

Анализ результатов наблюдений и методы расчета гидрофизических полей океана

УДК 551.46.062.8

А.П. Толстошеев

Метод оценивания результатов восстановления траекторий автономных дрейфующих буев

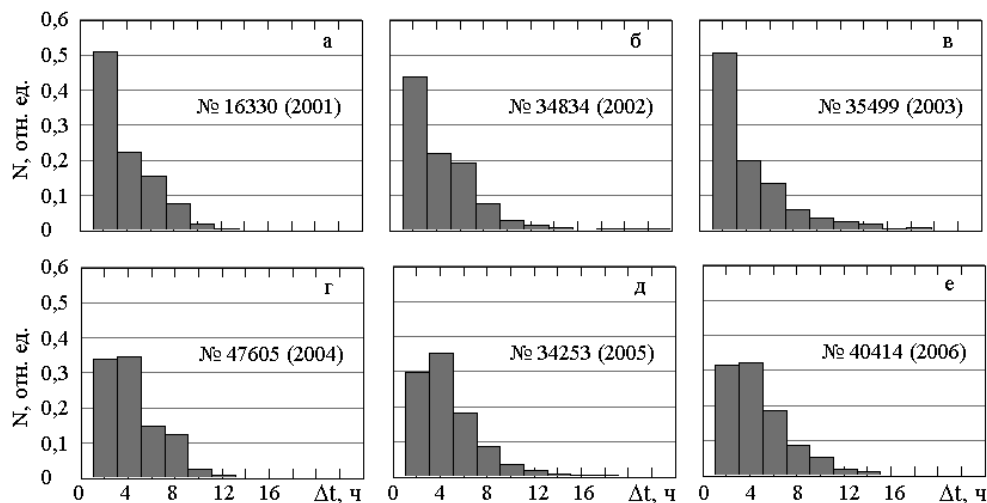
Предложен метод оценивания результатов восстановления траекторий автономных дрейфующих буев. Метод основан на сопоставлении оценок спектральных плотностей мощности компонент скорости течения, рассчитанных по трем временным рядам данных: ряду координат дрейфующего буя со встроенным приемником системы глобального позиционирования; ряду координат, сформированному на основе первого, с пропусками данных и погрешностями обсерваций, соответствующими реальным траекторным измерениям спутниковой системой определения координат платформ и сбора данных *Argos* с использованием доплеровского метода; ряду координат, полученному путем интерполяции данных второго ряда. В качестве примера рассмотрена процедура реализации метода и показана эффективность его применения для повышения достоверности результатов восстановления траекторий дрейфующих буев.

При несомненной эффективности применения автономных лагранжевых дрейфующих буев для изучения черноморских поверхностных течений [1 – 3] остается актуальной проблема повышения точности восстановления траекторий дрейфтеров по данным спутниковой системы определения координат платформ и сбора данных *Argos*, полученным с помощью доплеровского метода («доплеровским» данным). Анализ данных более 70 буев, развернутых в Черном море в 1999 – 2007 гг., показывает, что наряду с погрешностью метода существенное влияние на достоверность результатов восстановления траекторий оказывает неравномерность интервалов времени между обсервациями. На рис. 1 представлены гистограммы временных интервалов между последовательными обсервациями по данным некоторых из этих буев, развернутых в 2001 – 2006 гг. в Черном море. Для расчетов этих оценок были выбраны дрейфтеры с наиболее продолжительными временами лагранжевого дрейфа, т. е. дрейфа с присоединенным подводным парусом. Из графиков на рис. 1 следует, что временные интервалы между отсчетами координат почти в 90 % случаев не превышают 7 ч. Вместе с тем ряды могут содержать интервалы с пропусками данных до 20 ч. Это связано главным образом с естественными флуктуациями характеристик канала спутниковой связи и количеством обслуживающих спутников. В редких случаях из-за особенностей доставки данных пользователям возможны и более длительные пропуски информации. Очевидно, что непосредственное использование таких временных рядов данных о координатах может приводить к существенным погрешно-

© А. П. Толстошеев, 2009

ствиям результатов анализа, особенно при восстановлении относительно высокочастотных процессов переноса поверхностных вод.

Традиционный метод восстановления траекторий дрейфующих буев [4] основан на линейной интерполяции первичных данных. Однако результат применения его сводится к заполнению временных интервалов с пропущенной информацией данными, которые с достаточной степенью соответствия отражают реальную траекторию только в случаях прямолинейного дрейфа буя.



