

Экспериментальные и экспедиционные исследования

УДК 551.465

Ю.Б. Ратнер, А.П. Толстошеев, А.Л. Холод, С.В. Мотыжев

Создание базы данных мониторинга Черного моря с использованием дрейфующих поверхностных буюв

В настоящей статье рассмотрены особенности создания базы данных на основе материалов дрейферного эксперимента, выполненного в Черном море в 2001 – 2006 гг. Статья содержит общую статистическую информацию обо всех буйковых постановках в море. Рассмотрены критерии, по которым выполнялась фильтрация первичных данных, принципы формирования и структура базы дрейферных данных. В качестве примера приведены методика и результаты сопоставления модельных оценок и контактных измерений дрейфующими буюми температуры поверхности моря.

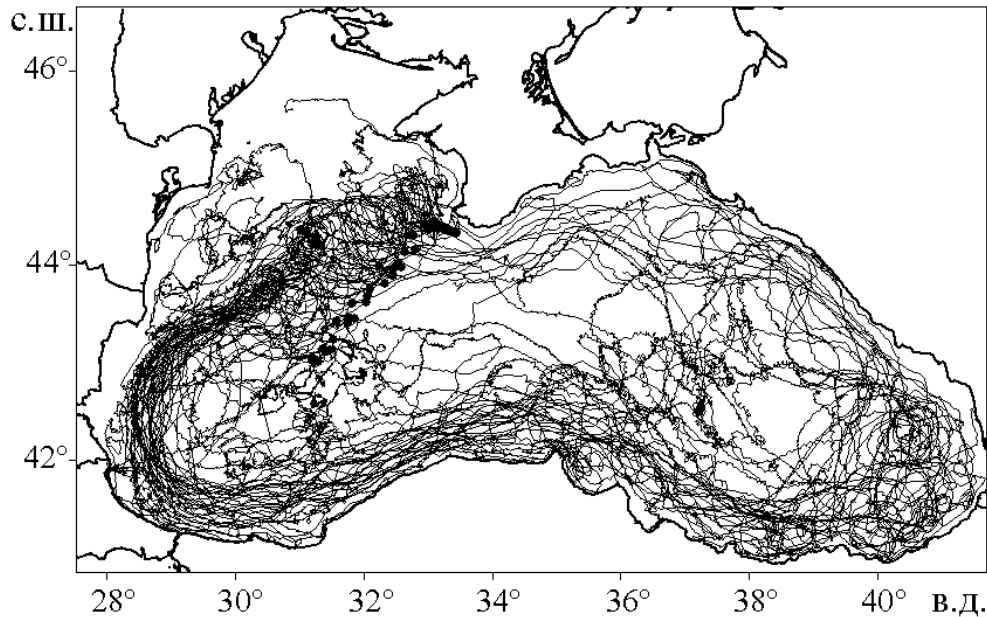
Введение. Изменчивость климата и связанная с ней проблема достоверного прогнозирования погоды определяют задачу систематического контроля процессов в верхнем слое океана и приземной атмосфере. Неотъемлемым компонентом современной системы оперативных наблюдений океана являются дрейферные технологии. Автономные дрейфующие платформы сбора данных (дрейферы), оборудованные аппаратурой спутниковой связи, вошли в число наиболее эффективных средств исследования верхнего слоя океана и пограничной с ним атмосферы.

В Черноморском регионе дрейферные эксперименты последнего десятилетия стали одним из основных источников контактной оперативной систематической информации о состоянии верхнего слоя открытого моря и приземной атмосферы. К 2007 г. продолжительность работы дрейферов составила более 90 000 ч. За это время получены представительные с разрешением в 1 ч массивы данных о температуре поверхности моря, профилях температуры верхнего слоя моря, атмосферном давлении и поверхностных течениях. Однако при очевидных преимуществах дрейферного мониторинга остается малоэффективным использование его результатов для полноценного дальнейшего анализа и адекватного реагирования на изменчивость окружающей среды. Причина этого в отсутствии формализованных в соответствии с современными требованиями массивов дрейферных данных и, как следствие, в ограниченном доступе пользователей к полученной информации. В статье представлены основные результаты работы по систематизации данных дрейферного мониторинга Черного моря, разработке методик обработки дрейферной информации с целью создания базы дрейферных данных и ее экспорта в базу океанологических данных. В качестве примера рассмотрено использование дрейферных данных для оценивания результатов модельного диагноза поля температуры поверхности моря (ТПМ).

© Ю.Б. Ратнер, А.П. Толстошеев, А.Л. Холод, С.В. Мотыжев, 2009

Общие сведения о дрейферном эксперименте в Черном море 2001 – 2006 гг.

Дрейферный эксперимент в Черном море 2001 – 2006 гг. выполнялся по программам черноморского сегмента Глобальной системы наблюдений океана *BS GOOS (Black Sea Global Ocean Observing System)* и Европейской наблюдательной дрейферной системы *E-Surfmar (EUCOS Surface Marine Programme)*. В этот период были развернуты 50 дрейфующих буев различных модификаций производства фирмы «Марлин-Юг» (Украина) (<http://www.marlin-yug.com>). Основные сведения о дрейферах приведены в табл. 1. На рис. 1 показана карта траекторий дрейферов, некоторые типы движений которых более детально рассмотрены в работе [1].



Р и с. 1. Карта траекторий дрейфующих буев в черноморском эксперименте 2001 – 2006 гг. (черные маркеры – точки развертывания дрейферов)

Эффективность дрейфера как средства получения оперативных систематических данных о процессах в верхнем слое моря стала причиной создания ряда модификаций буев с расширенными информационно-измерительными возможностями. В 2004 – 2006 гг. фирмой «Марлин-Юг» на основе стандартного лагранжевого барометрического дрейфера *SVP-B* (<http://www.jcom.mops.org/dbcp/SVPB-design-manual.pdf>) были разработаны буй с термопрофилирующими линиями до глубин 60 (*SVP-BTC60*) и 80 м (*SVP-BTC80*), мини-буй с подповерхностными датчиками температуры на глубине 12 м (*SVP-BT-mini*), буй с приемниками системы глобального позиционирования *GPS (SVP-BT-GPS)*.

Общие характеристики автономных дрейфующих буев черноморского эксперимента 2001 – 2006 гг.

