диапазоне масштабов энергия обычно рассчитывается как взвешенная сумма энергетического вейвлет-спектра:

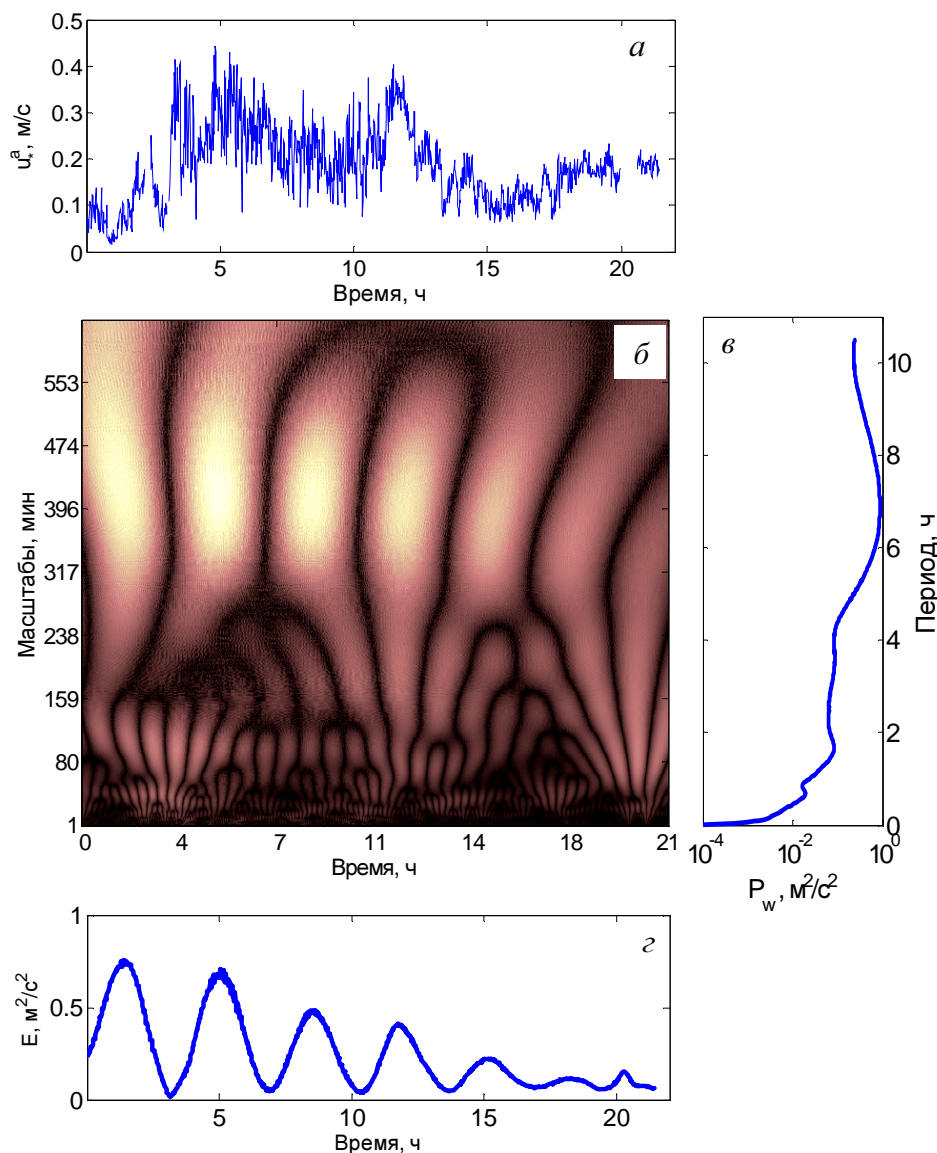
$$\bar{E}_i = \frac{\Delta j \Delta t}{C_{\delta}} \sum_{j=j_1}^{j_2} \frac{|W(a_j)|^2}{a_j}, \quad (13)$$

где  $\Delta j$  и  $\Delta t$  – шаг по масштабам и по времени соответственно;  $C_{\delta}$  – нормирующий коэффициент, для вейвлета Морле равный 0,776 [11]. По сути, (13) есть изменение со временем средней по масштабам дисперсии. Масштаб  $a$  достаточно точно пересчитывается в обычную частоту (или период) с помощью соотношения