Р и с. 1. Распределения интервалов времени между последовательными наблюдениями по «доплеровским» данным (N – повторяемость; Δt – интервал времени; на графиках указаны идентификационный номер и год развертывания дрейфтера)

В статье [5] описана методика интерполяции временных рядов координат автономных лагранжевых дрейфующих буев с применением предложенной в работе [6] функции вида

$$p(t) = c_0 + c_1t + c_2t^2 + c_3t^3 + c_4t^4 + a\sin(\omega t + \phi),$$

где $p(t)$ – восстановленный временной ряд соответствующей координаты; t – время; c_0, \dots, c_4 – коэффициенты полиномиальной составляющей; a, ω, ϕ – амплитуда, частота и фаза синусоидальной составляющей соответственно.

Функция $p(t)$ состоит из двух составляющих: полиномиальной – для описания среднего переноса дрейфтера (тренд траектории), синусоидальной – для восстановления участков траектории, обусловленных относительно высокочастотными колебаниями. В соответствии с предложенным в статье [5] алгоритмом интерполяции весь массив данных разбивался на перекрывающиеся участки с фиксированным количеством отсчетов. Значения коэффициентов c_0, \dots, c_4 и аргументов a, ω, ϕ в пределах каждого участка принимались постоянными и рассчитывались путем численного решения системы уравнений

$$p_{k,n}(c_0, c_1, c_2, c_3, c_4, a, \omega, \phi, t_n) = 0,$$

где k и n – порядковые номера участка и отсчета на k -м участке соответственно.

Предложенный алгоритм, по данным [5], позволяет восстанавливать траектории дрейфов буйев в условиях разномасштабных течений с разрешением по времени в 1 ч и погрешностью приблизительно на 20 % меньше, чем при линейной интерполяции данных. Эта оценка получена по данным дрейфера № 47621, координаты которого определялись как с помощью приемника системы глобального позиционирования (*GPS*), так и по «доплеровским» данным системы *Argos*. Использование для анализа двух временных рядов координат позволило достаточно корректно оценить эффективность методики интерполяции. Иначе обстоит дело с проверкой применимости предложенного алгоритма интерполяции для восстановления рядов координат стандартных дрейфтеров, полученных только по доплеровскому методу. В последнее десятилетие именно такие буйи применялись в черноморских экспериментах, а полученные долговременные ряды «доплеровских» координат главным образом и образуют базу дрейфтерных данных. Этим объясняется актуальность разработки как способов повышения достоверности траекторных измерений, выполненных в рамках дрейфтерной технологии, так и методов объективного оценивания эффективности результатов их применения. В настоящей статье рассматривается метод такого оценивания, а в качестве примера приведен вариант его реализации применительно к линейно интерполированным данным и данным, восстановленным в соответствии с алгоритмом [5].

Поскольку в подавляющем большинстве случаев оказывается невозможным привлечь данные из других источников для сопоставления с ними результатов восстановления «доплеровских» траекторий, критериями эффективности метода могут служить только косвенные оценки. Один из возможных вариантов выбора критерия сопоставления основан на таком очевидном проявлении неравномерности интервалов времени между наблюдениями, как частотные и амплитудные искажения в спектральных характеристиках процессов, оцениваемых по траекториям дрейфов. Количественные оценки таких искажений, рассчитанные по данным траекторных измерений дрейфера, могли бы служить критерием эффективности метода интерполяции временных рядов «доплеровских» координат. Наиболее корректный способ получения таких оценок – сопоставление спектральных плотностей мощности (СПМ) компонент скорости течения, рассчитанных для одного и того же дрейфера по «доплеровским» данным системы *Argos* и показаниям приемника *GPS*. Как уже упоминалось выше, именно на основании таких данных дрейфера № 47621 были получены оценки эффективности алгоритма интерполяции [5]. Однако есть обстоятельство, которое ограничивает возможность привлечения результатов сопоставления временных рядов координат дрейфера № 47621, полученных доплеровским методом и по данным приемника *GPS*, для последующего применения в качестве критерия эффективности интерполяции траекторий дрейфующих буйев. Оно состоит в том, что из трех месяцев дрейфа только в первые двое суток буй № 47621 двигался с присоединенным подводным парусом, т.е. его траектория определялась главным образом поверхностными течениями. После обрыва паруса существенно возрастает вероятность ветрового сноса дрейфера и, как следствие, – погрешность воспроизведения скорости и направления поверхностного течения. В связи с этим представляется некорректным применить полученные в работе [5] результаты для

оценивания траекторных измерений стандартных лагранжевых дрейфтеров. Это не касается достоверности оценок метода интерполяции, приведенных в [5], поскольку они рассчитаны по результатам сопоставления данных о траектории одного дрейфтера, полученных разными способами.