№ п/п	Идентификационный номер буя	Тип буя	Дата развертывания	Дата окончания продуктивной работы	Продолжительность продуктивной работы, сут	Дата окончания работы передатчика	Продолжительность работы передатчика, сут	Средний период локализаций, ч
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	16330	<i>SVP-B</i>	19.12.2001	14.01.2003	391	01.03.2004	803	3
2	16331	<i>SVP-B</i>	25.12.2001	08.06.2002	165	08.06.2002	165	4
3	16332	<i>SVP-B</i>	25.12.2001	02.04.2002	98	02.04.2002	98	5
4	16333	<i>SVP-B</i>	23.12.2001	15.02.2002	55	28.02.2004	798	4
5	16335	<i>SVP-B</i>	23.12.2001	09.02.2002	48	09.02.2002	48	3
6	16336	<i>SVP-B</i>	25.12.2001	27.03.2002	92	05.01.2004	741	4
7	16337	<i>SVP-B</i>	25.12.2001	16.05.2002	142	01.07.2003	553	4
8	16335	<i>SVP-B</i>	03.04.2002	08.08.2002	127	08.08.2002	127	4
9	34829	<i>SVP-B</i>	03.04.2002	20.09.2002	170	20.09.2002	170	5
10	34830	<i>SVP-B</i>	03.04.2002	17.08.2002	136	01.06.2003	424	4
11	34831	<i>SVP-B</i>	03.04.2002	26.04.2002	23	31.08.2004	881	9
12	34832	<i>SVP-B</i>	03.04.2002	20.08.2002	139	27.09.2003	542	6
13	34833	<i>SVP-B</i>	03.04.2002	29.08.2002	148	31.08.2004	881	4
14	34834	<i>SVP-B</i>	03.04.2002	13.11.2002	224	13.11.2002	224	5
15	35499	<i>SVP-B</i>	06.02.2003	12.09.2003	218	12.09.2003	218	5
16	35500	<i>SVP-B</i>	06.02.2003	18.04.2003	71	18.04.2003	71	4
17	35501	<i>SVP-B</i>	06.02.2003	25.02.2003	19	07.03.2003	29	4

1	2	3	4	5	6	7	8	9
18	35502	<i>SVP-B</i>	06.02.2003	04.04.2003	57	13.04.2003	65	3
19	40419	<i>SVP-B</i>	14.03.2003	02.04.2003	19	04.06.2003	82	3
20	40420	<i>SVP-B</i>	14.03.2003	25.08.2003	164	25.08.2003	164	5
21	40421	<i>SVP-B</i>	14.03.2003	02.08.2003	141	19.06.2004	464	2
22	40422	<i>SVP-B</i>	14.03.2003	23.04.2003	40	23.04.2003	40	3
23	40423	<i>SVP-B</i>	14.03.2003	20.08.2003	159	19.09.2003	189	2
24	40424	<i>SVP-B</i>	14.03.2003	29.06.2003	107	30.06.2003	108	3
25	40425	<i>SVP-B</i>	14.03.2003	23.05.2003	71	31.08.2004	536	4
26	40426	<i>SVP-B</i>	14.03.2003	05.06.2003	83	07.06.2003	85	3
27	40427	<i>SVP-B</i>	14.03.2003	19.04.2003	36	25.08.2003	164	7
28	40428	<i>SVP-B</i>	14.03.2003	14.06.2003	92	14.06.2003	92	3
29	47603	<i>SVP-B</i>	14.05.2004	29.06.2004	46	29.06.2004	46	3
30	47604	<i>SVP-B</i>	14.05.2004	06.07.2004	53	26.07.2005	438	3
31	47605	<i>SVP-B</i>	14.05.2004	06.10.2004	145	23.06.2005	404	3
32	47606	<i>SVP-B</i>	14.05.2004	23.07.2004	70	26.07.2005	438	3
33	47607	<i>SVP-B</i>	14.05.2004	05.08.2004	83	12.09.2004	121	3
34	47608	<i>SVP-B</i>	14.05.2004	08.07.2004	55	26.07.2005	438	4
35	49169	<i>SVP- BTC60</i>	23.08.2004	21.12.2004	120	24.12.2004	123	3
36	49170	<i>SVP- BTC60</i>	23.08.2004	18.09.2004	25	18.09.2004	25	3
37	49171	<i>SVP- BTC60</i>	23.08.2004	02.12.2004	97	06.07.2005	312	3

1	2	3	4	5	6	7	8	9
38	49172	<i>SVP-BTC60</i>	27.08.2004	12.10.2004	46	21.05.2005	267	3
39	34252	<i>SVP-BT-mini</i>	23.01.2005	17.02.2005	25	15.11.2005	296	3
40	34253	<i>SVP-BT-mini</i>	24.01.2005	31.08.2005	219	31.08.2005	220	2
41	34859	<i>SVP-BTC60</i>	04.04.2005	31.07.2005	118	09.09.2005	158	3
42	34860	<i>SVP-BTC60</i>	05.04.2005	29.09.2005	177	30.11.2005	239	2
43	40414	<i>SVP-BT-mini</i>	03.07.2006	16.10.2006	105	22.12.2006	172	2
44	40418	<i>SVP-BT-mini</i>	03.07.2006	06.08.2006	34	22.12.2006	172	2
45	40445	<i>SVP-BT-GPS-mini</i>	03.07.2006	26.08.2006	55	26.08.2006	55	1
46	47621	<i>SVP-BT-GPS-mini</i>	03.07.2006	05.07.2006	2	01.10.2006	90	1
47	56090	<i>SVP-BTC60</i>	03.07.2006	03.07.2006	0	06.03.2007	246	2
48	56091	<i>SVP-BTC60</i>	03.07.2006	03.07.2006	0	10.11.2006	130	2
49	56092	<i>SVP-BTC80</i>	03.07.2006	14.09.2006	73	08.11.2006	128	2
50	56093	<i>SVP-BTC80</i>	03.07.2006	27.09.2006	86	05.11.2006	125	2

П р и м е ч а н и е. Продуктивная работа – функционирование дрейфера с присоединенным подводным парусом.

Основные показатели назначения дрейфтеров различных модификаций приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Основные показатели назначения дрейфующих буев
черноморского эксперимента 2001 – 2006 гг.**

Тип буя	DAR	Атмосферное давление, гПа		Температура воды, °С		Номинальные горизонты измерения температуры верхнего слоя моря, м	Погрешность измерения координат, м
		Δ	μ	Δ	μ		
SVP-B	40	≤ 1	0,1	≤ 0,1	0,04	0,2	±150 (класс 3) ±350 (класс 2) ±1000 (класс 1)
SVP-BT mini						0,2; 12	
SVP- BTC60	0,2; 12,5; 22; 25; 30; 35; 40; 45; 50; 55; 60						
SVP- BTC80	0,2; 10; 12,5; 15; 20; 25; 30; 35; 40; 45; 50; 55; 60; 65; 70; 75; 80						
SVP-BT- GPS	0,2; 12					10	