$$f_a = \frac{f_c}{a \cdot \Delta t}, \quad (14)$$

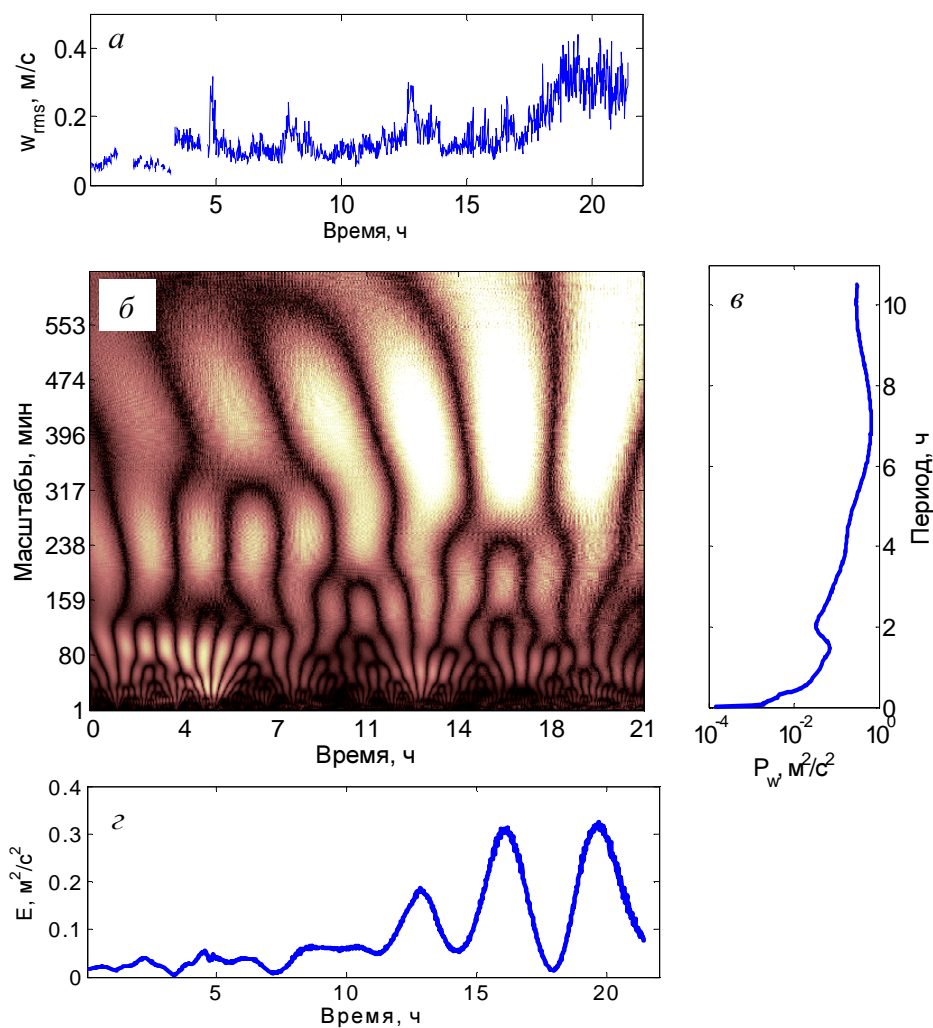
где  $f_c$  – центральная частота анализирующего вейвлета;  $\Delta t$  – дискретность ряда.

На рис. 4 и 5 приведены примеры вейвлет-анализа динамической скорости в атмосфере и среднеквадратической вертикальной компоненты пульсаций скорости в воде.



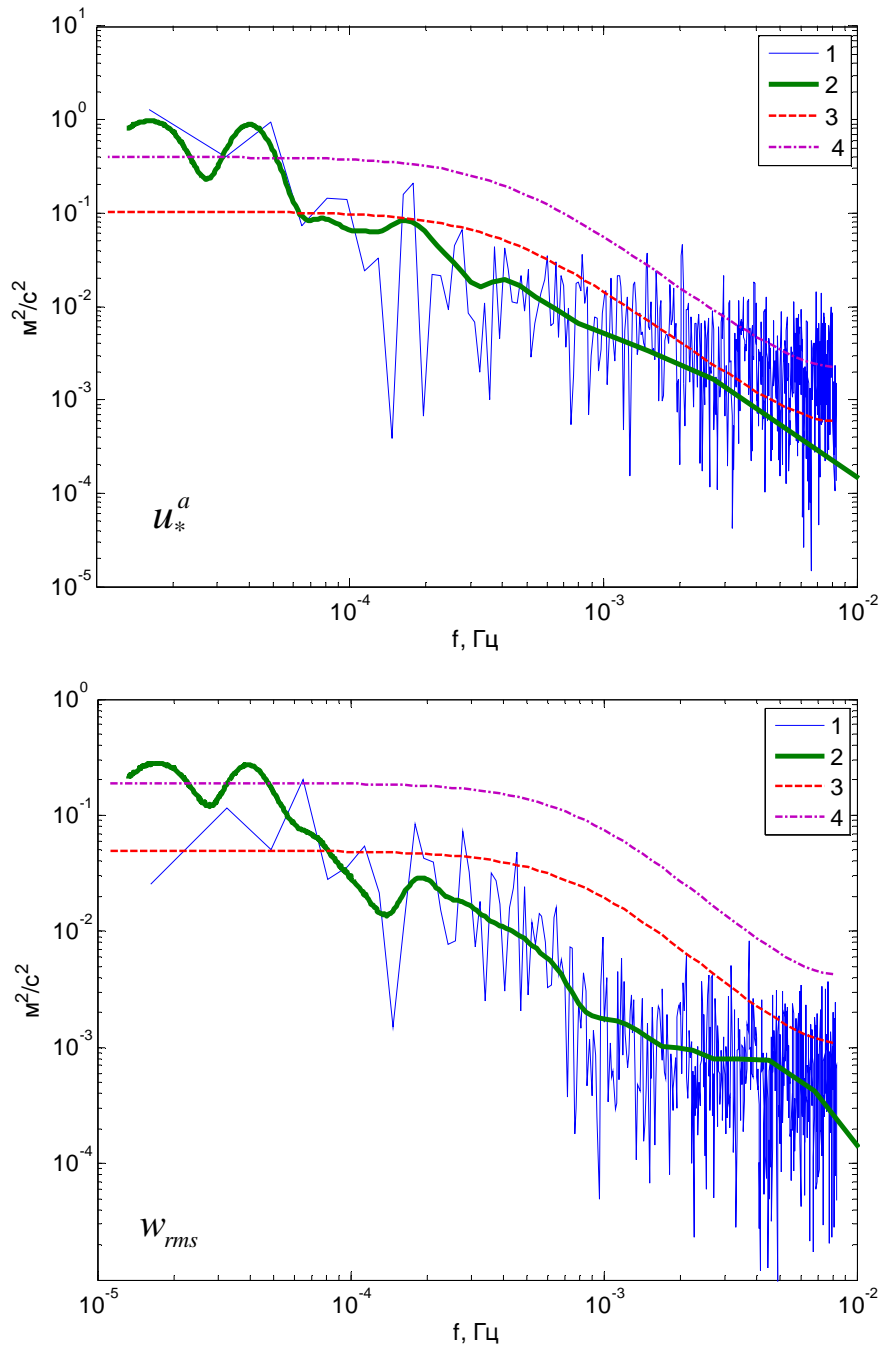
**Р и с. 4.** Динамическая скорость ветра  $u_*^a$  в период развития апвеллинга 11 – 12 июня 2005 г. и ее вейвлет-преобразование при  $J_{\max} \approx 10,5$  ч: а – исходный сигнал; б – абсолютные вейвлет-коэффициенты (более светлые области соответствуют большим коэффициентам); в – глобальный спектр энергии в полупологарифмическом масштабе; г – изменение средней по масштабам энергии сигнала (дисперсии)