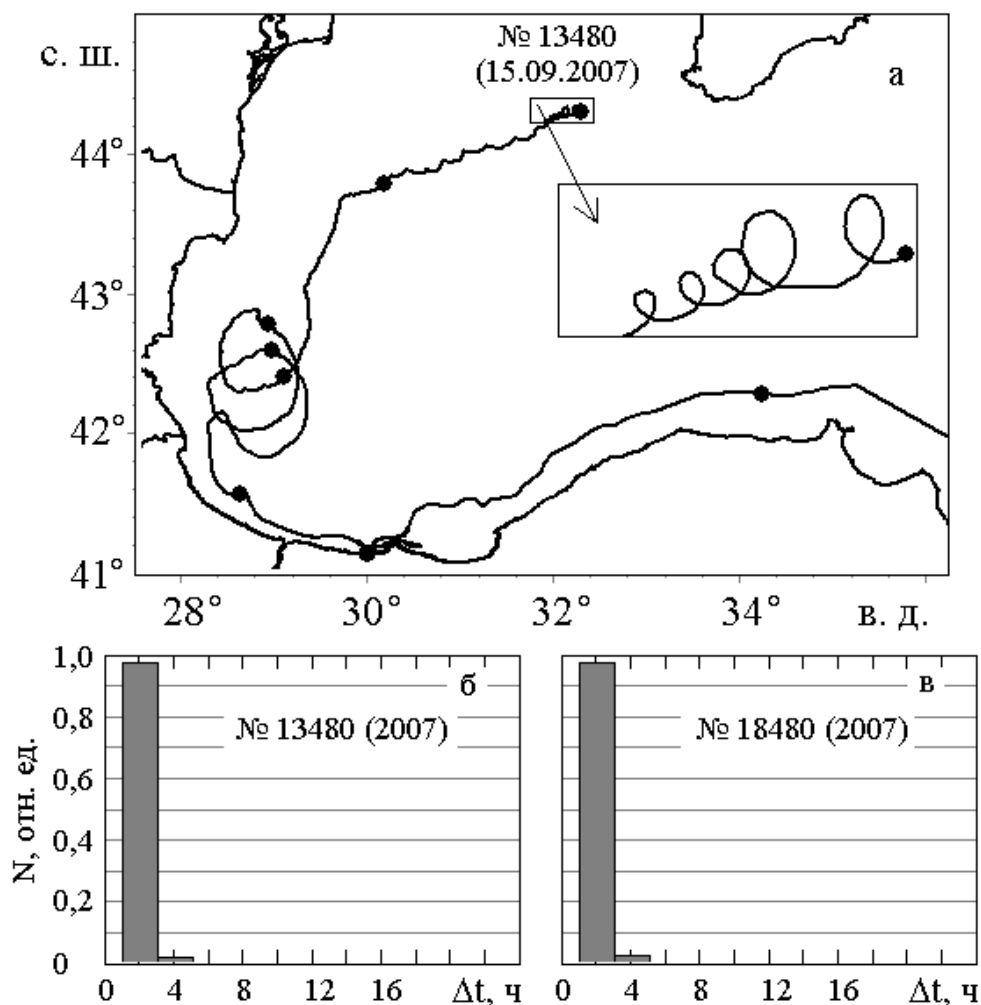
В 2007 – 2008 гг. стали проводиться пилотные эксперименты с дрейфующими буями, оборудованными аппаратурой спутниковой системы приема и передачи данных *Iridium* со встроенными приемниками *GPS*. В середине сентября 2007 г. в западной части Черного моря были развернуты два *Iridium*-дрейфтера № 13480 и № 18480. На рис. 2, *a* приведен фрагмент траектории дрейфтера № 13480. Из гистограмм (рис. 2, *б, в*), построенных по данным буев № 13480 и № 18480, следует, что для 98 % отсчетов временной интервал между наблюдениями составлял не более 3 ч. При этом погрешность наблюдений не превышала нескольких десятков метров. Очевидно, что такие временные ряды могут привлекаться в качестве тестовых для сопоставления с результатами траекторных измерений, полученных доплеровским методом. Проблема в том, что траектории *Iridium*-дрейфтеров оценивались только по данным системы глобального позиционирования и реальные «доплеровские» наблюдения системы *Argos* отсутствуют. Поэтому в рамках рассматриваемой методики предлагается на основе траектории *Iridium*-дрейфтера сформировать новый временной ряд координат («псевдодоплеровский»), который содержал бы такие же временные интервалы между наблюдениями (пропуски данных), что и исходный временной ряд координат стандартного *Argos*-дрейфтера, а погрешности измерений координат соответствовали бы погрешностям доплеровского метода. Эти два ряда – реально полученный по данным приемника *GPS* и синтезированный «псевдодоплеровский» – в последующем анализе используются для количественного оценивания искажений спектральных характеристик, обусловленных пропусками данных и погрешностями наблюдений, и, как следствие, для определения критериев эффективности результатов восстановления траекторий буев, рассчитанных по данным системы *Argos*, полученным доплеровским методом.