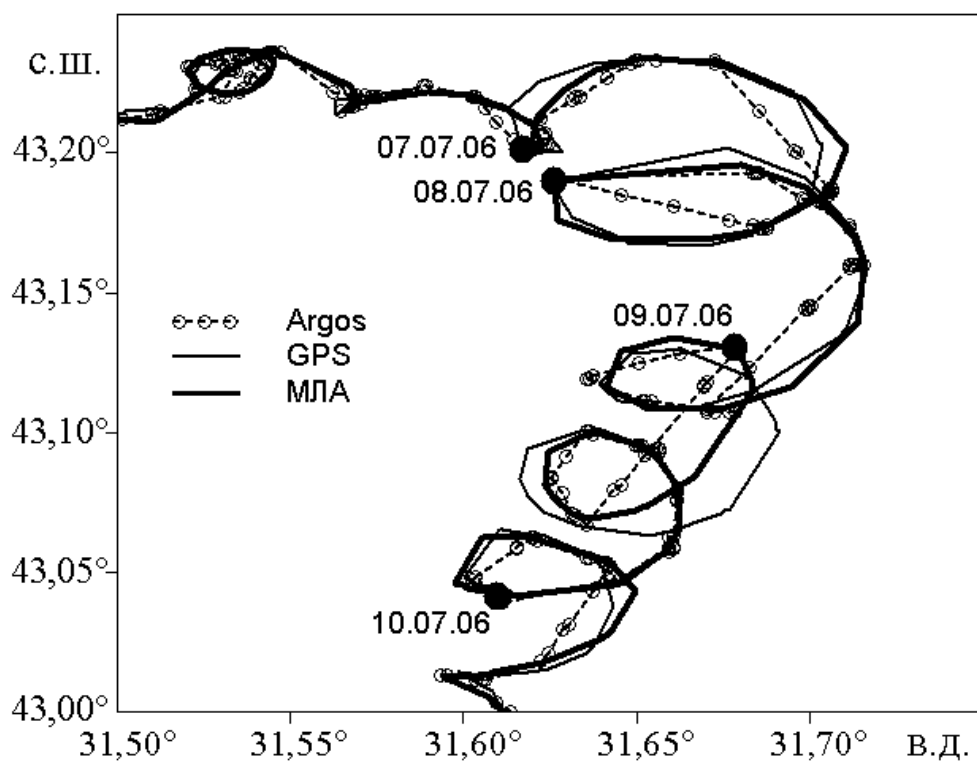
П р и м е ч а н и е: DAR (*Drag Area Ratio*) – соотношение между площадями паруса и остальных элементов буя; Δ – погрешность измерения; μ – цена единицы младшего разряда выходного кода; класс – служебный параметр, сопровождающий каждую обсервацию.

Ниже рассмотрены некоторые особенности, которые необходимо принимать во внимание при усвоении дрейфтерных данных.

Измерение координат. Погрешность оценивания траекторий дрейфующих буев, кроме основной погрешности доплеровского метода, указанной в табл. 2, содержит также и дополнительные составляющие, которые необходимо учитывать при изучении поверхностных течений по дрейфтерным данным.

Во-первых, для корректного воспроизведения траекторией буя поверхностного течения соотношение между площадями паруса и остальных элементов буя должно быть не менее 40 [2]. В этом случае дрейфтер имеет свойства, близкие к свойствам лагранжевой частицы, и параметры его движения с погрешностью несколько процентов определяются параметрами течения на горизонте расположения паруса. В работе [2] показано, что при таком соотношении ветер скоростью 10 м/с приводит к «проскальзыванию» буя не более чем на 0,7 см/с. Такое соотношение выполняется для всех буев, развернутых в Черном море, кроме термопрофилирующих (см. табл. 2). Это обстоятельство необходимо учитывать при восстановлении параметров поверхностных течений по координатам термопрофилирующих буев.

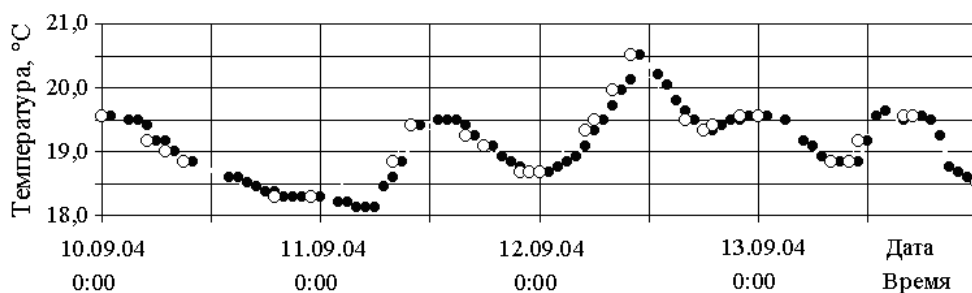
Во-вторых, при использовании данных о координатах буя, полученных по доплеровскому методу, необходимо также принимать во внимание неравномерность интервалов времени между наблюдениями. Длительности этих интервалов зависят от погодных условий, количества обслуживающих спутников и других факторов и могут отличаться от средних значений периодов локализаций, приведенных для каждого дрейфера в табл. 1. При применении простых способов интерполяции таких данных возрастает вероятность получения ошибочных результатов в оценках вектора скорости потока, особенно при дрейфе буя в условиях относительно высокочастотных, например инерционных, колебаний. Как следует из рис. 2, где в качестве примера показаны фрагменты траектории дрейфера № 47621, построенные по показаниям приемника *GPS* и по данным, полученным доплеровским методом спутниковой системы определения координат платформ и сбора данных *Argos*, линейная интерполяция последних приводит к значительным искажениям восстановленной траектории. Существенно более точные результаты могут быть получены при применении более сложных методов обработки первичных рядов координат, учитывающих априорные сведения о возможных диапазонах и характере изменчивости исследуемых физических процессов. На том же графике показан результат, полученный методом локальной аппроксимации «доплеровских» данных функцией, вид которой приведен в работе [3].



Р и с. 2. Фрагменты траектории дрейфера *SVP-BT-GPS* № 47621, построенные по данным, полученным доплеровским методом спутниковой системы *Argos*, по данным приемника *GPS* и по методу локальной аппроксимации (МЛА)

Третье замечание, касающееся выбора для анализа поверхностных течений только тех данных о координатах буя, которые были получены при лагранжевом дрейфе, т. е. при дрейфе буя с присоединенным подводным парусом, рассмотрено ниже.

Измерение температуры верхнего слоя моря. Все дрейфующие буи, развернутые в Черном море, обеспечивают измерение ТПМ с помощью датчика, расположенного в латунном корпусе в нижней полусфере поплавка на средней глубине около 20 см. Основные метрологические характеристики канала ТПМ приведены в табл. 2. Необходимо принимать во внимание, что при дискретности измерений 1 ч в принятой информации могут наблюдаться пропуски данных. Это замечание относится к буям, развернутым до 2004 г., и объясняется разреженной сеткой пролетов в ранее существовавшей 3-спутниковой системе и недостатками формата передачи данных *DBCP-M1*. Существенно повысить регулярность дрейферной информации удалось начиная с 2004 г. с применением формата *DBCP-M2* (<http://www.jcommops.org/dbcp/fmt-dbcpr-m2.html>). Особенность этого формата – мультиплексированная передача данных, основанная на сохранении в памяти буя блоков архивной информации с поочередной их трансляцией на спутник. На рис. 3 для сравнения показаны временные ряды данных о температуре, полученные в форматах *DBCP-M1* и *DBCP-M2*. Кроме того, в 2003 г. была введена 6-спутниковая система, что также улучшило регулярность приема дрейферных данных.



