

В. А. Блинков

*Морской гидрофизический институт НАН Украины, г. Севастополь***РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ
ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ВЕРХНЕГО СЛОЯ ЧЕРНОГО МОРЯ
В МЕЗОМАСШТАБНОМ ДИАПАЗОНЕ**

Приведены результаты измерений пространственной изменчивости температурного поля верхнего слоя Черного моря в диапазоне масштабов от десятков метров до нескольких десятков км. Определены одномерные пространственные спектры температурных неоднородностей при начале осеннего выхолаживания верхнего слоя и при интенсивной зимней конвекции. Уровень спектров уменьшается с ростом волнового числа с разными наклонами, что свидетельствует о различных режимах турбулентного движения, ответственных за формирование температурного поля в верхнем квазиоднородном слое.

Крупномасштабные свойства гидрологической структуры вод Черного моря и циркуляции водных масс описаны достаточно хорошо [1]. Менее изучены динамика локальной мезомасштабной циркуляции и детальная структура, механизмы генерации и диссипации индивидуальных фронтальных явлений [2].

Современный уровень знаний о мезомасштабной пространственной изменчивости в Черном море, в основном, базируется на временных измерениях. Сведения о пространственной структуре по данным натурных измерений весьма немногочисленны и, в основном, представлены результатами спутниковых наблюдений.

Спутниковые наблюдения свидетельствуют о наличии многочисленных струй, филаментов, различных динамических структур типа дипольных и мультипольных образований на разной стадии развития [3], меандрировании Основного черноморского течения (ОЧТ) с образованием мезомасштабных вихрей обоого знака в разных районах Черного моря [4]. Оценка вертикальных и горизонтальных скоростей в этих структурах свидетельствуют о важной роли, которую могут играть мезомасштабные процессы в обмене веществом и энергией между шельфом и глубоким морем [5].

Для изучения особенностей формирования пространственной структуры температурного поля в ВКС, были использованы данные измерений буксируемым комплексом «Галс-2» в зимний сезон (январь 1982 г.) над свалом глубин северо-западной части Черного моря, а также измерения температуры и солёности в Каламитском заливе в октябре 1997 г. буксируемым комплексом «Галс-3» (МГИ 9201).

Буксировки над свалом глубин северо-западной части были выполнены на полигоне 60 × 60 миль при движении буксируемого носителя на постоянной, задаваемой оператором, глубине примерно равной ~ 8 м. Измерения проведены на 10-ти галсах протяженностью от 45 до 125 км, ориентированных как вдоль свала глубин (3 галса), так и поперек склона (7 галсов). Сред-

© В. А. Блинков, 2005

ная скорость движения судна составляла $\sim 4,5$ м/с, что обеспечило дискретность измерений от 2,88 м.

На «Галсе-2» чувствительность канала температуры составила $\pm 3 \cdot 10^{-3}$ °С при точности измерений $2,5 \cdot 10^{-2}$ °С, чувствительность измерительного канала глубины была равна $\pm 0,1$ м, при суммарной погрешности измерений $\pm 0,25$ м. Постоянная времени датчика температуры 0,18 с, период опроса датчиков 0,64 с.

Необходимо отметить, что сочетание высокой дискретности измерений на достаточно протяженных галсах позволяет исследовать наряду с мезомасштабными особенностями исследуемого поля пространственные распределения мелкомасштабных флуктуаций температуры.

Мелкомасштабная структура температурного поля анализировалась по данным рассчитанных дисперсий температурных градиентов, осредненных по однокilометровым блокам. Температурные градиенты были определены как первые разности соответствующих температурных рядов, предварительно пропущенных через медианный фильтр 3-го порядка для устранения единичных выбросов.

Полигон в Каламитском заливе был выполнен в течение суток, измерения проводились на 10-ти галсах. Протяженность галсов была 20 – 35 км. Измерения выполнялись как в режиме сканирования носителя в диапазоне глубин от поверхности до 40 – 60 м, так и на одном горизонте при $z \sim 5$ – 8 м. Дискретность измерений при движении носителя на постоянной глубине составляла $\Delta x = 0,118$ – 0,177 м. Характеристика измерительных каналов буксируемого комплекса «Галс-3» (МГИ 9201) приведена в [6].

