

**РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТОВОГО ЭКСПЕРИМЕНТА
ПО СОПОСТАВЛЕНИЮ ДАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ
ТРЕХ БЛИЗКОРАСПОЛОЖЕННЫХ ДОННЫХ СТАНЦИЙ ADCP**

© 2016 г. В. Б. Пиотух¹, В. И. Баранов², С. Б. Куклев², О. И. Подымов²

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

²Южное отделение Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Геленджик

e-mail: vbp@ocean.ru

Поступила в редакцию 25.02.2015 г.

После доработки 02.08.2015 г.

Рассмотрены результаты тестового эксперимента по сопоставлению квазисинхронных данных трех различных акустических доплеровских профилографов течений (ADCP), установленных вблизи друг от друга на морском дне в ближней шельфовой зоне Черного моря в сентябре 2014 г. Непосредственной целью эксперимента было количественное сопоставление данных, полученных различными ADCP, помещенных в максимально сходные условия и проводящих одновременные измерения параметров морских течений в одной географической точке. Описываются цели и схема эксперимента, методика обработки измерительных данных, основные полученные результаты, их интерпретация и анализ, включая практические результаты и выводы.

DOI: 10.7868/S0030157416030163

**1. ВВЕДЕНИЕ. ОБОСНОВАНИЕ
И СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА**

Одной из актуальных задач современной экспериментальной океанологии является долговременный мониторинг состояния и изменчивости гидрофизических процессов. Длинные непрерывные ряды наблюдений существенно дополняют существующие представления о поведении и временной изменчивости характеристик морской среды, включая характеристики локально-неоднородных течений в шельфово-склоновой зоне — области моря, наиболее насыщенной различными динамическими эффектами. Для решения широкого спектра задач по исследованию гидродинамических процессов [1] в прибрежной шельфовой зоне Черного моря на базе Южного отделения Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН (ЮО ИО РАН, г. Геленджик) развивается экспериментальный подспутниковый полигон, основу которого составляют стационарные автоматизированные станции наблюдений: акустические доплеровские профилографы течений (ADCP), автоматизированные зонды-профилографы “Аквалог”, заякоренные термоксы [2]. Схема расположения станций позволяет исследовать закономерности развития гидродинамических процессов в широком диапазоне их пространственной изменчивости: от крупномасштабных течений до субмезомасштабных вихревых структур прибрежной шельфовой зоны моря.

Особенности временной изменчивости поля течений в прибрежной зоне Черного моря, наблюдавшиеся с помощью одиночной донной станции ADCP в течение календарного года, рассматривались в работе [3], при этом была показана высокая вариативность параметров течений, их знакопеременность и резкое преобладание вдольбереговой компоненты течений над поперечной берегу. Различные методические аспекты использования и обработки данных ADCP, полученных в акватории Черного моря, рассматривались в работах [4–6]. В [6] в числе прочих методических вопросов, включая анализ влияния вертикальных компонент течений, анализировались особенности наблюдений малоразмерных локально-неоднородных течений и вихрей с помощью донного ADCP, установленного в зоне значительных градиентов течений, также вблизи г. Геленджика. В [5] приводятся результаты работ по разработке и использованию автономного мобильного профилографа “Аквалог”, реализующего регулярные измерения различных параметров морской среды, в т.ч. вертикальных профилей скорости течений, в значительном диапазоне глубин. В [4] рассматривались различные методические аспекты применения судовых погружаемых (Lowered) ADCP, в т.ч. — вопросы влияния корпуса судна на показания встроенного магнитного компаса, вносящего значительные (до десятков угловых градусов на небольших глубинах) некон-