Р и с. 3. Временные ряды данных о ТПМ (дрейфер *SVP-B* № 49169), полученные в форматах *DBCP-M1* (белые кружки) и *DBCP-M2* (темные кружки)

Принципиально новым средством изучения тепловых процессов в верхнем слое моря стал термопрофилирующий дрейфующий буй *SVP-BTC* [1, 4], модификации *SVP-BTC60* и *SVP-BTC80* которого ориентированы на получение систематической оперативной информации о термических процессах в сезонном термоклине и холодном промежуточном слое. Технические характеристики термопрофилографов приведены в табл. 2. Поправки на положение по глубине каждого термодатчика вводились на основании показаний датчиков глубины, встроенных в термолинии.

Термолинии буев построены по технологии «однопроводной» сети *MicroLAN* с интегральными цифровыми термометрами *DS18B20* (*Dallas Semiconductor*). Эти датчики изначально подготовлены к работе в «однопроводной» сети и позволяют решать задачи измерения распределенной температу-

ры протяженных объектов. Однако при допустимой погрешности канала измерения температуры дрейфтера $\pm 0,1$ °C гарантируемая производителем погрешность датчиков составляет $\pm 0,5$ °C в диапазоне от -10 до $+85$ °C. Наряду с этим для датчиков, построенных на основе свойств запрещенной зоны кремния (*bandgap temperature sensing architecture*), к которым относятся и термометры *DS18B20*, предложена методика градуировки (http://www.maximic.com/appnotes.cfm/an_pk/208), позволяющая обеспечить требуемое значение погрешности. Для проверки возможности применения термометров *DS18B20* в термолинии дрейфующего буя в соответствии с указанной методикой были проведены испытания 100 экземпляров датчиков, которые показали, что в диапазоне температур от 0 до $+35$ °C в течение 4 мес погрешность остается в допустимых для каналов измерения температуры дрейфтеров пределах для приблизительно 70 % датчиков. По результатам этого тестирования в термопрофилографах использовались индивидуально калиброванные и отобранные термометры *DS18B20*. Конструктивно каждый датчик размещается в цилиндрическом латунном корпусе диаметром 20 мм и длиной 60 мм, заполненном теплопроводной пастой.

Оценивание положений по глубине измерителей температуры термопрофилирующего буя. При первичной обработке профилей температуры, кроме обычной процедуры отбраковки сбоев в рядах температур, оценивались и вводились поправки на горизонты положений датчиков термолинии. Необходимость введения поправок обусловлена отклонениями термолинии от вертикали при дрейфе буя, что приводит к смещениям положений датчиков температуры относительно номинальных значений горизонтов. Для количественного оценивания величины смещения по каждому горизонту была рассчитана модель поведения термолинии при разных скоростях дрейфа, в качестве переменного параметра в которой использовались результаты измерений глубины положения нижнего конца линии термопрофилографа. При этом предполагалось, что, во-первых, точка верхнего крепления линии при оцениваемых пространственно-временных масштабах не изменяет своего положения в вертикальной плоскости; во-вторых, в исследуемом слое отсутствуют сдвиговые течения либо их влияние пренебрежимо мало. Первое предположение основывалось на том, что верхний конец термолинии крепится на нижнем кольце подводного паруса, который в масштабах исследуемых процессов представляет собой относительно стационарную в вертикальном направлении платформу; второе – на том, что гидродинамическое сопротивление паруса существенно (приблизительно в 40 раз) превышает сопротивление термолинии. С целью проверки и уточнения принятой модели оценивания положений термодатчиков по глубине и, как следствие, для повышения достоверности восстановления вертикального распределения температуры в термолинии дрейфтера *SVP-BTC80* № 56092 были установлены дополнительные датчики глубины на номинальных горизонтах 15, 35 и 60 м. Для минимизации влияния этих датчиков на поведение линии были выбраны малогабаритные датчики гидростатического давления типа *MS5535* (*Intersema*, Швейцария), что позволило разместить каждый из них вместе с устройством адаптации к «однопроводному» интерфейсу линии в корпусе диаметром 35 мм и длиной 60 мм. В течение почти 3 мес дрейфа буя № 56092 с дополнительными

ми датчиками глубины были получены представительные данные о поведении термолинии в широком диапазоне пространственно-временных масштабов поверхностных течений. В частности, вертикальные смещения точки подвеса термолинии к нижнему кольцу паруса не превышали 1 м, что подтверждает справедливость предположения об относительной вертикальной стабильности этого узла и свидетельствует о надежности выбранной конструкции крепления термолинии. Степень достоверности результатов моделирования изменчивости конфигурации линии оценивалась по полученным данным в предположении линейности ее участков между датчиками глубины. Анализ полученных результатов позволяет обоснованно предположить, что при измерении положения по глубине только нижнего конца линии и линейной ее аппроксимации погрешность оценивания истинного горизонта любого термодатчика не превышает 1,5 м.

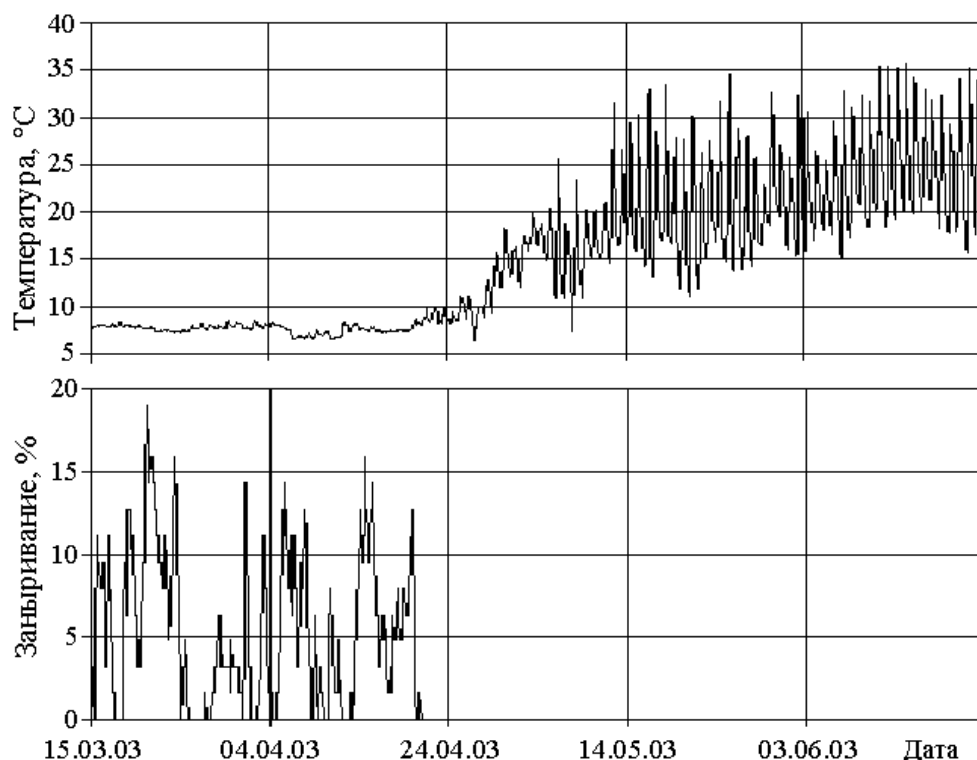
Измерение атмосферного давления. Условия эксплуатации дрейфтеров *SVP-B* определили особенности конструкции канала измерения атмосферного давления и алгоритм его работы. Ввод давления осуществляется через баропорт, исключая контакт датчика давления с водной средой при погружении буя на глубину до 10 м и снижающий влияние ветра на результат измерения. Алгоритм измерения обеспечивает фильтрацию отсчетов, полученных в подводном положении дрейфтера. В качестве датчиков атмосферного давления в дрейфтерах, развернутых в Черном море, использовались пьезорезистивные преобразователи типа *MS5534 (Intersema, Швейцария)*. Исследования метрологических характеристик этих датчиков, проведенные фирмой «Марлин-Юг» с целью оценивания возможности их применения в дрейфующих буях, показали, что при индивидуальной градуировке в диапазоне давлений от 850 до 1050 гПа погрешность не превышает 1 гПа в течение года.

