

В.В.Очередник¹, А.С.Запевалов²¹Южное отделение Института океанологии им.П.П.Ширшова РАН, г.Геленджик²Морской гидрофизический институт РАН, г.Севастополь

ИССЛЕДОВАНИЕ КОРОТКОПЕРИОДНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ЧЕРНОМОРСКОМ ГИДРОФИЗИЧЕСКОМ ПОЛИГОНЕ ИНСТИТУТА ОКЕАНОЛОГИИ РАН

Проведены исследования короткопериодной изменчивости поля температуры в придонном и промежуточном слоях прибрежной зоны Черного моря. Для анализа используются данные натуральных измерений, выполненных с помощью термокосы, установленной на черноморском гидрофизическом полигоне Института океанологии РАН. Использовался кросс-спектральный анализ флуктуаций температуры на разных горизонтах. Показано, что флуктуации температуры с периодом порядка минуты имеют высокую когерентность в придонном и промежуточном слоях. Сдвиг фазы между флуктуациями температуры на частотах, соответствующих указанному временному масштабу, не превышает 2°.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *поле температуры, прибрежная зона, термокосы, кросс-спектральный анализ*

doi:10.22449/2413-5577-2018-1-44-49

Введение. В настоящее время большое внимание уделяется исследованиям состояния и изменчивости прибрежных и шельфовых зон Черного моря [1, 2]. Одним из наиболее информативных и в то же время достаточно просто измеряемых параметров является температура. Изменения температуры непосредственно влияют на морские растения, рыб и животных, они также являются индикатором изменения динамических процессов [3].

Данные о поле температуры получают несколькими путями: зондированием на океанологических станциях [4], а также с помощью стационарно установленных термокос или термокос, размещенных на дрейфующих буйках (дрифтерах) [5]. Стационарно установленные термокосы являются эффективным средством исследования короткопериодной изменчивости поля температуры. Их используют для изучения апвеллингов, внутренних волн и ряда других процессов [6 – 8].

Внутренние волны играют важную роль в процессах перемешивания в прибрежной зоне. Наряду с течениями они также являются основным фактором, влияющим на формирование гидроакустических полей [9]. Традиционно при анализе короткопериодной изменчивости поля температуры используется рассчитанное по данным зондирования или измерений термокосами распределение изотерм по глубине [10]. В настоящей работе для этих целей используется математический аппарат кросс-спектрального анализа.

Методика и аппаратура. Термокоса представляет собой гирлянду термодатчиков, способных обеспечивать долговременное регулярное измерение температуры в море на различных горизонтах. Методика постановки, конструкция, аппаратная и измерительная части термокос Южного отделе-

ния Института океанологии РАН подробно описаны в одноименной статье [8]. Данные температурные цепочки на полигоне используются достаточно продолжительное время, периодически, с интервалом в 3 – 4 месяца производятся регламентные работы с термокосами: тарировка датчиков давления и температуры, замена протекторов на линиях буйрепа и пр.

Термокосы устанавливаются вертикально на черноморском шельфе, как на внутреннем и среднем, так и на его бровке. Обтекаемая форма подповерхностной плавучести и значительный положительный баланс её подъёмной силы удерживают термокосу в квазивертикальном положении даже в периоды сильных штормов. Наличие датчиков давления, работающих совместно с температурными, позволяет определить истинное положение термодатчиков и судить о наклоне буйрепа заякоренной буйковой станции, вызванного сильным течением.

Вертикальные распределения температуры. Основное внимание в настоящей работе уделяется придонному и промежуточному слою. Поэтому целесообразно выбрать такую систему отсчета, в которой ось координат OZ направлена вверх, точка $z = 0$ соответствует дну.

Для анализа была выбрана реализация продолжительностью 9 суток, в течение которых форма вертикального профиля температуры практически не менялась. Средний за указанный период профиль температуры представлен на рис.1. Точками показаны горизонты, на которых измерялась температура. Горизонт, на котором расположен нижний датчик, имеет номер 1, горизонт верхнего датчика имеет номер 21. Максимальные колебания температуры (отклонения от среднего значения) наблюдались на горизонтах, соответствующих середине термокосы (горизонты 8 – 13). Среднеквадратическая величина этих отклонений составляла 1,6 – 1,7 °С. По мере удаления от указанных горизонтов вверх и вниз среднеквадратические отклонения снижались и для верхнего, и для нижнего горизонтов и составляли примерно 1 °С.

Также на рис.1 показано, как градиент температуры меняется с глубиной. Градиент температуры $\Delta T/\Delta z$ рассчитывался по данным измерений на двух соседних горизонтах. Расстояние между датчиками равнялось $\Delta z = 0,95$ м.

