

Анализ результатов наблюдений и методы расчета гидрофизических полей океана

УДК 551.46.08

А.П. Толстошеев, Е.Г. Лунев, С.В. Мотыжев

Анализ результатов натуральных экспериментов с термопрофилирующими дрейфующими буями в Черном море и других районах Мирового океана

В статье рассмотрены результаты десятилетнего применения термопрофилирующих дрейфтеров в качестве сегмента глобальной системы наблюдений Мирового океана. Представлены принципы построения и особенности применения термодрейфтеров. Приведены сведения о дрейфтерных экспериментах в Черном море и других регионах Мирового океана, рассмотрены методы обработки данных мониторинга. Результаты экспериментов позволили получить статистически значимые корреляционные и спектральные оценки флуктуаций полей температуры верхнего слоя моря и их связей с флуктуациями циркуляции поверхностных вод в синоптическом и мезомасштабном диапазоне пространственно-временной изменчивости.

Ключевые слова: термическая структура, термопрофилирующий дрейфтер, инерционные движения.

Удачное сочетание потенциально широких возможностей дрейфтерной технологии с ее экономической эффективностью определило задачу создания различных специализированных дрейфующих платформ. Решение этой задачи в последнее десятилетие тесно связано с инновационной деятельностью Морского гидрофизического института (МГИ) НАН Украины по дальнейшему развитию дрейфтерной технологии. Одним из наиболее значимых результатов этой деятельности следует считать создание термопрофилирующего дрейфующего буя (термодрейфтера), ориентированного на получение систематической оперативной информации об изменчивости температуры верхнего слоя Мирового океана.

В статье рассматриваются результаты разработки, особенности применения термодрейфтеров, методы обработки данных, приведены сведения о дрейфтерных экспериментах в Черном море и других регионах Мирового океана.

Общие сведения о термопрофилирующих дрейфующих буях. Первая модификация термодрейфтера *SVP-BTC60* с термолинией до глубины около 60 м и терминалом спутниковой системы сбора данных и определения координат платформ *Argos-2* (далее – *Argos-2*) была разработана в МГИ в 2004 г. по проекту УНТЦ № 2241. Характеристики *SVP-BTC60* и некоторые результаты долговременного натурального эксперимента, выполненного в Черном море с опытными образцами этой модификации термодрейфтера, рас-

© А.П. Толстошеев, Е.Г. Лунев, С.В. Мотыжев, 2014

смотрены в статьях [1 – 3]. В ходе эксперимента были получены уникальные систематические данные об изменчивости температуры в верхнем слое моря в широком диапазоне пространственно-временных масштабов поверхностных течений, что определило интерес к термодрифтерам со стороны исследователей разных стран. К 2009 г. была разработана новая модификация *SVP-BTC80RTC/GPS* с термолинией до глубины около 80 м, терминалом спутниковой системы *Iridium* и приемником системы глобального позиционирования *GPS*. В алгоритм работы дрифтера были внесены изменения, позволившие, во-первых, синхронизировать измерения во времени; во-вторых, оценивать поправки на отклонения термолинии от вертикали и передавать данные о температуре каждого датчика совместно с данными о глубине его положения во время измерения. Структура построения и внешний вид термодрифтера *SVP-BTC80RTC/GPS* показаны на рис. 1, а в табл. 1 – его основные показатели назначения.



Р и с. 1. Структура (слева) и внешний вид (справа) термодрифтера *SVP-BTC80RTC/GPS*

Т а б л и ц а 1

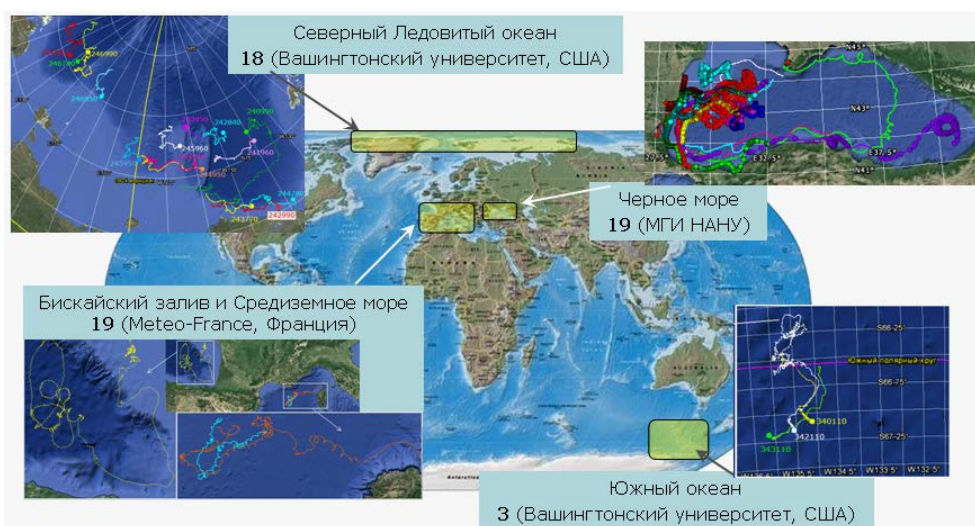
Основные показатели назначения термодрифтера *SVP-BTC80RTC/GPS* с терминалом спутниковой системы связи *Iridium*

Атмосферное давление, гПа		Температура воды, °С		Номинальные горизонты измерения температуры верхнего слоя моря, м	Погрешность измерения координат, м	
$ \Delta $	μ	$ \Delta $	μ		по приемнику <i>GPS</i>	по доплеровскому методу системы <i>Iridium</i>
$\leq 1,0$	0,1	$\leq 0,1$	0,04	0,2; 10; 12,5; 15; 20; 25; 30; 35; 40; 45; 50; 55; 60; 65; 70; 75; 80	≤ 100	по долготе: ≤ 10000 ; по широте: ≤ 1000

П р и м е ч а н и е : $|\Delta|$ – погрешность измерения; μ – цена единицы младшего разряда выходного кода.

В последующем термодрифтеры именно этой модификации наиболее широко использовались в многочисленных международных и национальных экспериментах, результаты которых рассмотрены в статье [4].

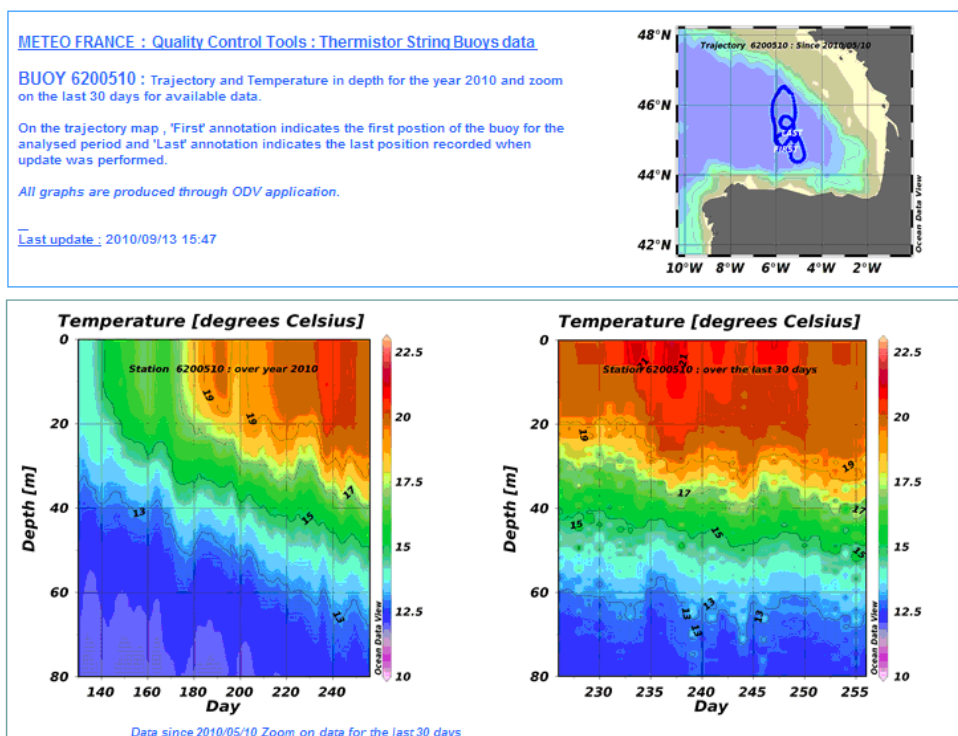
Анализ результатов натуральных экспериментов. В период с 2004 по 2014 гг. в различных регионах Мирового океана было развернуто более 60 термодрифтеров различных модификаций. На рис. 2 показаны регионы наиболее интенсивного использования термодрифтеров: Черное море (19 дрифтеров по программам МГИ, Украина), Бискайский залив и Средиземное море (19 – по программам *Meteo-France*, Франция), Северный Ледовитый и Южный океаны (18 и 3 соответственно – по программам Вашингтонского университета, США). В Северном Ледовитом океане использовались специализированные термодрифтеры, которые устанавливаются на ледовых образованиях и ориентированы на исследование термодинамики подледного верхнего слоя океана. На рисунке изображены также траектории дрейфов термодрифтеров. Следует заметить, что, поскольку для ряда дрифтеров пользователи частично или полностью ограничивают доступ к информации, на рисунке представлены траектории только тех буев, данные с которых поступали нам в полном объеме.



Р и с. 2. Регионы Мирового океана наиболее интенсивного применения термодрифтеров и траектории их дрейфов

К настоящему времени технология исследования океана с помощью термодрифтеров стала неотъемлемым компонентом современной системы оперативных наблюдений океана. Подтверждением этого является тот факт, что начиная с 2010 г. оперативный доступ к данным мониторинга стал возможен на интернет-сайте http://www.meteo2.shom.fr/qctools/svp_odv контроля качества дрейфтерных данных *Meteo-France*. На рис. 3 показан пример представления на сайте данных термодрифтера № 6200510, развернутого в Бискайском заливе.