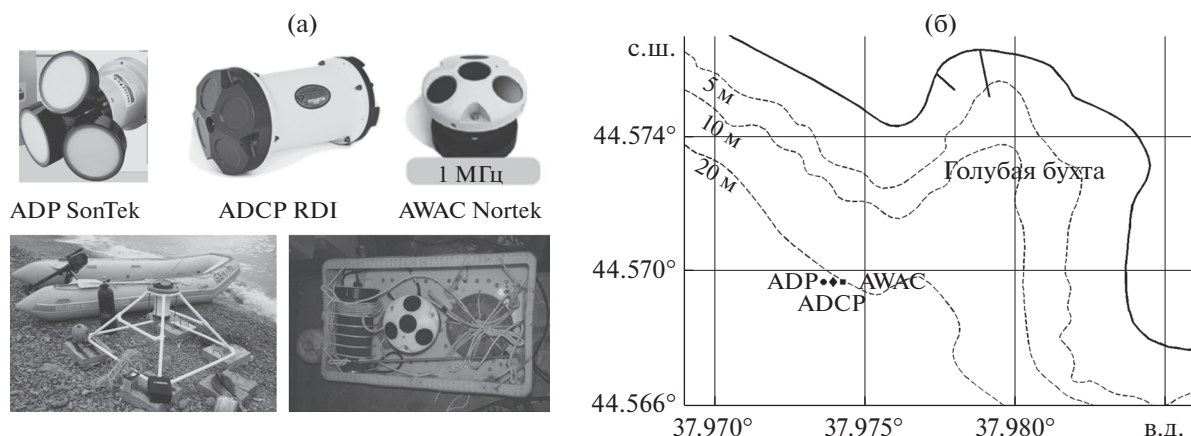


Рис. 1. Внешний вид используемых акустических профилографов и конструктивное исполнение оснастки для их донной установки (а), расположение донных станций во время проведения тестового эксперимента (б). Штриховые линии – изобаты 5, 10 и 20 м.

тролируемые погрешности в показания компаса ADCP, которые необходимо компенсировать путем применения специальных методик обработки данных, а также дополнительных методов, таких как GPS-позиционирование.

Практическая задача, решавшаяся с помощью описываемого ниже тестового эксперимента, – разработка методик совместной обработки квазисинхронных данных нескольких стационарных ADCP, используемых в варианте донной установки. Измерения течений, синхронные по времени, но разнесенные по пространству на несколько километров, должны, в принципе, обеспечить отслеживание динамики локальных неоднородностей в шельфовой зоне – таких как шельфовые вихри и меандры прибрежных течений. Используемые для этого акустические профилографы течений должны быть взаимно калиброваны, чтобы обеспечить однозначную привязку и интерпретацию данных о профилях течений по времени, направлению, амплитуде. Такая взаимная валидация двух и более ADCP, а также приобретение опыта совместной обработки данных может быть достигнута путем проведения одновременных измерений примерно в одной пространственной точке и их последующей совместной обработки.

В период 27–30 сентября 2014 г. был проведен тестовый эксперимент по квазисинхронным измерениям и сопоставлению данных 3-х различных ADCP (рис. 1а). Использовались следующие акустические доплеровские профилографы течений:

- ADCP WH Sentinel 600 кГц фирмы Teledyne RD Instruments (далее – ADCP RDI) [9];
- AWAC sensor Continental 1000 кГц фирмы Nortek (далее – AWAC) [8];
- ADP SonTek 250 кГц фирмы SonTek (далее – ADP SonTek) [7].

Приборы отличаются по своим конструктивным решениям: ADP SonTek имеет 3 акустических луча, ADCP RDI – 4 равномерно распределенных луча, AWAC имеет 1 центральный луч и 3 расходящихся луча. Различные рабочие частоты обуславливают различные рабочие диапазоны дальностей измерений: ADCP RDI 600 кГц предназначен для работы до глубин 60 м, шаг измерений по глубине – 1.0 м, AWAC 1 МГц – до глубин 30 м, шаг – 0.5 м, ADP SonTek 250 кГц – до глубины 120 м, шаг – 2 м. Для использования в варианте донной установки для каждого из приборов в ЮО ИО РАН была изготовлена специальная немагнитная оснастка (рис. 1а).

Приборы были установлены на грунте на траверзе Голубой бухты (г. Геленджик) на небольшом (30 м) расстоянии друг от друга (рис. 1б). ADCP RDI представляет собой ‘on-line’ регистратор, запитываемый и управляемый по подводному кабелю; другие приборы устанавливались как автономные с внутренним питанием и записью данных во встроенную память. Точка установки ADCP RDI была принята как базовая, ее координаты – 44°34.19′ с.ш., 37°58.44′ в.д., глубина установки – 22.4 м, расстояние от береговой линии – около 800 м. Прибор AWAC NorTek был установлен в 30 м восточнее RDI, глубина установки 22 м; прибор ADP SonTek был установлен в 30 м западнее RDI, глубина установки – около 23 м. В первом приближении можно принять, что все три прибора находились практически в одной точке (на рис. 1б точки установки для наглядности разнесены на несколько большее расстояние).

ADCP RDI осуществлял непрерывный ряд измерений, охватывающий весь диапазон с 00:00 МСК 27 сентября 2014 г. по 00:00 МСК 01 октября 2014 г., интервал измерений – 0.5 мин; AWAC Nortek – с 08:00 GMT 27 сентября 2014 г. по 06:06 GMT 30 сентября 2014 г. (запаздывание отсчетов 4 ч от-

носителем МСК), интервал измерений – 1 мин; ADP SonTek – с 12:00 МСК 27 сентября 2014 г., по 10:12 МСК 30 сентября 2014 г., интервал измерений – 1 мин.

