

ПРОБЛЕМЫ ПОСТРОЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕЛКОМАСШТАБНЫХ ПРОЦЕССОВ В МОРЕ

Н.А.Пантелеев, О.И.Ефремов
Морской Гидрофизический институт
НАН Украины
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2

1. Особенности классификации и приборные стратегии. Мелкомасштабные процессы в морях и океанах имеют периоды от долей секунды до десятков минут [1] и занимают крайний правый участок частотного и пространственного спектров энергии океанических движений. Поскольку оба этих спектра достаточно резко спадают, приборы для исследования мелкомасштабных явлений должны обеспечивать, помимо большой частоты съёма данных, также и высокую чувствительность измерительных каналов, в силу малости величин сигнала.

Для исследований в других участках спектра океанических движений - мезомасштабном, синоптическом и ещё более крупномасштабных - важными являются иные свойства аппаратуры, такие, как точность измерений и долговременная стабильность характеристик.

В результате образовались два различных класса океанографических приборов. Развитие средств измерений мелкомасштабных флуктуаций гидрофизических величин шло под лозунгами повышения быстродействия и чувствительности, а также создания методик, позволяющих исключать или контролировать нежелательные смещения и вибрации датчиков. Соответственно в классе приборов, предназначенных для изучения крупномасштабной изменчивости, совершенствовались точные методы измерений и контроля стабильности датчиков, развивались средства обеспечения массовых гидрологических съёмов.

Важное свойство мелкомасштабных процессов - их непосредственная зависимость от явлений более крупных

масштабов, характеристики которых также должны измеряться в течение эксперимента. При этом желательно, чтобы левая, длиннопериодная часть спектра, обеспечиваемая при флуктуационных измерениях, перекрывалась высокочастотным участком, доступным для измерителя соответствующих осреднённых значений.

Возможны две различные приборные стратегии в исследованиях мелкомасштабных океанических процессов. Первая исходит из необходимого обеспечения научных задач и заключается в создании специальных измерительных комплексов с максимально лучшими по быстродействию и чувствительности характеристиками каналов, достигаемыми на момент разработки. Такую стратегию можно назвать экстенсивной.

Примером служат разработанные в конце 80-х годов СКТЬ МГИ АН УССР по заказу отдела турбулентности свободнопадающие зондирующие комплексы ТОПАЗ (МГИ-4105) и ТОПАЗ-М. В этих комплексах погружные устройства (ПУ) оснащены измерительными каналами средних температуры, относительной электрической проводимости (ОЭП), гидростатического давления, трёх компонент вектора скорости в системе координат ПУ, углов крена, дифферента и азимута. Все эти каналы опрашиваются с частотой 20 Гц. Измеряются также пульсационные значения температуры, ОЭП и вертикальной составляющей вектора скорости с частотой 200 Гц. В верхней части ПУ расположены светорадиомаяк и элементы плавучести, в нижней - удерживаемый размыкателями балластный груз, после сбрасывания которого ПУ всплывает. Максимальная глубина зондирования 2000 м.

Для измерений частотных свойств мелкомасштабных процессов в этот же период был разработан автономный турбулиметр АГАТ, оснащённый аналогичным набором измерительных каналов и каналов регистрации собственных перемещений прибора.

Измерители течений ВОСТОК (МГИ-1305) разработаны для градиентных измерений в дополнение к турбулиметру АГАТ. В них, кроме векторно-осреднённых параметров скорости

течения, измеряются также осреднённые значения температуры, ОЭП и гидростатического давления. Дискретность измерений - 15, 30, 45 и 60 с.

Экстенсивная приборная стратегия обладает определенными положительными свойствами.

Измерения крупномасштабного фона здесь целиком подчинены мелкомасштабной задаче, и данные комплексных экспериментов являются действительно уникальными. Кроме того, передовые по ряду характеристик разработки дают толчок развитию приборных средств другого класса, для исследования крупномасштабных явлений, способствуя расширению их частотного диапазона.

К недостаткам этой стратегии относятся высокая стоимость разработки, изготовления, ремонта и эксплуатации сложных измерительных комплексов, которые редко проходят дальше стадии экспериментальных образцов. Перебои в финансировании обычно губительны для экстенсивной стратегии.

Основой другой приборной стратегии, которую можно назвать интенсивной, является максимально возможное использование для мелкомасштабных задач приборов, изначально разработанных применительно под исследования более крупномасштабной изменчивости. Упор здесь делается на анализ резервов увеличения частотного диапазона приборов путём усовершенствования схем обработки данных, а также на "подстройку" мелкомасштабных задач под ограниченные возможности аппаратуры.

