

Автоматизация научных исследований морей и океанов

УДК 551.46.08

А.С. Самодуров, В.З. Дыкман, В.А. Барабаш, О.И. Ефремов,
А.Г. Зубов, О.И. Павленко, А.М. Чухарев

Измерительный комплекс «Сигма-1» для исследования мелкомасштабных характеристик гидрофизических полей в верхнем слое моря

Описан новый измерительный комплекс для исследования мелкомасштабных процессов в верхнем деятельном слое моря. Обосновывается актуальность создания такого типа комплекса, очерчен круг задач, для решения которых он может использоваться. Теоретически оценены масштабы разрешения горизонтальных и вертикальных неоднородностей при измерениях в режиме вертикального зондирования. Представлены основные технические характеристики комплекса. Приведены результаты стендовых и натурных испытаний, подтверждающие соответствие рассчитанных и фактических технических возможностей комплекса. Описаны конструктивные особенности различных вариантов измерительного комплекса «Сигма-1» (позиционный вариант «Сигма-1П» и зондирующий «Сигма-1З»).

Введение. Исследование мелкомасштабных процессов представляет собой одно из важных направлений океанологии, которое получило существенный импульс для своего развития в середине прошлого столетия с введением в практику натурных измерений высокоразрешающих *CTD*-зондов. Первоначальный период наблюдений характеризовался активным усвоением и накоплением новой информации, в течение которого даже высказывалось мнение о том, что получаемые результаты измерений связаны с несовершенством используемой аппаратуры: традиционное применение батометров Нансена в практике измерений привело к созданию определенного стереотипа о гладкости вертикального строения гидрофизических полей океана. Затем пришло осознание того, что наблюдаемые явления реальны и представляют собой отражение действия широкого спектра процессов различной физической природы и различных пространственно-временных масштабов. В качестве общего термина для определения результата действия этих процессов, формирующих «негладкость» вертикальных профилей гидрофизических характеристик на масштабах от нескольких десятков до одного метра, было введено словосочетание тонкая структура (ТС) гидрофизических полей.

Среди физических механизмов, оказывающих влияние на формирование ТС океана, можно назвать: кинематический эффект внутренних волн, интрузионный обмен через фронтальные зоны, особенности рельефа дна и придон-

©А.С. Самодуров, В.З. Дыкман, В.А. Барабаш, О.И. Ефремов, А.Г. Зубов, О.И. Павленко, А.М. Чухарев, 2005

ное трение, плотностную конвекцию и опрокидывание поверхностных волн, различные проявления механизма дифференциально-диффузионной конвекции, локальное перемешивание вследствие сдвиговой неустойчивости и опрокидывания внутренних волн, береговой сток, обмен через проливы, подводную вулканическую деятельность и донный геотермальный поток тепла, таяние морского льда и другие.

Одной из основных особенностей физических механизмов формирования и эволюции ТС, важной с точки зрения приложений, служит их вклад в процессы вертикального и горизонтального обмена, а также процессы преобразования энергии в океане. Наряду с крупномасштабной циркуляцией, синоптическими вихревыми образованиями, волнами различной природы они принимают участие в перераспределении и диссипации энергии, переносе и диффузии тепла, соли, различных химических и биологических веществ естественного и искусственного происхождения. Постановка и решение экологических задач невозможны без детального знания механизмов обмена в естественных бассейнах. В этом, прежде всего, состоит актуальность исследования обсуждаемых явлений.

Вместе с тем для количественного описания процессов вертикального обмена в море необходимы надлежащие измерения характеристик, контролирующих потоки тепла, соли и других растворенных химических веществ, на вертикальных масштабах менее 1 м (общее определение — микроструктура). Как неотъемлемую составляющую, в число таких характеристик необходимо включить и пульсации скорости. Для решения указанной выше проблемы был разработан и изготовлен измерительный комплекс «Сигма-1», который позволяет производить измерения ТС и микроструктуры гидрофизических полей как в режиме зондирования, так и в позиционном режиме с неподвижного основания. Описанию особенностей и возможностей комплекса «Сигма-1», а также первых результатов его использования в натурных условиях посвящена предлагаемая работа.