Временные диапазоны построения изображений и графиков данных для каждого прибора соответствуют фактическому наличию данных и их временной градуировке. В случаях совместного анализа данных ADCP использовалась временная шкала МСК и временной диапазон 269.5 .. 272.25 сут от начала календарного года, что соответствует диапазону дат и времени 27 сентября 2014 г. 12:00 – 30 сентября 2014 г. 06.00 МСК.

2. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ВЫХОДНЫХ ДАННЫХ ADCP. МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Распаковка бинарных записей каждого ADCP проводилась с использованием собственного программного обеспечения каждой из фирм-производителей ADCP, в результате чего получались файлы измерительных данных в ASCII (текстовом) виде, пригодном для дальнейшей обработки внешними программами. Поскольку форматы ASCII-данных различных ADCP существенно отличаются друг от друга, следующим этапом предварительной обработки было приведение данных всех приборов в унифицированный формат, удобный для последующей работы. За основу был взят формат ASCII-данных Nortek AWAC, основанный на следующих принципах:

- профили основных измерительных данных (уровни сигнала и значения компонент скорости течений) записываются в однородные числовые массивы, число столбцов соответствует числу горизонтов измерений, число строк не ограничено и определяется длительностью и интервалом наблюдений; каждый вид данных (уровни сигналов, компоненты скоростей течений) записывается в отдельный файл;

- данные, имеющие временную изменчивость, но не зависящие от глубины (в их числе – данные об ориентации прибора, температуре, давлении), записываются в общий файл с той же самой временной привязкой;

- данные, не зависящие от времени, описание форматов и т.п. записываются в отдельный файл метаданных.

Исходные форматы данных RDI и SonTek построены иначе – результаты всех измерений записаны в общий файл, имеющий довольно сложную блочную внутреннюю структуру, в результате чего считывание больших массивов данных (десятки или сотни МБ) занимает неприемлемо много времени. Поэтому для данных RDI и SonTek были разработаны промежуточные форматы, примерно аналогичные ASCII формату AWAC

Nortek, проведено однократное преобразование данных. Для массивов данных ADCP RDI проводилась также предварительная фильтрация сбойных измерений (использование параметра Erog для ADCP RDI более подробно описано в [6]).

Проводилось интерполяционное сжатие данных до 10-минутных интервалов между отдельными измерениями, который уже был ранее нами использован при регистрации и обработке длинных (до нескольких месяцев) рядов данных автономных станций AWAC и ADP SonTek. Исходные данные в этом эксперименте были представлены с шагом 0.5 и 1 мин, однако подобное редуцирование массивов представляется оправданным при обзорной обработке, т.к. значительно ускоряет работу и, особенно, отладку программ. Работу с 1-минутными данными, при необходимости, предполагается реализовать позже. В результате были сформированы относительно стандартизированные массивы данных, приведенные к постоянной сетке по времени (10 мин), а также по глубине (0.5 м) с использованием стандартной бикубической аппроксимации.

В интересах дальнейшей обработки был разработан ряд специализированных программ, с помощью которых выполнялись необходимые операции по считыванию, коррекции, ресайзингу массивов, повороту осей координат (построение вдольбереговой и нормальной берегу компонент течений), построению наборов изображений и графиков, вычислению некоторых дополнительных параметров, записи результатов и т.д.

Этапы и программы вторичной обработки данных были, по возможности, сделаны максимально унифицированными для всех ADCP. В итоге были построены ряды иллюстративных материалов, часть которых приведена ниже. Концепция использования унифицированных массивов данных – синхронизированных по времени и вертикальному разрешению, вычищенных от измерительных ошибок – позволяет, в принципе, создавать практически любые виды вторичных материалов и проводить их последующую обработку и анализ, включая комплексную совместную обработку данных различных ADCP.

3. ВРЕМЕННЫЕ РАЗВЕРТКИ ПРОФИЛЕЙ УРОВНЯ СИГНАЛОВ И КОМПОНЕНТ СКОРОСТЕЙ ТЕЧЕНИЙ

3.1. Профили уровней сигнала обратного рассеяния.