THERMISTOR STRING BUOYS DATA



Р и с. 3. Представление данных термодрифтера *SVP-BTC80RTC/GPS* № 6200510 на сайте контроля качества дрейферных данных *Meteo-France*

Ниже более подробно рассмотрены результаты термодрифтерного мониторинга Черного моря.

Некоторые результаты черноморских экспериментов с термодрифтерами в 2004 – 2014 гг. В черноморских экспериментах последнего десятилетия преследовались две основных цели: оценивание степени эффективности разработанных средств термодрифтерной технологии и исследование термической структуры верхнего слоя моря в широком диапазоне пространственно-временных масштабов движений поверхностных вод. Основные статистические сведения об экспериментах приведены в табл. 2. В таблице и далее в тексте под термином «локализация» понимается определение координат дрейфтера.

На рис. 4 показана общая карта траекторий термодрифтеров, развернутых в Черном море. Об эффективности применения термодрифтеров можно судить по указанному в таблице времени продуктивной работы – времени функционирования термодрифтера в полном объеме на глубинах не менее номинальной длины термолитии. По данным черноморских экспериментов по этому параметру все дрейфтеры можно разделить на три приблизительно

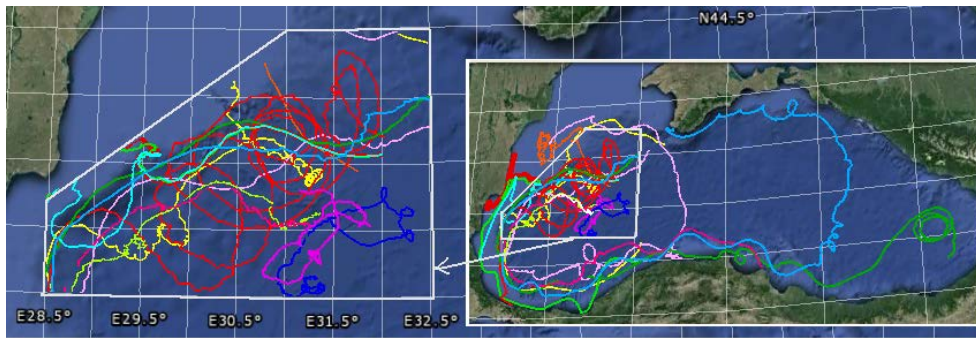
равные по количеству группы с временами жизни менее 1, от 1 до 3 и свыше 3 мес. Нарушение работоспособности в течение первого месяца в большинстве случаев объясняется выходом термодрифтеров в районы малых глубин шельфовой зоны.

Т а б л и ц а 2

Общие сведения о применении термопрофилирующих дрейфующих буев в черноморских экспериментах 2004 – 2014 гг.

№ п/п	Идентификационный номер буя	Модификация буя	Дата		Продолжительность продуктивной работы, сут	Средний период локализаций, ч
			развертывания	окончания продуктивной работы		
1	49169			21.12.04	120	
2	49170		23.08.04	18.09.04	25	
3	49171	SVP-BTC60 (Argos-2)		02.12.04	97	3,0
4	49172		27.08.04	12.10.04	46	
5	34859		04.04.05	31.07.05	118	
6	34860		05.04.05	29.09.05	177	2,0
7	56092	SVP-BTC80 (Argos-2)		14.09.06	73	
8	56093		03.07.06	27.09.06	86	2,0
9	33136	SVP-BTC80/GPS (Argos-2)		22.09.07	7	по GPS: 4,7 по Argos: 5,6
10	33137		15.09.07	09.10.07	23	по GPS: 2,6 по Argos: 5,5
11	IMEI 630380/ WMO 61690			16.08.09	13	
12	IMEI 630410/ WMO 61691		03.08.09	18.08.09	15	по GPS: 0,5
13	IMEI 638390/ WMO 61689			03.09.09	30	
14	IMEI 248940/ WMO 61689	SVP-BTC80/RTC/ GPS(Iridium)		30.06.13	198	
15	IMEI 249940/ WMO 61690		14.12.12	04.04.13	112	по GPS:1,1
16	IMEI 249940*		19.09.13	22.01.14	125	1,9
17	IMEI 247960/ WMO 61687			27.12.13	36	1,4
18	IMEI 248970/ WMO 61688		20.11.13	20.12.13	30	1,1
19	IMEI 248990/ WMO 61690			24.05.14	185	1,3

П р и м е ч а н и е : * – звездочкой обозначен номер дрейфтера, развернутого повторно.



Р и с. 4. Общая карта дрейфов термодрифтеров по данным черноморских экспериментов 2004 – 2014 гг. (справа) и траектории термодрифтеров в границах полигона в западной части Черного моря (слева)

Следует отметить особенности организации экспериментов, связанные с объективными возможностями развертывания термодрифтеров, ориентированных главным образом на исследование термической структуры верхнего слоя глубоководной части моря. Исходя из представлений об общей схеме циркуляции поверхностных вод в Черном море и сезонной изменчивости их термической структуры, наиболее интересными для исследования являются: зона континентального склона, в которой локализовано Основное Черноморское течение (ОЧТ); крупномасштабные циклонические круговороты в восточной и западной частях моря; квазистационарные антициклонические вихри (Севастопольский, Батумский и др.). Очевидно, что доставить термодрифтеры в указанные регионы возможно только путем целевых судовых экспедиций, организовать которые в настоящее время весьма сложно по известным причинам. В какой-то степени выходом из сложившейся ситуации стало использование попутных коммерческих судов. Поэтому большинство термодрифтеров было развернуто вдоль маршрута Севастополь – Стамбул, а наиболее представительные данные за весь период проведения черноморских экспериментов получены для района в западной части континентального склона, границы которого показаны на рис. 4. В этом контексте становится очевидной эффективность использования термодрифтеров в современных условиях. Относительная устойчивость крупномасштабной циркуляции поверхностных вод Черного моря, с одной стороны, и свойства термодрифттера как квазилагранжевого долговременного автономного средства контактного мониторинга, с другой, позволяют прогнозировать «доставку» дрейфтеров в различные районы Черного моря естественным путем. Таким образом удалось, например, осуществить долговременные наблюдения за Батумским антициклоном дрейфтерами, развернутыми вдоль трассы Севастополь – Стамбул. При планировании экспериментов повысить эффективность целевых термодрифтерных исследований позволяет привлечение данных, получаемых дистанционными методами.

Некоторые результаты анализа сезонной изменчивости вертикального распределения температуры по термодрифтерным данным. Рассматриваемые ниже результаты многолетних термодрифтерных эксперимен-

тов могут быть условно отнесены к двум блокам. Первый содержит анализ сезонной изменчивости вертикального распределения температуры по термодрифтерным данным, полученным в границах полигона, показанного на рис. 4; второй – анализ результатов термопрофилирования, полученных в условиях циркуляции поверхностных вод в синоптическом и мезомасштабном интервалах изменчивости. Наибольшая сезонная изменчивость температуры Черного моря, как показано, например, в работах [5 – 7], наблюдается на глубинах от 0 до 75 м, т. е. в слое, на исследование которого ориентированы термодрифтеры.

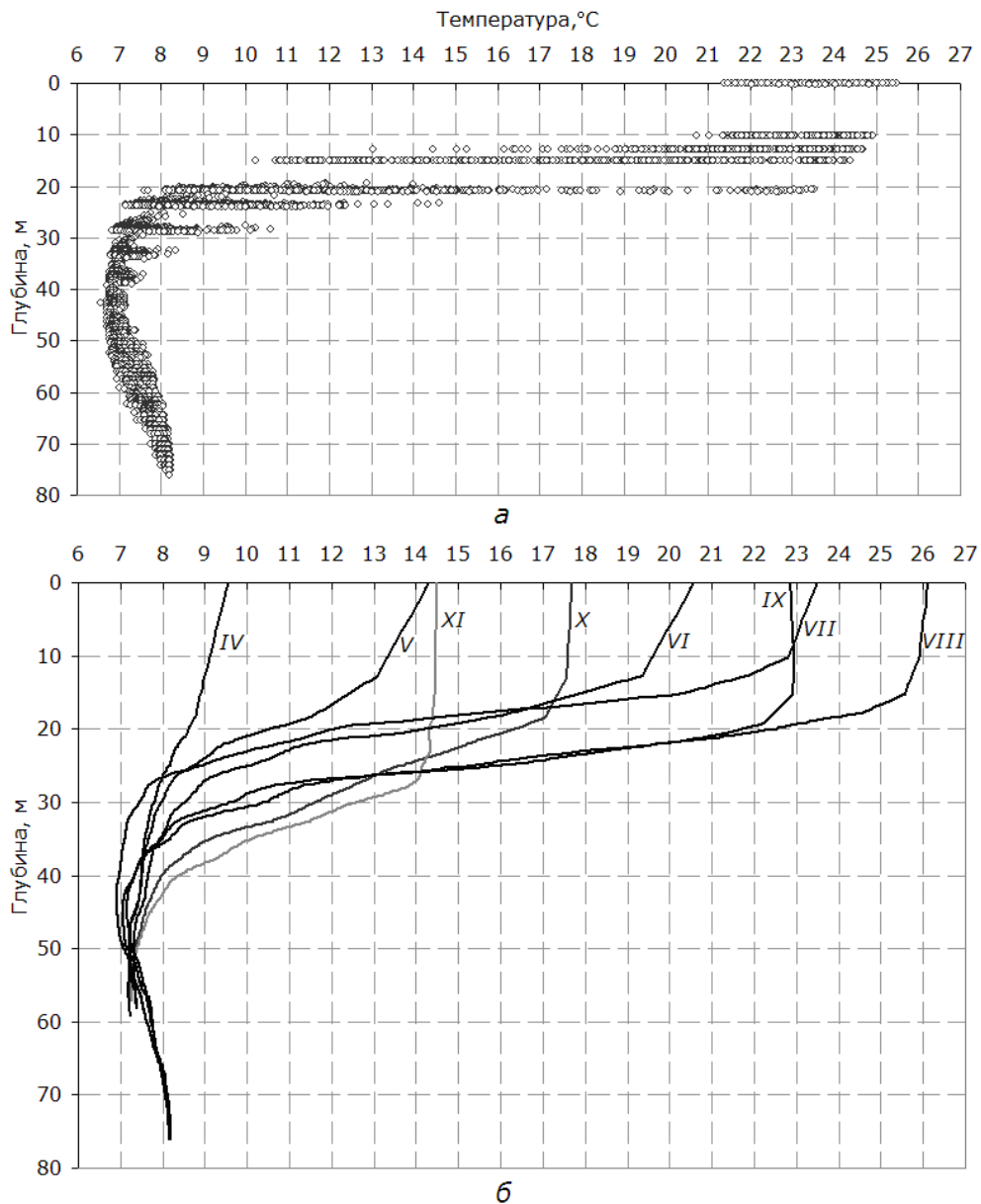
Границы полигона выбраны по следующим соображениям.