База дрейфтерных данных. Получаемая по глобальной телеметрической системе распределения (*GTS*) дрейфтерная информация содержит сбои различных типов, и использование таких данных может привести к ошибочным результатам. В связи с этим для создания достоверной базы данных (БД) были разработаны интерактивные программы выявления и исключения сбойных ситуаций. Фильтрация данных выполняется в два этапа: 1) фильтрация по результатам измерения занывривания; 2) фильтрация грубых сбоев.

Фильтрация по результатам измерения занывривания. Фильтрации по занывриванию подвергаются первичные данные о координатах буюв и ТПМ. В результате фильтрации для последующего анализа выбираются только данные, полученные при лагранжевом дрейфе буя. Критерием наличия паруса служит информация о средней продолжительности пребывания поплавка дрейфтера в притопленном состоянии, получаемая по каналу измерения занывривания. Продолжительные нулевые показания по этому каналу свидетельствуют об обрыве подводного паруса. Последующее движение буя не может рассматриваться как дрейф лагранжевой частицы, и, следовательно, его траектория не может использоваться для оценивания параметров поверхностных течений.

Необходимость фильтрации по занывриванию первичных данных о ТПМ иллюстрируется рис. 4, где представлены временной ряд данных по каналу измерения занывривания и соответствующий ему ряд результатов измерений

ТПМ (дрифтер *SVP-B* № 40427). Обрыв подводного паруса приблизительно в третьей декаде апреля приводит к тому, что датчик температуры оказывается на границе раздела вода – воздух, и его показания с этого времени в значительной степени определяются суточным ходом температуры воздуха.



Р и с. 4. Временные ряды данных о ТПМ и заныривании (дрифтер *SVP-B* № 40427)

Фильтрация по заныриванию выполняется по специально разработанной программе, а ее результатом является массив лагранжевых данных. В этом массиве автоматически оказываются также все данные дрифтеров *SVP-BTC* о профилях температуры и дрифтеров *SVP-BT* о температуре на глубине 12 м, поскольку обрыв подводного паруса приводит к потере подповерхностных датчиков температуры.

Фильтрация грубых сбоев в результатах измерения температуры.

Для фильтрации сбоев в рядах данных о поверхностной (все типы буев), подповерхностной (буи *SVP-BT*) температурах и о профилях температуры верхнего слоя моря (буи *SVP-BTC*) разработана программа, по которой обрабатывается соответствующий массив лагранжевых данных. Программа позволяет в интерактивном режиме обнаружить сбойное измерение и удалить его. Отбраковка результатов измерений температуры воды выполняется на основании двух последовательно применяемых критериев. В качестве первого критерия принимается во внимание диапазон физически значимых температур верхнего слоя моря в районах дрейфов буев, в качестве второго – заданное

оператором пороговое значение градиента температуры. Выборки, значения температуры в которых превышают пороговое значение, считаются сбойными и переносятся оператором в файл сбойных измерений. Оператор может подтвердить свой выбор или отказаться от него. Значения применяемых критериев могут быть изменены оператором в зависимости от условий измерений (времени года, географического положения буя, горизонта измерений и др.).

Процедура фильтрации первичных временных рядов измерений температуры позволяет существенно повысить достоверность информации, помещаемой в БД, однако не гарантирует полного исключения сбоев. Дальнейшее использование БД для решения конкретных научно-прикладных задач не исключает необходимости выполнения дополнительной фильтрации.

Фильтрация грубых сбоев в результатах измерения атмосферного давления. Процедура фильтрации сбоев в рядах данных об атмосферном давлении аналогична методике фильтрации данных по температуре, приведенной выше. При этом отсчеты, значения градиентов давления в которых превышают 1 гПа/ч, классифицируются как сомнительные. Решение по таким реализациям принимается по результатам анализа монотонности значений давления в последующих отсчетах и, если это возможно, с привлечением данных, полученных от других источников в совместимом пространственно-временном масштабе. Такими источниками могут служить аналогичные буи, дрейфовавшие в том же районе.

Выбор формата представления данных. При построении БД мы исходили из необходимости обеспечения оперативного доступа, надежности хранения и документирования данных, а также возможности обмена данными между научными сообществами в рамках международных проектов.

Форматы представления научных данных должны отвечать следующим требованиям: способность к объединению в одном файле записей самых разных типов и структур; ориентация на большие объемы данных; гарантируемая форматом и поддерживаемая его инструментарием мобильность; обеспечение быстрого ввода/вывода; эффективное хранение на различных носителях; расширяемость. Участниками Европейской конференции по объектно-ориентированному программированию *ECOOP (European Conference on Object-Oriented Programming)* был рекомендован разработанный по программе *Unidata* Университетской корпорации по атмосферным исследованиям (*University Corporation for Atmospheric Research, UCAR*) формат *netCDF (network Common Data Form)*, который и был принят для решения задачи создания базы дрейфтерных данных. Формат и интерфейс *netCDF* обеспечивают хранение и обработку дрейфтерных данных в переносимом и самоопределяемом виде. Был разработан пакет утилит для манипулирования данными, представленными в формате *netCDF*, и обеспечения произвольного доступа к ним как поэлементно, так и по блокам.