Недостатки такой стратегии очевидны. К достоинствам следует отнести меньшие затраты на приборное обеспечение и возможность использования больших массивов данных, получаемых в ходе крупномасштабных экспериментов. Интенсивная стратегия обеспечивает сравнительно большую устойчивость к сокращению финансирования работ.

Возможно, наибольшие основания для применения интенсивной приборной стратегии возникают при исследованиях такого традиционно относимого к разряду мелкомасштабных явления, как вертикальная микроструктура океана. Для главного океанского термоклина принята более детальная классификация

неоднородностей вертикальных профилей, в которой образования с размерами от 100 м до ~1 м относят к тонкой структуре, меньшие - к собственно микроструктуре. Летний температурный скачок в верхнем слое Чёрного моря, иногда занимающий интервал глубин буквально в несколько метров, неосознанно воспринимается как мелкомасштабная неоднородность, хотя и представляет собой сезонное явление. Как будет показано ниже, в этом случае полезны именно тонкоструктурные методы анализа, как и вообще для вертикальных профилей на мелководье.

2. Тонкоструктурные исследования. На практике различные зонды при измерениях в одной точке дают в той или иной степени несовпадающие результаты, причем если в средних профилях расхождение чаще всего невелико, то флуктуационные части обычно существенно отличаются. На участках профилей с потоянными средними градиентами измеряемых параметров, где флуктуации могут считаться однородными по глубине, удобной их характеристикой является распределение интенсивностей по масштабам, или вертикальный спектр. В длинномасштабной области спектра расхождения между зондами, как правило, меньше, и нарастают по мере продвижения к большим волновым числам. Причины таких явлений достаточно многообразны и отражают различие в конструктивных параметрах измерительных устройств.

В гидрофизических приборах лишь немногие параметры морской воды определяются прямыми измерениями. Большую же часть характеристик получают косвенно, то есть путем расчета их по непосредственно измеряемым параметрам. Имеет смысл непосредственно измеряемые параметры называть первичными, а получаемые расчетным путем - вторичными. Анализ возникающих здесь проблем выполнен Калашниковым [2].

В качестве первичных параметров реально могут использоваться температура T , удельная электропроводность κ , скорость распространения звука C и гидростатическое давление P . Для расчета вторичных параметров y_m (соленость S , условная плотность σ_t и др.) достаточно измерять три из четырех указанных

параметров. При этом используются зависимости следующих видов:

$$y_m = f(T, \kappa, P)$$

$$y_m = f(T, \kappa, C)$$

$$y_m = f(T, C, P)$$

$$y_m = f(\kappa, C, P)$$

Второе и четвертое соотношения вряд ли имеют шанс на широкое применение, поскольку в одном из них в разряд вычисляемых параметров попадает давление, а в другом температура. Обе эти величины привычнее и надежнее измерять непосредственно.

Пара температура-электропроводность в качестве первичных параметров оказывается предпочтительней, чем температура-скорость звука. Причина заключается в том, что скорость звука, будучи тесно связанной с температурой воды (в характерном для гидрофизики диапазоне ее изменения), сравнительно меньше реагирует на вариации солености. Удельная электропроводность в этом смысле является более сбалансированным параметром. Важно также, что погрешность измерения скорости звука сравнительно велика.

Все современные гидрологические зонды измеряют в качестве первичных параметров электропроводность, температуру и давление (STD-системы). Для специализированных зондов тонкой структуры ситуация не выглядит столь однозначной, поскольку для них точность расчета вторичных параметров может отступать на второй план по сравнению с пространственным разрешением. При измерениях электропроводности приходится иметь дело с проблемой уменьшения эффективного масштаба осреднения первичного преобразователя, принимая специальные меры, обеспечивающие замыкание линий тока в возможно меньшем объеме. Для скорости звука масштаб осреднения четко фиксируется размерами измерительной базы, что является преимуществом при введении коррекции измерительных каналов с целью повышения пространственного разрешения по вычисляемому параметрам. Примером тонкоструктурного зонда с измеряемой парой температура-скорость звука может

служить разработанный в отделе турбулентности МГИ НАН Украины в 80-х годах Зонд-СТ [3,4].

Однако и для специализированных зондов тонкой структуры использование именно STD-систем в конечном счете оказалось более предпочтительным. Здесь сыграла свою роль возможность использования унифицированных измерительных преобразователей, развитой системы метрологического обеспечения и уменьшение за счет этого расходов на разработку и эксплуатацию тонкоструктурных зондов.

