

А.М.Чухарев*, И.А.Репина**

**Морской гидрофизический институт НАН Украины, г.Севастополь*

***Институт физики атмосферы РАН, г.Москва*

КОМПЛЕКСНЫЕ НАТУРНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ТУРБУЛЕНТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК В СЛОЯХ У ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА МОРЯ И АТМОСФЕРЫ

Представлена информация о совместных экспериментах МГИ НАНУ и ИФА РАН по исследованию взаимного влияния пограничных слоев атмосферы и моря в натуральных условиях. Описаны основные цели и задачи исследований, технические характеристики использовавшейся измерительной аппаратуры, методика работ. Изложены главные подходы и методы, используемые при обработке полученных данных. В течение ряда лет получен обширный набор данных о состоянии физических полей взаимодействующих слоев моря и атмосферы в различных гидрометеорологических условиях. Уже первые результаты совместного анализа свидетельствуют о широких возможностях таких комплексных исследований. Подчеркивается актуальность и перспективность междисциплинарных программ по исследованию взаимодействия двух сред.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *пограничный слой, взаимодействие атмосферы и океана, турбулентность.*

Взаимодействие атмосферы и океана по-прежнему является одним из самых сложных предметов для изучения и количественного описания в гидрофизике. В последние годы делаются попытки рассматривать приповерхностный слой атмосферы и приповерхностный слой моря в неразрывной связи друг с другом. Необходимость детального изучения обменных процессов внутри каждого слоя, исследования взаимного влияния диктуется потребностями точного прогнозирования в метеорологии и океанологии. Без точного количественного учета физических механизмов взаимодействия атмосферы и океана невозможно создание теоретических моделей, адекватно описывающих обменные процессы между двумя средами и турбулентное перемешивание в верхнем слое океана и нижних слоях атмосферы.

Хорошо известно, что взаимодействие океана и атмосферы является ключевым аспектом в фундаментальных и прикладных исследованиях климата и погоды, но параметризация механизмов переноса тепла, влаги, импульса и массы через водно-воздушную поверхность сопряжена с определенными трудностями. Одна из наиболее сложных проблем – учет воздействия ветровых волн на поток импульса. Сложность турбулентного поля над водной поверхностью вызывает необходимость дополнительного исследования применимости теории подобия Монина-Обухова. Остается и немало вопросов связанных с изучением влияния на турбулентный обмен различных механизмов генерации турбулентности: сдвига скорости дрейфового течения, нелинейности ветровых волн, их обрушений, различия в направлении ветра, течения, волнения, а также других факторов. Чтобы установить связи турбулентных характеристик с определяющими фоновыми процесса-

ми необходимо также знание средних значений гидрофизических полей и их медленных вариаций.

В этой связи экспериментальные исследования пограничных слоев атмосферы и моря являются необходимым условием решения указанных выше и других задач. Особенно актуальны комплексные исследования этих слоев, детальные синхронные измерения физических параметров и турбулентных характеристик обеих сред, получение объективных зависимостей между ними.

Цель настоящей работы – описание средств и методов совместных исследований, проводившихся в пограничных слоях моря и атмосферы в рамках международных проектов и в соответствии с Договором о научно-техническом сотрудничестве между Морским гидрофизическим институтом (МГИ) НАН Украины и Институтом физики атмосферы (ИФА) РАН.