Рассмотрим процедуру реализации такого подхода на примере конкретного дрейфтера. Исходными данными для анализа являются: 1) временной ряд координат по данным приемника *GPS Iridium*-дрейфтера № 13480; 2) временной ряд координат дрейфтера № 34253 по «доплеровским» данным.

Выбор данных дрейфтера № 13480 в качестве тестовых объясняется тем, что в течение 3 мес после развертывания его траектория воспроизводилась с хорошим качеством (рис. 2, *б*) и, кроме того, дрейф буя определялся практически всеми типами движений, характерными для процессов переноса поверхностных вод Черного моря мезомасштабного и синоптического диапазонов (рис. 2, *а*): колебаниями вблизи инерционной частоты (выделенный фрагмент на рис. 2, *а*), движением в антициклоническом вихре, дрейфом в Основном Черноморском течении.

Дрейфтер № 34253 был развернут 24 января 2005 г. Выбор для анализа данных именно этого дрейфтера обусловлен продолжительным временем лагранжевого дрейфа, которое составило 219 сут, а также тем, что временной ряд «доплеровских» координат буя по наличию и продолжительности пропусков данных (рис. 1, *д*) и погрешностям позиционирования может рассмат-

риваться как среднестатистический относительно данных о дрейфах более 70 лагранжевых буюв, развернутых в Черном море в 1999 – 2007 гг.



Р и с. 2. Фрагмент траектории дрейфера № 13480 (а) и распределения интервалов времени между последовательными наблюдениями по данным дрейферов № 13480 (б) и № 18480 (в) (интервалы между метками – 10 сут; отдельно на рис. 2, а показан участок траектории в условиях инерционных колебаний; остальные обозначения, как на рис. 1)

Временной ряд координат дрейфера № 34253 использовался в качестве матрицы для формирования на основе траекторных измерений *Iridium*-дрейфера № 13480 «псевдодоплеровского» ряда данных. Собственно процедура формирования такого ряда состояла в следующем:

1) выборка из данных дрейфера № 34253 фрагмента последовательных отсчетов, продолжительность которого близка длительности реализации тестовых данных дрейфера № 13480 (фрагмент траектории на рис. 2, а). В соответствии с этим для последующего анализа был выбран участок траектории буюа № 34253 продолжительностью около 50 сут;

2) приведение отсчетов данных дрейфтера № 34253 к временной сетке ряда координат дрейфтера № 13480 путем сдвига значений отсчетов времени дрейфтера № 34253 на величину разницы между начальными отсчетами обеих последовательностей;

3) линейная интерполяция временного ряда для каждой координаты по данным дрейфтера № 13480;

4) формирование нового временного ряда координат путем вычисления значений полученных интерполяционных функций для преобразованных отсчетов времени дрейфтера № 34253;

5) внесение в значения координат нового временного ряда погрешностей, соответствующих «доплеровским» наблюдениям. Для каждого временного отсчета этого ряда значения координат смещались на случайную величину из диапазона неопределенности, соответствующего классу наблюдения. Класс наблюдения – это параметр, которым сопровождается каждый принятый отсчет координат дрейфтера. Значения этого параметра содержат информацию о возможном диапазоне неопределенности измерений: первому классу соответствует погрешность ± 1000 м, второму – ± 350 м, третьему – ± 150 м.