В файлах данных ADCP присутствуют измерения профилей уровня сигналов обратного рассеяния (BackScatter Level), изменяющихся по времени. Эти измерения могут представлять интерес для отслеживания изменчивости мутности морской среды, например, вследствие штормов, атмосферных осадков, других значимых явлений, в

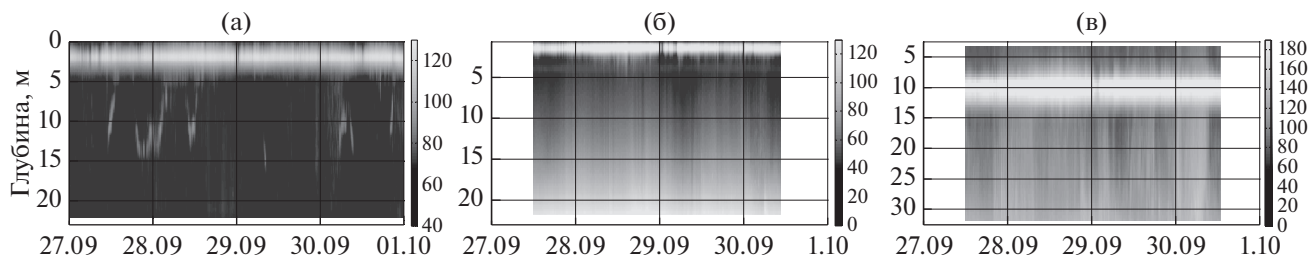


Рис. 2. Сигналы обратного рассеяния (дБ) в период тестового эксперимента в 3-м канале ADCP RDI (а), AWAC (б), ADP SonTek (в).

т.ч. апвеллингов. Данные об уровне сигнала представляются в логарифмической шкале, практический интерес имеет их временная и вертикальная изменчивость, выраженная в относительных единицах (как правило, в децибелах). В тестируемый период данные BScLev были относительно однородными. Данные ADCP RDI записываются в 4-х каналах, данные других приборов – в 3-х каналах. На рис. 2 приведены примеры временных разверток уровня сигналов обратного рассеяния в 3-м канале для каждого акустического профилографа.

Временные шкалы по оси X взаимно синхронизированы. По оси Y отложены дальности горизонтов измерений от излучающего прибора в метрах, инвертированные по глубине, т.е. отсчет дальностей идет “сверху вниз” и примерно соответствует расстоянию от морской поверхности. При построении изображений использовались интерполированные массивы данных с шагом 0.5 м по глубине и 10 мин по времени. Яркости приведены в относительных единицах, согласно числовым значениям в файлах данных каждого прибора. Коррекции шкалы яркости и шкалы глубин в данном случае не проводилась. Видно, что характер изменчивости уровня сигнала обратного рассеяния по дальности у разных приборов существенно отличается.

Если временно отвлечься от мощных слоев усиления уровня сигнала вблизи поверхности, видно, что нижележащие слои по-разному отображают временную изменчивость уровня сигнала. Сигналы ADCP RDI наиболее тщательно скорректированы по дальности/глубине, что позволяет в некоторых случаях наблюдать локальные звукорассеивающие слои (рис. 2а), наиболее вероятная интерпретация которых – присутствие слоев органической взвеси. Сигналы AWAC и ADP SonTek требуют дополнительной коррекции по глубине для их корректного временного анализа.

На всех изображениях наблюдаются мощные слои увеличения уровня сигнала вблизи поверхности (т.н. “зоны интерференции”), которые обусловлены отражением акустических импульсов от взволнованной границы раздела вода–воздух. При

этом наблюдаются также ненулевые значения сигнала в нескольких строках дальности выше “зоны интерференции”. Для принятия решений об учете или исключении данных “зоны интерференции” и выше из дальнейшего внимания потребовалось дополнительное уточнение вертикальной привязки данных ADCP.

Встроенный датчик давления AWAC в процессе эксперимента регистрировал показания 20.5–20.7 дбар, что соответствует глубинам 20.8–21.0 м. Датчики давления других приборов не были задействованы, но, судя по схеме установки, их глубины отличались незначительно, предполагаемая разница глубин – около 1–1.5 м. В процессе тестового эксперимента прибор AWAC регистрировал данные в диапазоне дальностей от 0.9 до 22.4 м (44 горизонта, шаг 0.5 м), ADCP RDI – от 2.1 до 24.1 м (23 горизонта, шаг 1.0 м), ADP SonTek – от 3.5 до 31.5 м (15 горизонтов, шаг 2.0 м).