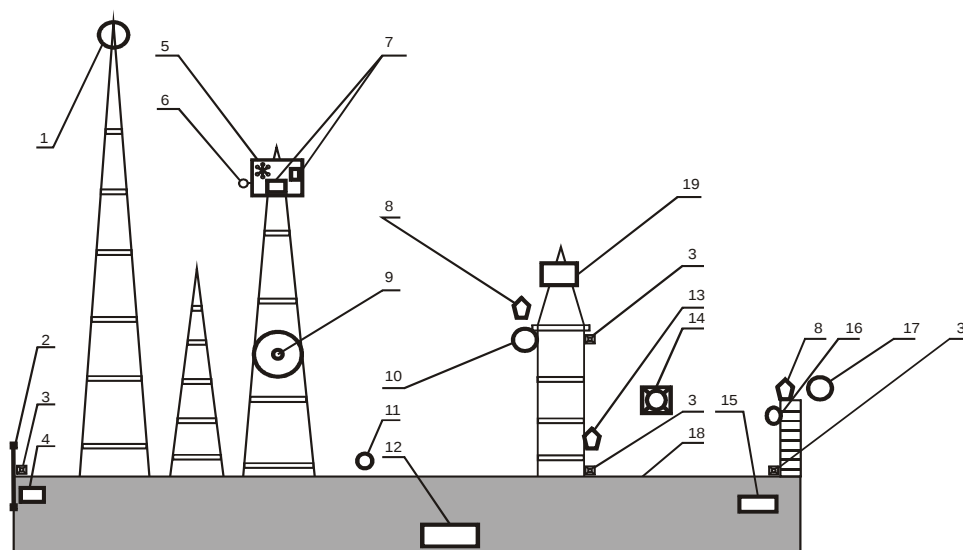
Экспериментальные исследования проводились в прибрежной зоне Черного моря на стационарной океанографической платформе (СОП) Экспериментального отделения МГИ (ЭО МГИ) в пос.Кацивели, начиная с 2005 г. Здесь описаны работы отдела турбулентности (ОТ) МГИ и Лаборатории взаимодействия атмосферы и океана ИФА. В период проведения экспедиций происходило самое тесное сотрудничество и с другими группами исследователей: отделом дистанционных методов исследования (ОДМИ) МГИ и Институтом космических исследований РАН. Обширные программы и задачи этих групп в данной работе не рассматриваются, главное внимание уделяется изучению турбулентности в пограничных слоях атмосферы и океана.

Аппаратура и средства измерения. В различные годы состав измерительной аппаратуры несколько изменялся как в сторону расширения парка используемых приборов, в первую очередь это касается московской группы, так и модернизации и усовершенствования имеющихся средств наблюдения. На рис.1 изображена схема расположения приборов во время комплексной экспедиции в 2009 г., включая и средства измерения других групп исследователей. Технические характеристики приборов, используемых МГИ и ИФА приведены в табл.1 – 3.

Основные средства наблюдения ИФА имеют международные сертификаты качества, измерительные комплексы МГИ тарифовались в отделе метрологии МГИ непосредственно перед экспедицией, в некоторых случаях – сразу после проведения экспедиции. Регистрация всех основных параметров велась на бортовые компьютеры в режиме реального времени.

Большое количество измерительных средств существенно расширяет возможности исследователя, но и влечет за собой дополнительные сложности, связанные с синхронизацией различных приборов, а также принимающей и записывающей аппаратуры. При совместных измерениях нами проводились ежесуточная синхронизация бортовых компьютеров, сверка различных измерителей по одним и тем же параметрам и другие необходимые методические работы. Все получаемые данные подвергались тщательному контролю, выявлению сбойных участков и неправдоподобных значений. Стоит отметить, что за редким исключением, аппаратура работала исправно, и выбракованных данных практически не было.

Измерения в атмосфере. В табл.1 приводится перечень аппаратуры, использованной ИФА в 2009 г., на рис.2 изображены приборы, обозначенные



Р и с . 1 . Схема расположения приборов на океанографической платформе во время экспериментов в 2009 г.

- | | |
|---|---|
| 1. Струнный волнограф – ОДМИ МГИ. | 11. Измерители МГИ-1308 (5 шт.) – ЭО МГИ. |
| 2. Оптический измеритель волнения (стереофотосъемка) – ОДМИ МГИ. | 12. Метеокомплекс – ОДМИ МГИ. |
| 3. Струнный волнограф (4 шт.) – ИО РАН. | 13. Акустический анемометр <i>Wind-Sonic</i> – ИФА РАН. |
| 4. Локатор – ОДМИ МГИ. | 14. Измеритель скорости течения (гидрологический зонд <i>FSI</i>) – ИФА РАН. |
| 5. Акустический анемометр <i>USA-1 (METEK)</i> – ИФА РАН. | 15. Метеорологический температурный профилемер <i>МРЗ</i> – ИФА РАН, ЦАО. |
| 6. Измеритель CO_2 и H_2O (газоанализатор <i>LiCorr 7500</i>) – ИФА РАН. | 16. Видеокамера – ИФА РАН. |
| 7. Блоки регистрации – ИФА РАН. | 17. Измерительный комплекс «Восток-М» №007 – ОТ МГИ. |
| 8. Чашечный анемометр <i>AMC ANDEERA</i> (2 шт.) – ИФА РАН. | 18. Океанографическая платформа. |
| 9. Измерительный комплекс «Сигма-1» – ОТ МГИ. | 19. Гидрологический комплекс «Траверс» – ИКИ РАН. |
| 10. Измерительный комплекс «Восток-М» №002 – ОТ МГИ. | |

на схеме № 5, 6 и 8.