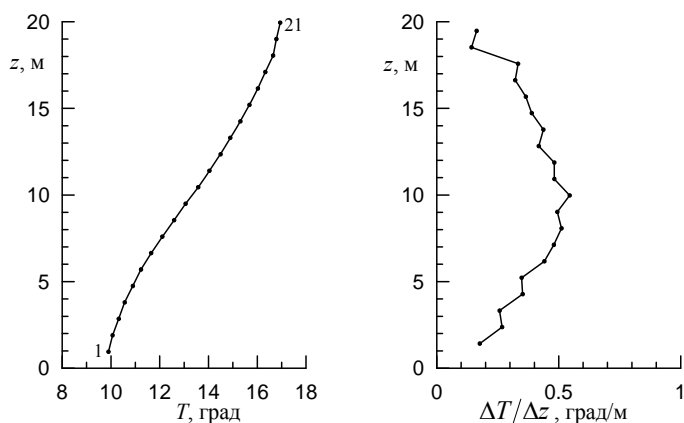


Рис. 1. Вертикальные профили температуры T и градиента температуры $\Delta T/\Delta z$.

Спектры флуктуаций температуры. При анализе случайных процессов широкое распространение получили два способа расчета спектральных характеристик. Первый способ включает расчет корреляционных функций, их сглаживания и вычисление спектров путем преобразования Фурье сглаженных корреляционных функций. Второй способ (метод быстрого преобразования Фурье) заключается в вычислении выборочного спектра и последующей процедуре его сглаживания. Здесь использован первый способ. При оценивании доверительных интервалов спектральных оценок применялись процедуры, описанные в монографии [11].

Для сглаживания корреляционных функций использовалось окно Тьюки

$$w_T(\tau) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left(1 + \cos \frac{\pi\tau}{M} \right) & \text{при } |\tau| \leq M \\ 0 & \text{при } |\tau| > M \end{cases}, \quad (1)$$

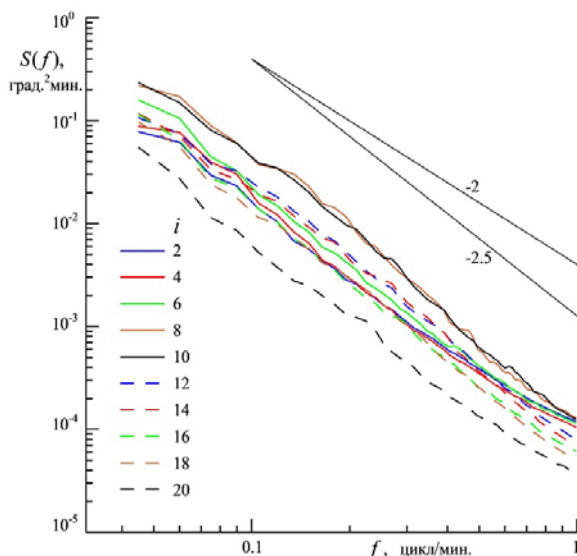
где τ – сдвиг; M – длина корреляционной функции. Для окна Тьюки число степеней свободы определяется соотношением $\nu = 2,667 N_0/M$, в котором N_0 – длина ряда. Приведенные в данной работе оценки авто и кросс-спектральных характеристик получены при $\nu = 1100$.

Частотные спектры температуры, рассчитанные по измерениям на разных горизонтах, представлены на рис.2. Они охватывают диапазон частот, соответствующий временным интервалам от 1 мин до 22 мин. Полученные спектры можно аппроксимировать степенной зависимостью

$$S_i(f) \sim f^{-n}, \quad (2)$$

где i – номер горизонта, f – частота (размерность цикл/мин), n – безразмерный параметр. Значения параметра n лежат в пределах от 2 до 2,5.

Проводя сравнение со спектрами, измеренными в прибрежной зоне, в других регионах Мирового океана, можно отметить, что полученные резуль-



Р и с . 2 . Спектры флуктуаций температуры на i -ом горизонте.

таты достаточно близки. Данные измерений в Японском море показывают, что, как и в нашем случае, спектры на частотах, соответствующих периодам менее одного часа, имеют наклон -2 [10], что согласуется с моделью Гаррета-Манка, построенной для глубокого океана [12].

Кросс-спектры флуктуаций температуры на разных горизонтах. Выше было показано, что наибольший спектральный уровень флуктуаций температуры зарегистрирован датчиками, размещенными в средней части термокосы. Выберем в качестве опорного датчик, расположенный на десятиметровом горизонте. Оценим, как регистрируемые им возмущения поля температуры взаимосвязаны с изменениями температуры на других горизонтах. Для этого построим квадратичную функцию когерентности, являющуюся мерой линейной статистической связи двух случайных величин в частотной области

$$R_{i,j}^2(f) = \frac{Co_{i,j}^2(f) + Q_{i,j}^2(f)}{S_i(\omega) S_j(\omega)}, \quad (3)$$

где $Co_{i,j}^2(a)$ – ко-спектр; $Q_{i,j}^2(f)$ – квадратурный спектр; $S_i(f)$ и $S_j(f)$ – спектры возвышения поверхности, измеренные на горизонтах i и j . В нашем случае $j = 10$.