Карта температурного поля над свалом глубин северо-западной части Черного моря, построенная по данным измерений (рис.1), позволяет выделить

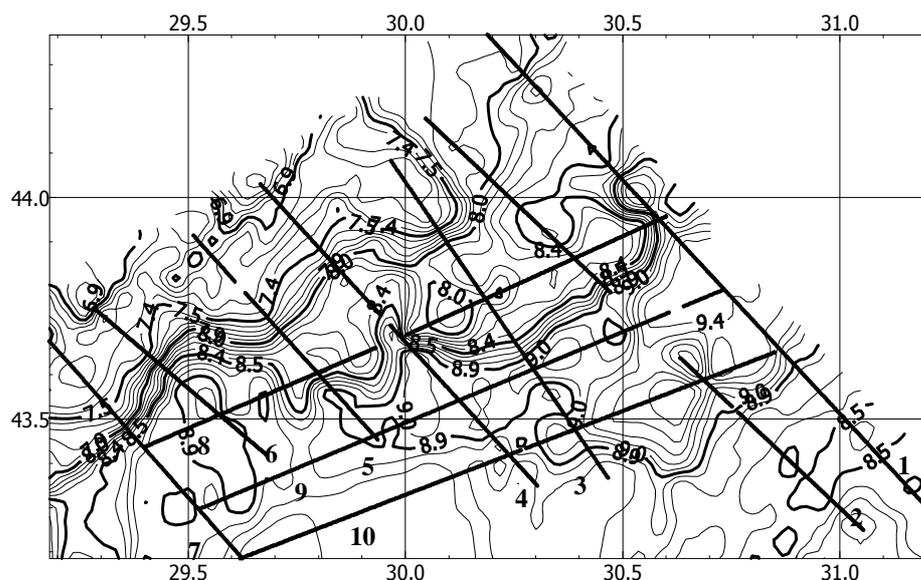


Рис. 1. Распределение температуры в верхнем квазиоднородном слое над свалом глубин в северо-западной части Черного моря, полученное по данным буксировок «Галса-2».

Т а б л и ц а 1. Горизонтальные градиенты температуры в приповерхностном слое по данным измерений на галсах, пересекающих континентальный склон.

№ галса	ΔT , °С	Δl , км	$\Delta T/\Delta l$, °С/км	L , км	$\Delta T_{\phi}/\Delta L_{\phi}$	K
1	0,3	0,09	3,13	30,5	0,03	104
2	0,53	0,270	1,96	26,3	0,03	65
3	0,5	0,42	1,19	25,2	0,03	39,7
4	0,72	3,12	0,2	17,6	0,03	7
5	0,4	0,9	0,44	8,22	0,05	9
6	0,49	2,1	0,23	2,2	0,08	3
7	0,38	0,06	6,29	0,275	0,08	79

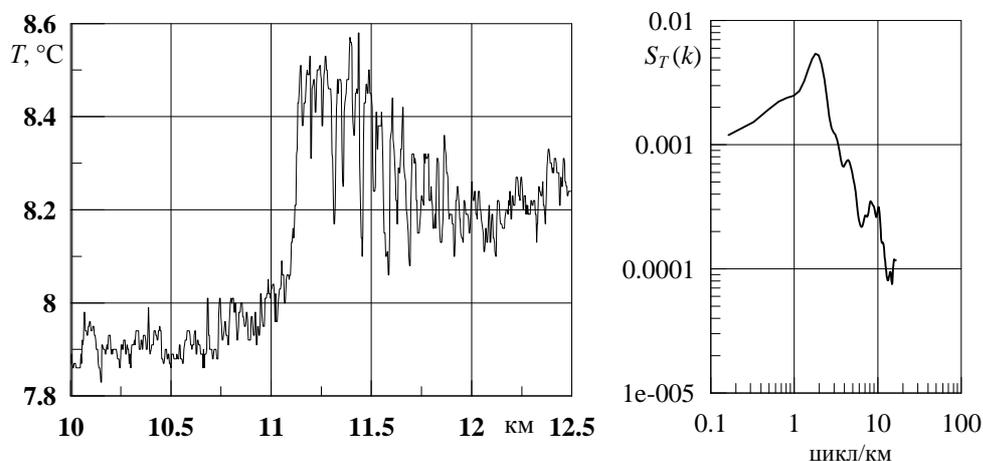
полосу относительно теплых вод с температурой 9,0 – 9,5 °С, распространяющуюся над свалом глубин и разделяющую холодную воду шельфа ($T_{ш} < 7$ °С) от вод глубоководной части моря ($T \sim 8,2 - 8,5$ °С).