**Рис. 5.** То же, что на рис. 4, для среднеквадратических вертикальных пульсаций скорости на глубине 1,3 м

Для оценки достоверности выделяемых пиков на глобальном спектре проводилось сопоставление с обычным энергетическим Фурье-спектром и рассчитывались статистические критерии. В качестве фонового модельного спектра рассматривался спектр красного шума, используемый часто в таких случаях [11] (красный шум – случайная последовательность с определенной автокорреляцией, простейшая модель – авторегрессионная последовательность с одним коэффициентом:  $x_i = \alpha x_{i-1} + \zeta_i$ , где  $\zeta_i$  – элементы ряда гауссова белого шума); коэффициент автокорреляции определялся методом Юла – Уокера.



**Р и с. 6.** Сравнение Фурье-спектра и глобального спектра, рассчитанного по вейвлет-коэффициентам и нормированного на дисперсию: для динамической скорости ветра (вверху) и для среднеквадратических вертикальных пульсаций скорости в воде (внизу), где 1 – спектр Фурье, умноженный на частоту; 2 – глобальный спектр; 3 – спектр красного шума при  $\alpha = 0,86$  для  $u_*^a$  и  $\alpha = 0,74$  для  $w_{rms}$ ; 4 – 95%-ный уровень значимости. Спектры рассчитаны для тех же рядов, что на рис. 4 и 5

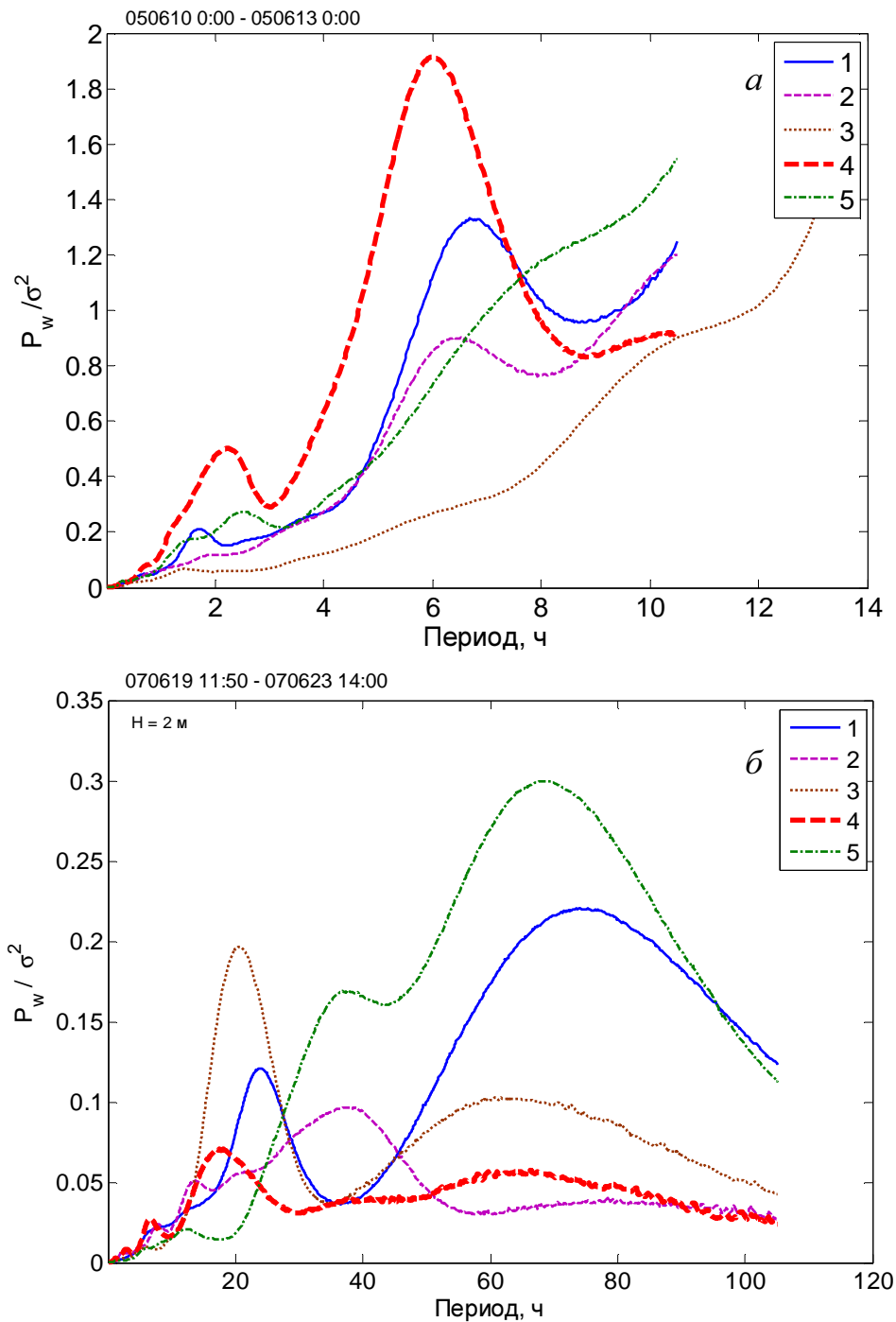
На рис. 6 в логарифмическом масштабе изображены энергетические Фурье-спектры, умноженные на частоту, глобальные спектры, нормированные на дисперсию, а также спектр красного шума и 95%-ный уровень значимости для глобального спектра (статистическая значимость результата представляет собой меру уверенности в его истинности). Как видим, рассчитанные спектры хорошо согласуются по значимым пикам (превосходящим спектр красного шума). Следовательно, можно использовать вейвлет-спектры для выявления относительно низкочастотных модуляций турбулентной энергии во взаимодействующих слоях моря и атмосферы. Изменение масштаба вейвлет-преобразования позволяет выделять значимые пики на глобальных спектрах в довольно большом диапазоне масштабов, максимальный масштаб (максимальный оцениваемый период) в совместном анализе был ограничен длиной непрерывной записи при неизменном горизонте расположения турбулиметра «Сигма-1».