Во-первых, для этого района характерна наиболее высокая плотность траекторий термодрифтеров, что в определенной степени связано с указанными выше обстоятельствами. Общая продолжительность наблюдений в этом регионе к 2014 г. составила более 35000 ч. Это позволило получить статистически обеспеченные оценки среднего за период наблюдений сезонного хода вертикального распределения температуры верхнего слоя моря, характеристик таких основных элементов вертикальной структуры, как верхний квазиперемешанный слой (ВКС), сезонный термоклин (СТК) и холодный промежуточный слой (ХПС). Наиболее представительные данные получены с апреля по ноябрь 2004 – 2014 гг., т. е. в периоды формирования СТК и ослабления термической стратификации.

Во-вторых, в этом регионе, как показано, например, в работе [8], ОЧТ наиболее устойчиво, что позволяет распространить полученные оценки на характеристики межгодовой изменчивости вертикальной термической структуры верхнего слоя Черного моря в районе западной части континентального склона.

Следует заметить, что из-за особенностей конструкции термодрифтеров фиксированными по глубине являются только верхние горизонты измерений температуры: 0; 12,5 и 17,5 м для дрифтеров типа *SVP-BTC60* и 0; 10; 12,5 и 15 м для дрифтеров типа *SVP-BTC80*. Глубины расположения датчиков температуры, размещенных ниже, зависят от условий дрейфа и оценивались по методу, основанному на известных результатах решения задачи о поведении однородной нерастяжимой нити в установившемся потоке [9]. Алгоритм оценивания выполнен в соответствии с процедурой восстановления геометрии термолинии с известными гидродинамическими параметрами по результатам измерения глубины расположения ее нижнего конца. Метод технически реализован путем установки датчика гидростатического давления на нижнем конце термолинии, конструктивно совмещенного с балластом. Геометрия термолинии оценивалась при следующих предположениях: первое – скорость и направление потока и плотность воды постоянны по глубине; второе – точка верхнего крепления термолинии не изменяет своего положения в вертикальной плоскости. Результаты воздействия на термолинию сил, возникающих при дрейфе буя, и, как следствие, изменчивость ее геометрии моделировались с привлечением метода конечных элементов [10].

После внесения поправок на горизонты измерений для последующего анализа принимались результаты измерения каждого профиля, интерполированные по глубине с шагом 1 м.



Р и с. 5. Совокупность вертикальных профилей температуры воды для августа (а) и среднемесячные вертикальные профили температуры (б) по данным термодрифтерных измерений в 2004 – 2009 гг. на полигоне в районе западной части континентального склона Черного моря (римскими цифрами указаны месяцы)

Для получения оценок сезонных среднемесячных профилей первичные данные всех термодрифтеров на участках траекторий, принадлежащих указанному полигону, были сгруппированы по месяцам. На рис. 5, а показаны совокупные первичные результаты измерений для августа по данным термодрифтера *SVP-BTC80*. В качестве ежемесячных оценок температуры на каждом горизонте принимались медианные значения интерполированных на глу-

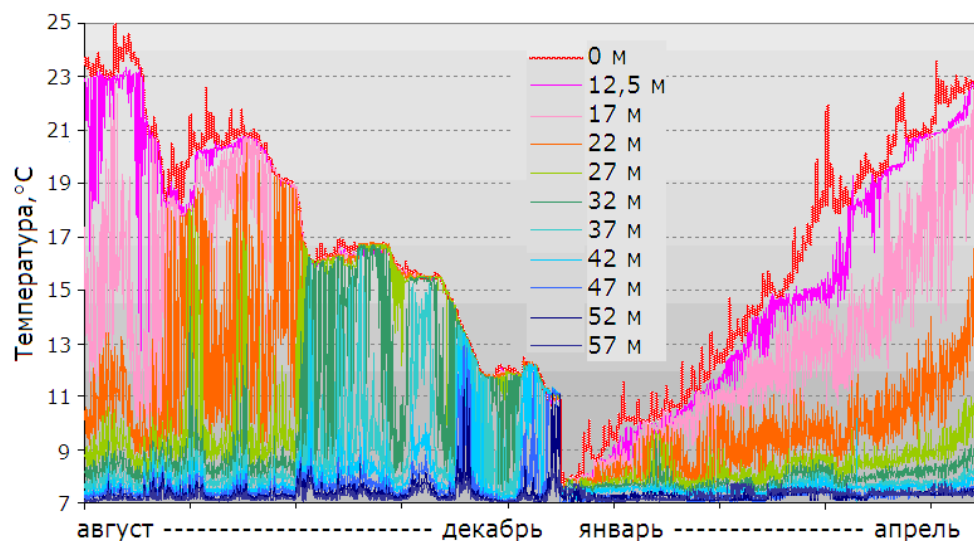
бину 1 м значений температуры. Рассчитанные таким образом среднемесячные вертикальные профили температуры на рассматриваемом полигоне показаны на рис. 5, б. Различие в значениях наибольших глубин профилирования объясняется различием в длинах термолиний дрейфтеров *SVP-BTC60* и *SVP-BTC80*, по данным которых восстановлены профили.

Сопоставление полученных результатов с аналогичными профилями, приведенными в монографии [5], позволяет сделать следующие выводы.

Трансформация среднемесячных вертикальных профилей температуры, восстановленных по данным термодрейфтеров, в целом не противоречит представлениям о сезонной эволюции термических процессов в верхнем слое Черного моря. Для всех профилей, кроме августовских, среднемесячные значения температуры поверхности моря различаются не более чем на 0,5°C. Для августа температура по дрейфтерным измерениям превышает температуру поверхности по данным работы [5] почти на 2°C. Среднемесячные профили температуры, построенные по дрейфтерным данным (рис. 5, б), отличаются большей глубиной нижней границы ВКС (графики VIII – XI), более низкими минимальными температурами (графики VII – IX) и более высокими градиентами температур в термоклине.

К наиболее значимым относятся те результаты черноморских экспериментов, которые были получены благодаря возможностям термодрейфтеров обеспечивать регулярные долговременные автономные наблюдения с часовым разрешением. С этой точки зрения на сегодняшний день в системе наблюдений верхнего слоя открытого моря прямыми методами практически не существует альтернативы термодрейфтерной технологии. Даже при наличии научно-исследовательских судов организация непрерывного долговременного мониторинга представляется весьма сложным и затратным предприятием. Конечно, информационно-измерительные возможности термодрейфтеров не позволяют решить весь комплекс задач мониторинга верхнего слоя моря, но, как показали результаты черноморских экспериментов, применение этих средств открывает исследователю доступ к уникальным по своей статистической значимости данным, получение которых иными способами невозможно. Термодрейфтеры дают возможность независимо от погодных условий выполнять непрерывные долговременные наблюдения термических процессов с дискретностью в несколько минут, обеспечивая при этом оперативный доступ к результатам. На рис. 6 показаны обобщенные временные ряды данных измерений с учетом поправок на положения датчиков по глубине. Данные получены в черноморских экспериментах 2004 – 2005 гг. в условиях формирования СТК и ослабления термической стратификации. Реальная изменчивость вертикального распределения температуры такова, что достоверное восстановление ее с помощью современных средств наблюдений в открытых районах моря без привлечения термодрейфтерной технологии практически невозможно. Так, например, в монографии [6] – одной из наиболее значимых работ по океанографии Черного моря – характеристики мезомасштабной и синоптической изменчивости термической структуры верхнего слоя моря оцениваются на основании наблюдений на многосуточных (от 5 до 20 сут) автономных буйковых и гидрологических станциях. Там же приведены сведения о пространственно-временном расположении этих станций, из кото-