Краткое описание комплекса «Сигма-1». Многофункциональный измерительный комплекс «Сигма-1», предназначенный для исследования мелкомасштабных процессов в верхнем 100-метровом слое моря, был создан в отделе турбулентности совместно с сотрудниками отдела гидрофизики шельфа МГИ. Зондирующий вариант «Сигма-13» имеет две модификации: кабельную (питание и передача информации осуществляются по грузонесущему кабелю) и автономную (питание от батареи аккумуляторов с накоплением информации во флэш-памяти). Достаточно подробное описание комплекса приведено в работе [1].

Комплекс «Сигма-1» позволяет измерять три компоненты пульсаций вектора скорости течения U, V, W , температуру и электропроводность воды, пульсации температуры и электропроводности, гидростатическое давление. Характеристики измерительных каналов приведены в таблице. Помимо измерителей основных гидрофизических параметров комплекс снабжен также системой контроля положения его условной оси относительно магнитного меридиана (азимут) и плоскости горизонта (крен — дифферент), что позволяет учитывать движения самого прибора и связать измеренные

величины компонент вектора скорости течения с неподвижной системой отсчета.

Технические характеристики измерителя «Сигма-1»

Измеряемые параметры	Диапазон	Разрешение	Погрешность	Частотный диапазон	Частота дискретизации
Пульсации компонент вектора скорости течения U' , V' , W'	± 2 м/с	10^{-3} м/с	$\pm 10\%$	0,1 – 20 Гц	Дискретность измерений по средним величинам 20 Гц, по пульсациям – 100 Гц
Температура	0 – 30 °С	0,01 °С	$\pm 0,5^\circ$	0 – 2 Гц	
Пульсации температуры	$\pm 2^\circ$	0,001 °С	$\pm 5\%$	0,1 – 20 Гц	
Электропроводность	0 – 0,9	0,00025	$\pm 5 \cdot 10^{-3}$	0 – 2 Гц	
Пульсации электропроводности	0,005	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$\pm 5\%$	0,1 – 20 Гц	
Крен и дифферент прибора	$\pm 20^\circ$	0,01°	$\pm 1^\circ$	0 – 2 Гц	
Угол азимута прибора	0 – 360°	1,0°	$\pm 5^\circ$	0 – 2 Гц	
Давление на горизонте	0 – 1 МПа	$5 \cdot 10^{-4}$	$\pm 0,5\%$	–	

В состав комплекса «Сигма-1» входят модули различного функционального назначения: измерители гидрофизических параметров; многоканальный аналого-цифровой преобразователь — АЦП; системный контроллер, управляющий работой АЦП; энергонезависимая память (в автономной модификации); интерфейс кабельной связи (в кабельной модификации), обеспечивающий передачу измерительной информации на бортовое устройство комплекса и его питание по двухпроводной линии; преобразователь питающих напряжений.

Для приема и обработки информации, поступающей с комплекса «Сигма-1», был создан набор программ, обеспечивающих прием и запись информации через коммуникационный порт компьютера в реальном режиме времени. Прием информации сопровождается графической визуализацией на экране монитора измеряемых параметров, что позволяет наблюдать за их изменениями и оперативно корректировать условия работы прибора во время проведения эксперимента.

Для статистической обработки информации, полученной измерительным комплексом «Сигма-1», создан набор программ, объединенных графическим пользовательским интерфейсом. Эти программы позволяют производить предварительную обработку данных (сглаживание, фильтрацию и т. д.), применять спектральный анализ. Программы работают в диалоговом режиме, реализована удобная визуализация анализируемых данных и спектральных характеристик.

Все описанные программы в достаточной степени унифицированы и могут быть использованы для обработки данных, полученных с помощью других приборов.

Влияние движений носителя аппаратуры на диапазон измеряемых флуктуаций скорости течения. Измеритель пульсаций компонент вектора скорости течения ИПВСТ [2], являющийся базовым элементом комплекса «Сигма-1», имеет электромагнитный датчик сферической формы диаметром $a = 3$ см, который, в соответствии с видом своей пространственной аппаратной функции, ограничивает спектр исследуемых неоднородностей со стороны малых масштабов $\lambda < 1,8 a = 5,4$ см [3].

Максимальный размер измеряемых неоднородностей поля скорости течения в случае зондирующего варианта исполнения комплекса определяется характером движения носителя аппаратуры. При свободном падении массивный зонд движется с некоторой средней скоростью, на которую накладываются дополнительные флуктуации, вызванные наличием пульсаций скорости течения. Параметры среднего движения зонда можно найти, рассматривая его падение в неподвижной воде.