Чрезвычайное многообразие гидрометеорологических условий требует накопления достаточно большого статистического материала, который позволит установить объективные закономерности во взаимодействии двух сред. По нашему мнению, этот процесс накопления еще не закончен, поэтому на сегодняшний день сформулирован только ряд обобщений для некоторых ситуаций.

Важной чертой, обнаруженной при анализе наблюдаемых процессов, мы считаем наличие внутрисуточных и межсуточных многочасовых периодичностей в исследуемых гидрометеорологических характеристиках. На рис. 7 в линейном масштабе приведены примеры глобальных спектров основных параметров, рассчитанных по вейвлет-коэффициентам. В качестве исходных данных использовались величины, осредненные за 1 и 5 мин. На спектрах с максимальным масштабом до 1 сут были выявлены значимые пики на периодах 1 – 22 ч, количество таких пиков (внутрисуточных периодичностей) для каждого параметра обычно составляло 3 – 5. В значениях большинства выделенных периодов наблюдалась некоторая закономерность: каждое отличалось от предыдущего примерно в два, реже – в три или в четыре раза. Возможно, что это проявление внутреннего самоподобия, характерного для многих турбулентных движений и связываемого с когерентными структурами. Как показывает численное моделирование, периодическое воздействие создает когерентные структуры в пограничном слое и увеличивает интенсивность турбулентных движений [12], причем для некоторой частоты имеется максимум такого увеличения, своего рода резонанс. В качестве примера приведены значимые периоды для среднеквадратической вертикальной пульсации скорости в воде из нескольких дней наблюдений (таблица). Похожие последовательности наблюдались для всех параметров.

**Значимые внутрисуточные периоды в интенсивности турбулентной энергии в море, выделяемые на глобальных спектрах**

Дата, время	Периоды, ч
2007/06/13/22.50 – 2007/06/14/07.10	1,03; 3,2; 6,4
2007/06/14/07.45 – 2007/06/15/08.55	1,1; 2; 3,8; 12,7
2007/06/17/21.00 – 2007/06/18/08.55	1,15; 2,15; 4,6; 9,5
2007/06/18/17.00 – 2007/06/19/09.40	1,45; 3,1; 5,8; 10,3



**Р и с. 7.** Глобальные спектры, нормированные на дисперсию: 1 –  $u_*^a$ ; 2 –  $H_S$ ; 3 –  $Q$ ; 4 – фильтрованная  $w_{rms}$  на глубине 1,3 м (а) и 2 м (б); 5 – скорость дрейфового течения  $U_d$ ; а – данные осреднены за 1 мин, максимальный масштаб вейвлет-преобразования  $J_{max} \approx 10,5$  ч, период наблюдений 10 – 13 июня 2005 г.; б – данные осреднены за 5 мин,  $J_{max} \approx 105$  ч, период наблюдений 19 – 23 июня 2007 г.

Динамическое воздействие атмосферы на поверхность моря обычно разделяют на две компоненты:

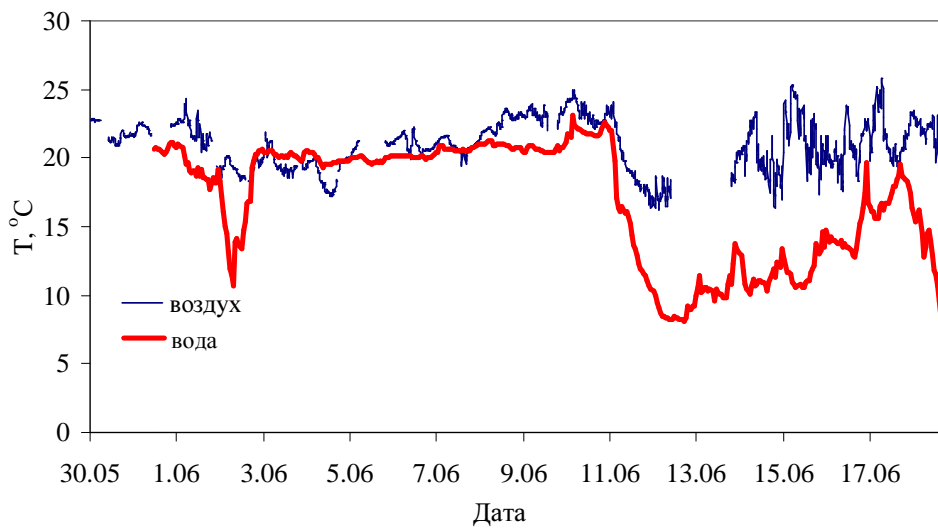
$$\tau_a = \rho_a \left[ -\overline{\tilde{u}\tilde{w}} + \nu \frac{\partial U}{\partial z} \right]_{\eta} = \tau_{aw} + \tau_{ao}, \quad (15)$$

где  $\tilde{u}, \tilde{w}$  – волновые флуктуации скорости;  $U(z)$  – средняя скорость ветра;  $\nu$  – вязкость;  $\tau_{aw}$  – поток импульса, идущий к волнам,  $\tau_{ao}$  – непосредственно передающийся океану; индекс  $\eta$  у квадратных скобок означает, что выражение относится к поверхности моря. Считается, что первое слагаемое в формуле (15) гораздо больше, но вот доли энергии  $E_a = E_{aw} + E_{ao}$ , передающейся морской турбулентности, пока определены не так однозначно.