Квадратичные функции когерентности $R_{i,10}^2(f)$ представлены на рис.3. Видно, что на всех горизонтах зависимость от частоты подобна. Высокая когерентность наблюдается на частотах выше 0,85 цикл/мин. На более низких частотах уровень когерентности с уменьшением частоты снижается. Высокий уровень когерентности ($R^2 > 0,8$) для горизонтов ниже горизонта 10 сохраняется на расстоянии до 8,5 м. Для горизонтов выше горизонта 10 когерентность снижается ниже уровня 0,8 на расстоянии 4 м. Физические механизмы, которые привели к появлению описанной квадратичной функции когерентности, не ясны. Этот вопрос нуждается в дальнейшем исследовании с привлечением данных о вертикальной плотностной структуре и о течениях.

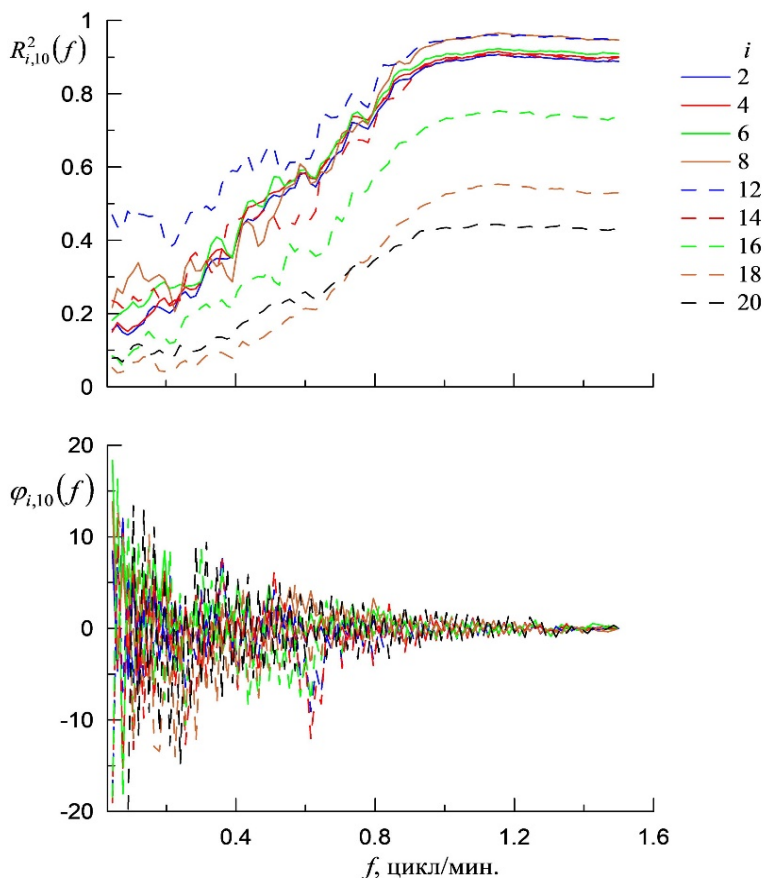
Фазовый спектр можно определить как

$$\varphi_{i,j}(f) = \arctg \left[-\frac{Q_{i,j}}{Co_{i,j}} \right]. \quad (4)$$

Оценки $\varphi_{i,10}(f)$ представлены на рис.3. Видно, что фазовый сдвиг на частотах, где высока когерентность, близок к нулю. В диапазоне от нижнего до верхнего датчика сдвиг фазы не превышает 2° .

Заключение. Проанализирована короткопериодная изменчивость поля температуры в прибрежной зоне Черного моря. Исследования основаны на данных измерений, выполненных с помощью термокосы, установленной на заякоренный буйреп с подповерхностной плавучестью. Измерения выполнены на подспутниковом полигоне Института океанологии РАН. Для анализа использован математический аппарат кросс-спектрального анализа.

Получены частотные спектры флуктуаций температуры в диапазоне от одной до двадцати минут. Спектры аппроксимируются степенной зависимостью с показателем степени, лежащим в пределах от 2 до 2,5.



Р и с . 3 . Квадратичные функции когерентности $R_{i,10}^2(f)$ и фазовый спектр $\varphi_{i,10}(f)$.