В работе [1] были получены выражения для установившейся скорости падения зонда W_0 и пути разгона L до значения скорости, отличающейся от W_0 примерно на 1%:

$$W_0 = \sqrt{g_3 k^{-1}}, \quad L = \frac{1}{k} \ln h 2,5. \quad (1)$$

Здесь $k = \frac{C_{DZ} \rho_s}{2h\rho_3(1+C_{MZ})}$, $g_3 = \frac{(\rho_3 - \rho_s)g}{\rho_3(1+C_{MZ})}$, C_{MZ} — коэффициент присоединенной массы, ρ_3 — средняя плотность зонда, ρ_s — плотность воды, C_{DZ} — коэффициент сопротивления, h — высота зонда, g — ускорение свободного падения.

В соответствии со схемой расчета, используемой в работе [4], граница полосы пропускания по уровню 0,7 равна:

$$\lambda_T \approx \frac{8\pi h}{C_{DZ}} = 51,5 \text{ м.} \quad (2)$$

Это означает, что для флуктуаций горизонтальной компоненты скорости течения длинноволновая граница регистрируемых зондом неоднородностей определяется только фильтрами верхних частот на входах пульсационных каналов (частота 0,1 Гц) и при $W_0 = 1$ м/с составляет $\lambda = 10$ м.

Для пульсаций вертикальной скорости $\dot{z}$ в [1] получено:

$$\dot{z} = \frac{16h}{3\pi^2 d} \frac{1}{\sqrt{1+\omega^2\tau^2}} u_0 \sin 2\omega t. \quad (3)$$

Здесь d — диаметр зонда, ω — частота горизонтальной флуктуации скорости течения с амплитудой u_0 ,

$$\tau = \frac{2\rho_3(1+C_{MX})}{\rho_s C_{DZ} W_0} h. \quad (4)$$

Из соотношения (3) следует, что флуктуации скорости падения зонда $\dot{z}$ определяются горизонтальной составляющей пульсаций скорости течения u и спадают до амплитудного уровня 0,5 на частоте $\omega = 3\text{с}^{-1}$, что соответствует циклической частоте $f = 1\text{ Гц}$ или длине волны неоднородностей $\lambda = 1\text{ м}$. Таким образом, собственно флуктуации вертикальной составляющей скорости течения могут быть измерены зондом только в относительно высокочастотном диапазоне от 1 Гц до $\sim 20\text{ Гц}$ (примерно соответствует диапазону масштабов от 1 м до 5,4 см), а на низких частотах в этом канале присутствуют помехи от горизонтальных флуктуаций скорости, в соответствии с выражением (3).

При обработке получаемой с помощью зондирующего прибора информации его колебательные движения относительно центра масс учитываются с помощью каналов крена и дифферента.

Распределение основной массы зонда в нижней части цилиндра и использование тормозящего стабилизатора в его верхней части дополнительно повышает курсовую устойчивость зонда.

Лабораторные испытания. В процессе отладки и настройки комплекса «Сигма-1» было проведено два цикла лабораторных исследований характеристик прибора — до натурных испытаний и после.

Для проведения лабораторных испытаний был создан стенд, способный создавать контролируемые колебания сферического электромагнитного датчика по трем осям в неподвижной и движущейся воде [2].

В ходе выполнения лабораторных испытаний ИПВСТ, его трехкомпонентного сферического электромагнитного датчика и электроники установлено:

- значение шумов электродной системы испытываемого датчика и электроники ИПВСТ в полосе частот 0,1 — 20 Гц, регистрируемых в неподвижной воде, соответствует пульсациям скорости не более 0,3 мм/с, что и определяет его пороговую чувствительность;

- вид спектра шумов $S_f \sim f^{-2}$ и его измеренный уровень позволяют судить о небольшом вкладе шумов в регистрируемые пульсации скорости течения;

- диаграмма направленности датчика и характеристики электроники соответствуют рассчитанным и позволяют правильно выделять компоненты вектора скорости течения U' , V' , W' ;