В исследованиях взаимодействия атмосферы и океана на СОП ставились следующие цели и задачи:

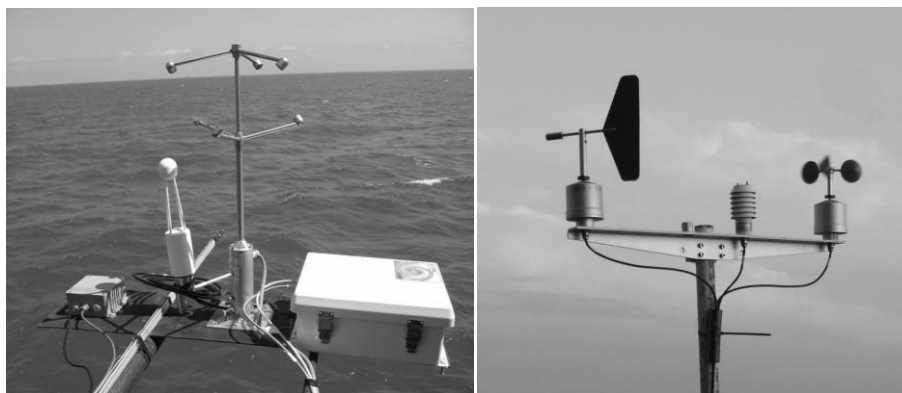
- исследование энергообмена и газообмена атмосферы и подстилающей поверхности при различных типах морского волнения с помощью инструментальных измерений потоков тепла, влаги, углекислого газа и импульса в приповерхностном слое атмосферы;
- выбор наилучших способов параметризации турбулентных потоков;
- исследование взаимодействия моря и атмосферы при наличии локальных неоднородностей подстилающей поверхности.

В период экспедиции группой выполнялись виды наблюдений и работ:

- непрерывные измерения пульсаций температуры, горизонтальной и вер-

Т а б л и ц а 1. Измерительная аппаратура, использовавшаяся ИФА РАН.

прибор		расположение	частота измерений	получаемые данные
<i>AMC ANDEERA</i>		1 уровень: 5,5 м над уровнем моря на 6-метровом выносе 2 уровень: 12 м над уровнем моря на 2-метровом выносе с верхней палубы	1 мин	температура воздуха, средняя скорость, порывы и направление ветра на 2-х уровнях; относительная влажность, давление на нижнем уровне; температура поверхности.
акустический	анемометр	на 8-метровом выстреле, высота 4,5 м над уровнем моря	10 Гц	пульсации температуры воздуха, трех компонент скорости ветра. турбулентные потоки явного тепла и импульса, статистические характеристики ветрового потока.
акустический	анемометр	на уровне 1 м над морской поверхностью	4 Гц	пульсации двух компонент скорости ветра, скорость, направление ветра, статистические характеристики ветрового потока.
газоанализатор <i>LiCorr 7500</i>		на 8-метровом выстреле, высота 4,5 м над уровнем моря	10 Гц	пульсации концентраций водяного пара и углекислого газа. турбулентные потоки углекислого газа и влажности (скрытого тепла)
гидрологический зонд <i>FSI</i>		на глубине 1 м	1 мин	температура, соленость, скорость и направление течений
метеорологический температурный профилемер <i>MP3</i>		на верхней площадке платформы	5 мин, с шагом 50 м до высоты 1000 м	профиль температуры в атмосферном пограничном слое
датчик-зонд <i>YSI MODEL 30M</i>		глубина 5 – 10 см	3 – 4 раза в сут	температура и соленость верхнего слоя
видеокамера		на мостике верхней палубы	5 кадров в с	видеофайлы с записью состояния морской поверхности
датчик для измерения температуры моря <i>PIRAT</i>		глубина 1 м	30 мин	температура моря



Р и с . 2 . Газоанализатор и акустический анемометр (слева) и чашечный анемометр (справа).

- непрерывные измерения пульсаций концентраций водяного пара и углекислого газа на высоте 5 м с частотой 10 Гц;
- непрерывные измерения пульсаций двух компонент скорости ветра на высоте 1 м над морской поверхностью с частотой 4 Гц;
- метеорологические измерения, которые включали в себя измерения температуры, влажности, давления, скорости и направления ветра на 2-х высотах (5 и 12 м) непрерывно во время всего периода работы с дискретностью 1 мин;
- измерения температуры и солёности поверхностного слоя моря, измерение скорости и направления течений (глубина 1 м);
- непрерывные измерения профиля температуры в атмосферном пограничном слое до высоты 1000 м;
- видеоконтроль за состоянием морской поверхности.