Установлено, что флуктуации температуры с периодом порядка минуты, измеренные на разных горизонтах, имеют высокую когерентность в придонном и промежуточном слоях. Сдвиг фазы между флуктуациями температуры на частотах, соответствующих указанному временному масштабу, не превышает 2° .

Исследование проведено при финансовой поддержке РФФИ грант № 17-35-50030\17 мол_нр. Для спектрального анализа использованы методики, разработанные в рамках темы № 0827-2014-0010 ФГБУН МГИ РАН. Полевые исследования выполнялись в рамках темы госзадания № 0149-2018-0013 ИО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зацепин А.Г., Островский А.Г., Кременецкий В.В., Низов С.С., Пиотух В.Б., Соловьев В.А., Швоев Д.А., Цибульский А.Л., Куклев С.Б., Куклева О.Н, Москаленко Л.В., Подымов О.И., Баранов В.И., Кондрашов А.А., Корж А.О., Кубряков А.А., Соловьев Д.М., Станичный С.В. Подспутниковый полигон для изучения гидрофизических процессов в шельфово-склоновой зоне Черного моря // Физика атмосферы и океана.– 2014.– № 1.– С.16-29.

2. Халиулин А.Х., Годин Е.А., Ингеров А.В., Жук Е.В., Галковская Л.К., Исаева Е.А. Банк океанографических данных морского гидрофизического института: информационные ресурсы для поддержки исследований прибрежной зоны черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря.– 2016.– вып.1.– С.89-95.
3. Христофоров Г.Н., Запезалов А.С., Смолов В.Е. Временная изменчивость вертикальной термической структуры в районе Южного берега Крыма // Морской гидрофизический журнал.– 1997.– № 2.– С.14-21.
4. Кречик В.А., Гриценко В.А. Термическая структура прибрежных вод Балтийского моря у северного побережья Калининградской области // Процессы в геосредах.– 2016.– № 5.– С.77-84.
5. Сильвестрова К.П., Мысленков С.А., Зацепин А.Г., Краюшкин Е.В., Баранов В.И., Самсонов Т.Е., Куклев С.Б. Возможности использования GPS-дрифтеров для исследования течений на шельфе Черного моря // Океанология.– 2016.– т.56, № 1.– С.159-166.
6. Сильвестрова К.П., Зацепин А.Г., Мысленков С.А. Прибрежные апвеллинги в Геленджикском районе Черного моря: связь с ветровым воздействием и течением // Океанология.– 2017.– т.57, № 4.– С.1-10.
7. Христофоров Г.Н., Запезалов А.С. Развитие летнего апвеллинга вблизи Южного берега Крыма // Метеорология и гидрология.– 1997.– № 7.– С.64-71.
8. Очередник В.В., Баранов В.И., Зацепин А.Г., Куклев С.Б. Термокосы ЮО ИО РАН: конструкция, методика и результаты метрологического исследования датчиков // Океанология.– 2018.– т.58, № 1. (в печати)
9. Кацнельсон Б.Г., Петников В.Г. Акустика мелкого моря.– М.: Наука, 1997.– 191 с.
10. Яроцук И.О., Леонтьев А.П., Кошелева А.В., Самченко А.Н., Пивоваров А.А., Храпченков Ф.Ф., Швырев А.Н., Яроцук Е.И. Экспериментальные исследования внутренних волн в прибрежной зоне Японского моря // Подводные исследования и робототехника.– 2013.– № 1(15).– С.37-44.
11. Дженкинс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложения: Пер. с англ.– М.: Мир, 1972.– т.2.– 287 с.
12. Garrett C., Munk W.H. Space-time scales of internal waves: A progressive report // J. Geophys. Res.– 1975.– v.80, № 3.– P.291-298.

Материал поступил в редакцию 02.02.2018 г.
После доработки 01.03.2018 г.

Ocherednik V.V., Zapevalov A.S.

INVESTIGATION OF THE SHORT-PERIOD VARIABILITY OF THE TEMPERATURE FIELD ON THE BLACK SEA HYDROPHYSICAL TRAINING GROUND OF THE INSTITUTE OF OCEANOLOGY RAS

Short-period variability of the temperature field in the near-bottom and intermediate layers of the Black Sea coastal zone has been studied. The analysis was done by means of the full-scale measurements that were made with the aid of the thermochain, which had been installed at the Black Sea hydrophysical training ground of the IO RAS. We have used cross-spectral analysis of temperature fluctuations at different horizons. The research has shown that temperature fluctuations with a period about a minute have high coherence in the bottom and intermediate layers. The phase shift between the temperature fluctuations at frequencies corresponding to the indicated time scale does not exceed 2°.

KEYWORDS: temperature field, coastal zone, thermochain, cross-spectral analysis