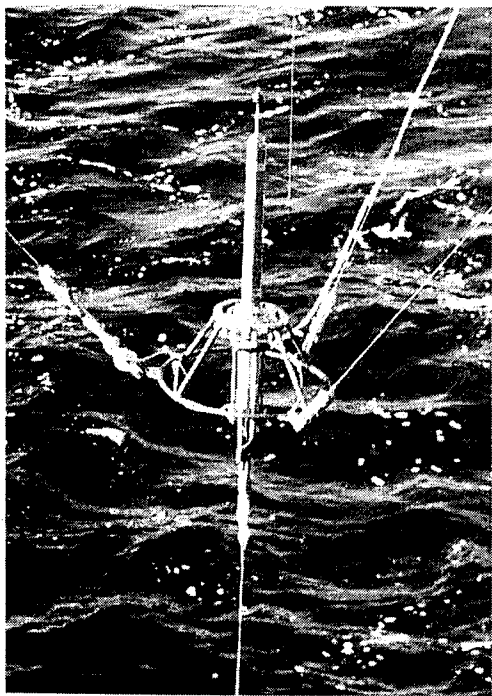
- стендовое оборудование позволяет установить необходимые динамический и частотный диапазоны измерительного тракта ИПВСТ и определить диаграмму направленности.

Натурные испытания. В октябре 2003 г. на океанографической платформе в пос. Кацивели были проведены натурные испытания позиционного варианта комплекса с целью определения некоторых эксплуатационных характеристик, проверки адекватности получаемой информации теоретическим представлениям о характере поля скорости течения в поверхностном взволнованном слое моря, отработки методики измерений и программного обеспечения комплекса.

Чтобы максимально исключить гидродинамическое влияние корпуса прибора и оснастки на зону измерений и по возможности свести к минимуму

графической платформы. Эта система позволяет фиксировать измеритель на выбранном горизонте, малая подвижность обеспечивается с помощью трех растяжек и большого груза, подвешенного на расстоянии 5 – 7 м ниже прибора. Общий вид комплекса, снаряженного для работы в приповерхностном слое, приведен на рис. 1. Регистрация измеряемых величин осуществлялась на различных горизонтах от поверхности до 13 м с выдержкой на каждом горизонте от 10 до 20 мин. В течение 2 дней было проведено 3 серии экспериментов.

В процессе натурных измерений получены записи по всем измерительным каналам и проведена первичная обработка данных. Наблюдалась хорошая повторяемость амплитудных значений величин на одинаковых горизонтах, что говорит о стабильности работы датчиков и измерительных каналов в целом.



Р и с. 1. Комплекс «Сигма-1» (позиционный вариант)

Все приведенные спектры построены по осредненным значениям (по 10 со сдвигом на 10) для большей наглядности наличия пиков на низких частотах.

В результате анализа материалов натурных испытаний позиционного варианта комплекса установлено:

— датчик и электроника ИПВСТ функционируют правильно, что подтверждается характером полученных реализаций трех компонент вектора скорости течения U' , V' , W' , адекватных условиям проведения натурального эксперимента — достаточно сильная зыбь и очень слабая ветровая волна;

На рис. 2 приведены характерные спектры пульсаций скорости, полученные во время эксперимента. На спектрах достаточно хорошо просматриваются пики на частотах, соответствующих двум доминантным системам волн, которые присутствовали во время эксперимента (с периодами ~ 9 с и ~ 4 с). В более высокочастотной области отдельные небольшие пики, очевидно, связаны с собственными колебаниями прибора — соответствующие спектры, построенные для измеренных углов, подтверждают это.

На рис. 3 изображены спектры пульсаций температуры, полученные на разных горизонтах. Отчетливо видно уменьшение интенсивности турбулентных пульсаций с глубиной, что и ожидалось для таких погодных условий, когда основной вклад в турбулизацию слоя вносили поверхностные волны.

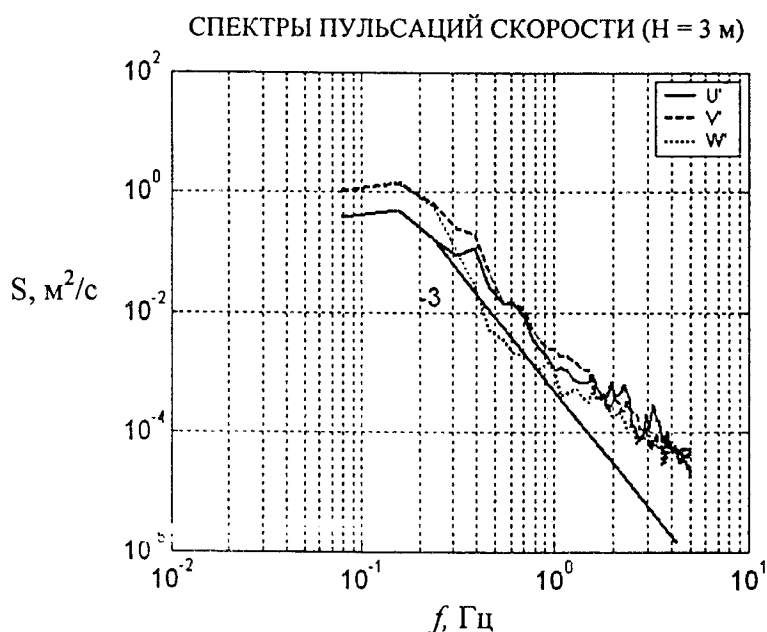
скорости течения U' , V' , W' , адекватных условиям проведения натурального эксперимента — достаточно сильная зыбь и очень слабая ветровая волна;