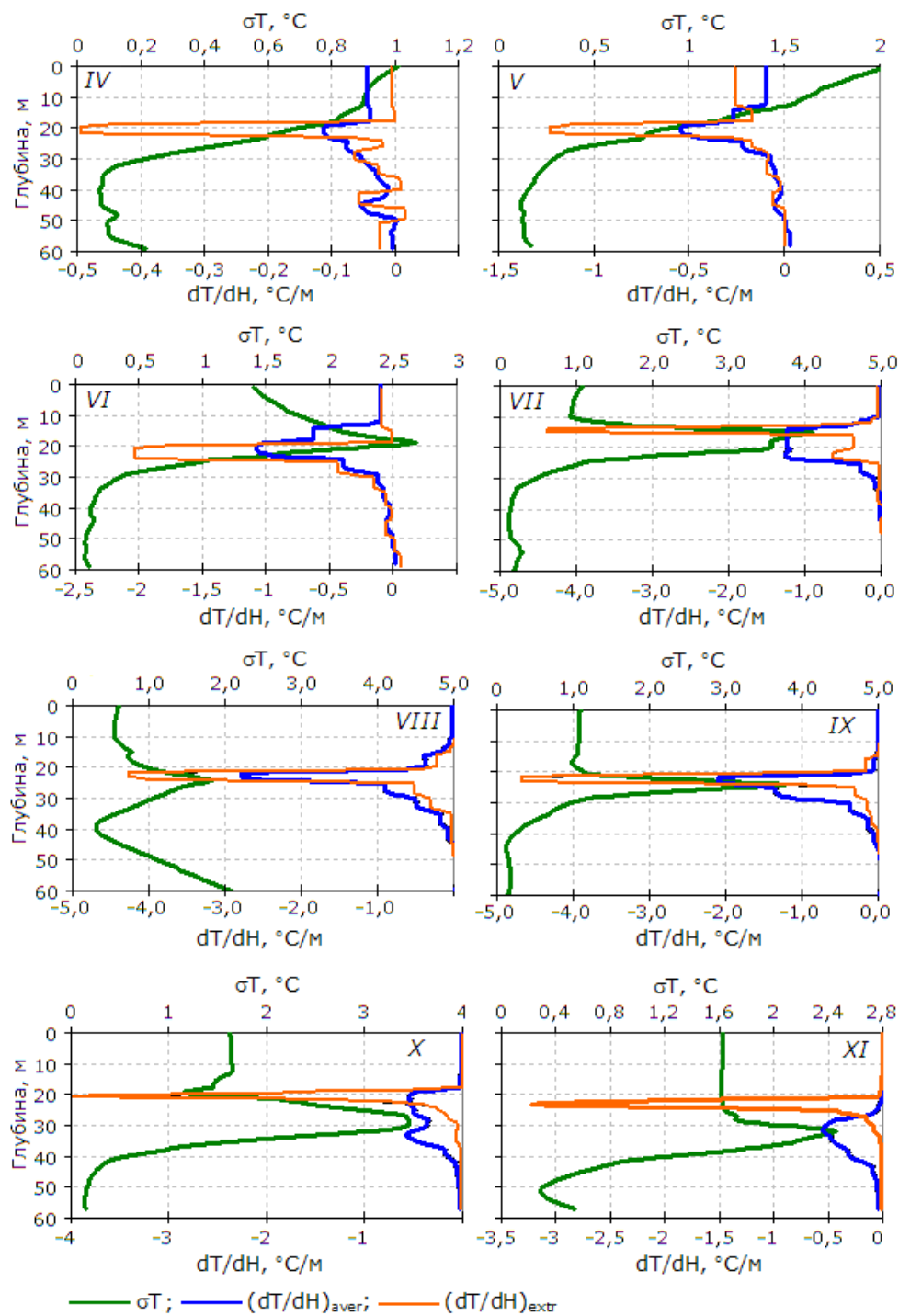
рых, и это отмечается авторами монографии, следует низкая статистическая обеспеченность результатов восстановления вертикальной термической структуры вод.



Р и с. 6. Обобщенные временные ряды результатов измерений температуры с учетом поправок на положение датчиков по глубине по данным термодрифтеров № 49169 (август – декабрь) и № 34860 (январь – апрель)

В статье [11], одной из современных работ, посвященных термодинамике верхнего слоя Черного моря, предложена альтернативная традиционной концепции версия структуры деятельного слоя. Фактический материал, на котором основана эта версия, представляет собой результаты измерений вертикального распределения температуры с помощью зонда *Sea Bird* на 100-мильном разрезе в восточной части моря. В течение полутора лет на разрезе было выполнено 10 съемок. То есть приводимые в статье характеристики элементов термической модификации деятельного слоя рассчитаны по результатам краткосрочных наблюдений, что, принимая во внимание возможную температурную изменчивость (см., например, рис. 6), может приводить к статистически необоснованным выводам. Мониторинг термодинамики верхнего слоя моря с помощью термодрифтеров позволяет в значительной степени преодолеть указанные недостатки в обеспеченности исследований Черного моря систематическими результатами контактных наблюдений.

На рис. 7 показаны графики средних ежемесячных вертикальных профилей флуктуаций и градиентов температуры, зарегистрированных на рассматриваемом полигоне. Исходными для расчетов этих характеристик были ежечасные профили температуры. Горизонты измерений корректировались согласно рассмотренному выше методу оценивания вертикальных смещений горизонтов расположения датчиков температуры по глубине нижнего конца термолинии. Результаты измерения температуры на исправленных таким



Р и с. 7. Графики вертикальных профилей ежемесячных средних флуктуаций температуры σT , средних $(dT/dH)_{aver}$ и экстремальных $(dT/dH)_{extr}$ градиентов температуры, зарегистрированных на рассматриваемом полигоне (римскими цифрами указаны месяцы)

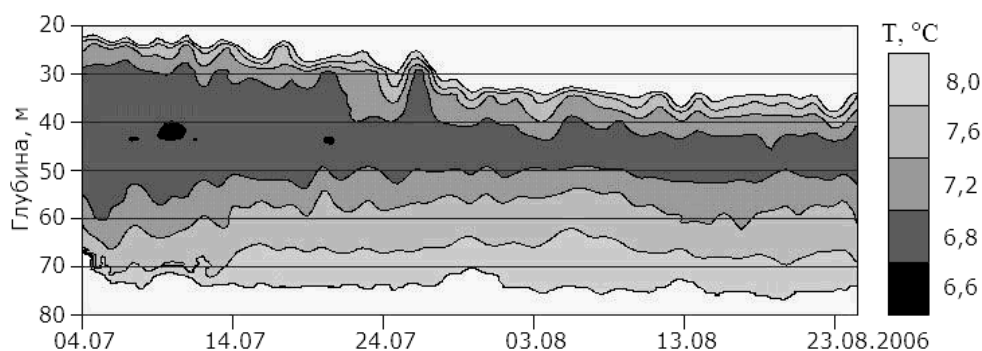
образом горизонтах для каждого ежечасного профиля линейно интерполировались на глубину с шагом 1 м. По совокупным ежемесячным интерполированным данным для каждого горизонта оценивались средние квадратические отклонения (СКО) температуры, распределения которых по глубине принимались в качестве средних ежемесячных вертикальных профилей флуктуаций. Профили ежемесячных градиентов температуры рассчитывались по осредненным за соответствующий месяц ежечасным отсчетам температуры, интерполированным на глубину с шагом 1 м.

Наибольшие по абсолютному значению средние ежемесячные вертикальные градиенты температуры сосредоточены в весенне-летний период на глубине около 20 м. С августа максимум градиента начинает заглубляться и к ноябрю глубина его расположения увеличивается до 32 м. Наибольшее среднее ежемесячное значение градиента наблюдалось в августе на глубине 23 м и составило $-2,81^{\circ}\text{C}/\text{м}$. В этом же месяце были зарегистрированы наименьшая протяженность СТК по глубине (ширина слоя СТК по сравнению с июлем уменьшилась более чем в 3 раза, главным образом за счет заглубления нижней границы ВКС) и абсолютный минимум флуктуаций в СТК в летне-осенний период (СКО = $1,62^{\circ}\text{C}$).

В апреле, мае и июне в вертикальной структуре градиента, кроме его максимума в СТК на глубинах 20 – 22 м, прослеживается устойчивый по глубине (46 м) и значению ($-0,05^{\circ}\text{C}/\text{м}$) максимум в ХПС. Эти результаты отличаются от оценок сезонных эволюций характеристик ХПС, приведенных в диссертации [11], где, в частности, сказано, что «сезонный цикл выражается в ... последовательном опускании ядра ХПС с глубин 20 – 30 м в марте – апреле до 70 – 80 м в декабре ...». Различия подтверждаются и последующими результатами дрейферных наблюдений. Хотя проследить характеристики ХПС по вертикальной структуре градиента в этот период времени из-за малых различий температур верхнего слоя ХПС и нижней границей СТК сложно, эволюция структуры ХПС хорошо видна на графиках изотерм на рис. 8. Изотермы построены по данным термодрифтёра № 56093, полученным с 4 июля по 23 августа 2006 г. В этот период толщина слоя, ограниченного сверху и снизу изотермой $8,0^{\circ}\text{C}$, уменьшилась с 50 до 40 м, главным образом за счет заглубления верхней его границы. Обращает на себя внимание резко неоднородный характер поведения верхней изотермы $6,8^{\circ}\text{C}$, глубина которой в начале третьей декады июля изменялась со скоростью приблизительно $0,3\text{ м}/\text{ч}$, что могло быть связано с резким прогревом в этот период поверхности моря, температура которой за неделю увеличилась на $2,5^{\circ}\text{C}$. К концу июля ширина ядра ХПС по этой изотерме уменьшилась с 30 до 10 м и впоследствии до конца наблюдений менялась незначительно. Минимальное значение температуры в ядре ХПС было зафиксировано 9 июля на глубине 50 м и составило $6,6^{\circ}\text{C}$.

С меньшей определенностью полученные данные позволяют оценить характеристики других элементов вертикальной термической структуры. Причины этого две. Первая связана с конструктивными особенностями термодрифтёра и состоит в том, что количество горизонтов расположения датчиков температуры не достаточно для восстановления изменчивости температуры в

пограничных слоях. В частности, это затрудняет получение статистически значимых оценок нижней границы ВКС. Вторая причина обусловлена тем, что вследствие естественной изменчивости вертикального распределения температуры в ряде случаев границы слоев определить оказалось вообще невозможно, во всяком случае в рамках традиционных представлений. Тем не менее анализ показанных на рис. 8 графиков позволяет обнаружить в сезонной эволюции ВКС некоторые отличия от результатов, опубликованных, например, в монографиях [5, 6]. Эти отличия касаются главным образом изменчивости толщины ВКС в период формирования СТК. Оценки толщины ВКС, рассчитанные по термодрифтерным данным, на качественном уровне совпадают с данными работ [5, 6] только для апреля, когда она уменьшается почти до нуля. В последующем до августа, как показано в [6], «толщина ВКС слабо растет или остается приблизительно на одном уровне, не превышая 10 м». По данным термодрифтеров (см. рис. 5, б и рис. 7) близкий к нулю градиент температуры в приповерхностном слое наблюдается только начиная с августа: около $-0,015^{\circ}\text{C}/\text{м}$ в слое толщиной 10 м. До августа средние вертикальные градиенты температуры в приповерхностном слое составляли $-0,1^{\circ}\text{C}/\text{м}$ в мае и июне; $-0,04^{\circ}\text{C}/\text{м}$ в июле. С июля в этом слое наблюдается снижение СКО температуры до 1°C .