Анализ профилей уровней сигналов обратного рассеяния, положения “зон интерференции” и их сопоставление с реальными глубинами установки приборов показал, что корректными в данном эксперименте являлись 39 отсчетов дальности для AWAC, 19–20 отсчетов для ADCP RDI, 9–10 для ADP SonTek. Это соответствует следующим рабочим диапазонам глубин, отсчитываемых от морской поверхности: от 20.0 до 0.5 м для AWAC, от 20.0 до 1.0 м для ADCP RDI, от 19.5–20 м до 0.5–1.5 м для ADP SonTek. Соответственно, сигналы от начала “зон интерференции” и выше (т.е. для AWAC – 5 горизонтов, для ADCP RDI – 3–4 горизонта, для ADP SonTek – 5 горизонтов) являлись неинформативными и не должны участвовать в тематической обработке. Таким образом, положение “зон интерференции” в сигналах обратного акустического рассеяния в сопоставлении с реальными глубинами установки позволило точнее верифицировать рабочие диапазоны глубин тестируемых ADCP.

3.2. Профили географических компонент, модуля и направления скорости течений. На рис. 3 представлены развертки компонент скорости течений по данным различных ADCP. Значения приведены “как есть”, т.е. визуализированы числовые

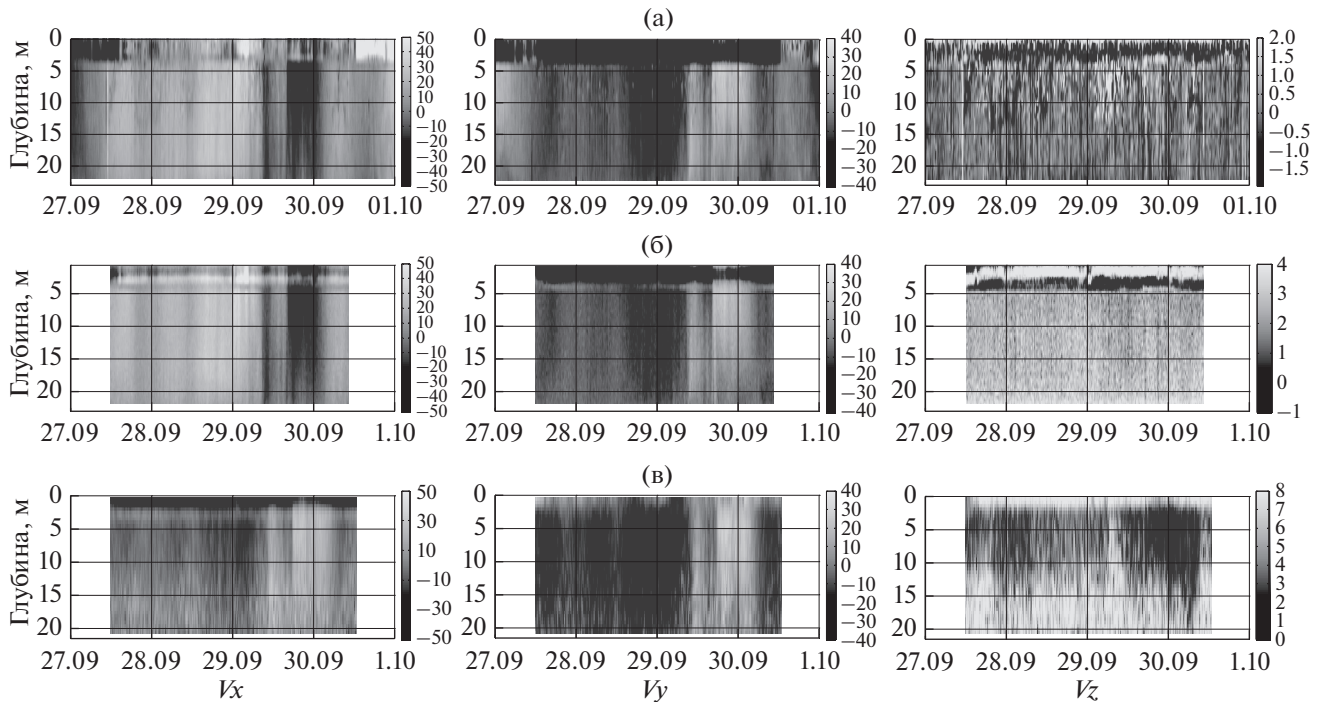


Рис. 3. Компоненты скорости течений V_x , V_y , V_z по данным ADCP RDI (а), AWAC (б), ADP SonTek (в).