— характер спектров трех компонент вектора скорости течения, полученных на глубинах более 3 м, не противоречит теоретическим представлениям;

— качество принимаемой информации высокое, сбойных и потерянных кадров не наблюдалось;

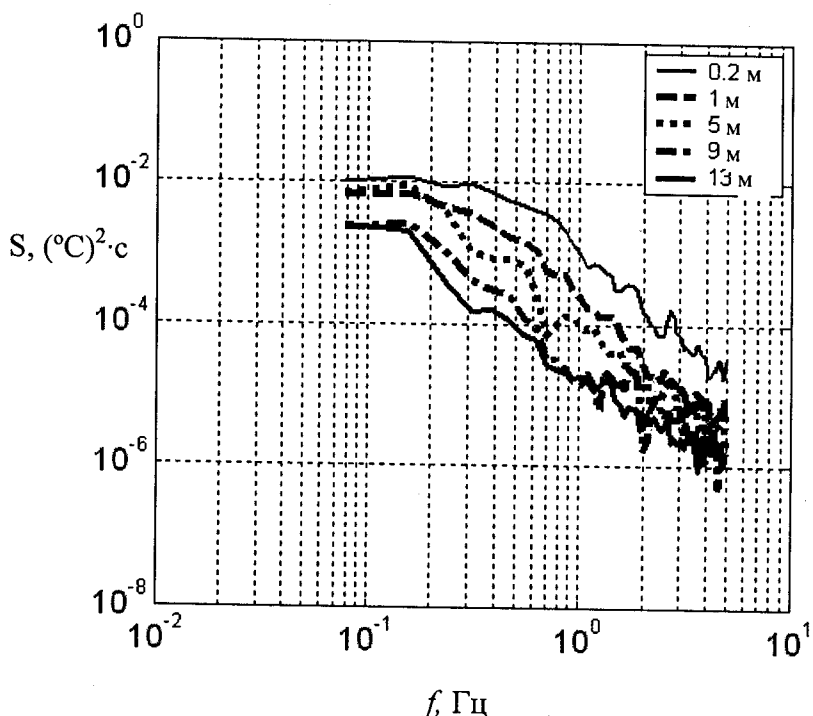
— все измерительные каналы работают в соответствии с заданными характеристиками, программное обеспечение позволяет оперативно принимать и обрабатывать получаемую информацию.

В апреле 2004 г. проводились натурные испытания зондирующего варианта комплекса «Сигма-13» на стационарной океанографической платформе в пос. Кацивели.



Р и с. 2. Спектры пульсаций компонент вектора скорости течения U' , V' , W'

Общий вид зондирующего варианта комплекса «Сигма-13» показан на рис. 4. Здесь представлен рабочий момент — зонд подвешен на П-раме перед началом зондирования. Датчики располагаются в нижней части корпуса; выше находится корпус с электроникой и утяжеляющим грузом; верхняя часть прибора состоит из пустотелого корпуса, обеспечивающего необходимую плавучесть, и гидродинамического стабилизатора — оперения. Связь с прибором осуществляется с помощью специально изготовленного грузонесущего кабеля, обеспечивающего хорошие электрические и механические характеристики. Полностью снаряженный прибор со штатным кабелем опускался в режиме свободного падения от поверхности воды. Средняя скорость установившегося падения составляла приблизительно 0,7 м/с (рис. 5). Глубина, с которой начиналось достаточно стабильное движение, составляла около 6 м.