Область смешения вод с различными параметрами образует фронтальную зону с хорошо выраженными двумя фронтальными разделами, располагающимися вдоль изобат и пересекающих полигон с северо-востока на юго-запад. Пространственная структура поля сохраняла свои характерные особенности в течение всего времени наблюдений (около 4-х суток), что было установлено при повторении измерений на галсе 1 (рис.1).

Основные характеристики фронтальной температурной зоны приведены в табл.1, где рассчитаны: перепад температуры через локальный фронт ΔT (°С); ширина этих фронтов Δl – расстояние, на котором наблюдаются скачкообразные изменения температуры; средние значения горизонтальных градиентов на этих фронтах $\Delta T/\Delta l$; ширина фронтальной зоны – расстояние между фронтами на одном разрезе; средние значения температурных градиентов фронтальной зоны по данным каждого разреза $\Delta T_{\phi}/\Delta L_{\phi}$, а также отношение горизонтальных градиентов на локальных фронтах к среднему градиенту фронтальной зоны K .

Максимальные значения горизонтальных градиентов на локальных фронтах более чем в 10^2 раз превышают средний градиент температурного поля исследуемого района. Расстояние между фронтами изменяется от 30,5 км на северо-востоке полигона до 60 м на юго-западе, фактически в юго-западной части два фронтальных раздела сливаются в единый фронт.

Области с наиболее высоким уровнем дисперсий мелкомасштабных флуктуаций температуры наблюдаются на участках, примыкающих непосредственно к прифронтальным зонам. Характер изменения на этих участках показывает, что увеличение дисперсий вызвано квазигармоническими колебаниями температуры с длиной волны около 0,5 км и амплитудой до 0,25 °С. На рис.2 показан фрагмент изменения температуры на галсе 1 и спектр по волновым числам для этого участка. После пересечения фронтального раздела с $\Delta T = 0,55$ °С и $\Delta L = 60$ м наблюдаются интенсивные колебания температуры на участке длиной несколько км. По-видимому, такие флуктуации могут быть вызваны внутренними волнами или вихрями с горизонтальными осями, которые генерируются на наклонном приповерхност-



Р и с . 2 . Фрагмент изменений температуры на прифронтальном участке галса 1 и спектр для отрезка с максимальным уровнем флуктуаций.