При современном уровне морского приборостроения данные практически любого зонда могут быть использованы для исследования характеристик тонкой вертикальной структуры. Однако, такому применению должен предшествовать тщательный анализ возможностей прибора, ограничений по диапазону вертикальных масштабов и параметрам самого исследуемого явления. Ниже приводятся краткие характеристики зондов, данные которых подвергались тонкоструктурной обработке. Перечень этих приборов включает:

гидролого-гидрохимический зонд ИСТОК-7;

комплекс гидрологический буксируемо-зондирующий МГИ 1201 (Минизонд);

тонкоструктурный зонд Комплекс - 1;

тонкоструктурный зонд Комплекс - 1М;

зонд Н. Брауна Марк Ш.

По методике проведения измерений перечисленные зонды достаточно разнородны. Большинство из них имеют силовую кабель-тросовую связь с судном, что имеет свои достоинства и недостатки. К достоинствам относятся отсутствие проблем с электропитанием погружного устройства и передачей информации, к недостаткам - влияние качки на процесс и результат измерений. Последнее особенно важно, если данные используются для исследования характеристик тонкой структуры и необходимо получить максимально возможное разрешение по глубине.

Тонкоструктурный зонд Комплекс-1 [5] разрабатывался в отделе турбулентности МГИ НАН Украины, совместно с СКТЬ МГИ. Предназначен для измерений температуры, удельной электрической

проводимости, гидростатического давления и пульсаций удельной электрической проводимости морской воды. Измерения проводятся на дрейфовых станциях в режиме зондирования при свободном падении погружаемого устройства вдоль одножильного грузонесущего кабеля на глубину до 2000 метров. Связь бортовой аппаратуры и погружного устройства обеспечивается с помощью индуктора. Питание погружного устройства осуществляется от батареи аккумуляторов. Частота опроса каналов 16,7 герц, пульсационного канала 100 герц. Измерительный преобразователь 15-разрядный.

Тонкоструктурный зонд Комплекс-1М является модернизированным вариантом прибора Комплекс-1. В нем исключен

канал пульсаций электропроводности, но частота опроса всех измерительных каналов - температуры, относительной электрической проводимости и давления - повышена до 50 герц. Разрядность измерительного преобразователя увеличена до шестнадцати, в несколько раз снижено потребление от автономного блока питания в погружном устройстве, уменьшена постоянная времени температурного датчика, а также выполнен ряд конструктивных усовершенствований.

Параметры STD-систем перечисленных зондов несколько различаются. Приводимые ниже данные взяты из технических описаний приборов, использовались также литературные данные [6,7,8].

Таблица

Важные для мелкомасштабных измерений параметры некоторых зондов

Параметры	ИСТОК-7	Минизонд	Комплекс-1	Комплекс-1М	Марк III
Инерционность температуры τ_T , с	0,05	0,05	0,05	0,01	0,03
Наименьший разряд температуры ΔT , $^{\circ}\text{C}$	$0,6 \cdot 10^{-3}$	$10 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$0,5 \cdot 10^{-3}$	$0,5 \cdot 10^{-3}$
Частота опроса f , Гц	10,0	10,0	16,7	50,0	30,0
Наименьший разряд давления ΔP , см	4,0	40,0	4,0	3,0	2,5
Средняя дискретность по глубине Δl , см	10,0	30,0	6,0	2,0	3,3
λ_T , м $T_Z = 0,01 \text{ } ^{\circ}\text{C} / \text{м}$	0,35	3,4	0,42	0,19	0,22
λ_S , м $S_Z = 0,001 \text{ } \text{‰} / \text{м}$	1,6	15,8	1,8	0,85	1,0
λ_S , м $S_Z = 0,003 \text{ } \text{‰} / \text{м}$	0,77	7,6	0,86	0,41	0,5

2.1. Влияние качки. Возможность появления регулярных искажений вертикальных профилей температуры и солености за счет качки исследовалась Пингри [9]. Наличие постоянной времени температурного датчика τ_T приводит к отставанию измеренной температуры T_M от истинной T_R :

$$T_R - T_M = \tau_T dT_M/dt$$

Аналогично из-за временной постоянной канала давления τ_D измеренная глубина Z_M не совпадает с истинной Z_R :

$$Z_R - Z_M = \tau_D dZ_M/dt$$

Истинная глубина при скорости опускания V , периоде качки t_0 ($t_0 = 2\pi/\omega$) и амплитуде смещения точки подвеса D определяется выражением:

$$Z_R = vt + D \sin \omega t$$

Профиль температуры предполагается линейным, с градиентом B :

$$T_R = A - B Z_R.$$

Здесь A - температура на поверхности.