Р и с. 3. Спектры пульсаций температуры на различных глубинах (с осреднением по 10 значениям)

Пуск прибора из положения, в котором корпус наполовину погружен в воду, уменьшает глубину установления постоянной скорости до 3 м. Колебания прибора в горизонтальной плоскости и его вращение вокруг своей оси также уменьшились и, начиная с глубины 3 м, были соответственно не более $\pm 1^\circ$ (рис. 6) от вертикали и 30° по азимуту. Вращение было плавным и в основном происходило на протяжении



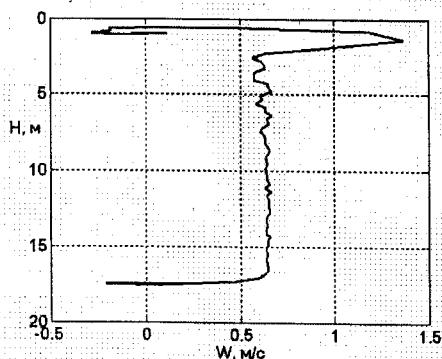
Р и с. 4. Измерительный комплекс «Сигма-13» (кабельная модификация) на борту НИС «Академик» Болгарской академии наук

первых 8 – 10 с до глубины примерно 6 – 7 м. Частота собственных колебаний прибора находится главным образом в пределах 0,15 – 0,3 Гц. На основании проведенных испытаний можно сделать следующие заключения:

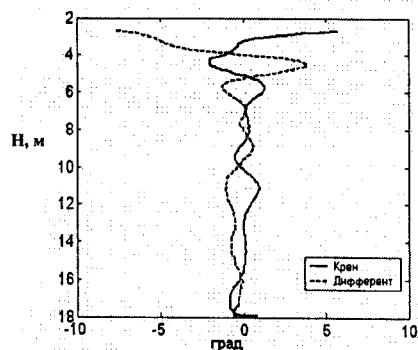
— конструкция корпуса прибора и стабилизатор обеспечивают устойчивое движение прибора с постоянной скоростью начиная с глубины 5 – 7 м, что соответствует рассчитанным данным. Большая начальная скорость (при пуске прибора из полупогруженного состояния) уменьшает время стабилизации движения;

— имеющаяся система контроля положения измерительного комплекса позволяет учитывать собственные движения датчика и фильтровать «паразитные» колебания зонда.

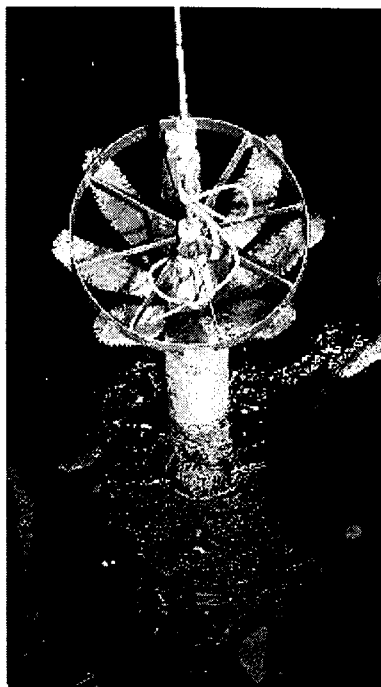
Таким образом, динамические свойства носителя прибора можно считать вполне приемлемыми при измерениях турбулентных пульсаций от нижней частоты 0,5 Гц, а верхняя граница по частоте 15 – 20 Гц, обусловлена характеристикой ИПВСТ и собственной скоростью носителя. Это соответствует диапазону исследуемых масштабов 1,5 – 0,05 м.