Синхронизация измерений осуществлялась с помощью GPS.

Для вычисления потоков использовался так называемый прямой или метод турбулентных пульсаций:

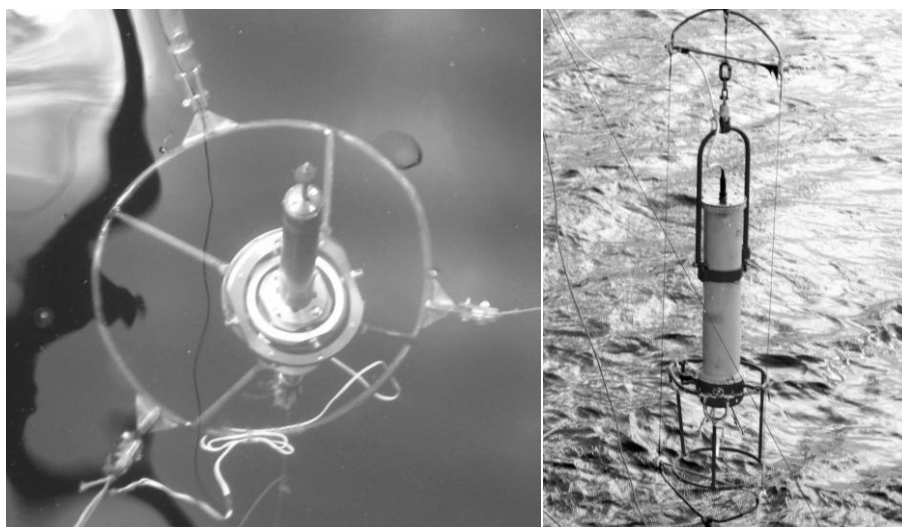
$$\tau = \rho_0 \left[\overline{u' w'^2} + \overline{v' w'^2} \right]^{1/2} = \rho_0 u_*^2, \quad (1)$$

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

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

$$F_{co_2} = \overline{w' c'}, \quad (4)$$

где формулы (1) – (4) выражают поток импульса, явного и скрытого потоков тепла и поток углекислого газа соответственно, использованы следующие обозначения: ρ_0 – плотность, u_* – динамическая скорость, c_p – теплоемкость при постоянном давлении, w' – вертикальные пульсации скорости, T' – пульсации температуры, q' – пульсации влажности, L_s – удельная теплота парообразования, c' – пульсации концентрации углекислого газа.



Р и с . 3 . Измерительные комплексы «Сигма-1» (слева) и «Восток-М» (справа).

Измерения в морской среде. В исследованиях морской турбулентности в приповерхностном слое использовались позиционный вариант измерительного комплекса «Сигма-1» [1] и векторно-осредняющий измеритель скорости течения «Восток-М» (МГИ-1306), общий вид которых представлен на рис.3, на схеме они обозначены номерами 9 и 10 соответственно.

Главные задачи:

- 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 приподнятого слоя атмосферы.

С помощью комплекса "Сигма-1" измерялись три компоненты пульсаций вектора скорости течения, температура и электропроводность воды (включая их пульсации), гидростатическое давление. Характеристики измерительных каналов приведены в табл.2. Помимо измерителей основных гидрофизических величин комплекс снабжен также системой контроля положения его условной оси относительно магнитного меридиана (азимут) и датчиками линейных ускорений (акселерометрами), являющихся одновременно измерителями углов наклона (крена и дифферента), что позволяет учитывать движения самого прибора и связать измеренные величины компонент вектора скорости с неподвижной системой отсчета. Более подробно техника измерений и предварительная обработка данных, полученных комплексом «Сигма-1», описана в [2].

Характеристики измерительного комплекса «Восток-М» представлены в табл.3. Отличительная особенность этого измерителя скорости течения – наличие трех вертушек (импеллеров), равноудаленных от центра прибора и расположенных друг относительно друга под углом 120°. Это дает возможность определять модуль и направление вектора скорости течения при любом положении прибора относительно магнитного меридиана.

Т а б л и ц а 2. Технические характеристики измерительного комплекса «Сигма-1».