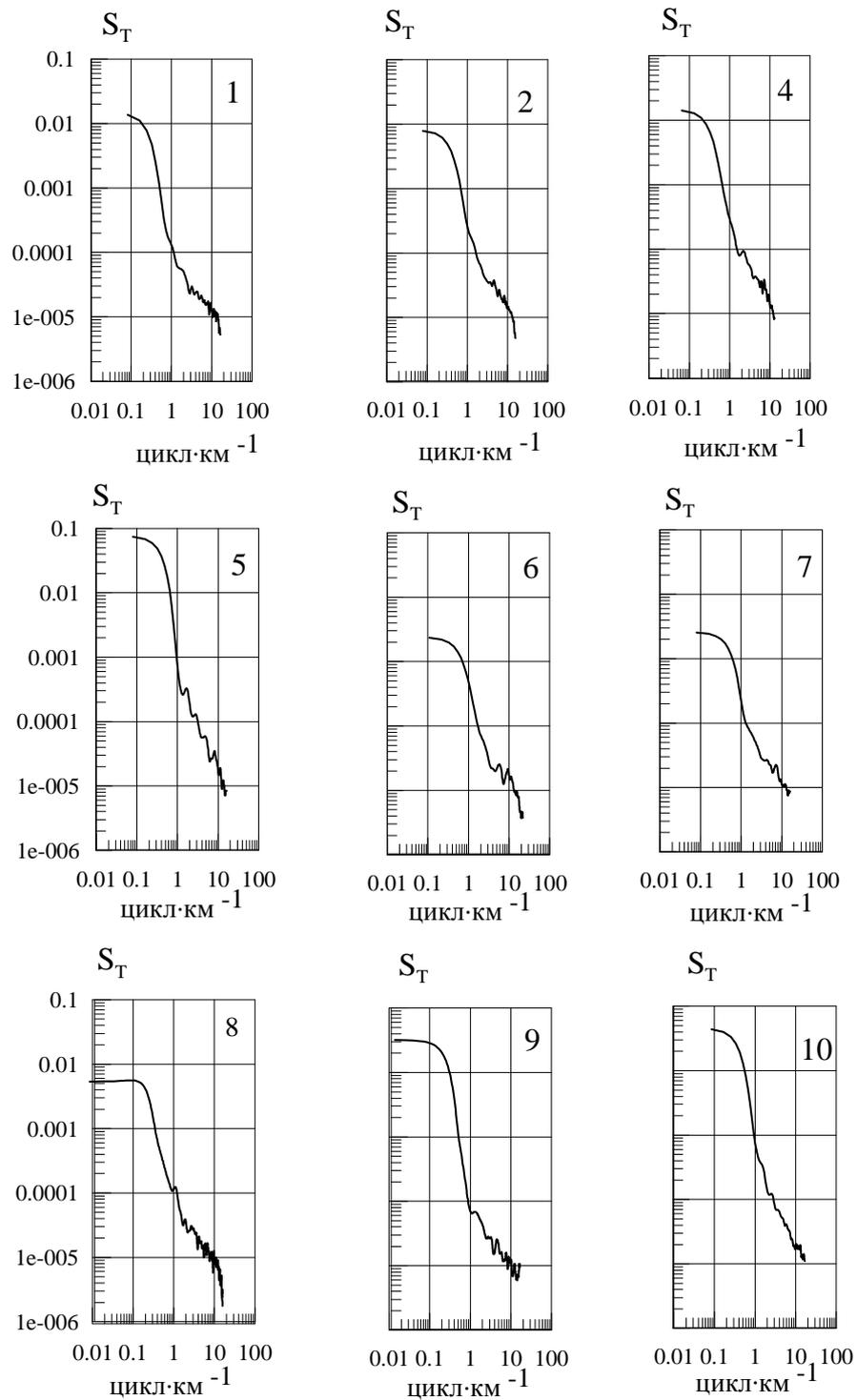
ном пикноклине при контакте вод с различной плотностью. По данным вертикальных зондирований буксируемым комплексом были отмечены случаи инверсионного переслаивания воды в ВКС, образующиеся при натекании более легкой и холодной шельфовой воды на более плотную и теплую воду ОЧТ. Вертикальный градиент температуры в таких областях, по данным измерений, был более $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{м}$.

Для анализа пространственного распределения мелкомасштабных флуктуаций температуры были получены ряды дисперсий горизонтальных градиентов для отрезков длиной в 1 км, которые в дальнейшем были сглажены скользящим осреднением. Общая продолжительность ряда наблюдений по времени равна 63 ч. Из этого ряда был удален низкочастотный тренд и после этого рассчитан временной спектр (рис.3), на котором выделяется значимый пик на периоде 12,6 ч. Было также определено, что уровень дисперсий в течение одного полупериода изменяется, в среднем по полигону, в 1,4 раза.

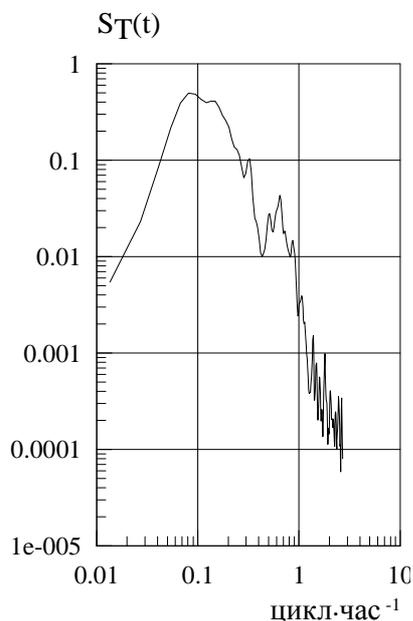
Для изучения статистических свойств температурного поля и для изучения механизмов формирования пространственного спектра в мезомасштабном диапазоне были определены одномерные спектры для всех галсов, оценивающие изменчивость в диапазоне от 0,06 до 20 км.