Р и с. 5. Зависимость вертикальной скорости комплекса «Сигма-13» от глубины

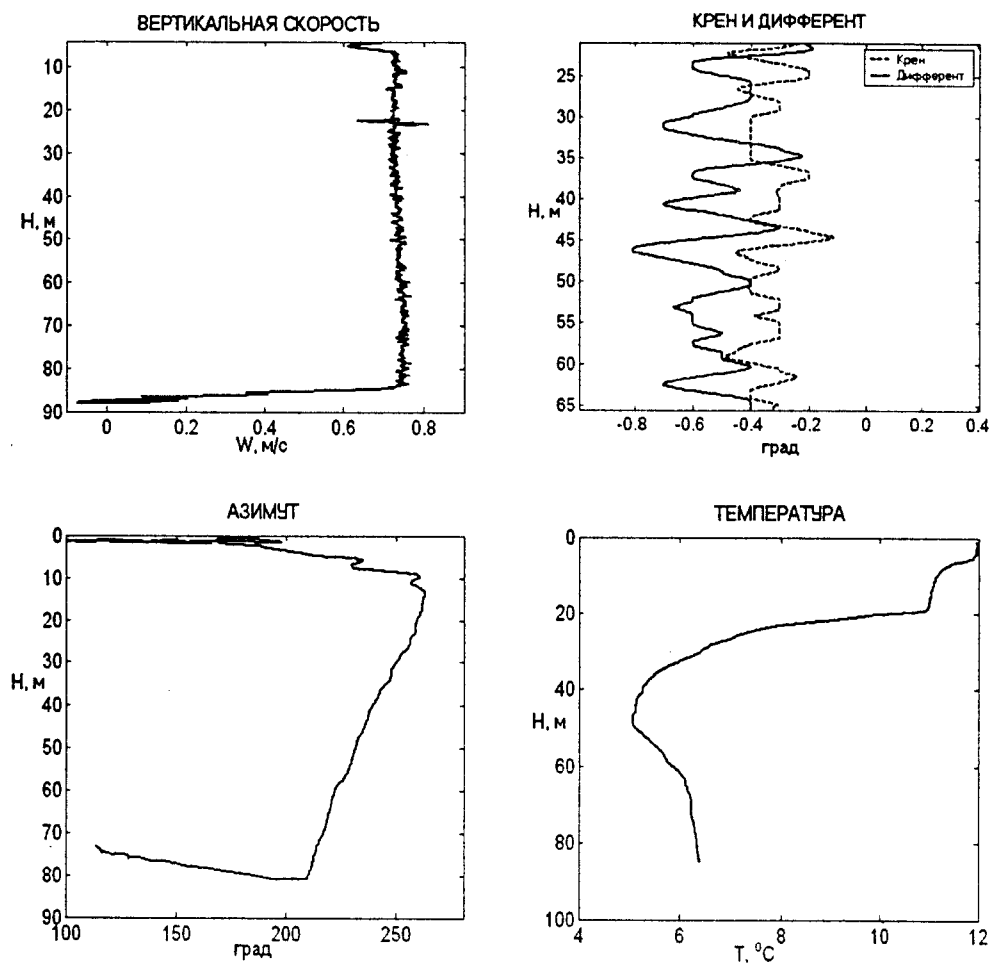


Р и с. 6. Зависимость углов наклона прибора (крена и дифферента) при свободном падении прибора



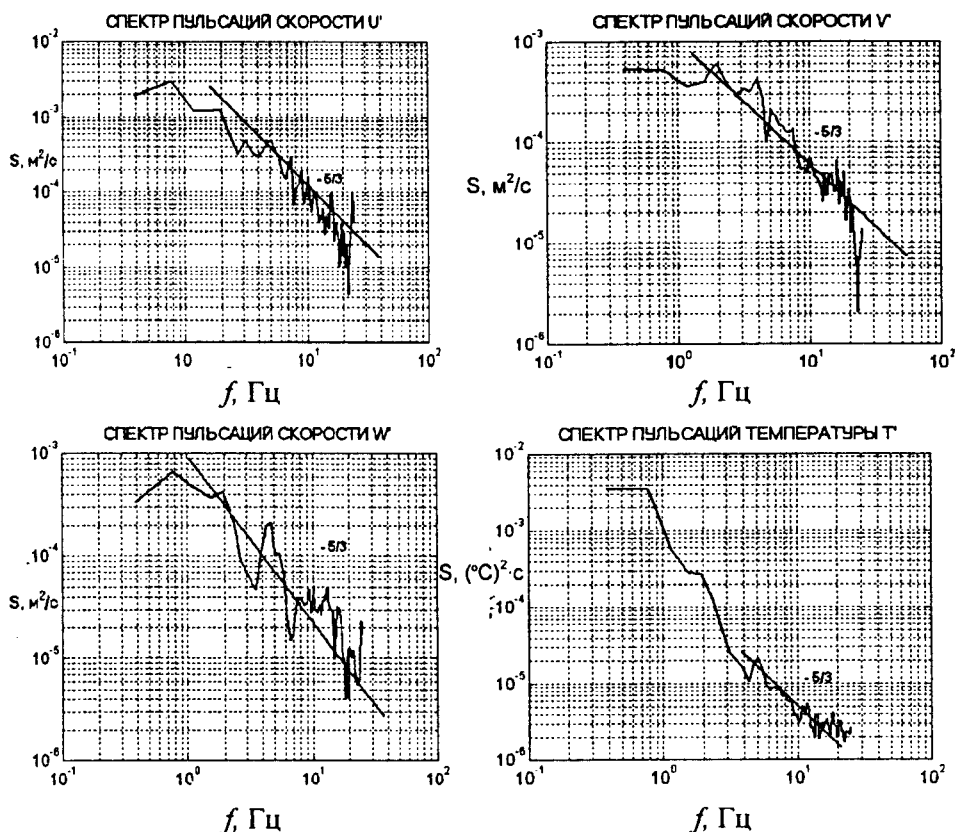
Р и с. 7. Начало зондирования из полупогруженного состояния