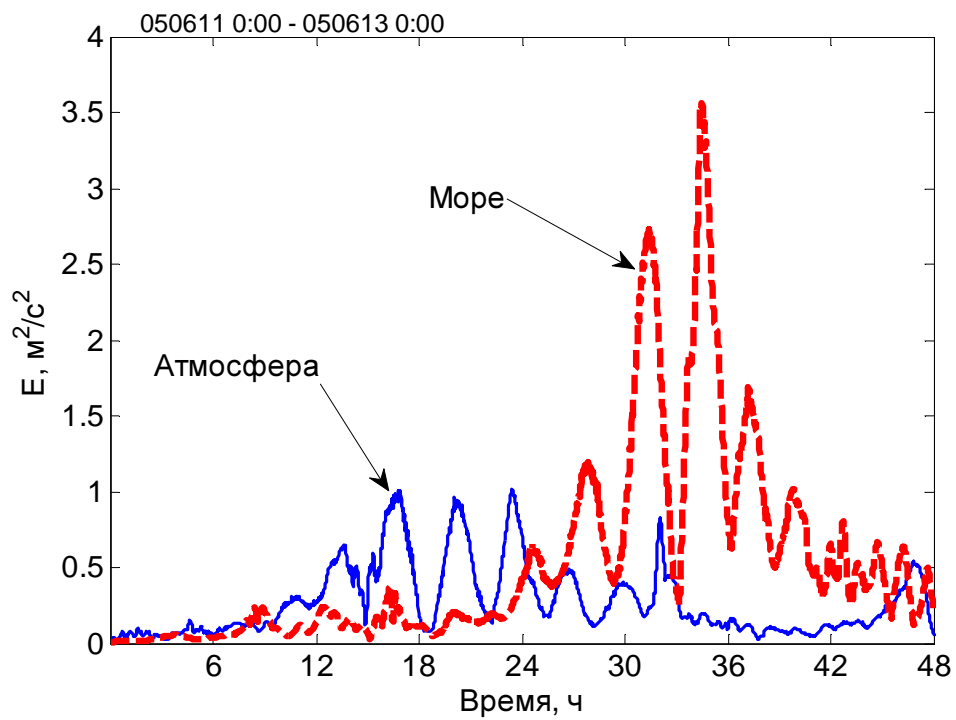
В наших экспериментах при умеренных и сильных ветрах масштабы периодичностей турбулентной энергии в приповерхностном слое были близки к масштабам изменчивости динамической скорости в воздухе (рис. 7, а), связь с волнением прослеживалась менее явно. При слабом ветре и в штилевую погоду основным фактором, влияющим на морскую турбулентность, по всей видимости, становился поток тепла (рис. 7, б). Небольшой подъем спектра на кривой 3, соответствующий периоду  $\sim 60$  ч, не являлся значимым.

В экспериментах 2005 г. значительная часть данных была собрана в условиях сильного апвеллинга. На рис. 8 показано изменение температуры воды и воздуха 30 мая – 18 июня. Влияние атмосферных процессов на изменение энергии морской турбулентности в период развития апвеллинга продемонстрировано на рис. 9, где представлена эволюция во времени средней энергии, рассчитанной по вейвлет-коэффициентам за 11 – 13 июня 2005 г. Видно возникновение колебаний в море с таким же периодом ( $\sim 3,5$  ч) и с временной задержкой около 10 – 12 ч. На всех Фурье-спектрах  $u_*^a$  и  $w_{rms}$  для данного периода наблюдений (рис. 10) хорошо заметен пик на этой частоте.

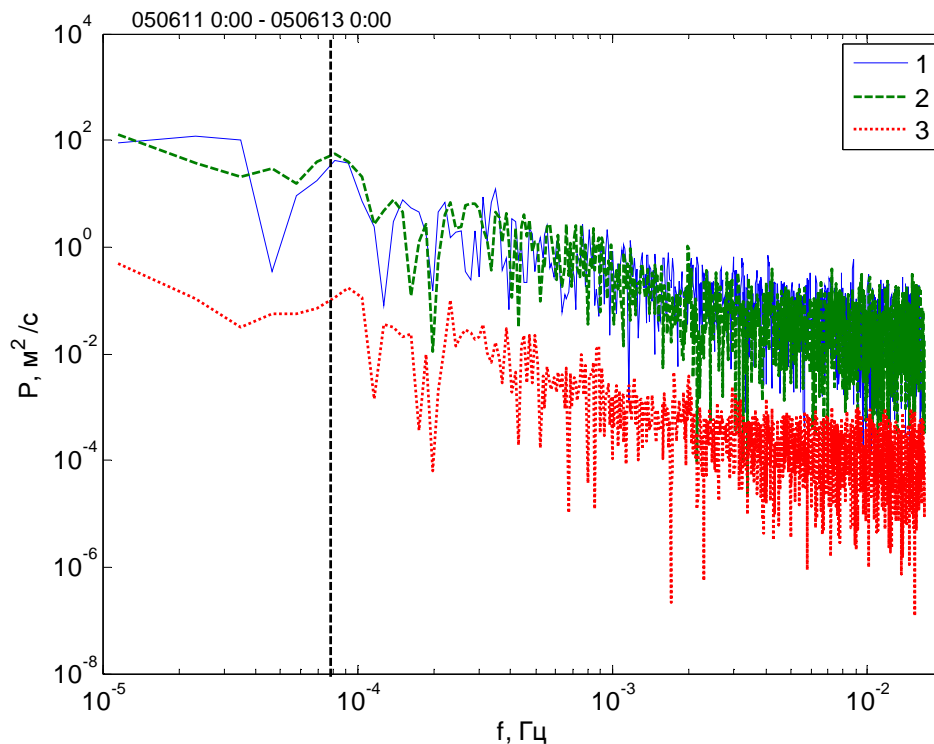
На рис. 11 и 12 показаны изменение энергии основных параметров и глобальные спектры, рассчитанные за время наблюдений 10 – 13 июня 2005 г. с масштабом  $J_{\max} = 84$  ч. Здесь наиболее явно выражен период интенсивности почти во всех процессах длительностью 43 – 47 ч. Несколько больше этот период в данном примере для потока тепла – примерно 56 ч. Следует отметить наличие близкой к суточной ( $\sim 18$  ч) периодичности в атмосферной турбулентности и практически отсутствие пика на этой частоте у морской турбулентности. В то же время периодичности 6,5 ч наблюдаются в обеих средах. Хорошо прослеживаются на рис. 11 согласующиеся по времени изменения энергии в атмосфере и в море и противоположные им колебания потока тепла.