Для расчета спектров использовалась стандартная процедура получения выборочных оценок с использованием спектрального окна Парзена. Выбор окна был обусловлен более широкой полосой частот, охватываемых этим окном и, следовательно, более гладкими спектральными оценками, что повышает достоверность оценки наклонов спектральных функций.

Предварительная обработка рядов заключалась в сглаживании ряда фильтром низкой частоты с окном $10\Delta x$ и дальнейшим прореживанием ряда с $\Delta x_1 = 10\Delta x$. После этого, ряд разбивался на отрезки с границами, определяемыми положением резких изменений температуры на локальных фронтах. Участки резких, скачкообразных изменений температуры исключались из анализа. Из полученных отрезков удалялся тренд, затем они объединялись в один ряд, по которому рассчитывались спектры. Полученные таким образом одномерные спектры показаны на рис.4. Видно, что спектральные функции по-

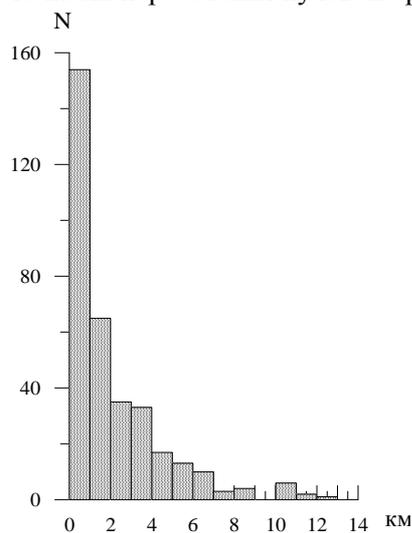


Р и с. 3. Одномерные пространственные спектры приповерхностной температуры на шале глубин северо-западной части Черного моря. Цифры на графиках – номера галсов.



Р и с . 4 . Спектр ряда осредненных дисперсий горизонтальных градиентов температуры.

Для более полной статистики изменчивости температурного поля была определена функция распределения по размерам температурных неоднородностей поля. Размеры неоднородностей определялись по расстояниям между точками пересечения нулевой ординаты для рядов температурных измерений



Р и с . 5 . Гистограмма распределения неоднородностей температуры по размерам, полученная по данным всех разрезов на полигоне.

добны между собой, монотонно спадают с ростом волнового числа и могут быть описаны в виде k^p , где k – волновое число, p – показатель степени. Однако, в данном случае, из-за характерного изменения наклонов спектральных плотностей, спектры целесообразно представить в виде:

$$S_T(k) = A_1 k^{p_1} + A_2 k^{p_2}$$

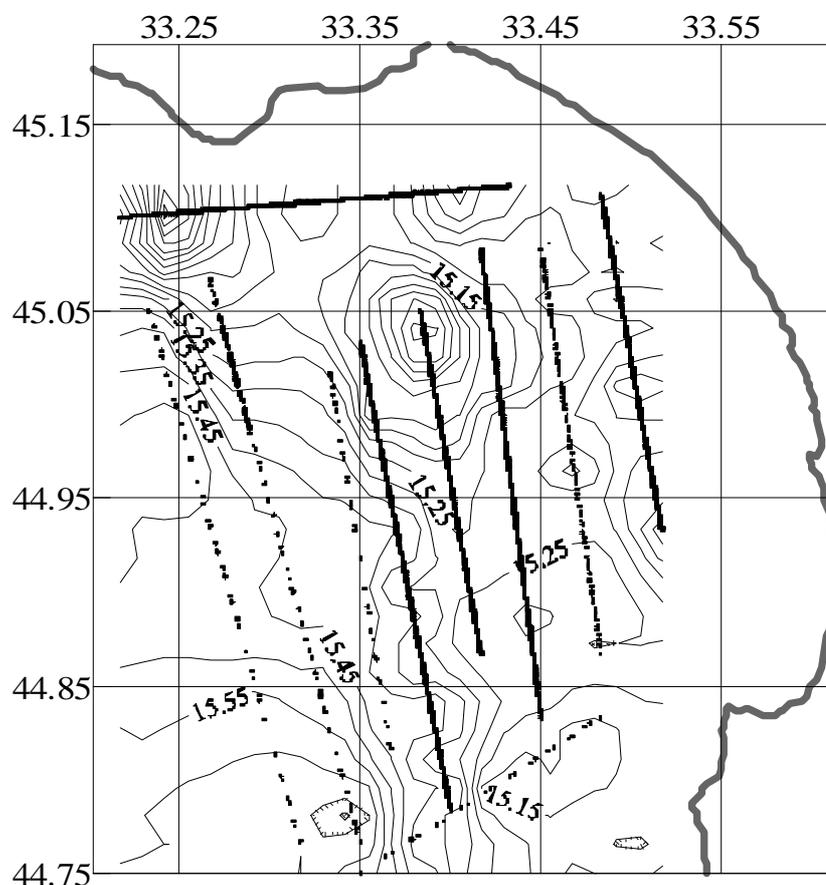
и определить p_i для разных диапазонов.