Р и с. 8. Термическая структура ХПС (по данным термопрофилирующего дрифтера № 56093 с 4 июля по 23 августа 2006 г.)

Несмотря на то, что в термодрифтующих модификациях термодрифтера *SVP-BTC80* был добавлен датчик температуры на горизонте 10 м, очевидно, что для более детального исследования ВКС необходимо проведение измерений с более высоким пространственным разрешением профиля температуры приповерхностного слоя. Здесь следует отметить, что задача увеличения количества горизонтов в слое между подводным парусом и поплавком к настоящему времени не нашла приемлемого технического решения. С одной стороны, используемый в термодрифтере «однопроводный» интерфейс позволяет достаточно просто увеличить количество горизонтов измерения температуры; с другой, – конструктивные особенности термодрифтера затрудняют практическую реализацию этой задачи. Последнее обстоятельство связано с тем, что участок линии, связывающий поплавок с парусом, является грузонесущим. В термодрифтере этот участок реализован на основе

каротажного кабеля типа КГ-1. Интегрирование в него датчиков температуры приведет к существенному увеличению диаметра кабеля и, следовательно, к неизбежному ухудшению свойств термодрифтера как трассировщика поверхностных течений.

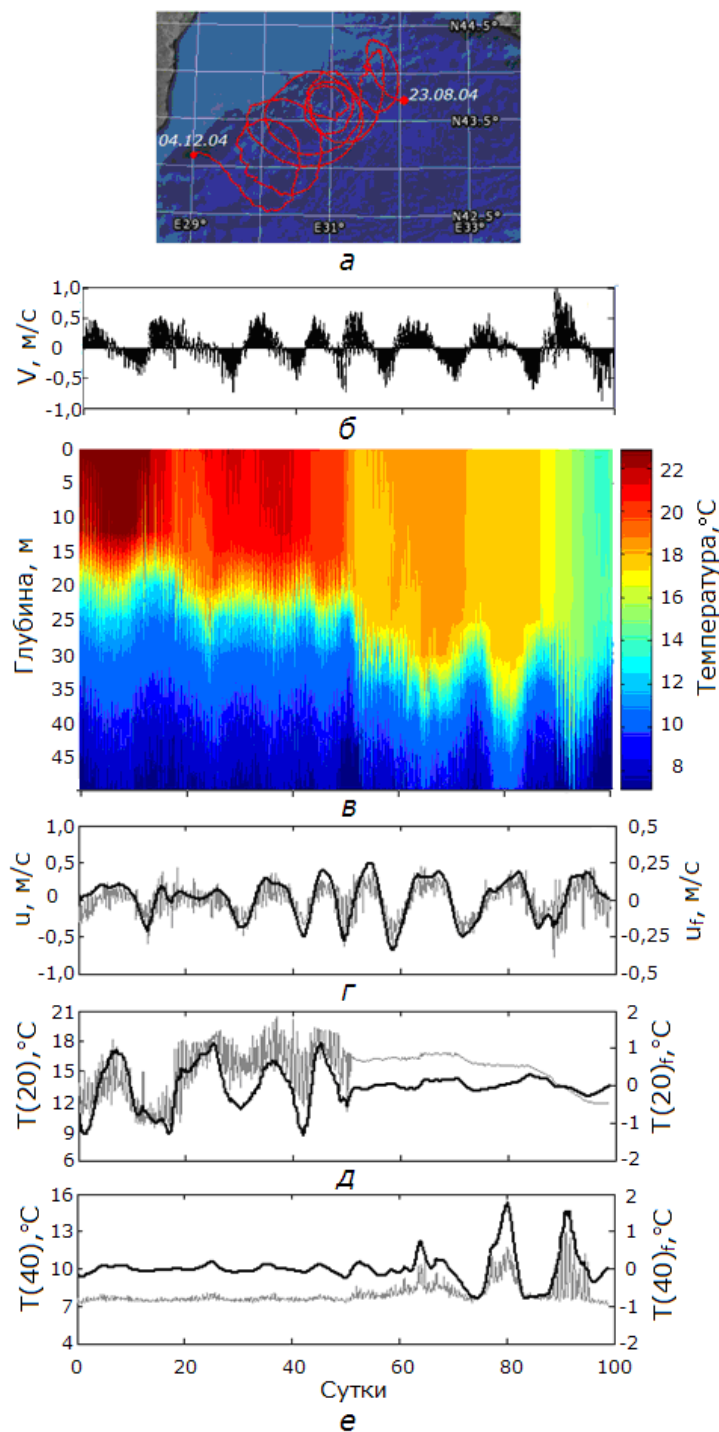
К числу наиболее значимых результатов термодрифтерного мониторинга относятся результаты исследования относительно мелкомасштабных неоднородностей вертикального распределения температуры. Локальная мезомасштабная изменчивость термических процессов в верхнем слое открытых районов моря изучена гораздо меньше, чем крупномасштабные их свойства. Возможности термодрифтеров осуществлять долговременные систематические наблюдения с малым интервалом времени между измерениями наряду со статистически значимыми оценками средних характеристик распределения температуры позволили зарегистрировать и относительно краткосрочные термические процессы, наблюдение которых иными способами возможно только в результате случайного стечения обстоятельств. Анализ долговременных рядов систематических дрейферных данных позволяет, в частности, обнаружить относительно краткосрочные аномалии высокочастотной изменчивости, информация о существовании и эволюции которых может значительно расширить и уточнить представления о термических процессах в верхнем слое моря. Примерами таких наблюдений могут служить профили градиентов температуры, в которых были зафиксированы экстремальные в пределах каждого месяца значения градиентов $((dT/dH)_{\text{extr}}$ на рис. 7). Экстремальные флуктуации градиентов, превышающие их среднемесячные оценки в несколько раз, в весенне-летний период располагались на границе раздела ВКС и СТК, а в период ослабления термической стратификации наблюдались в нижней части ВКС. Так, в октябре и ноябре абсолютные максимумы градиентов были зарегистрированы на глубинах 20 и 22 м, при этом наибольшие среднемесячные флуктуации температуры были сосредоточены на 30 и 33 м соответственно. Таким образом, очевидны существенные различия в оценках сезонной и мезомасштабной изменчивости вертикального распределения температуры, игнорирование которых в процессе ассимиляции данных в прогностических моделях может приводить к снижению эффективности морских оперативных прогнозов.

Анализ результатов термопрофилирования в синоптическом и мезомасштабном диапазонах циркуляции поверхностных вод. Объединение свойств термопрофилемера и квазилагранжевого носителя в термодрифтере позволяет рассматривать его как принципиально новое средство исследования изменчивости термических процессов в условиях циркуляции поверхностных вод в широком диапазоне пространственно-временных масштабов. Результаты совместного анализа изменчивости циркуляции поверхностных вод и их термической структуры к настоящему времени представлены слабо, что отмечается, в частности, в статье [12]. В той же статье опубликованы результаты исследования взаимосвязи между сезонной изменчивостью полей температуры поверхности моря и геострофических скоростей. Первичными данными для анализа служили массивы гидрологических данных океанографических банков МГИ НАН Украины и Севастопольского отделения ФГБУ

«Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова», а также массивы спутниковых наблюдений температуры поверхности моря за 1986 – 2002 гг. Массивы данных интерполировались на узлы регулярной сетки 18×18 км. Понятно, что пространственная и временная дискретности исходной информации ограничивали возможности авторов установлением взаимосвязей только температуры поверхности моря с циркуляцией поверхностных вод в диапазоне сезонной изменчивости. В отличие от этого термодрифтерный мониторинг обеспечивает исследования долговременными рядами систематических комплексных измерений параметров верхнего слоя моря, а характеристики измерений позволяют получать статистически значимые оценки процессов и их взаимосвязей в широком диапазоне пространственно-временных масштабов.

Ниже рассмотрены некоторые результаты взаимного статистического анализа движения поверхностных вод и термических процессов в верхнем слое Черного моря, полученные по данным термопрофилирующих дрейфтеров. Анализ был направлен на выявление статистических взаимосвязей между флуктуациями температуры в верхнем слое моря и составляющими вектора скорости течения в условиях синоптической и мезомасштабной циркуляций поверхностных вод. Временные ряды скорости рассчитывались по данным траекторных измерений дрейфтеров, которые, при необходимости, подвергались предварительной обработке в соответствии с методикой, приведенной в статье [13]. В качестве временных рядов температуры принимались исправленные по глубине и интерполированные на номинальные горизонты профили температуры.

Синоптическая изменчивость. Наиболее представительные данные, касающиеся синоптической изменчивости, были получены во время дрейфа термодрифтера *SVP-BTC60 (Argos-2)* № 49169. На протяжении 104 сут с 23 августа по 4 декабря 2004 г. траектория дрейфтера, как можно видеть на рис. 9, а, определялась антициклоническим вихрем, двигавшимся с северо-востока на юго-запад в границах полигона, показанного на рис. 4. За этот период было выполнено более 2000 измерений профилей температуры верхнего слоя моря. Среднее значение интервала времени между измерениями составило 1,2 ч. Траектория дрейфтера восстанавливалась по координатам, измеренным по доплеровскому методу, реализованному в системе *Argos*. Среднее время между последовательными локализациями составило 3 ч; средний класс локализаций – 2, что соответствует радиусу ошибок 350 м. С учетом таких параметров траекторных измерений предварительная подготовка данных заключалась в простой линейной интерполяции результатов измерений координат. Необходимо сделать пояснения относительно результатов восстановления реальных горизонтов измерений температуры. На некоторых участках траектории дрейфа сопровождались значительными отклонениями термомолинии от вертикали, что приводило к частичной потере данных о температуре на нижних горизонтах. Поэтому для последующего анализа привлекались результаты термопрофилирования до глубины 55 м. Скорректированные по глубине результаты измерений температуры линейно интерполировались на горизонты от 0 до 55 м с интервалом 5 м.