значения компонент скоростей, записанные в файлах данных каждого ADCP. Использовались интерполированные массивы данных с шагом 0.5 м по глубине и 10 мин по времени. Яркость соответствует скорости течений в см/с, шкалы соответствия яркости приведены на рисунке. Если предположить, что угловая градуировка встроенных компасов каждого ADCP корректна (обсуждение этого вопроса см. в п. 3.3 и разделе 5), то положительное направление зональной компоненты V_x должно быть направлено на восток, меридиональной V_y – на север. Вертикальная компонента V_z направлена к прибору, т.е. вниз. Временные шкалы по оси X взаимно синхронизированы. По оси Y отложены дальности горизонтов измерений от излучающего прибора в метрах, инвертированные по Y , что примерно соответствует глубине для ADCP RDI и AWAC (с поправкой -2 м). Для данных ADP SonTek проведена коррекция глубин – отсечены данные выше от границы “зоны интерференции”, проведена переградуировка шкалы глубин от поверхности до глубины 20 м.

Можно видеть, что разрезы горизонтальных компонент скоростей ADCP RDI и AWAC весьма схожи. Далее это подтверждено расчетами коэффициентов взаимной корреляции. Компонента V_y ADP SonTek также неплохо коррелирует с данными ADCP RDI и AWAC, однако компонента V_x сильно отличается, вплоть до получения значений противоположного знака. Вертикальная компонента течений V_z в настоящей работе далее не рассматривается. Отметим лишь, что амплитуда из-

менчивости V_z в данном эксперименте находилась в пределах $\pm 1-2$ см/с, что близко к порогу чувствительности и приборным шумам ADCP. В данных AWAC и ADP SonTek обнаружился систематический сдвиг среднего значения V_z на $2-3$ см/с, чего быть не должно (и его нет в данных ADCP RDI). Анализ данных ADCP о вертикальных течениях является отдельной задачей, выходящей за пределы данной работы, а на малых глубинах порядка 20 м не представляет существенного интереса.

На рис. 4 представлены временные развертки абсолютных значений скорости горизонтальных течений $|V|$ и направления горизонтальных течений $fi = 0...360^\circ$. Модули скорости считались как $|V| = \sqrt{V_x^2 + V_y^2}$, направления отсчитывались по часовой стрелке от направления на север, исходя из показаний встроенных магнитных компасов каждого ADCP (в предположении их корректности). Данное представление горизонтальных течений является альтернативным представлению профилей скоростей течений, использованному на рис. 3. Можно отметить, что развертки модулей скорости довольно близки для всех приборов, может быть за исключением повышенной зашумленности данных ADP SonTek в придонных слоях. Направления горизонтальных течений, рассчитанные по показаниям встроенных магнитных компасов, оказались близкими для ADCP RDI и AWAC, но сильно отличаются для ADP SonTek. Это свидетельствует о значительном отличии калибровки магнитного компаса данного ADCP в тестовом эксперименте.