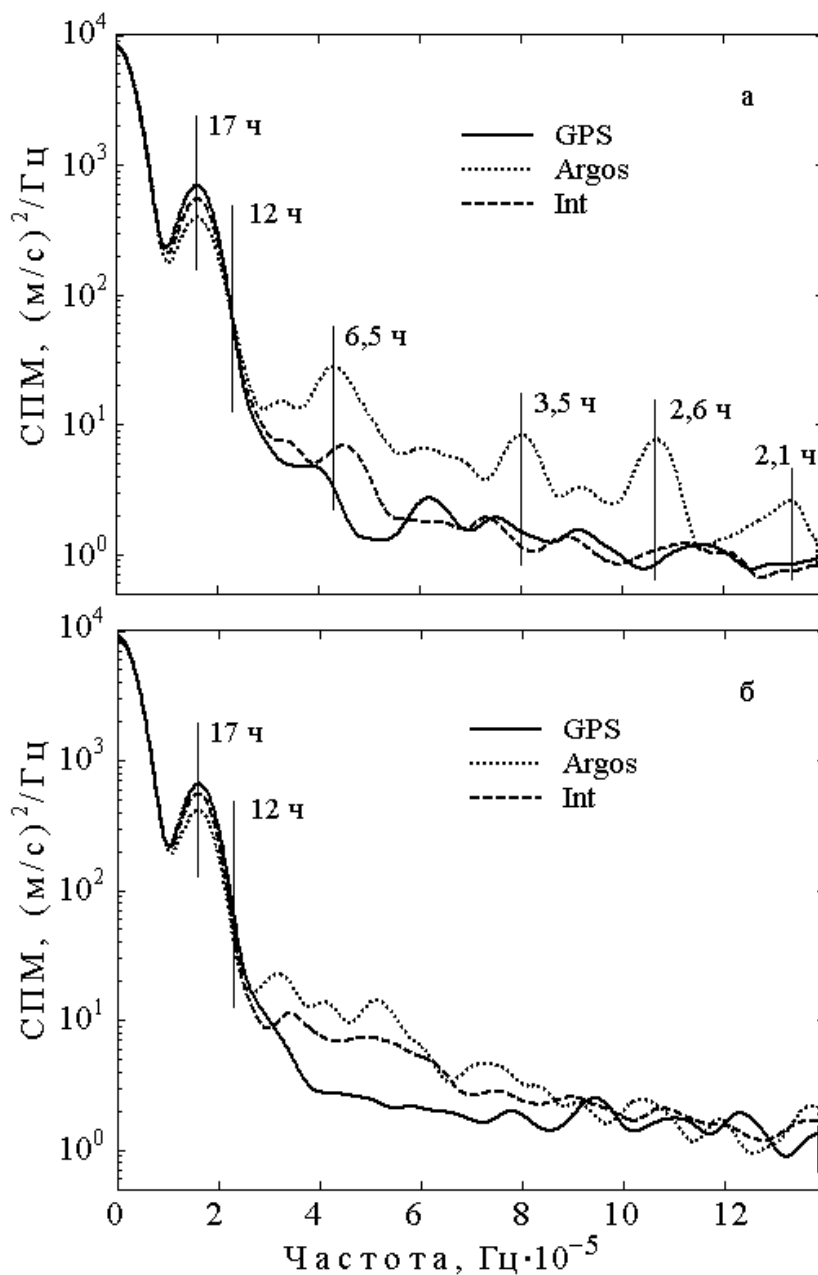
Исходными данными для последующего сопоставления являются: 1) исходный временной ряд координат по данным приемника *GPS* дрейфтера № 13480; 2) сформированный на его основе так, как указано выше, «псевдодоплеровский» временной ряд координат; 3) временной ряд координат, полученный путем интерполяции «псевдодоплеровского» в соответствии с алгоритмом статьи [5].