Р и с. 9. Фрагмент траектории термодрифтёра *SVP-BTC60* (*Argos-2*) № 49169 (*a*), а также временные ряды вектора скорости дрейфа (*б*), профилей температуры (*в*), зональной составляющей скорости (*г*) и температур на горизонтах 20 м (*д*) и 40 м (*е*) в синоптическом антициклоническом вихре (индексом «*f*» обозначены временные ряды после фильтрации – линии черного цвета)

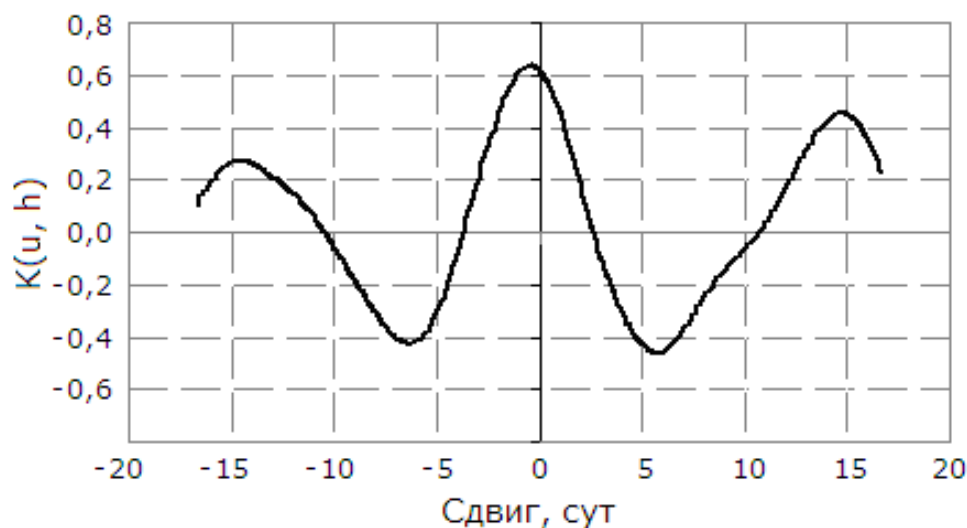
Составляющие скорости дрейфа рассчитывались по интерполированным координатам. Графики вектора скорости и исправленных профилей температуры показаны на рис. 9, б, в. Поскольку, как видно из векторной диаграммы, движение дрейфера наряду с переносом синоптическим вихрем в значительной степени определялось относительно высокочастотными мезомасштабными флуктуациями скорости течения, для выделения синоптических компонентов временные ряды температур и составляющих скорости подвергались фильтрации. В качестве фильтра использовался полосовой фильтр Баттерворта с частотами среза 0,05 и 0,33 цикл/сут. Фильтрация выполнялась с помощью реализованной в среде *MATLAB* функции *filtfilt*, позволяющей путем двунаправленной обработки сигнала компенсировать фазовый сдвиг, вносимый при обычной фильтрации, т. е. без добавления временной задержки в результат фильтрации. На рис. 9 показаны результаты такой фильтрации для зональной составляющей скорости (z) и температур на горизонтах 20 м (δ) и 40 м (e). Горизонты выбраны из тех соображений, что эволюции температур на этих глубинах наиболее полно отражают изменчивость термических процессов в верхнем и нижнем слоях профилирования.

В эволюциях скорости и температуры отчетливо различимы два участка, граница между которыми обусловлена резким выхолаживанием верхнего слоя после 12 октября. На рис. 9, в это хорошо видно по заглублению ВКС до 30 – 35 м, а на графиках рис. 9, з, д, е – по резкому изменению характера флуктуаций как составляющей скорости, так и температур на горизонтах 20 и 40 м. Визуально различимые особенности поведения измеряемых параметров на этих двух участках подтверждаются статистическими оценками, значимость которых обеспечивается продолжительностью наблюдений: каждый массив данных включает в себя приблизительно 1200 наблюдений с часовым разрешением.

Частотная структура флуктуаций скорости и температуры оценивалась по спектральным плотностям мощности (СПМ), которые рассчитывались по методу усреднения модифицированных периодограмм, или методу Уэлча. Исходный временной ряд данных разбивался на перекрывающиеся сегменты, и данные каждого полученного сегмента умножались на оконную функцию Парзена. Для взвешенных таким образом сегментов вычислялись модифицированные периодограммы. Полученная оценка СПМ представляет собой результат усреднения периодограмм всех сегментов. Такой метод обеспечивает получение гладких и статистически устойчивых оценок по конечному ряду данных. Оценивание СПМ выполнялось по программе, реализованной в среде *MATLAB*, с помощью функции *pwelch*.

В СПМ всех рассматриваемых процессов на обоих участках статистически значимые максимумы наблюдаются на периоде 14,2 сут. В то же время на первом участке в СПМ флуктуаций температуры на горизонте 40 м и компонент скорости имеется локальный максимум на периоде 8,5 сут. Возможные объяснения полученным оценкам СПМ можно найти в статье [14].

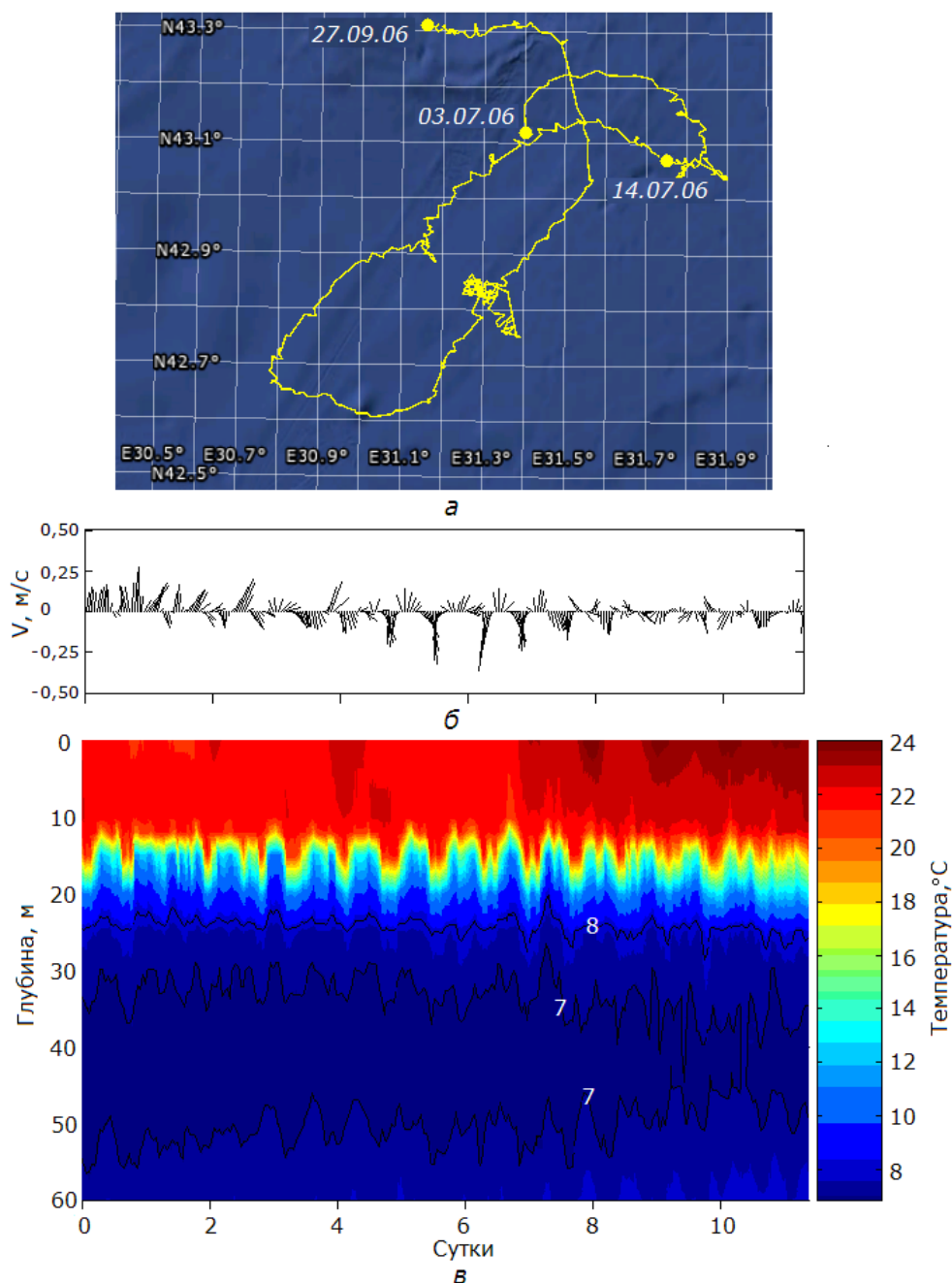
Результаты сопоставления изменчивости глубины СТК с флуктуациями компонент скорости дрейфа обнаруживают наличие когерентной связи между этими процессами также на периоде 14,2 сут. Связь между этими процессами во временной области можно видеть на графике функции взаимной корреляции флуктуаций глубины термоклина и зональной компоненты скорости, показанного на рис. 10. Амплитудное значение функции составляет 0,63 при отрицательном сдвиге в 8 ч флуктуаций компоненты скорости относительно флуктуаций глубины, т. е. СТК заглубляется при движении дрейфера преимущественно в южном направлении.