Структура БД. БД дрейфтеров была создана на основе формата хранения данных *netCDF* с использованием программного пакета *MATLAB 7.0*. Первичные данные для каждого дрейфтера, включенного в БД, были записаны в

одном или нескольких текстовых файлах различной структуры. В них содержится информация, полученная собственно с измерительных каналов, координаты дрейфера и время наблюдения, данные о режимах функционирования аппаратуры. С целью преобразования различных структур данных к универсальному виду была разработана программа *CreateBD.m*, которая считывает исходные данные дрейферов (файл контактных измерений и файл наблюдений), создает общий массив измерений всех дрейферов с учетом их типа и записывает соответствующие данные в файлы БД *netCDF*.

База дрейферных данных состоит из 4 файлов, каждый из которых содержит результаты последовательно усложняющихся уровней обработок: БД уровня 1 – первичные данные; БД уровня 2 – данные уровня 1, отфильтрованные по результатам измерения зануривания (база лагранжевых данных); БД уровня 3 – отфильтрованные на предмет сбоев данные по атмосферному давлению и лагранжевые данные по температуре и координатам; БД уровня 4 – добавлена таблица координат, полученных с помощью разных методов интерполяции координат буев из БД уровня 3. Доступ к базе дрейферных данных возможен по согласованию с дирекцией МГИ НАН Украины (ocean@alpha.mhi.iuf.net).

Пример сопоставления результатов моделирования поля ТПМ с базовыми данными дрейферных измерений. Одно из направлений использования базы дрейферных данных – привлечение дрейферной информации для оценивания точности модельных расчетов циркуляции вод Черного моря [5]. Система моделирования циркуляции вод Черного моря в настоящее время находится на этапе тестирования. В ее состав входят бассейновая и волновая модели, с помощью которых выполняются расчеты полей температуры, солености, скорости морских течений, возвышений уровня морской поверхности, высоты и направления распространения волн с разрешением 5 км. В дополнение к бассейновой модели в составе системы функционируют вложенные модели циркуляции для отдельных районов акватории Черного моря, с помощью которых выполняются расчеты на сетке с более высоким пространственным разрешением – 1 км. Данные расчетов поставляются пользователям в виде карт полей, представленных на регулярно обновляемом интернет-сайте <http://dvs.net.ua/mp>. Ниже в качестве примера приведены методика и результаты сопоставления модельных оценок и контактных измерений дрейфующими буями ТПМ.

Методика. Погрешность оценивания точности модельных расчетов содержит составляющие, обусловленные рядом влияющих факторов: во-первых, несинхронностью во времени и пространственным несовпадением точек локализации дрейферов с узлами модельной сетки, а также несоответствием пространственно-временных масштабов дрейферных измерений и результатов модельных расчетов ТПМ; во-вторых – погрешностями исходных данных, используемых при проведении модельных расчетов; в-третьих, несовершенством самой модели. Все эти факторы могут приводить к значительным погрешностям результатов сопоставления, особенно в условиях сильно-

го суточного прогрева верхнего слоя моря, прибрежных апвеллингов, температурных фронтов, в областях активной мезо- и мелкомасштабной изменчивости поля ТПМ. Хотя перечисленные особенности встречаются относительно редко (не более 10 % случаев), они могут приводить к появлению аномально больших отклонений между результатами модельных расчетов и измерениями *in situ*. Подобные аномальные ситуации ни в коем случае не должны исключаться из дальнейшего рассмотрения, так как именно они в первую очередь могут содержать ценную информацию, необходимую для дальнейшего совершенствования модели и процедур подготовки исходных данных для выполнения модельных расчетов. Но в то же время их нельзя анализировать таким же образом, как и однородную часть тестового массива.

С учетом указанных влияющих факторов в процедуру сопоставления результатов модельных расчетов с дрейфтерной информацией были включены следующие этапы: анализ однородности массивов данных; формирование подмножеств однородных и аномальных данных; анализ с привлечением всей доступной дополнительной информации подмножества аномальных данных с целью выяснения причин возникновения аномальных ситуаций; расчет статистических оценок отклонений для однородного массива данных и массива данных, объединяющего однородные данные и данные из аномального подмножества, неоднородность которых либо осталась не объясненной, либо связана с физическими особенностями поля ТПМ.

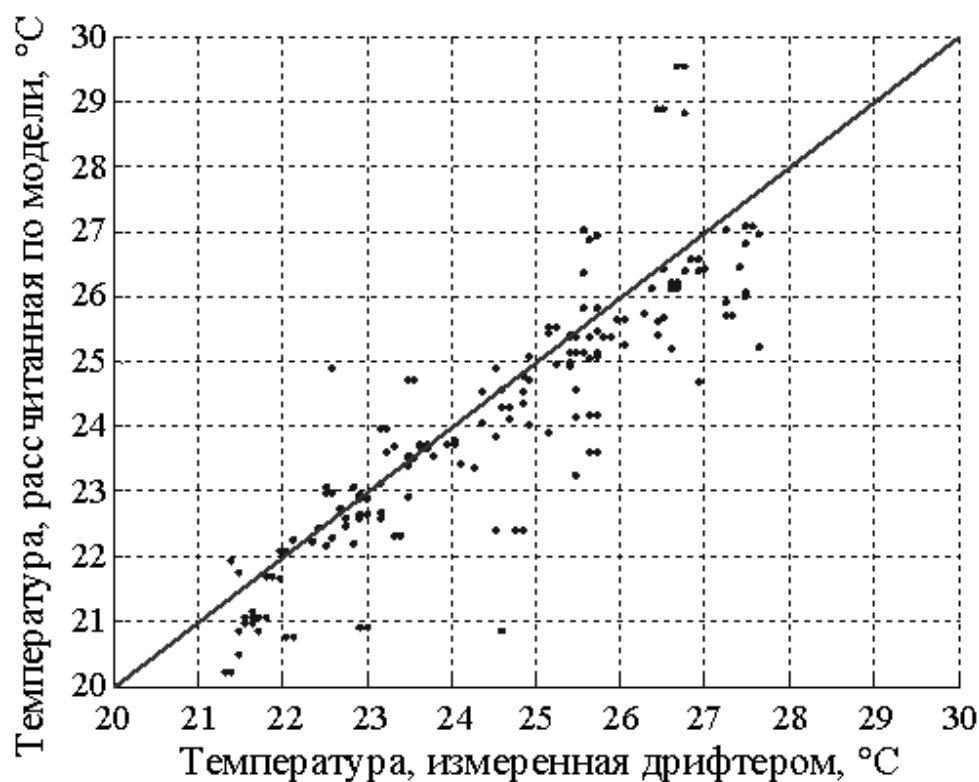
Для выделения аномальных ситуаций при сопоставлении данных модельных расчетов и измерений *in situ* были использованы методы робастной статистики. Они основаны на построении робастных регрессионных оценок коэффициентов линейной регрессии величин ТПМ, рассчитанных по модели, на величины, измеренные с помощью дрейфтеров. В результате применения итерационно-взвешенного метода наименьших квадратов [6] были получены оценки коэффициентов регрессии, величины отклонений между модельными и контактными значениями ТПМ и веса w_i этих отклонений. Веса отклонений несут информацию об уровне аномальности сопоставляемых пар величин ТПМ. Чем меньше вес, тем выше уровень аномальности соответствующей пары сопоставляемых величин. Это свойство используемого алгоритма, как показано ниже, является ключевым для выделения аномальных измерений.