По данным каждого из этих трех рядов, линейно интерполированным на равномерный интервал в 1 ч, рассчитывались зональные и меридиональные компоненты скорости дрейфа. Последующее оценивание СПМ компонент скорости выполнялось в предположении о том, что анализируемые временные ряды представляют собой реализации локально-стационарных случайных процессов, что позволяет использовать соответствующие методы спектрального анализа. Оценки СПМ рассчитывались по методу усреднения модифицированных периодограмм, или методу Уэлча, который состоит в том, что вектор отсчетов данных делится на перекрывающиеся сегменты и данные каждого полученного сегмента умножаются на используемую оконную функцию. Для взвешенных таким образом сегментов вычисляются модифицированные периодограммы. Полученная оценка СПМ представляет собой результат усреднения периодограмм всех сегментов. Такой метод обеспечивает получение гладких и статистически устойчивых оценок по конечному ряду данных. В работе [7] приведены результаты анализа, подтверждающие надежность метода Уэлча для оценивания СПМ компонент скорости течения по данным дрейфующих буев.

Расчеты оценок СПМ для всех трех рядов выполнялись по программе, реализованной в среде *MATLAB*, с помощью функции *pwelch*. Каждый ряд данных, линейно интерполированных на равномерный временной интервал 1 ч, содержал 1200 отсчетов, которые разбивались на сегменты по 75 отсчетов. Для взвешивания данных в пределах каждого сегмента использовалась оконная функция Парзена. Коэффициент перекрытия сегментов был принят равным 50 %. В работе [7] показано, что такие вид оконной функции и значе-

ние коэффициента перекрытия оптимальны для получения надежных оценок СПМ для подобных временных рядов.

Оценки СПМ зональных и меридиональных компонент скорости дрейфа, рассчитанные по каждому временному ряду, графически представлены на рис. 3.



Р и с. 3. Оценки спектральных плотностей мощности зональной (а) и меридиональной (б) компонент скорости дрейфа по данным временного ряда координат дрейфера № 13480 (GPS), «псевдодоплеровского» ряда (Argos) и по интерполированным данным (Int)

Как и следовало ожидать, в области относительно низких частот результаты оказались схожими для всех трех последовательностей данных. Существенно более информативными в плане решения поставленной задачи оказались результаты оценивания СПМ в относительно высокочастотной части спектра. Начиная с диапазона инерционных колебаний в оценках распределения мощности анализируемых временных рядов появляются различия. Рассмотрим более подробно наиболее характерные из них.

В области частот инерционных колебаний на графиках обеих компонент для всех трех рядов анализируемых данных наблюдаются максимумы СПМ на частотах, соответствующих периодам $(17,1 \pm 0,1)$ ч. Амплитудные значения оценок СПМ зональной компоненты (рис. 3, а) составляют: $747 \text{ (м/с)}^2/\text{Гц}$ для исходного ряда (*GPS*); $393 \text{ (м/с)}^2/\text{Гц}$ для «псевдодоплеровского» ряда (*Argos*); $550 \text{ (м/с)}^2/\text{Гц}$ для ряда интерполированных данных (*Int*). Приблизительно такие же соотношения амплитуд имеют место и для меридиональной компоненты (рис. 3, б).

В более высокочастотных областях спектров поведение оценок СПМ для зональной и меридиональной компонент несколько различается. Для зональной компоненты характерен быстрый спад высокочастотных составляющих оценок СПМ, полученных по данным исходного и интерполированного рядов. СПМ, оцененная по данным «псевдодоплеровского» ряда, затухает гораздо медленнее и к тому же имеет ярко выраженные максимумы на периодах, указанных на рис. 3, а. Для меридиональной компоненты на этом участке спектра средняя мощность колебаний по интерполированным данным заметно превышает оценки, полученные по исходному ряду, но при этом остается ниже, чем средняя мощность колебаний «псевдодоплеровского» ряда. В интервале частот, ограниченном снизу частотой полусуточных колебаний и сверху – максимальной частотой оцениваемого спектрального диапазона, средние значения мощности составили: по данным исходного ряда (*GPS*) –34,5 и –33,9 дБ; «псевдодоплеровского» ряда (*Argos*) –30,2 и –31,3 дБ; ряда интерполированных координат (*Int*) –33,8 и –32,7 дБ для зональной и меридиональной компонент соответственно.