Р и с. 10. Функция взаимной корреляции флуктуаций глубины СТК и зональной компоненты скорости дрейфа

Мезомасштабная изменчивость. Информация, получаемая с помощью термопрофилирующих дрейфтеров, дает возможность распространить результаты исследования взаимных связей термических процессов с циркуляцией поверхностных вод на область мезомасштабной изменчивости. Временные ряды термодрейфтерных данных с дискретностью 1 ч, а в некоторых экспериментах – 30 мин, обеспечивают статистически значимые оценки таких взаимосвязей в условиях инерционных и полусуточных колебаний.

В границах указанного выше полигона (рис. 4) почти все траектории дрейфтеров воспроизводят колебания на частотах, близких к инерционным. Здесь мы рассмотрим некоторые результаты, полученные по данным термодрейфтера *SVP-BTC80 (Argos-2)* № 56093, дрейфовавшего в центральной части западного циклонического круговорота с 3 июля по 27 сентября 2006 г. Траектория дрейфтера, более подробно показанная на рис. 11, *a*, в этот период была ограничена площадью 122 км по долготе и 56 км по широте и определялась практически непрерывными инерционными колебаниями на фоне антициклонической и циклонической циркуляций.



Р и с. 11. Траектория термодрифтера *SVP-BTC80* (*Argos-2*) № 56093 (*a*), а также временные ряды вектора скорости дрейфа (*б*) и профилей температуры (*в*) на участке траектории с 3 по 14 июля 2006 г. (цифрами на графике (*в*) отмечены изотермы 7 и 8°C)

За время дрейфа было выполнено около 2000 измерений профилей температуры и координат дрейфера. Данные о температуре поступали с номинальной дискретностью отсчетов 1 ч. Координаты дрейфера измерялись по

ISSN 0233-7584. Мор. гидрофиз. журн., 2014, № 5 27

доплеровскому методу системы спутниковой связи *Argos*. Среднее значение периода локализаций составило 1,5 ч; средний класс локализаций – 2 (радиус ошибок 350 м). Такие погрешности позиционирования позволяют, как было показано выше, получать статистически значимые оценки характеристик циркуляции поверхностных вод в синоптическом диапазоне изменчивости, но приводят к значительным погрешностям результатов восстановления по траектории дрейфера колебаний мезомасштабного диапазона. В связи с этим временные ряды координат дрейфера подвергались предварительной интерполяции в соответствии с методом, описание которого приведено в статье [13]. По полученным таким образом рядам координат оценивались составляющие скорости дрейфа, которые интерполировались на временную шкалу отсчетов профилей температуры.

Поскольку в данном случае интерес представляют взаимосвязи термических процессов с циркуляцией поверхностных вод в области инерционных колебаний, последующему статистическому анализу подвергались фильтрованные временные ряды температур и составляющих скорости. В качестве фильтра использовался полосовой фильтр Баттерворта с частотами среза $0,85f_i$ и $1,15f_i$, где f_i – частота инерционных колебаний, номинальное значение которой на рассматриваемом участке дрейфа составляет приблизительно $1/17,5$ цикл/ч.

Ниже приведены результаты анализа данных дрейфера № 56093, полученных на участке дрейфа с 3 по 14 июля 2006 г. (рис. 11, *а*). На рис. 11, *б* показана диаграмма вектора скорости дрейфа, рассчитанная по траектории дрейфа на этом участке. Как видно из графиков на рис. 11, *в*, на фоне колебаний вблизи инерционной частоты наблюдались практически все основные элементы вертикальной термической структуры верхнего слоя: ВКС глубиной от 10 до 12 м; СТК с максимумом вертикального градиента на средней глубине 15 м; слой подповерхностного минимума температур, характеристики которого были рассмотрены выше (см. пояснения к рис. 8).

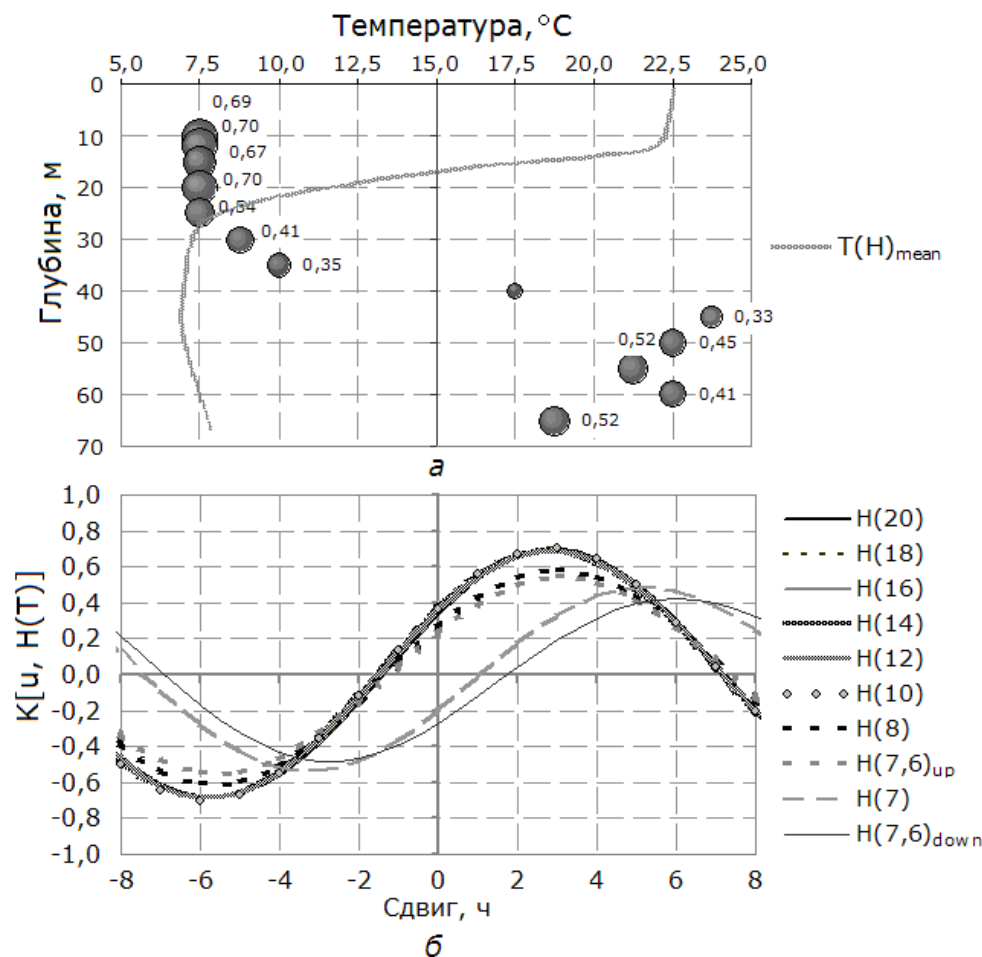
По данным термодрейфера № 56093 в пространственно-временных масштабах, соизмеримых с инерционными, оценивались: взаимные корреляционные функции флуктуаций температур на фиксированных горизонтах слоя профилирования и составляющих скорости дрейфа; взаимные корреляционные функции флуктуаций глубин изотерм и составляющих скорости дрейфа; СПМ флуктуаций температур на фиксированных горизонтах слоя профилирования и составляющих скорости дрейфа.

Основные результаты статистического анализа во временной области состоят в следующем:

1) наибольшее значение коэффициента взаимной корреляции между составляющими скорости на сдвиге, приблизительно равном четверти периода инерционных колебаний T_i , равно 0,87;

2) в распределении по глубине амплитуд взаимных корреляционных функций флуктуаций температур и зональной составляющей скорости, как можно видеть на рис. 12, *а*, отчетливо различимы слои со значимыми корреляциями: в верхнем слое, расположенном приблизительно между нижней границей ВКС и средней глубиной СТК, амплитуды функций взаимных корреляций составляют 0,67 – 0,70, а флуктуации температуры запаздывают от-

носительно флуктуаций зональной составляющей скорости на 6 ч; в нижнем, расположенном глубже 45 м, амплитуды составляют 0,33 – 0,52, а флуктуации температуры сдвинуты относительно флуктуаций зональной составляющей скорости на 3 – 6 ч в сторону опережения. На рис. 11, в видно, что граничным между этими двумя слоями является ХПС, в пределах которого взаимосвязь флуктуаций скорости и температуры мала, а на глубине ядра ХПС практически отсутствует;