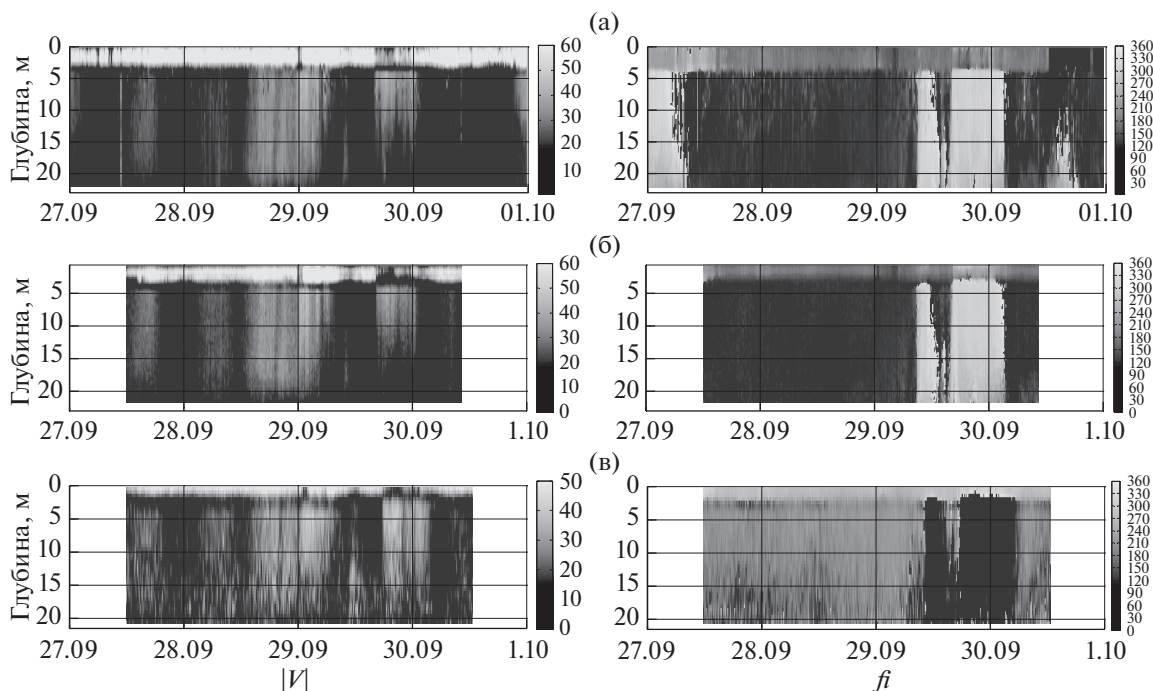


Рис. 4. Модуль скорости течений $|V|$ (см/с, слева) и направление течений (град, справа) по данным ADCP RDI (а), AWAC (б), ADP SonTek (в).

3.3. Профили вдольбереговой и поперечной берегу компонент скорости течений. Горизонтальные компоненты течений V_x и V_y , ориентированные по географическим осям координат, являются основой для всех последующих построений, однако интерпретация их физического смысла затруднена, т.к. реальные течения в прибрежной зоне в первую очередь зависят от направления береговой линии. Как следует из общих физических соображений, а также в соответствии, например, с [3], практическое значение имеют вдольбереговая V_c (*collinear*) и поперечная берегу V_n (*normal*) компоненты скорости течений. Вдольбереговая компонента является доминирующей, поперечная — миноритарной, хотя именно она является индикатором проявления бароклинных течений, сгонно-нагонных явлений, апвеллингов и даунвеллингов, баланса накопления и оттока водных масс в прибрежной зоне моря. Вдольбереговая компонента при этом отвечает за основной перенос водных масс, а ее временная изменчивость является главным индикатором поведения прибрежного течения.

На рис. 5 представлены временные развертки вдольбереговой V_c и поперечной V_n компонент течений для трех тестируемых ADCP. Правила построения изображений аналогичны принятым на рис. 3–4. Положительный знак V_c — на северо-запад, т.е. совпадает с направлением Основного черноморского течения (ОЧТ), положительное направление V_n — к берегу, т.е. на северо-восток. Углы поворота осей координат приведены в заго-

ловках рисунков. Иллюстрацией к схеме поворота осей координат является также рис. 9а.

Определение угла поворота осей координат для каждого ADCP проводилось индивидуально. Критерием определения угла поворота осей координат была максимизация отношения $F(fi) = \langle |V_c(fi)| / |V_n(fi)| \rangle$, при последовательном переборе угла поворота осей координат fi . Сравнивались модули компонент вдольбереговой и поперечной берегу компонент, осреднение проводилось по всему периоду измерений для каждого ADCP, а скорости здесь усреднялись по всему диапазону глубин, за исключением неинформативных горизонтов (“зоны интерференции” вблизи поверхности моря и придонного отсчета). Ниже будет показано, что данный критерий определения угла поворота осей координат является устойчивым, однако он зависит от интервалов усреднения по времени и по глубине. Более детальный анализ критериев выбора угла поворота осей координат для определения вдольберегового вектора течений проведен в п. 5.3.

Судя по рис. 5, вычисленные значения профилей вдольбереговой компоненты скорости V_c оказались весьма близкими для всех 3-х использованных ADCP, за исключением повышенной зашумленности данных ADP SonTek в придонных слоях. Развертки поперечной берегу компоненты V_n показали высокое сходство данных ADCP RDI и AWAC, а также разумное сходство с ними данных ADP SonTek. Вместе с тем, абсолютные