измеряемые параметры	диапазон	разрешение	точность	дискретность измерений
три компоненты пульсации скорости, м/с	± 2	10^{-3}	$\pm 10 \%$	дискретность по средним величинам 20 Гц, по пульсациям —100 Г
температура, °С	0 – 30	0,001	$\pm 5 \%$	
электропроводность, отн.ед.	0 – 0,9	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$\pm 5 \%$	
три компоненты линейных ускорений, м/с ²	± 20	0,002	0,002	
крен и дифферент прибора	$\pm 20^\circ$	$0,01^\circ$	$\pm 1^\circ$	
угол азимута прибора	0 – 360°	10°	$\pm 5^\circ$	
давление, МПа	0 – 1	$5 \cdot 10^{-4}$	$\pm 1 \%$	

Т а б л и ц а 3. Технические характеристики измерительного комплекса «Восток-М».

измеряемые параметры	диапазон	точность	дискретность
модуль скорости течения V_R	0 – 1,8 м/с	$\pm (1 - 4V_R) \cdot 10^{-2}$ м/с	дискретность измерений по всем измерительным каналам составляет 15, 30 или 60 с
направление вектора скорости (азимут)	0 – 360°	$\pm (\arctg(4 + 1/V_R) \cdot 10^{-2} + 3)$	
температура	– 2 – 35 °С	$\pm 0,05$ °С	
относительная электрическая проводимость	0 – 1,6	$\pm 1,25 \cdot 10^{-3}$	

Такая конструкция позволяет использовать его для регистрации параметров в режиме реального времени, без применения не всегда надежных скользящих электроразъемов. Каналы измерения средних величин температуры и электропроводности «Востока» обладают достаточно хорошей точностью и высокой стабильностью, что позволяет проводить дополнительный контроль средних параметров, полученных комплексом «Сигма-1».

В процессе проведения экспериментов оба этих прибора, как правило, находились на одном горизонте, информация синхронно вводилась в бортовой компьютер. При необходимости глубина размещения приборов менялась. Проводились как долговременные (продолжительностью от нескольких часов до трех суток) измерения на одном горизонте для оценки временной изменчивости турбулентных характеристик, так и кратковременные (10 – 20 мин) записи для оценки интенсивности турбулентности на разных глубинах при различных гидрометеорологических условиях, которые в этом случае предполагались квазистационарными.

Второй измерительный комплекс «Восток-М» №007 устанавливался обычно на глубине 10 м, и в течение всей экспедиции его расположение не менялось. Прибор работал в автономном режиме, запись информации велась во внутреннюю флеш-память.

Для анализа турбулентных характеристик приповерхностного слоя выбирались участки записи при направлении течения со стороны открытого моря, чтобы избежать влияния платформы на область измерений.

Как один из наиболее важных критериев интенсивности турбулентности обычно рассматривается скорость диссипации турбулентной энергии:

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

где μ – коэффициент вязкости, v' – пульсации скорости. Расчет скорости диссипации проводился по методике, изложенной в [3]. Указанный способ позволяет оценить значения ε по наилучшему совпадению эмпирических спектров пульсаций скорости с модельным спектром турбулентности, в качестве которого использовался спектр Насмита [4], при этом искажения, вносимые в сигнал волнением и колебаниями прибора с подвеской, не оказывают существенного влияния на результат [3]. Указанная методика оценки скорости диссипации успешно использовалась в [5].

Исходные данные предварительно обрабатывались сглаживающим медианным фильтром, при необходимости и фильтром Винера [2] для устранения влияния собственных колебаний прибора. Рассчитывались частотные спектры для горизонтальной и вертикальной компонент пульсаций скорости, которые переводились затем в спектры волновых чисел в соответствии с гипотезой «замороженной турбулентности» Тэйлора: $U_d = \omega/k$, где k – волновое число, U_d – скорость переноса турбулентных вихрей через датчик, ω – угловая частота. При развитом волнении в качестве переносной скорости U_d до глубины $2H_s$ (H_s – высота значительных волн) использовалась скорость орбитального движения волны, то есть применялась так называемая расширенная гипотеза Тэйлора [7], в остальных случаях в качестве U_d использовалась скорость среднего течения, измеряемая комплексом «Восток-М».

Рассчитанные величины скорости диссипации в целом не противоречили трехслойной схеме [7] распределения диссипации по глубине, и в «классических» случаях (при умеренном ветре, отсутствии зыби, развитом ветровом волнении, однонаправленности ветра и волнения) находились в согласии с теоретической моделью [8].