Выявленные аномальные случаи подвергались последующему анализу с привлечением дополнительной метеорологической, гидрологической и спутниковой информации. Ситуации, в которых возможно однозначное объяснение возникших аномальных расхождений, например, погрешностями в исходных данных для модельных расчетов, исключались из дальнейшего рассмотрения. Ситуации, в которых большие величины отклонений могут быть объяснены физическими особенностями изменчивости поля ТПМ или которые не допускают однозначной интерпретации и относятся к сомнительным случаям, оставались в тестовых массивах данных. В качестве основных статистических характеристик отклонений между модельными расчетами и дан-

ными контактными измерениями нами использовались цензурированные средние и среднеквадратичные отклонения [7].

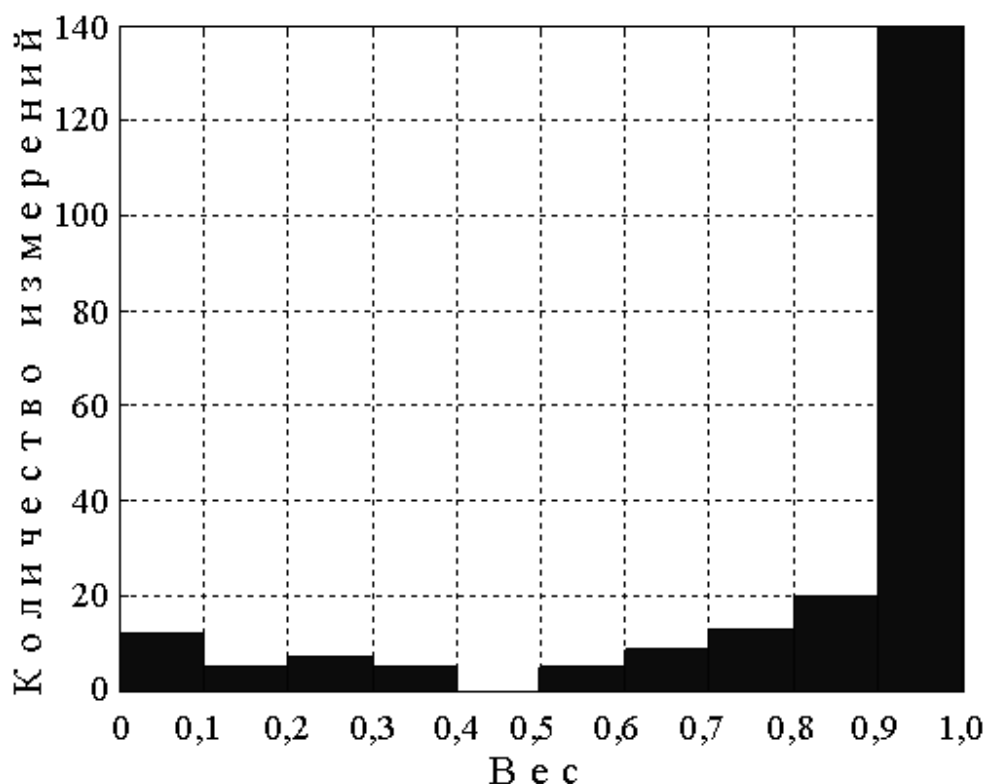
Результаты. Предложенный подход иллюстрируется примером сопоставления модельных расчетов поля ТПМ и результатов контактных измерений, полученных с помощью дрейфтеров *SVP-BTC* в июле – сентябре 2006 г. Для этого был сформирован тестовый массив данных. При его формировании было необходимо обеспечить пространственно-временную квазисинхронность расчетов по модели в точках локализации дрейфтеров. На основе работы [8] значение порога по времени было принято равным 1 ч, а величина порога по пространству – половине шага сетки модели по широте и долготе, т.е. приблизительно 2,4 км. В результате выполнения этой процедуры был сформирован тестовый массив, содержащий 216 совместных измерений.

В соответствии с первым этапом были получены стандартные оценки среднего и среднеквадратичного отклонений между результатами модельных расчетов ТПМ и измерениями дрейфтеров. Их величины составили соответственно $-0,37$ и $0,94$ °C. Скаттерограмма значений ТПМ, рассчитанных по модели и измеренных *in situ*, представлена на рис. 5.



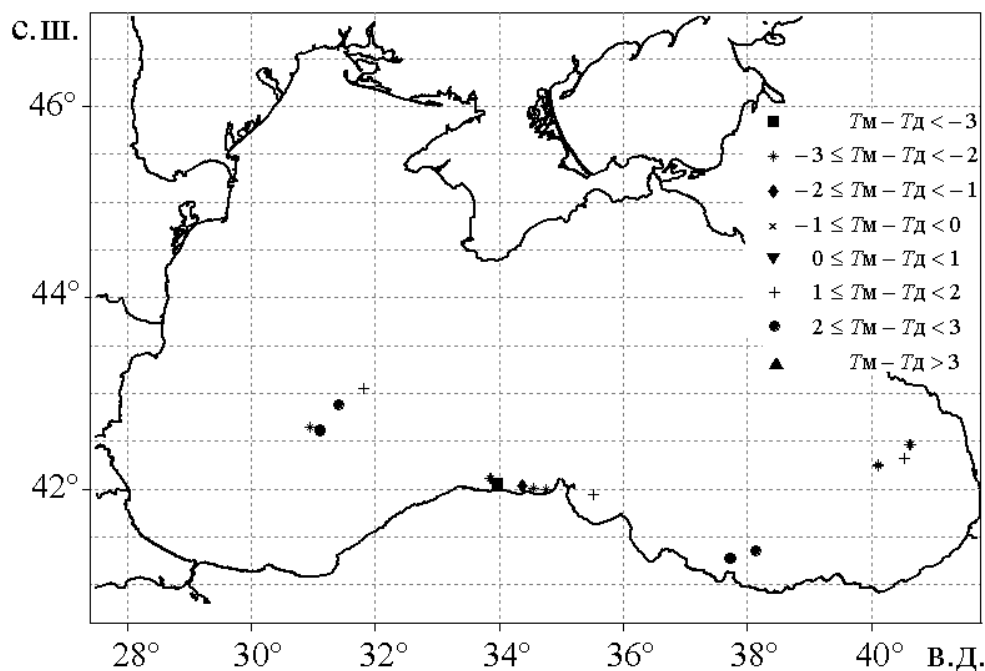
Р и с. 5. Скаттерограмма значений ТПМ, рассчитанных по модели и измеренных *in situ* (июль – сентябрь 2006 г.)