Основные результаты визуального анализа и количественного оценивания спектральных характеристик компонент скорости дрейфа с точки зрения решения задачи определения объективных критериев достоверности восстановления траекторий дрейфующих буев состоят в следующем:

- 1) пропуски во временных рядах координат дрейфующего буя, связанные с нерегулярностью обсерваций, приводят к ошибкам в оценивании распределения энергии компонент скорости, восстановленных по этим данным. В области частот инерционных колебаний ошибки проявляются в занижении оценок СПМ на 40 – 50 % относительно результатов, полученных по данным приемника *GPS*. С повышением частоты картина меняется на противоположную. В спектральном диапазоне, ограниченном снизу частотой, соответствующей полусуточным колебаниям, а сверху – верхним значением рассматриваемого частотного диапазона, средняя мощность колебаний компонент скорости дрейфа, восстановленных по данным координат «псевдодоплеров-

ского» ряда, выше средней мощности, оцененной по данным приемника *GPS*. Разница составляет 4,3 дБ для зональной и 2,6 дБ для меридиональной компонент. Кроме того, в оценках СПМ «псевдодоплеровского» ряда появляются максимумы (рис. 3, а), которые отсутствуют на графике СПМ, рассчитанной по данным исходного ряда. Это свидетельствует о том, что данные, образующие «псевдодоплеровский» ряд, в значительной степени не соответствуют реальным физическим процессам;

2) различия в спектральных характеристиках исходного ряда и ряда интерполированных данных в целом имеют тот же характер, что и результаты сопоставления исходного и «псевдодоплеровского» рядов, однако количественные оценки этих различий существенно иные. Амплитуды оценок СПМ в области частот инерционных колебаний различаются приблизительно на 25 %. Средние значения мощности в указанном выше диапазоне частот, рассчитанные по временному ряду интерполированных координат, выше средней мощности, оцененной по данным приемника *GPS*, на 0,7 дБ для зональной и на 1,2 дБ для меридиональной компонент.

Таким образом, предлагаемый метод позволяет качественно и количественно оценить степень достоверности результатов восстановления траекторий дрейфующих буев по данным сравнительного анализа распределений мощности процессов в соответствующих частотных диапазонах.

Практически рассмотренный метод может быть реализован путем сопоставления оценок СПМ компонент скорости течения, рассчитанных по «доплеровским» координатам дрейфующего буя, с соответствующими оценками СПМ, полученными по временному ряду интерполированных тем или иным способом координат. При этом степень достоверности восстановленных данных оценивается по результатам сравнительного анализа плотностей мощности так, как показано выше.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Журбас В.М., Зацепин А.Г., Григорьева Ю.В. и др. Циркуляция вод и характеристики разномасштабных течений в верхнем слое Черного моря по дрейфтерным данным // *Океанология*. – 2003. – 43, № 6. – С. 149 – 158.
2. Ратнер Ю.Б., Толстошеев А.П., Холод А.Л. и др. База данных дрейфтерных экспериментов в Черном море // *Системы контроля окружающей среды*. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2007. – С. 112 – 114.
3. 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.
4. Hansen D.V., Poulain P.-M. Quality control and interpolation of WOCE/TOGA drifter data // *J. Atmos. Ocean Technol.* – 1996. – 13, № 4. – P. 900 – 909.
5. Толстошеев А.П. Метод восстановления траекторий дрейфующих буев // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2007. – Вып. 15. – С. 392 – 396.

6. *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.
7. *Ратнер Ю.Б., Скороход Б.А., Холод А.Л.* Результаты сопоставлений скоростей поверхностных течений, полученных на основе данных дрейферного эксперимента и расчета по модели динамики Черного моря в сентябре – декабре 2007 г. // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.* – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2008. – Вып. 16. – С. 156 – 183.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь

Материал поступил
в редакцию 14.08.08
После доработки 07.11.08

ABSTRACT Method of estimating the results of reconstruction of drifting buoys trajectories is presented. It is based on comparison of the estimates of power spectral densities of current velocity components. The estimates are calculated using three time datasets: dataset of coordinates of a drifting buoy with a built-in GPS receiver; dataset of coordinates formed on the basis of the first one including missing data and observational errors corresponding to the actual trajectory measurements of the Argos satellite location and data collection system by the Doppler method; dataset of coordinates resulted from interpolation of the second one. The procedure of the method implementation is considered as an example, and efficiency of its use for increasing reliability of reconstruction of drifting buoys trajectories is shown.