**Р и с. 8.** Временной ход температуры воды и воздуха за период наблюдений в мае – июне 2005 г.



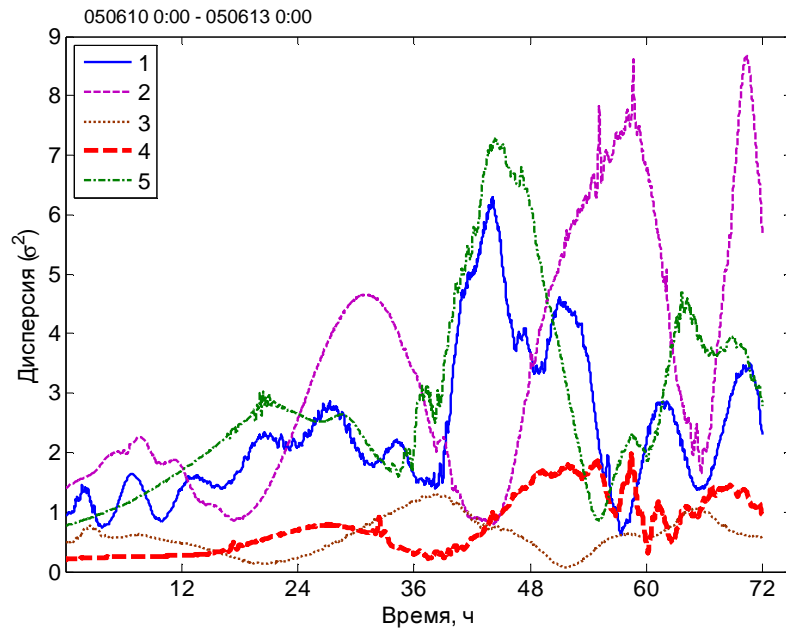
**Р и с. 9.** Изменение средней по масштабам турбулентной энергии в пограничных слоях атмосферы и моря 11 – 13 июня 2005 г. в период развития апвеллинга. Энергия рассчитана по вейвлет-коэффициентам, формула (13), для  $u_*^a$  и нефильтрованной  $w_{rms}$  в воде на глубине 1,3 м при  $J_{max} \approx 10,5$  ч. Период колебаний, появившихся в атмосфере, а затем в море,  $\sim 3,5$  ч



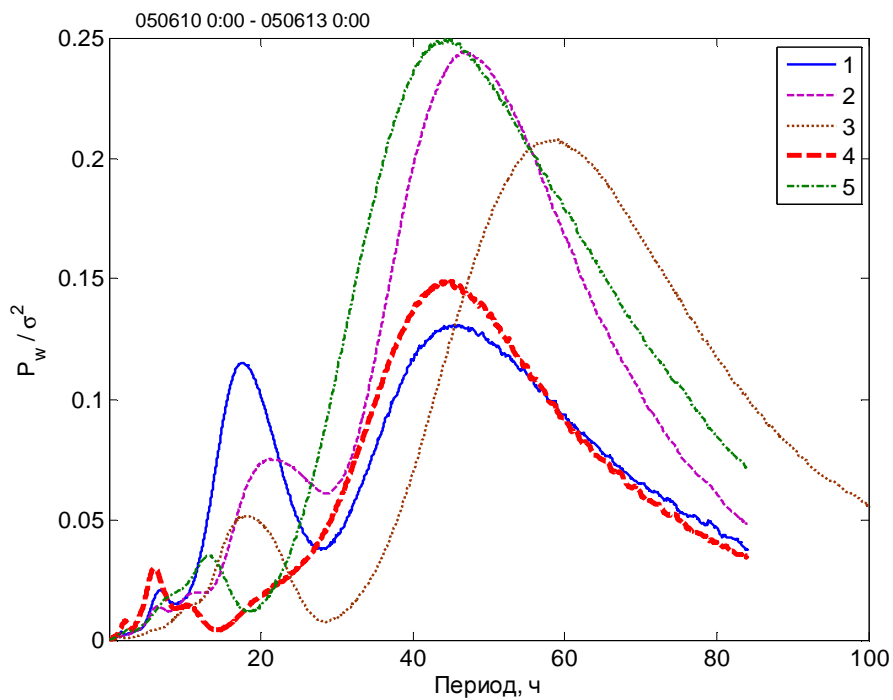
**Р и с. 10.** Фурье-спектры динамической скорости в воздухе (1) и среднеквадратических вертикальных пульсаций скорости в воде на глубине 1,3 м – исходных (2) и обработанных фильтром верхних частот 1 Гц (3). Вертикальная линия соответствует периоду 3,5 ч. Спектры рассчитаны для того же интервала времени, что на рис. 9

Близкое к указанному ( $\sim 12$  ч) время реакции морской турбулентности обнаруживалось и в других условиях, для больших по масштабу и периоду возмущений (рис. 13). Энергия здесь рассчитывалась по  $u_*^a$  и  $w_{rms}$  на глубине 2 м, глобальные спектры представлены на рис. 7, б. Однако следует заметить, что в наших экспериментах отмечалось и меньшее время реакции,  $\sim 6$  ч. По всей видимости, такая временная задержка как-то связана с масштабами (периодами) возмущений, но достоверно утверждать это пока сложно.