Анализ решений показывает, что нелинейности в зависимостях $T(t)$ и $Z(t)$ имеют циклоидальный характер. Искажения больше при малых скоростях опускания v и больших амплитудах качки D . Более важными являются отклонения от линейности вертикального профиля $T(z)$, которые также циклоидальны, но в двух случаях линейность сохраняется: а) если постоянные времени τ_T и τ_D равны нулю, что в общем понятно, но нереализуемо; б) если эти постоянные равны между собой. Второй вариант является несколько неожиданным и требует осмысления. Такие же соображения справедливы и для канала электропроводности, так что искажения при вычислении профиля солености будут отсутствовать, если постоянные времени всех трех измерительных каналов равны между собой. По-видимому, реализация такой возможности исключения влияния качки должна встречать некоторые затруднения. Методы точной оценки постоянной времени канала давления пока не разработаны, и неясно, насколько этот параметр стабилен. В считающийся безынерционным канал электропроводности задержку пришлось бы вводить искусственно. Более реальным является путь максимально возможного уменьшения всех постоянных времени, с тем, чтобы их разность также была малой.

Приборы ИСТОК-7 и Комплекс-1 имеют τ_T не более 0,05 с, постоянная времени канала давления, τ_D , по некоторым данным, является величиной такого же порядка. Поскольку влияние качки определяется различием в постоянных времени, для простоты оценки удобно положить $\tau_T = 0,05$ с, $\tau_D = 0$. При нулевой постоянной времени канала давления среднее квадратическое значение паразитного возвышения определяется выражением [10]

$$D_H = 1 / \sqrt{2 D \omega \tau_T (1 + \omega^2 \tau_T^2)^{-2}} \quad (1)$$

и при амплитуде качки $D = 1$ м и частоте $\omega = 1$ с⁻¹ (период t_0 порядка 6 секунд) составит $D_H \sim 3,5$ см. Это намного ниже среднего уровня естественных волновых возвышений. Как показано в [10], среднее квадратическое возвышение мелкомасштабных внутренних волн в интервале масштабов компенсационного спектра равно 0,25 м. Паразитные возвышения такого уровня можно получить из (1) при амплитуде качки $D = 2$ м и $\tau_T = 0,2$ с.

Скорость лебедки влияет на вертикальный масштаб помех L , $L = 2\pi v / \omega$. При уменьшении скорости зондирования искажения становятся заметнее на фоне естественных флуктуаций, интенсивность которых падает с уменьшением масштаба. На профилях могут проявляться регулярные ступеньки. Таким образом, главным условием ослабления влияния качки для привязных зондов является малость постоянных времени всех измерительных каналов, в том числе и канала давления. Возможные задержки в последнем необходимо вносить в число контролируемых величин для привязных зондов.

2.2. Влияние дискретности.

Аппаратурные шумы первичных измерительных преобразователей имеют много различных составляющих, рассмотрение которых по отдельности затруднительно. Репрезентативной является совокупная оценка шумов всего измерительного тракта непосредственно по результатам зондирования, путем обработки данных верхнего перемешанного слоя в океане, где градиенты всех параметров часто близки к нулевым. Наименьшее значение измеренных в этих слоях флуктуаций принимается за шумовой уровень прибора. Полученная таким образом для зонда Комплекс-1 шумовая дисперсия канала температуры составляет $0,08 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^2$, что совпадает с уровнем шумов дискретизации, дисперсия которых D_d рассчитывается по формуле [11]:

$$D_d = \Delta^2 / 12,$$

где Δ - цена единицы младшего разряда, равная для "Комплекса-1" $\sim 1 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}$. Это

означает, что остальные шумы аппаратуры много меньше. Такой же вывод был получен Фофоновым, Хейсом и Миллардом [12] для зонда Н. Брауна Марк Ш.