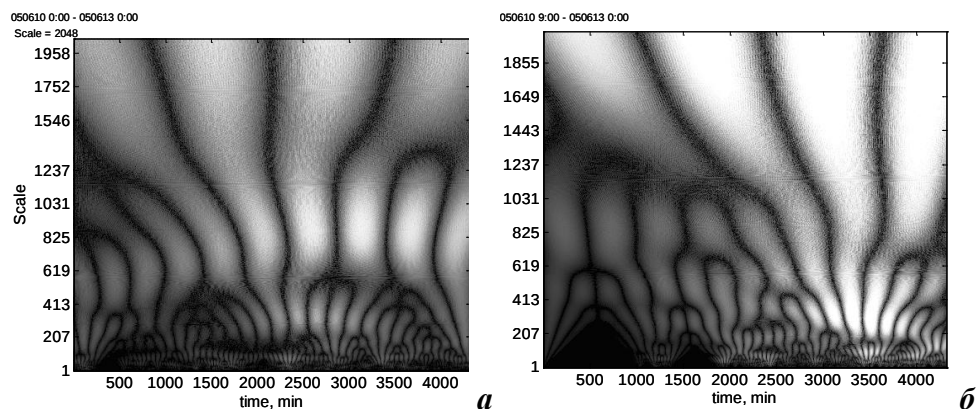
Некоторые результаты совместного анализа. Данные, полученные при синхронных измерениях, использовались для совместного анализа с целью выявления корреляционных зависимостей между процессами в атмосфере и в море. Большое многообразие гидрометеорологических условий требует накопления достаточного статистического материала, который позволит установить объективные закономерности во взаимодействии двух сред. По нашему мнению этот процесс накопления еще не закончен, поэтому на сегодняшний день можно сформулировать только ряд обобщений для некоторых исследованных ситуаций.

В силу сложившихся погодных условий значительная доля измерений 2005 г. проводилась в условиях апвеллинга, вызванного сильным западным ветром. На рис.4 приведены основные измеренные и рассчитанные физические параметры приповерхностного слоя атмосферы и приповерхностного слоя моря 11 – 12 июня в период мощного апвеллинга. Наблюдается определенная корреляция между физическими процессами тепло- и энергообмена и интенсивностью турбулентности в приповерхностном слое (скоростью диссипации турбулентной энергии). Как известно, взаимодействие между двумя средами носит очень сложный характер. В данном примере изменение потоков тепла и импульса в атмосфере, по-видимому, обуславливали периодические изменения интенсивности турбулентности в море, это, в свою очередь, через обратную связь влияло на интенсивность обменных процессов «море – атмосфера».

При анализе данных кроме обычных корреляционных и спектральных оценок использовался вейвлет-анализ, что значительно расширило возмож-



Рис. 4. Изменение физических параметров в пограничных слоях моря и атмосферы в период апвеллинга.

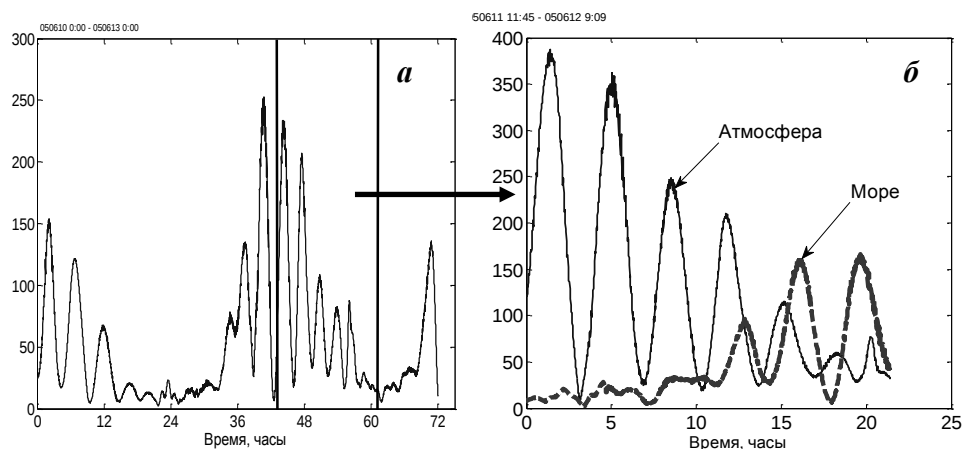


Р и с . 5 . Абсолютные вейвлет-коэффициенты, рассчитанные по динамической скорости в воздухе u^a (а) и по среднеквадратичным вертикальным пульсациям скорости в воде (б), осредненным по 1 мин, за период с 10 по 13 июня 2005 г.