При слабых ветрах и в штиль взаимодействие атмосферы и океана довольно плохо параметризовано, и имеющиеся на сегодняшний день модели не дают удовлетворительного согласия расчетов и натурных данных. Из наших экспериментов при таких погодных условиях на графиках эволюции средней энергии можно увидеть обратную зависимость между потоком тепла и интенсивностью морской турбулентности. Это свидетельствует о необходимости включения потока тепла в модели, описывающие турбулентный обмен в приповерхностном слое моря, поскольку нагрев ведет к усилению стратификации и соответственно – к ослаблению турбулентности. Отчетливо эффект виден на рис. 14, когда погодные условия близки к штилевым. Связь морской турбулентности с динамической скоростью в атмосфере и волнением при этом выражена слабо, а увеличивающийся поток тепла ведет к значительному снижению уровня турбулентной энергии, изменяющейся в противофазе с тепловым потоком, но с некоторой временной задержкой. Влияния ветра и волнения при этом почти не заметно.

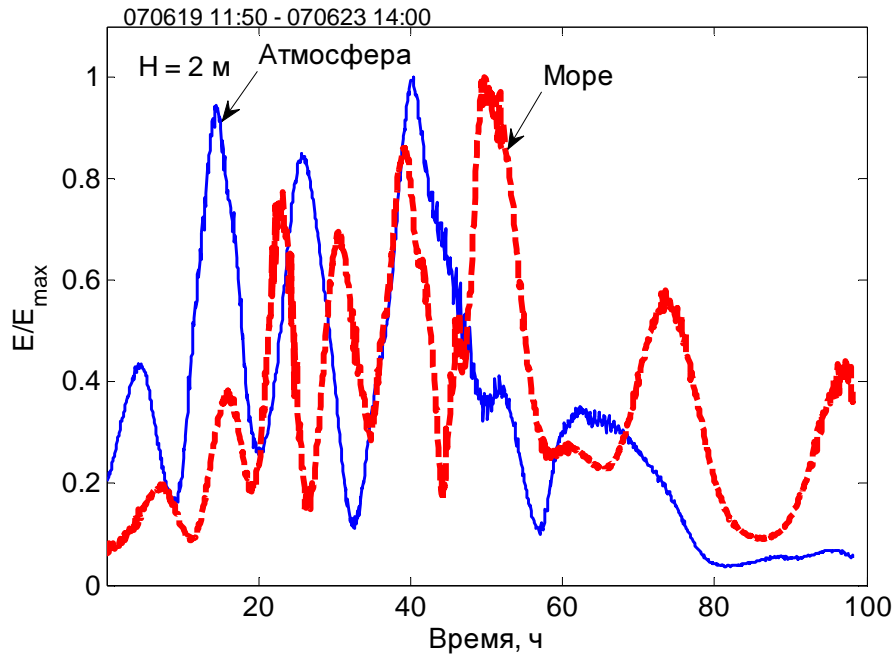


**Р и с. 11.** Изменение средней по масштабам энергии колебаний физических параметров в пограничных слоях атмосферы и моря 10 – 13 июня 2005 г. при  $J_{\max} \approx 84$  ч: 1 –  $u_*^a$ ; 2 –  $H_S$ ; 3 –  $Q \cdot 10^{-2}$ ; 4 –  $w_{rms} \cdot 10$  на глубине 1,3 м; 5 –  $U_d$

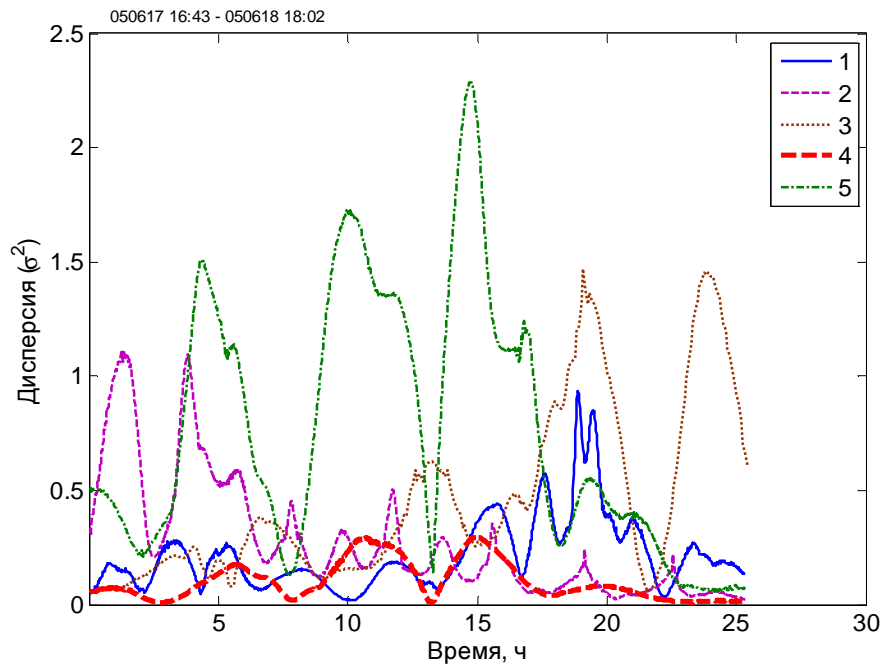


**Р и с. 12.** Глобальные спектры для тех же параметров, что на рис. 11, за указанный период наблюдений. Обозначения те же





Р и с. 13. Изменение средней по масштабам турбулентной энергии, нормированной на максимальное значение, в пограничных слоях атмосферы и моря 19 – 23 июня 2007 г.



Р и с. 14. Изменение средней энергии колебаний различных физических параметров в пограничных слоях атмосферы и моря 17 – 18 июня 2005 г. при  $J_{\text{max}} \approx 10,5$  ч: 1 –  $u_*^a$ ; 2 –  $H_S/2$ ; 3 –  $Q \cdot 10^{-2}$ ; 4 –  $w_{\text{rms}} \cdot 10$  на глубине 1,5 м; 5 –  $U_d/2$

Учитывая сложность проблемы, на основании имеющейся информации делать однозначные выводы было бы преждевременно, поэтому на сегодняшнем этапе можно привести лишь некоторые предварительные результаты.