Можно определить, какие ограничения уровень шумов накладывает на применимость зонда для исследования тонкой вертикальной структуры. Такой расчет легко выполнить, если тонкая структура имеет волновое происхождение. Для волновых процессов спектральная плотность температурных флуктуаций $E_T(k_z)$ определяется выражением [10]:

$$E_T(k_z) = E_c(k_z) T_z^2, \quad (5)$$

где $E_c(k_z)$ - спектр возвышений, T_z - градиент температуры, k_z - вертикальное волновое число. Для спектра возвышений можно использовать модельное выражение $E_c(k_z) = B/k_z^3$ [10], среднее значение коэффициента B по экспериментальным данным составляет примерно 0,2. Из формулы (5) для некоторого уровня спектра $E_T(k_z)$ получается температурный градиент при заданном k_z :

$$T_z = [E_T(k_z) k_z^3 B^{-1}]^{1/2}, \quad (6)$$

или волновое число при заданном градиенте:

$$k_z = [E_T^{-1}(k_z) B T_z^2]^{1/3}. \quad (7)$$

Для Минизонда дисперсия шумов дискретизации составляет $D_d \sim 8 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^2$. При средней дискретности по глубине 0,3 м диапазон волновых чисел спектра определяется величиной $k_0 = 2\pi/0,6 \text{ 1/м} \sim 10 \text{ 1/м}$. Если считать спектральную плотность шумов $E_{ш}(k_z)$ равномерной, то $E_{ш}(k_z) = 8 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^2\text{м}$. Полагая, что измеряемый уровень температурного спектра должен быть в четыре раза выше, чтобы шумы мало влияли на получаемые результаты, из выражения (6) легко определить средний градиент температуры, при котором такая спектральная плотность будет характерна, например, для вертикального масштаба 1 м. Расчет дает $T_z = 6,2 \cdot 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{Cм}^{-1}$. Такие величины средних градиентов в океане для достаточно протяженных участков профиля встречаются очень редко.

Можно также найти, пользуясь выражением (7), минимальный масштаб λ_T тонкой структуры температурного поля, который доступен исследованию с помощью зонда при часто встречающемся среднем градиенте, например $T_z = 0,01 \text{ } ^\circ\text{C м}^{-1}$. Расчетные λ_T и λ_s приведены в таблице. Видно, что чрезмерно грубое квантование по уровню в Минизонде делает его неприменимым для исследования тонкой вертикальной структуры.

Таким образом, малозаметный на первый взгляд параметр - величина наименьшего кванта - в низкоградиентных слоях выходит на первый план в оценке разрешающей способности зондов. Повышенная частота съема данных полезна, поскольку шумы дискретизации распределяются в более широкой полосе волновых чисел.

2.3. Разрешение по вычисляемым параметрам Сам факт получения равномерных по глубине стсчетов непосредственно измеряемых величин с малой погрешностью и нужной пространственной дискретностью еще не означает, что необходимая разрешающая способность зонда достигнута. Существует специфический вид погрешностей, возникающих при вычислениях солености и плотности по измеренным значениям температуры и электропроводности. Такие вычисления репрезентативны только при условии согласования пространственно-временных характеристик указанных измерительных каналов. Объективной мерой такого согласования являются когерентность и фаза между температурой и электропроводностью, рассчитанные в слоях, где изменчивость температуры велика, а соленость варьирует слабо. В этом случае оба канала, по сути, измеряют температуру, и когерентность между ними должна быть единица, а сдвиг фазы равен нулю. На практике, с уменьшением вертикального масштаба, сначала возрастает фазовый сдвиг, а затем резко падает когерентность. За пределами области когерентности вычисления солености и плотности дают случайные, шумовые значения.

Аппаратурный сдвиг фазы между температурой и электропроводностью в

области высокой когерентности приводит к "просачиванию" температурных флуктуаций в канал солености. Интенсивность такого просачивания можно оценить, если учесть, что определение изменений солености S по температуре T и электропроводности κ в первом приближении имеет разностный характер. В выражении

$$dS = \partial S / \partial T dT + \partial S / \partial \kappa d\kappa$$

при $T = 10^\circ\text{C}$ и $S = 35\text{‰}$

$$\begin{aligned} \partial S / \partial T &\sim -1\text{‰}(\text{°C})^{-1}, \\ \partial S / \partial \kappa &\sim 1\text{‰}(\text{мСм/см})^{-1}. \end{aligned}$$

Интенсивность просачивания за счет сдвига фаз φ определяется выражением

$$dS^2 \sim [\sin KX - \sin (KX + \varphi)]^2 = 4 \sin^2 \varphi / 2 \cos^2 (KX + \varphi / 2).$$

Дисперсия паразитных флуктуаций солености определяется множителем $4 \sin^2 \varphi / 2$. Эта величина составляет примерно 1% для $\varphi = 6^\circ$ и около 10% для $\varphi = 18^\circ$, если дисперсия температуры выражается в $(\text{°C})^2$, а дисперсия солености в $(\text{‰})^2$. Таким образом, даже небольшие фазовые сдвиги опасны в тех случаях, когда природные флуктуации солености малы по сравнению с температурными.