Полученные результаты свидетельствуют о том, что в сформированной выборке есть пары данных с аномальными отклонениями. Для выделения аномальных ситуаций анализировались веса w_i всех сопоставляемых пар ТПМ, полученные в результате робастного оценивания. Их гистограмма приведена на рис. 6. Большой части сопоставляемых данных соответствуют веса, близкие к 1. Именно эти данные относятся к однородной части тестового массива. Наименее часто встречаются значения с весами $w \in [0,3 - 0,6]$. По мере дальнейшего уменьшения веса частота встречаемости соответствующих пар ТПМ незначительно увеличивается. Это говорит о том, что пороговое значение веса можно принять равным 0,5. Данные с весами, меньшими 0,5, относятся к аномальным ситуациям сопоставления, а оставшиеся – к однородной части тестового массива.



Р и с. 6. Гистограмма весов отклонений между модельными и измеренными *in situ* значениями ТПМ (июль – сентябрь 2006 г.)

В результате применения этого подхода к аномальным ситуациям отнесено 29 случаев сопоставления. Пространственное распределение точек с аномальными отклонениями между результатами моделирования и данными контактных измерений ТПМ показано на рис.7.



Р и с. 7. Географическое распределение точек с аномальными отклонениями между значениями ТПМ, рассчитанными по модели T_m и измеренными дрейфтерами T_d

Анализ полученных результатов позволяет сделать некоторые выводы относительно причин возникновения аномальных ситуаций. Прежде всего, из рисунка видно, что большое количество точек с аномальными отклонениями группируется вблизи береговой линии. Объяснить это можно рядом причин. Во-первых, в прибрежных районах наблюдается существенная неоднородность поля ТПМ, например, в результате апвеллингов. Во-вторых, модельные значения ТПМ для районов мелководья могут содержать ошибки задания граничных условий из-за погрешности дискретизации модели. В-третьих, из-за погрешности дискретизации береговой линии для точек, расположенных вблизи нее, возможно отсутствие спутниковых данных о ТПМ. Вследствие этого не происходит ассимиляции спутниковых данных о температуре в непосредственной близости от берега и модель имеет тенденцию релаксировать к режиму, соответствующему расчетам без ассимиляции ТПМ. С учетом особенностей прибрежных данных из дальнейшего рассмотрения были исключены 15 точек. Именно среди них отмечаются наиболее экстремальные величины отклонений. В результате общее число аномальных точек уменьшилось до 14. Оставшиеся аномальные случаи были разделены на пары с положительными и отрицательными отклонениями. В результате дальнейшего анализа было установлено, что по два случая с отрицательными отклонениями приходится на отсутствие ассимиляции спутниковых данных о ТПМ из-за мешающего влияния облачности на протяжении не менее 24 ч до момента сопоставления и на возможное влияние ошибок в этих данных из-за наличия

холодной пленки при слабых, по данным Национального центра прогноза окружающей среды *NCEP (National Centers for Environmental Prediction)*, ветрах. Еще в двух случаях положительные аномальные отклонения объясняются эффектом сильного дневного перегрева верхнего слоя моря в условиях, близких к штилевым. Таким образом, еще 6 точек должны быть исключены из рассмотрения. Оставшиеся 8 аномальных отклонений не поддаются интерпретации и оставлены в тестовом массиве для дальнейшего анализа. После исключения 21 аномальной точки и повторной обработки массива данных для сопоставления значения математического ожидания и среднеквадратичного отклонения составили $-0,30$ и $0,68$ °C соответственно. Большое отрицательное значение математического ожидания объясняется систематическими погрешностями в данных о температуре поверхности Черного моря, восстанавливаемых по информации Национального агентства по изучению океана и атмосферы *NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)* и усваиваемых в модели. Значение среднеквадратичного отклонения на 10 % меньше, чем приведено в работе [8].

Поскольку климатические условия 2003 и 2006 гг. были примерно одинаковыми и методология сопоставления за прошедший период принципиально не изменилась, можно предположить, что повышение точности результатов моделирования поля ТПМ связано как с совершенствованием процедуры ассимиляции спутниковых данных о ТПМ в модели циркуляции вод Черного моря, так и с повышением достоверности привлекаемой для сопоставления дрейфтерной информации.

Заключение. На основе анализа данных черноморского дрейфтерного эксперимента 2001 – 2006 гг. были получены следующие основные результаты:

- создана БД дрейфтерного мониторинга Черного моря;
- предложены методы фильтрации первичных дрейфтерных данных, что позволило повысить достоверность информации, экспортируемой в БД;
- повышена достоверность восстановления траекторий дрейфующих буйев путем применения более совершенных алгоритмов интерполяции данных спутниковой системы определения координат платформ и сбора данных *Argos*;
- систематизация дрейфтерных данных и повышение их достоверности позволили значительно улучшить качество и оперативность результатов модельных расчетов циркуляции вод Черного моря.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Толстошеев А.П., Лунев Е.Г., Мотыжев В.С. Развитие средств и методов дрейфтерной технологии применительно к проблеме изучения Черного моря // *Океанология*. – 2008. – 48, №1. – С. 149 – 158.
2. Griffa A., Kirwan A.D., Mariano A.J. et al. Lagrangian analysis and prediction of coastal and ocean dynamics. – Cambridge: Cambridge University Press, 2007. – P. 39 – 67.
3. Bograd S.J., Rabinovich A.B., Thomson R.E. et al. On sampling strategies and interpolation schemes for satellite-tracked drifters // *J. Atmos. Ocean. Technol.* – 1999. – 16, №7. – P. 893 – 904.
4. Толстошеев А.П., Лунев Е.Г., Коротаев 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.

5. Демьяшев С.Г., Коротав Г.К. Численная энергосбалансированная модель бароклинных течений океана с неровным дном на сетке *C* // Численные модели и результаты калибровочных расчетов течений в Атлантическом океане. – М.: ИВМ РАН, 1992. – С. 163 – 231.
6. Holland P.W., Welsh R.E. Robust regression using iteratively reweighted least-squares // Commun. Statist: Theory and Meth. – 1977. – 6, №9. – P. 813 – 827.
7. Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика: основы моделирования и первичная обработка данных. – М.: Финансы и статистика, 1983. – 472 с.
8. Ратнер Ю.Б., Баянкина Т.М. Сопоставление величин поверхностной температуры, полученных по модели динамики Черного моря и данным *SVP*-дрифтеров в марте – августе 2003 г. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2004. – Вып. 11. – С. 51 – 63.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь

Материал поступил
в редакцию 21.01.08
После доработки 11.04.08

ABSTRACT Features of creation of the database composed based on the materials of the drifter experiment carried out in the Black Sea in 2001 – 2006 are examined. Information on all the drifter deployments in the sea is presented. The criteria used for filtering primary data, the principles of formation of the drifter database and its structure are considered. The method and the results of comparison of the model sea surface temperature estimates with those measured directly by the drifters are given as an example.