1. Применение обширного набора современной измерительной и вычислительной аппаратуры дает возможность получать информацию на качественно новом уровне, особая ценность такой информации – в комплексности и совместном анализе взаимодействия двух сред.

2. Многосуточные непрерывные наблюдения позволили определить значимые периодичности с масштабами от одного часа до десятков часов в интенсивности турбулентных пульсаций во взаимодействующих слоях.

3. Обнаружено, что по всем наблюдаемым параметрам в значимых внутрисуточных периодах интенсивности колебаний присутствуют закономерности, что может свидетельствовать о наличии когерентных структур в исследуемых слоях.

4. С использованием вейвлет-анализа прослежены эволюция интенсивности турбулентности в приводном слое на разных масштабах и реакция приповерхностного слоя моря на атмосферные возмущения.

5. В период развития апвеллинга обнаружены колебательные процессы во взаимодействующих слоях атмосферы и моря, связанные, по-видимому, с изменениями теплообмена.

6. Установлено, что при слабых ветрах существенное влияние на турбулентный режим приповерхностного слоя начинает оказывать поток тепла – наблюдается обратная зависимость между этим параметром и интенсивностью турбулентности.

На основании проведенных экспериментальных исследований и анализа данных считаем, что накопленный опыт совместных работ и постоянное усовершенствование аппаратуры и методики измерений позволяют получать уникальную информацию, которая может служить основой для создания объединенных моделей нового поколения, описывающих взаимодействие атмосферы и океана.

В заключение выражаем искреннюю признательность всем сотрудникам, участвовавшим в экспедициях, за обеспечение качественной работы аппаратуры и выполнение трудоемких процедур обработки информации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Charnock H.* Wind stress on a water surface // *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* – 1955. – 81. – P. 639 – 640.
2. *Hsu S.A.* A dynamic roughness equation and its application to wind stress determination at the air-sea interface // *J. Phys. Oceanogr.* – 1974. – 4, № 1. – P. 116 – 120.
3. *Fairall C.W., Bradley E.F., Rogers D.P. et al.* Bulk parameterization of air-sea fluxes for Tropical Ocean-Global Atmosphere Coupled-Ocean Atmosphere Response Experiment // *J. Geophys. Res.* – 1996. – 101, № C2. – P. 3747 – 3764.
4. *Чухарев А.М., Ретина И.А.* Комплексные натурные измерения турбулентных характеристик в слоях у границы раздела моря и атмосферы // *Экологическая безопасность и комплексное использование прибрежной и шельфовой зон моря.* – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2010. – Вып. 23. – С. 75 – 87.

5. *Stewart R.W., Grant H.L.* Determination of the rate of dissipation of turbulent energy near the sea surface in the presence of waves // *J. Geophys. Res.* – 1962. – 67, № 8. – P. 3177 – 3180.
6. *Монин А.С., Озмидов Р.В.* Океанская турбулентность. – Л.: Гидрометеоздаг, 1981. – 320 с.
7. *Soloviev A., Lukas R., Hacker P., Schoeberlein H. et al.* A near-surface microstructure sensor system used during TOGA COARE. Part II: Turbulence measurements // *J. Atmos. Ocean. Technol.* – 1999. – 16. – P. 1598 – 1618.
8. *Чухарев А.М.* Применение измерительного комплекса «Сигма-1» для исследования турбулентности на океанографической платформе // Экологическая безопасность и комплексное использование прибрежной и шельфовой зон моря. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2010. – Вып. 21. – С. 231 – 238.
9. *Астафьева Н.М.* Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // *Успехи физических наук.* – 1996. – 166, № 11. – С. 1145 – 1170.
10. *Витязев В.В.* Вейвлет-анализ временных рядов. – СПб.: Изд-во СПб-го ун-та, 2001. – 60 с.
11. *Torrence C., Compo G.P.* A practical guide to wavelet analysis // *Bull. Am. Met. Soc.* – 1998. – 79, № 1. – P. 61 – 78.
12. *Kim K., Sung H.J.* DNS of turbulent boundary layer with time-periodic blowing through a spanwise slot // *Proceedings of the Asian Computational Fluid Dynamics Conference (5th)*. Busan, Korea, October 27 – 30. – 2003. – P. 835 – 842.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,  
Севастополь  
E-mail: alexchukh@ukr.net  
Институт физики атмосферы имени А.М. Обухова РАН,  
Москва

Материал поступил  
в редакцию 29.11.10  
После доработки 18.02.11

**АНОТАЦІЯ** Наведені результати детальних натурних вимірювань турбулентних характеристик в спряжених шарах моря та атмосфери в прибережній зоні Чорного моря. Використовувалася сучасна високоточна апаратура, спостереження велися по великому числу параметрів протягом трьох експедиційних періодів у 2005 – 2009 рр. Виявлені періодичності різних масштабів у інтенсивності атмосферної та морської турбулентності, простежена еволюція турбулентної енергії в різних умовах і на різних масштабах, а також реакція приповерхневого шару моря на атмосферні збурення. Показано, що при слабких вітрах істотний вплив на морську турбулентність починає робити потік тепла.

**Ключові слова:** взаємодія атмосфери та моря, турбулентність, натурні вимірювання, вейвлет-аналіз.

**ABSTRACT** Results of the detailed *in situ* measurements of turbulent characteristics of the sea and atmosphere conjugate layers in the Black Sea coastal zone are presented. Modern high-precision equipment was used; many parameters were observed during three expeditionary periods in 2005 – 2009. Periodicities of various scales of the atmospheric and sea turbulence intensity are revealed. Evolution of turbulent energy in various conditions and on various scales, and response of the sea near-surface layer to the atmospheric disturbances are traced. It is shown that at weak winds the sea turbulence is strongly influenced by a heat flux.

**Keywords:** atmosphere-sea interaction, turbulence, *in situ* measurements, wavelet-analysis.