По счастью, во многих случаях сдвиг фазы между температурой и электропроводностью может быть резко уменьшен на этапе предварительной обработки путем искусственного смещения рядов на фиксированное число отсчетов. Все другие характеристики каналов, за исключением фазового сдвига, при этом сохраняются. Величина смещения определяется расположением максимума взаимной корреляционной функции.

Для зонда Н. Брауна Марк III максимум взаимной корреляционной функции смещен на два отсчета влево, что при дискретности съема данных 30 гц означает, что температурный канал отстает примерно на 67 миллисекунд. Такое отставание приводит к большому набегу фазы даже в области высокой когерентности. Устранение запаздывания путем сдвига температурного ряда на два

отсчета влево приводит к выравниванию спектра фазы.

Иная картина наблюдается в случае зонда Комплекс-1М. Здесь максимум уже смещен вправо на два отсчета, что при частоте дискретизации 50 гц соответствует отставанию канала электропроводности на 40 миллисекунд. Выравнивание фазы достигается смещением отсчетов электропроводности влево на два отсчета.

Аппаратурный спад когерентности между температурой и электропроводностью невозможно скорректировать предварительной обработкой, и именно это явление в наибольшей степени определяет разрешающую способность СТД - систем по вычисляемым параметрам. Вертикальный масштаб аппаратного спада когерентности зависит в основном от конструкции датчика электропроводности. Зонд Н. Брауна Марк III оснащен миниатюрным контактным датчиком электропроводности, благодаря чему обеспечивается высокая когерентность с температурным каналом до вертикального масштаба порядка 3 см, так что потенциально в спектре могут исследоваться шестнадцатисантиметровые масштабы. Однако, если не убрать предварительно отставание температурного канала, такая разрешающая способность фактически не реализуется. Так, для вертикального масштаба 30 см, при скорости опускания зонда $0,6 \text{ мс}^{-1}$, сдвиг фаз составит 48° , и две трети дисперсии температурных флуктуаций просочится в канал солености. Только устранение фазового сдвига на этапе предварительной обработки позволяет получить заложенное в конструкции прибора высокое разрешение по вычисляемым параметрам.

В зондах Комплекс-1, Комплекс-1М, ИСТОК-7 применяется индуктивно-трансформаторный датчик электропроводности, имеющий большие размеры, чем контактный, и спад когерентности начинается уже на масштабе порядка одного метра. Поскольку вычисления солености и плотности за пределами области когерентности не имеют смысла, получаемые отсчеты нужно осреднять,

причем на начальном этапе обработки, до вычисления вторичных параметров. В итоге, для обеспечения устойчивого функционирования схемы тонкоструктурной обработки, данные зонда Комплекса-1М, исходная дискретность которых примерно 2,5 см по глубине, приходится осреднять до масштаба один метр, а данные Комплекса-1, снимаемые примерно через 7,5 см, до 1,2 м. Значения солености и плотности рассчитываются уже по этим осредненным данным.

Однако коррекция фазового сдвига между температурой и электропроводностью не всегда возможна. В частности, сложная ситуация обнаружилась при исследовании зонда Н. Брауна той модификации, которая используется в Институте биологии южных морей НАНУ на НИС "Профессор Водяницкий". Кроме STD - измерителя и канала кислорода, прибор содержит оптический и химический каналы, с единой частотой измерений 15 Гц. Когерентность между температурой и электропроводностью здесь также сохраняется вплоть до малых масштабов, как у зонда Марк III, но сдвиг фазы оказывается практически постоянным, порядка 20° , в широком диапазоне, включая вертикальный размер летнего слоя скачка в Черном море, составляющий примерно пять метров. Возможно, это получилось из-за неудачной аппаратной коррекции постоянной времени температурного канала для другой частоты съема данных. В результате летний слой скачка, который можно интерпретировать как мощную температурную неоднородность с амплитудой порядка 5°C , "просачивается" в канал солености, формируя паразитный пик солености амплитудой до $0,5\%$. Попытка скорректировать фазовый сдвиг на больших масштабах влечет за собой необратимые искажения в мелкомасштабной области, что приводит к почти полной потере пространственного разрешения.

3. Особенности схемы обработки данных Комплекс программ предусматривает возможность статистической, спектральной обработки первичных рядов температуры, электропроводности и давления.

Необходимым элементом является анализ гистограмм распределений первых разностей, позволяющий обнаружить сбойные значения или другие нарушения аппаратного характера. Определенные выводы о свойствах измерительных каналов позволяет сделать анализ выводимых на дисплей взаимных корреляционных функций и спектров непосредственно измеряемых величин. Предусмотрена возможность различной фильтрации рядов, их осреднения и взаимного сдвига. Далее производятся расчёт солености и плотности и интерполяция их на эквидистантные по глубине отсчёты, наряду с рядом температуры.