Результаты опытной эксплуатации «Сигма-13» в рейсе НИС «Академик». Опытная эксплуатация комплекса «Сигма-13» была осуществлена в экспедиции на НИС «Академик» Болгарской академии наук, выполнявшейся в рамках проекта *GEF/BSERP* «Контроль эвтрофикации, опасных для здоровья веществ и сопутствующих измерений для реабилитации Черноморской экосистемы: Этап 1: *RER/01/G33/A/1G/31/*». На 15 станциях в северо-западной части Черного моря в различных областях исследуемого вихревого образования были проведены 29 зондирований. По результатам анализа полученных данных все основные выводы о характеристиках как носителя, так и измерительной аппаратуры полностью подтвердились.



Р и с. 8. Вертикальная составляющая скорости зондирования, крен и дифферент носителя, положение условной оси комплекса относительно магнитного меридиана и профиль температуры

На рис. 7 показан момент начала зондирования из полупогруженного состояния для быстрого достижения установившейся скорости зондирования, равной примерно 70 см/с (см. рис. 8). Поведение условной оси комплекса — поворот вокруг вертикальной оси, его крен и дифферент — также представлены на рис. 8. На этом же рисунке приведен характерный для района работ профиль температуры. На рис. 9 приведены характерные для этого района спектры пульсаций компонент вектора скорости течения и температуры.



Р и с. 9. Спектры пульсаций трех компонент вектора скорости течения U' , V' , W' и температуры T'

Выводы. На основе вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

— лабораторные и натурные испытания комплекса, а также опытная эксплуатация комплекса «Сигма-1» подтвердили соответствие прибора его назначению и возможность применения при исследовании мелкомасштабных процессов в море;

— варианты комплекса «Сигма-1» — позиционный и зондирующий — позволяют применять его для решения различных физических задач, а набор измеряемых параметров дает возможность количественно описывать мелкомасштабную структуру и динамику гидрофизических полей.

Таким образом, технические и эксплуатационные характеристики измерительного комплекса «Сигма-1» дают возможность использовать его при проведении многоцелевых гидрофизических исследований в верхнем слое океана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дыкман В.З., Багимов И.С., Барабаш В.А. и др. Измерительный комплекс «Сигма-1» для исследования процессов перемешивания и диссипации энергии в верхнем слое моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. — Севастополь: МГИ НАН Украины, 2004. — Вып. 10. — С. 395 – 409.
2. Дыкман В.З., Ефремов О.И. Электромагнитный датчик для измерения флуктуаций вектора скорости течения // Там же. — Севастополь: МГИ НАН Украины, 2000. — С. 318 – 324.
3. Доценко С.В. Теоретические основы измерения физических полей океана. — Л.: Гидрометеоиздат, 1974. — 152 с.
4. Hendricks P.J., Rodenbusch G. Interpretation of velocity profiles measured by freely sinking probes // Deep-Sea Res. — 1981. — 28, A № 10. — P. 999 – 1213.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
г. Севастополь

Материал поступил
в редакцию 01.06.04
После доработки 12.08.04

ABSTRACT New measuring complex for studying small-scale processes in the upper active layer of the sea is described. Urgency of creating the complexes of such a type is grounded. A set of tasks for its application is outlined. Resolution scales of horizontal and vertical fluctuations for the mode of vertical probing are theoretically estimated. Basic technical characteristics of the complex are represented. The submitted results of laboratory and field tests confirm correspondence between the calculated and actual potentials of the complex. Structural features of different versions of the measuring complex «Sigma-1» (a point-to-point operation version «Sigma-1P» and a probing version «Sigma-1Z») are described.