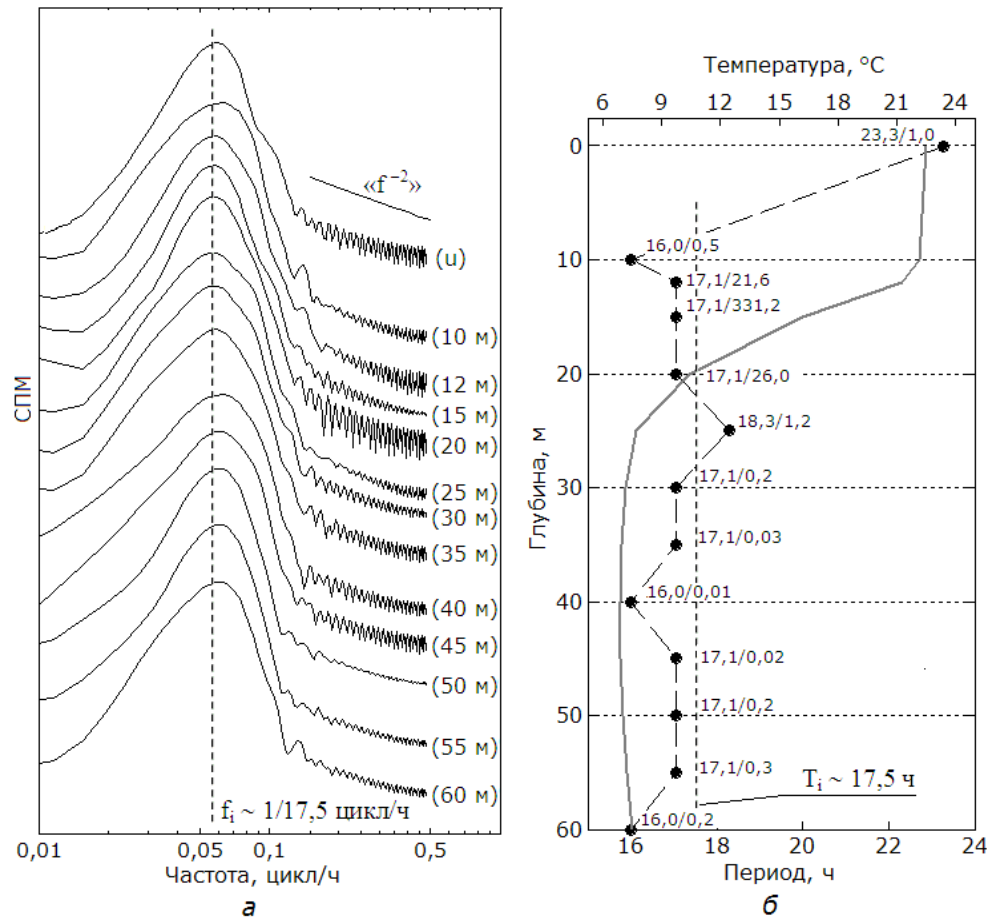


Р и с. 12. Распределение по глубине амплитудных значений функций взаимных корреляций флуктуаций температур и зональной составляющей скорости и профиль средних значений температуры $T(H)_{mean}$ (а), а также функции взаимных корреляций флуктуаций глубин изотерм и зональной составляющей скорости (б) по данным термодрифтета *SVP-BTC80* (*Argos-2*) № 56093 (индексами «up» и «down» обозначены изотермы 7,6°C выше и ниже ядра ХПС)

3) свойства ХПС как пограничного слоя проявляются также и в поведении функций взаимных корреляций флуктуаций глубин изотерм и составляющих скорости, графики которых показаны на рис. 12, б. Фазы флуктуаций глубин всех изотерм, расположенных выше ХПС и на его верхней границе, постоянны и сдвинуты относительно флуктуаций зональной составляющей

скорости на 3 ч в сторону опережения. С увеличением глубины наблюдается незначительное снижение амплитуд взаимных корреляций при увеличении сдвига до 6 ч для функции взаимной корреляции флуктуаций глубины «нижней» изотермы 7,6°C и составляющей скорости.

СПМ рассчитывались так же, как при анализе синоптической изменчивости. Доверительные интервалы оценок с вероятностью 0,95% лежат в границах (0,5 – 2,6) СПМ. Из графиков, показанных на рис. 13, видно, что наклоны СПМ как для составляющей скорости, так и для температур на всех горизонтах на частотах выше инерционной пропорциональны f^{-2} . Максимумы энергий колебаний зональной и меридиональной составляющих скорости сосредоточены на периодах 17,1 и 16,6 ч соответственно, что несколько меньше периода инерционных колебаний T_i , среднее значение которого на этом участке дрейфа составляет 17,5 ч.



Р и с. 13. СПМ флуктуаций зональной составляющей скорости дрейфа u и температур на горизонтах от 10 до 60 м (а) по данным термодрифтёра *SVP-BTC80 (Argos-2)* № 56093, а также профиль средних значений температур и распределение по глубине периодов колебаний, соответствующих максимумам СПМ, по тем же данным (б); рядом с метками указаны значения отношения «период / максимум СПМ» (вертикальные штриховые линии соответствуют частоте f_i (а) и периоду T_i (б) инерционных колебаний на средней широте дрейфа)

В распределении СПМ температур обращает на себя внимание устойчивое значение периодов максимумов энергии на горизонтах от 15 до 30 м. Наибольшие значения СПМ в этом слое наблюдались на периоде, равном периоду максимума СПМ зональной составляющей скорости, – 17,1 ч. При этом энергия колебаний спадала с глубиной от 336,33 до 0,23 (°C)²/(цикл/ч) практически по экспоненте. Такой же период колебаний температуры наблюдался под нижней границей ХПС на глубине 60 м. На средней глубине ядра ХПС (40 м) был зафиксирован локальный минимум энергии колебаний температуры 0,01 (°C)²/(цикл/ч).

По результатам выполненного анализа можно сделать следующие выводы:

1) анализируемые массивы термодрифтерных данных по своей продолжительности и дискретности измерений координат и температур позволяют получать статистически значимые оценки процессов, частоты которых сопоставимы с частотами инерционных колебаний;

2) значимая взаимосвязь между флуктуациями температур и составляющих скорости дрейфа наблюдалась в слое СТК и ниже ХПС. При наличии отчетливо выраженного ХПС фазы функций взаимных корреляций на глубинах выше и ниже слоя различны;

3) периоды энергетически значимых колебаний составляющих скорости течений смещены относительно инерционных в сторону увеличения;

4) в пределах ВКС преобладают более низкочастотные колебания температуры с близкими к суточным периодами энергетических максимумов;

5) ниже границы раздела ВКС и СТК преобладающими являются колебания температуры с периодами, меньшими инерционных. Среднее значение смещения составило –0,9 ч;

6) наибольшая энергия колебаний температуры сосредоточена на глубине СТК. По данным дрейфтера № 56093 частота максимума СПМ на глубине термоклина совпадает с частотой колебаний зональной составляющей скорости;

7) наименьшая амплитуда СПМ колебаний температуры наблюдалась на глубине ядра ХПС, а уменьшение амплитуд максимумов СПМ с глубиной близко к экспоненциальному.

Полученные оценки следует рассматривать как предварительные, отражающие в большей степени возможности термопрофилирующих дрейфтеров как новых средств мониторинга в составе глобальной системы наблюдений океана. Предложенная методика подготовки и обработки первичной термодрифтерной информации направлена главным образом на повышение достоверности результатов измерений траекторий дрейфтеров и профилей температуры и должна рассматриваться как составляющая комплексного специального методологического и математического подхода к анализу синоптических и мезомасштабных процессов в верхнем слое океана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Толстошеев А.П., Лунев Е.Г., Кортаев Г.К. и др. Термопрофилирующий дрейфующий буй // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2004. – Вып. 11. – С. 143 – 154.
2. Лунев Е.Г., Толстошеев А.П., Мотыжев С.В. Особенности информационного обеспечения термопрофилирующих дрейфующих буй // Там же. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2004. – Вып. 11. – С. 132 – 142.

3. *Толстошеев А.П., Лунев Е.Г., Мотыжев С.В.* Исследование верхнего слоя Черного моря с помощью термопрофилирующих дрейфующих буев // Там же. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2008. – Вып. 16. – С. 116 – 123.
4. *Толстошеев А.П.* Использование термопрофилирующих дрейфующих буев для изучения верхнего слоя Черного моря // Там же. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2011. – Вып. 24. – С. 273 – 278.
5. *Иванов В.А., Белокопытов В.Н.* Океанография Черного моря. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2011. – 209 с.
6. *Блатов А.С., Булгаков Н.П., Иванов В.А.* Изменчивость гидрофизических полей Черного моря. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 239 с.
7. *Белокопытов В.Н.* Термохалинная и гидролого-акустическая структура вод Черного моря: Дис. ... канд. геогр. наук. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2004. – 160 с.
8. *Stanev E.V.* Understanding Black Sea dynamics // *Oceanography*. – 2005. – 18, № 2. – P. 56 – 75.
9. *Меркин Д.Р.* Введение в механику гибкой нити. – М.: Наука, 1980. – 240 с.
10. *Галлагер Р.* Метод конечных элементов. Основы. – М.: Мир, 1984. – 428 с.
11. *Прокопов О.И.* Внутригодовая изменчивость структуры вод в поле градиентов температуры (северо-восточная часть моря) // Комплексные исследования северо-восточной части Черного моря / Под ред. А.Г. Зацепина, М.В. Флинта. – М.: Наука, 2002. – С. 40 – 47.
12. *Артамонов Ю.В., Белокопытов В.Н., Бабий М.В. и др.* Особенности сезонной изменчивости температуры поверхности и циркуляции вод Черного моря // Тр. ЮгНИРО. – Керчь: ЮгНИРО, 2008. – 46. – С. 102 – 109.
13. *Толстошеев А.П.* Метод восстановления траекторий дрейфующих буев // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2007. – Вып. 15. – С. 392 – 396.
14. *Журбас В.М., Зацепин А.Г., Пулейн П.-М.* Статистический анализ скорости течений в Черном море по дрейфтерным данным // Комплексные исследования северо-восточной части Черного моря / Под ред. А.Г. Зацепина, М.В. Флинта. – М.: Наука, 2002. – С. 105 – 118.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь
E-mail: marlin@marlin-yug.com

Материал поступил
в редакцию 06.02.14
После доработки 12.03.14

АНОТАЦІЯ У статті розглянуто результати десятирічного застосування термопрофільюючих дрейфтерів як сегменту глобальної системи спостережень Світового океану. Представлені принципи побудови та особливості застосування термодрейфтерів. Наведено відомості про дрейфтерні експерименти в Чорному морі та інших регіонах Світового океану, розглянуто методи обробки даних моніторингу. Результати експериментів дозволили отримати статистично значні кореляційні та спектральні оцінки флуктуацій полів температури верхнього шару моря та їх зв'язків з флуктуаціями циркуляції поверхневих вод у синоптичному і мезомасштабному діапазонах просторово-часової мінливості.

Ключові слова: термічна структура, термопрофільюючий дрейфтер, інерційні рухи.

ABSTRACT Results of ten-year application of temperature-profiling drifters as a segment of the Global Ocean Observing System are considered. Principles of the drifters' structure and features of their application are represented. Information on the experiments with thermodrifters in the Black Sea and other regions of the World Ocean is given; the methods of processing of the monitoring data are considered. The results of the experiments permit to obtain statistically significant correlation and spectral estimations of fluctuations of the sea upper layer temperature fields and their relations with spatial-temporal variability of surface water circulation in synoptic and mesoscale ranges.

Keywords: thermal structure, temperature-profiling drifter, inertial motions.