Дальнейшим пунктом программы является определение границ участка профилей температуры, солености и плотности, по которому будет рассчитываться спектр. Задание начальной и конечной глубин участка производится на основе визуального просмотра на экране дисплея одновременно трех профилей, необходимым элементом является постоянство средних градиентов на выбираемом участке. Затем просматриваются гистограммы распределений первых разностей рядов температуры, солености и плотности. Сбойные значения могут быть устранены линейной интерполяцией по соседним правильным отсчетам. Предусмотрена возможность дополнительного осреднения обрабатываемых рядов. Далее фильтрацией выделяются флуктуационные части всех трех профилей. В программе предусмотрено применение для этих целей косинусного фильтра, полуширина которого p , как правило, выбирается равной одной двадцатой длины ряда N . Длина корреляционного окна обычно также выбирается равной p , чем обеспечивается его автоматическое стягивание. Используется косинусное окно Тьюки [11], иногда называемое также окном Хэннинга. Далее по желанию оператора назначается любая из возможных пар обрабатываемых рядов (температура - соленость, соленость - плотность или температура - плотность) и для этой пары рассчитываются автокорреляционные и взаимные корреляционные функции с выводом на экран

дисплея для визуального контроля, затем автоспектры, взаимные кросс и квадратурный спектры, спектр когерентности и фазы. Автоспектры, когерентность и фаза также выводятся на экран дисплея. После обработки первой пары рядов может обрабатываться любая другая. Попутно рассчитываются асимметрия и эксцесс распределений флуктуационных величин, для сравнения с параметрами нормального распределения, а также средние градиенты температуры, солености и плотности на выбранном участке профиля и значения коэффициентов температурного расширения α и соленостной сжимаемости β в его середине.

Для коротких рядов (на малых глубинах) рассчитываются только дисперсии в выбранном фильтрацией спектральном окне.

4. Исследования частотных мелкомасштабных спектров. В этой области применение интенсивной приборной стратегии затруднено, поскольку приборы, предназначенные для исследований крупномасштабных процессов, обычно далеко не обеспечивают нужной чувствительности по каналу скорости течения.

Для примера можно привести величины амплитуд флуктуаций скорости, присущих мелкомасштабным внутренним волнам в океане. Оценкой сверху для этих амплитуд служит горизонтальная скорость точек с постоянной фазой в мелкомасштабных внутренних волнах V_A [13]:

$$V_A = (V_\Gamma^2 + V_\Phi^2)^{1/2} = N/k$$

Здесь V_Γ - групповая скорость, V_Φ - фазовая скорость волн. N - частота Вайселя-Брента, k - модуль волнового числа.

При $N=10$ ц/час и длине волны $L=2\pi/k=7,2$ м $V_A=2$ см/с, при $N=2$ ц/час и $L=1,4$ м $V_A=0,8$ мм/с. Ясно, что такой диапазон скоростей не может быть обеспечен стандартным прибором с ценой наименьшего кванта порядка 0,5 см/с.

С этой точки зрения интересно рассмотреть недавно разработанный в МГИ НАНУ В.З.Дыкманом и Г.П. Дудниковым акустический измеритель

течения АИТ МГИ-1310 (ДИТ-1). Анализируемые ниже параметры взяты из рекламного проспекта прибора [14].

Используется векторное осреднение компонент скорости, разрешение 2,5 мм/с. Для больших N и сравнительно длинных волн это значение можно считать приемлемым. Разрешение по температуре $5 \cdot 10^{-3}$ °C является достаточным при умеренных градиентах температуры. Для косвенного метода измерения вертикальной скорости смещения изолиний температуры [15] по формуле

$$W = -(\partial T / \partial t)(\partial T / \partial z)^{-1}$$

при градиенте температуры 0,03 °C/м и интервале дискретности 1 мин соответствующий квант по W получается ~2,8 мм/с, что соответствует разрешению по горизонтальной компоненте.