Было установлено, что спектры изменяют наклон на масштабе неоднородностей, изменяющегося от 0,3 до 1,0 км со средним значением $0,58 \pm 0,15$ км. Наклоны спектров, найденные методом наименьших квадратов, оказались равными $p_1 = -2,77 \pm 0,3$ и $p_2 = -0,96 \pm 0,15$ при 95 % доверительном интервале.

Были оценены средние масштабы температурных неоднородностей, которые для ориентированных поперек изобат галсов равны 9,8 км, а для параллельных кромке шельфа галсов 15,6 км.

После исключения низкочастотной составляющей. Функция распределения достаточно хорошо аппроксимируется экспоненциальным законом (рис.5).

Полученные данные указывают на непрерывный перенос изменчивости в температурном поле в верхнем однородном слое от крупномасштабных процессов, создающих неоднородности ~ 100 км (ОЧТ) к более мелким масштабам при активной конвекции и ветро-волновом перемешивании. Наклоны спектров со значениями, близкими к «-3», указывают на проявление квазигеострофической турбулентности для неоднородностей более 500 м. Для масштабов менее 500 м наклоны спектров, близкие к «-1», свидетельствуют, вероятно, о переносе температурных неоднородностей как динамически пассивных субстанций в турбулентном поле.



Р и с . 6 . Распределение температуры в приповерхностном слое в Каламитском заливе.

На самом мелкомасштабном участке спектра, в этом случае, наклон должен соответствовать наклону спектра изотропной турбулентности, который в наших измерениях, по-видимому, маскируется шумами квантования измерительного канала температуры.

Измерения на полигоне в Каламитском заливе были выполнены при устойчивом ветре северного направления силой 12 – 14 м/с и волнении 3,5 – 4,0 балла. Температурное поле в верхнем квазиоднородном слое показано на рис.6. Для расчета спектров были выбраны данные измерений на трех галсах, где буксируемый носитель перемещался на постоянном горизонте в верхнем перемешанном слое.

Температура в ВПС в заливе изменялась в диапазоне от 14,7 до 15,3 °С, соленость от 17,5 до 17,61 ‰. Изменения солености в ВПС весьма малы, среднеквадратический разброс составляет $\pm 0,037$ ‰. Максимальные изменения T и S наблюдаются в районах апвеллинга в северной части залива [7]. Ширина полосы апвеллинга ~8 км, его протяженность в пределах полигона ~20 км. В области апвеллинга формируются острые поверхностные температурные фронты при незначительных изменениях солености (~0,025 ‰).

В целом, поле температуры характеризуется увеличением температуры приповерхностного слоя на полигоне с севера на юг со средним меридиональным градиентом $3,3 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}/\text{км}$.

Пространственная структура температуры в ВКС неоднородна, средние значения амплитуд неоднородностей $\sim 0,075 \text{ } ^\circ\text{C}$ (рис.6). Средний по полигону масштаб температурных неоднородностей равен 5,5 км. По данным вертикальных зондирований было найдено среднее значение частоты Вайсяля $N^2(z) = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ и определен внутренний радиус Россби для этого района $R_{\text{вн}} = 5,1 \text{ км}$.