ности установления объективных зависимостей между физическими характеристиками обеих сред [6]. Из всего многообразия в качестве материнского вейвлета был выбран вейвлет Морле, оказавшийся для наших целей наиболее подходящим.

На рис.5 показаны вейвлет-коэффициенты, рассчитанные для пограничных слоев воздуха и воды. Более светлые области соответствуют большим значениям коэффициентов и, соответственно, большей энергии. На основании данных непрерывных трехсуточных наблюдений хорошо видна нестационарная структура процесса с элементами квазипериодичности и с участками локальных периодичностей на разных масштабах.

Очень наглядную иллюстрацию реакции приповерхностного слоя моря на динамическое воздействие ветра можно видеть на рис.6, где изображена эволюция полной турбулентной энергии, рассчитанной по вейвлет-коэффициентам для воздуха и воды. Наблюдается возникновение колебаний интенсивности турбулентности в море после воздействия атмосферного возмуще-



Р и с . 6 . Изменение полной турбулентной энергии по вейвлет-коэффициентам в атмосфере с 10 по 13 июня (а), в атмосфере и в море 11 – 12 июня (б) 2005 г.

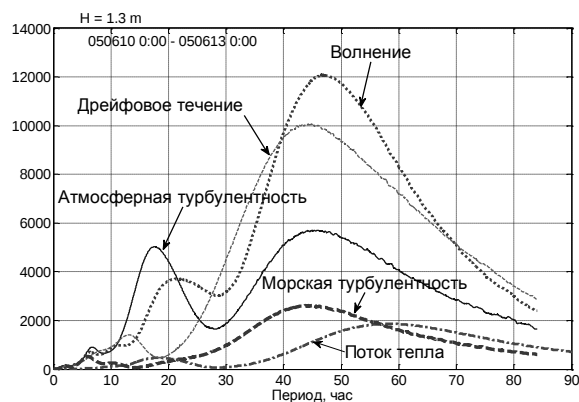


Рис. 7. Спектры, рассчитанные по вейвлет-коэффициентам за период с 10 по 13 июня 2005 г. Все данные усреднены по 1 мин, поток тепла – по 5 мин. В приведенном случае скорость течения и пульсации скорости в воде измерены на глубине 1,3 м.

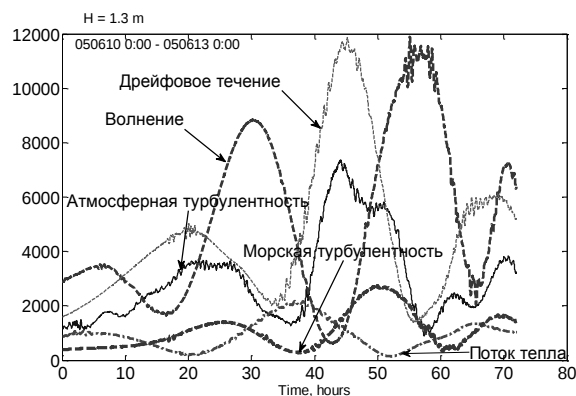


Рис. 8. Изменение полной энергии различных физических параметров с 10 по 13 июня 2005 г., рассчитанной по вейвлет-коэффициентам. Исходные данные те же, что на рис. 7.

ности 6,5 ч наблюдаются и в атмосферной и в морской турбулентности. На рис. 8 изображено изменение полной энергии этих же параметров за указанный период. Хорошо заметны синфазность в колебаниях энергии в атмосфере и в море и обратная корреляция между потоком тепла и морской турбулентностью.

Известно, что при слабых ветрах и в штилевую погоду, 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 можно увидеть обратную зависимость между потоком тепла и интенсивностью турбулентности, что свидетельствует о необходимости включения этого параметра в модели – понятно, что нагрев ведет к усилению стратифика-

ция с тем же периодом $\sim 3,5$ ч. Временная задержка в приведенном случае составила около 10 ч.

На рис. 7 приведены спектры основных физических характеристик взаимодействующих слоев моря и атмосферы, рассчитанные по вейвлет-коэффициентам. Для расчета вейвлет-коэффициентов использовались следующие параметры: динамическая скорость в воздухе, модуль скорости дрейфового течения, среднеквадратичные возвышения поверхности, измеренный поток тепла, среднеквадратичные вертикальные пульсации скорости в воде.