Разрешение по гидростатическому давлению в 60 см водного столба недостаточно, если использовать этот канал для регистрации собственных вертикальных перемещений прибора. В целом измеритель АИТ (МГИ-1310) можно считать пригодным для измерения частотных параметров мелкомасштабных внутренних волн в высокоградиентных слоях

Измерения мелкомасштабной турбулентности, помимо высокой чувствительности, требуют еще и малых размеров датчиков. Для этих целей представляет интерес разработанный в СКТБ МГИ НАНУ электромагнитный измеритель трех пульсационных компонент вектора скорости течения с диаметром сферического датчика 3 см и уровнем шумов на уровне 1 мм/с (В.З.Дыкман, частное сообщение). В данном случае важно, что измеряются именно три компоненты скорости и прибор не должен разворачиваться по потоку, благодаря круговой диаграмме направленности датчика.

5. Заключение. В статье очерчен круг вопросов, характерных для специфического, мелкомасштабного подхода к оценке параметров океанографических приборов. Задача изучения характеристик мелкомасштабных

процессов всегда будет актуальной, поскольку они служат внутренним механизмом формирования крупномасштабной изменчивости океана. Кроме того, мелкомасштабные процессы выступают на первый план при исследованиях закономерностей распространения различных примесей в прибрежной, экологически наиболее важной зоне.

Общетехнический прогресс, появление более совершенных комплектующих изделий объективно способствуют созданию средств гидрофизических измерений с повышенными возможностями в плане исследования мелкомасштабных явлений. Аппаратурная база для применения интенсивной приборной стратегии должна, таким образом, расширяться, и изложенные приемы и методы анализа могут оказаться полезными.

ЛИТЕРАТУРА

1. Монин А.С., Каменкович В.М., Корт В.Г. Изменчивость мирового океана.-Л.: Гидрометеиздат, 1974.-264 с.
2. Калашников П.А. Первичная обработка гидрологической информации. - Л.: Гидрометеиздат, 1985.-С.152 с.
3. Дыкман В.З., Ефремов О.И., Пантелеев Н.А. Зондирующий комплекс для исследования тонкой вертикальной структуры океана. // Экспериментальные методы исследования океана.- Севастополь: МГИ АН УССР, 1978.- С.105-136.
4. Ефремов О.И., Дыкман В.З. Зондирующий комплекс "Зонд-СТ" // Приборы для научных исследований и системы автоматизации в АН УССР.- Киев: Наук. думка, 1981.-С. 239-241.
5. Ефремов О.И., Козлов А.Н., Петров В.А. Тонкоструктурный зонд "Комплекс-1" // "Исследования вертикальной тонкой структуры гидрофизических полей в Тропической и Субтропической зонах Атлантики в 49 рейсе НИС "Михаил Ломоносов".- Деп. рукопись N 378-B89.- М.: ВИНТИ, 1989.- С.56-60.
6. Парамонов А.Н., Кушнир В.М., Забурдаев В.И. Современные методы и средства измерения гидрологических параметров океана. - Киев: Наук. думка, 1979.- 248 с.
7. Нелепо Б.А., Смирнов Г.В., Шадрин А.Б. Интегрированные системы для гидрофизических исследований. - Л.: Гидрометеиздат, 1990.- 238 с.
8. Гайский В.А., Забурдаев В.И., Иванов А.Ф. и др. Гидролого-химический зонд ИСТОК-7: Аппаратные и алгоритмически-программные решения // Сборник трудов научной конф. "Диагноз состояния экосистемы Черного моря и зоны сопряжения суши и моря". - Севастополь: МГИ НАН Украины. - 1997. - С. 140-150.
9. Pingree R.D. Regularly spaced instrumental temperature and salinity structures // Deep-Sea Res.- 1971.- 18.-P.841-844.
10. Ефремов О.И., Пантелеев Н.А. Экспериментальные оценки характеристик вертикального перемешивания в океанском термохалоклине на основе тонкоструктурных спектров адвекции, солевых пальцев и мелкомасштабных внутренних волн.// Морской гидрофизический журнал. -1998.-N2-С.30-55.
11. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных.- М.: Мир, 1989.- 540 с.
12. Fofonoff N.P., Hayes S.P., Millard R.C. WHOI/Brown CTD microprofiler: methods of calibration and data handling. Technical Report / WHOI-74-89.- 1974.- 64 p.
13. Филлипс О.М. Динамика верхнего слоя океана. - Л.: Гидрометеиздат, 1980.- 319 с.
14. Автономный измеритель течений ДИТ-1 (модель МГИ-1310)/Рекламный проспект.- Севастополь: МГИ НАН Украины- 1998.- 2 с.
15. Дыкман В.З., Ефремов О.И., Кортаев Г.К., Пантелеев Н.А. Исследование пульсационного движения в океане в области масштабов коротких внутренних волн // Исследования турбулентной структуры океана".- Севастополь: МГИ АН УССР, 1975.- С. 30-40.