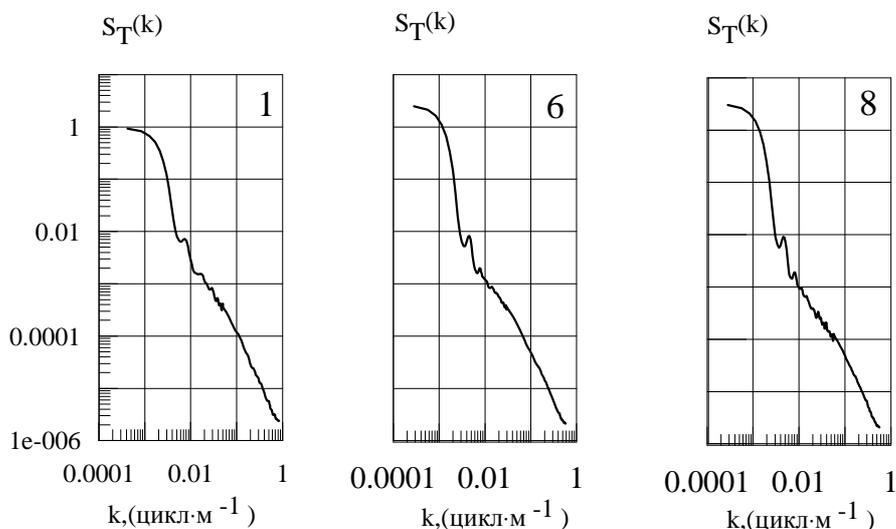
Данные измерений на галсах при перемещении буксируемого носителя на постоянном горизонте были использованы для расчета спектральных оценок температуры и солености в диапазоне волновых чисел $10^{-3} - 0,2 \text{ цикл/км}$ (рис.7). Полученные спектры температуры для 3-х разрезов подобны друг другу и имеют следующие особенности. В диапазоне волновых чисел от 1 до 10^{-2} цикл/м спектр спадает с наклоном $-5/3$, а для волновых чисел более 10^{-2} цикл/м наклон близок к -3 .

Выполненные наблюдения изменчивости температурного поля в верхнем слое Черного моря позволили определить пространственно-временные характеристики фронтальной зоны над свалом глубин северо-западной части черноморского бассейна.

На стороне ОЧТ с антициклоническим сдвигом наблюдается понижение температуры и формирование достаточно интенсивных локальных температурных фронтов и фронтальных вихрей размером около 10 км.

В Каламитском заливе температурные неоднородности в верхнем слое имеют средний масштаб 5,5 км. Основным источником изменчивости гидрофизических полей в заливе, по-видимому, может быть ветровой апвеллинг, наблюдающийся при северном ветре.

Пространственный спектр монотонно спадает с ростом волнового числа и изменяет наклон на различных участках диапазона, свидетельствуя о различных режимах турбулентного движения в верхнем слое моря.



Р и с . 7 . Одномерные пространственные спектры температуры в Каламитском заливе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Блатов А.С. и др.* Изменчивость гидрофизических полей Черного моря.– Л.: Гидрометеиздат, 1984.– 239 с.
2. *Oguz T., La Violette P.E., Unluatta U.* The upper layer circulation of the Black Sea: Its variability as inferred from hydrographic and satellite observations // *J. Geophys. Res.*– 1992.– 97.– P.12569-12584.
3. *Гинзбург А.И.* Нестационарные диполи и мультиполи как закономерность эволюции изолированного вихря (спутниковая информация) // *ИЗК.*– 1991.– 2.– С.75-83.
4. *Титов В.Б.* О роли вихрей в формировании режима течений на шельфе Черного моря // *Океанология.*– 1992.– 1.– С.39-48.
5. *Блинков В.А., Дулов В.А., Станичный С.В.* Грибовидные течения под свалом глубин северо-западной части Черного моря: дистанционные и контактные измерения // *Системы контроля окружающей среды.*– Севастополь, 2002.– С.406-412.
6. *Блинков В.А.* Оценка возможностей гидрофизического буксируемого комплекса «Галс-3» // *Морской гидрофизический журнал.*– 1998.– 2.– С.73-80.
7. *Карнаушенко Н.Н., Блинков В.А., Лобачев В.Н., Тютюнов А.П.* Буксируемый, сканирующий по глубине комплекс МГИ 9201М и его использование для высококоразрешающей съемки заливов черноморского побережья Украины // *Системы контроля окружающей среды.*– Севастополь, 1998.– С.28-46.

Материал поступил в редакцию 2.03.2005 г.
После доработки 16.05.2005 г.