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 (около 18 ч) периодичности в атмосферной турбулентности и практически отсутствие пика на этой частоте у морской турбулентности. В то же время периодич-

ции и, соответственно, к ослаблению турбулентности. Отчетливо это видно на рис.9, когда погодные условия были близки к штилевым. Корреляция морской турбулентности с динамической скоростью в атмосфере и волнением при этом выражена слабо, а увеличивающийся поток тепла привел к значительному снижению уровня турбулентной энергии, изменяющейся в противофазе с тепловым потоком, но с некоторой временной задержкой.

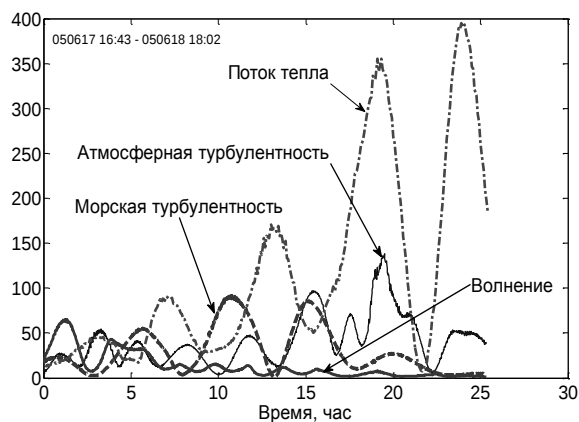


Рис. 9. Изменение полной энергии физических параметров 17 – 18 июня 2005 г., рассчитанной по вейвлет-коэффициентам.

Выводы. По причине весьма значительного объема информации, большая часть данных еще находится в стадии обработки, поэтому на сегодняшнем этапе можно сделать некоторые предварительные выводы.

1. Применение современной измерительной и вычислительной аппаратуры дает качественно новый уровень получаемой информации, особая ценность которой – в комплексности, возможности совместного анализа взаимодействия двух сред.
2. Отработаны методики совместных измерений в сопряженных слоях моря и атмосферы.
3. Получены значения турбулентных потоков тепла, импульса и углекислого газа над морской поверхностью в различных условиях.
4. Рассчитаны значения коэффициентов обмена в приводном слое при разных скоростях ветра.
5. Определены величины коэффициентов турбулентного обмена в приповерхностном слое моря в зависимости от скорости ветра и состояния морской поверхности.
6. Многосуточные непрерывные наблюдения позволили определить явно выраженные периодичности в интенсивности турбулентных пульсаций во взаимодействующих слоях.
7. Обнаружено динамическое взаимодействие атмосферы и моря на разных временных масштабах от 2 до 48 часов.
8. С использованием вейвлет-анализа прослежена эволюция интенсивности турбулентности в приводном слое на разных масштабах и реакция приповерхностного слоя моря на атмосферные возмущения.
9. 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.

Самые первые результаты анализа полученных данных позволяют говорить о перспективности подобных комплексных исследований и необходимости развития междисциплинарных программ. Накопленный опыт со-

вместных работ и постоянное усовершенствование аппаратуры и методики измерений позволяют получать уникальную информацию, которая явится основой для создания объединенных моделей нового поколения, описывающих взаимодействие атмосферы и океана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.65-71.
2. Чухарев А.М. Коррекция измеренных величин пульсаций вектора скорости. / Системы контроля окружающей среды. – Севастополь, 2008. – С.147-152.
3. 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. – P.3177-3180.
4. Oakey N.H. Determination of the rate of dissipation of turbulent energy from simultaneous temperature and velocity shear microstructure measurements // J. Phys. Oceanogr. – 1982. – 12. – P.256-271.
5. Soloviev A., Lukas R., Hacker P., Schoeberlein H., Baker M., Arjannikov A. A near-surface microstructure sensor system used during TOGA COARE. Part II: Turbulence measurements // J. Atmos. Oceanic Technol. – 1999. – v.16. – P.1598-1618.
6. Астафьева Н.М. Вейвлет-преобразования. Основные свойства и примеры применения. – М.: ИКИ РАН, 1994. – № 1891. – 56 с.
7. Terray E.A., Donelan M.A., Agrawal Y.C., Drennan W.M., Kahma K.K., Williams A.J., Hwang P.A., Kitaigorodskii S.A. Estimates of kinetic energy dissipation under breaking waves // J. Phys. Oceanogr. – 1996. – 26, № 5. – P.792-807.
8. Craig P.D., Banner M.L. Modelling of wave-enhanced turbulence in the ocean surface layer // J. Phys. Oceanogr. – 1994. – 24, № 12. – P.2546-2559.

Материал поступил в редакцию 20.10.2010 г.