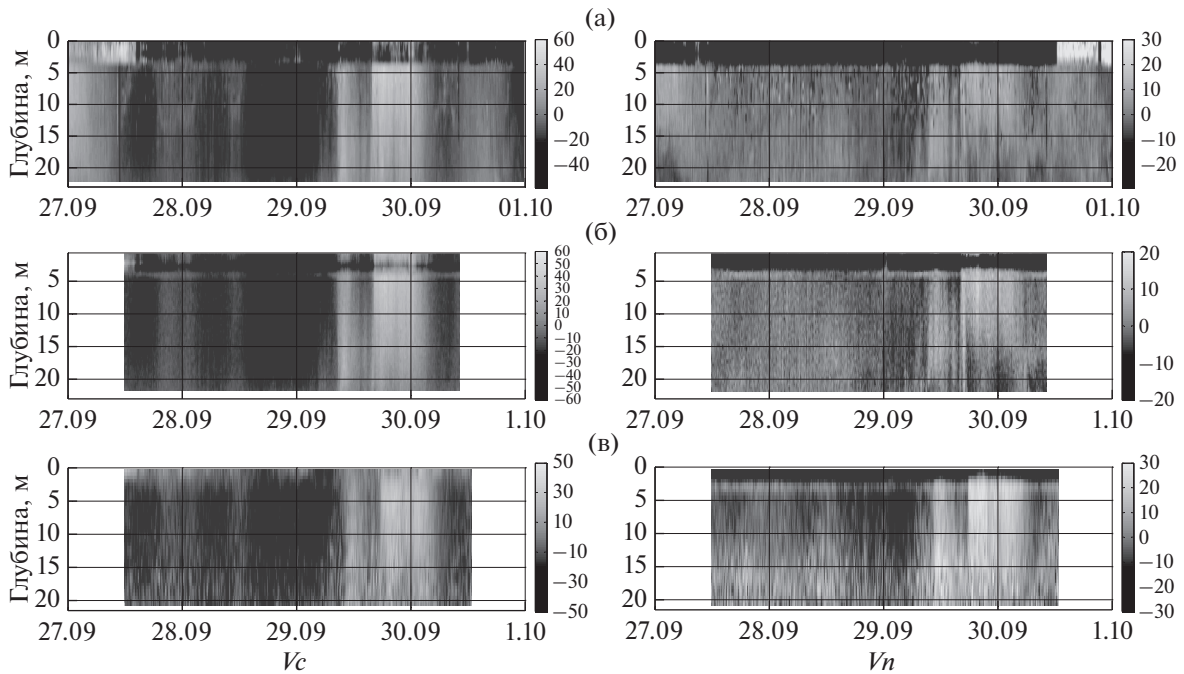


Рис. 5. Вдольбереговая V_c (слева) и поперечная берегу V_n (справа) компоненты течений (см/с) по данным ADCP RDI (а), AWAC (б), ADP SonTek (в). Значения углов поворота осей координат β составляют -66° , -68° и $+4^\circ$, соответственно.

значения скорости компоненты V_n для ADP SonTek оказались заметно выше, чем у других приборов, также выше оказался уровень шумовых флуктуаций компоненты V_n в придонных слоях.

Таким образом, все три использованных ADCP выдали близкие результаты для временных зависимостей и абсолютных значений профилей модулей скорости течений и вдольбереговой компоненты течений V_c , которая является главной физически-обусловленной модой прибрежных течений. Для поперечной компоненты V_n скорости течений и направлений вектора течений β измерительные данные приборов ADCP RDI и AWAC оказались очень близки, но отличия данных ADP SonTek оказались весьма значительными.

4. СОПОСТАВЛЕНИЕ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ КОМПОНЕНТ ТЕЧЕНИЙ. КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ ФУНКЦИИ

4.1. Временные ряды вдольбереговой и поперечной компонент течений. Вертикальные развертки компонент скоростей течений (рис. 3–5) дают наглядное представление о характере временной и вертикальной изменчивости полей течений, однако их сравнение и получение количественных характеристик затруднено вследствие сложности сравнения пространственных данных, а также значительных объемов самих данных. Для количественного сопоставления временной изменчивости данных были построены одномерные ряды

значений продольной $V_c(t)$ и поперечной $V_n(t)$ компонент скорости течений.

В массивах интерполированных компонент вдольбереговой $V_c(h, t)$ и поперечной $V_n(h, t)$ скоростей выделялись диапазоны данных для 5-метровых слоев вблизи поверхности (5...10 м) и вблизи дна (15...20 м), внутри каждого диапазона данные осреднялись по глубине. Это позволяет минимизировать влияние случайных выбросов данных при анализе их временных характеристик. Временные ряды компонент скоростей в верхнем и нижнем слоях моря представлены на рис. 6. Жирными линиями отложены значения, сглаженные скользящим окном 2 ч, тонкими – несглаженные с шагом 10 мин. Не углубляясь сейчас в вопросы физической интерпретации полученных временных рядов (прежде всего – из-за краткости интервала измерений), обратим основное внимание на технические детали их сходства и наблюдаемых различий.

Как отмечалось выше, измерительные данные ADCP RDI и AWAC весьма схожи. В частности, общей закономерностью для них является превышение абсолютных величин скорости течения в верхнем слое над скоростями в глубинном слое, особенно явное для продольной компоненты течения V_c , для которой характерно также совпадение знака (направления) течений в верхнем и глубинном слоях. Направления поперечной компоненты V_n в верхнем и глубинном слоях совпадают не всегда. Например, 29–30 сентября наблюдался эпизод усиления положительной компоненты V_n

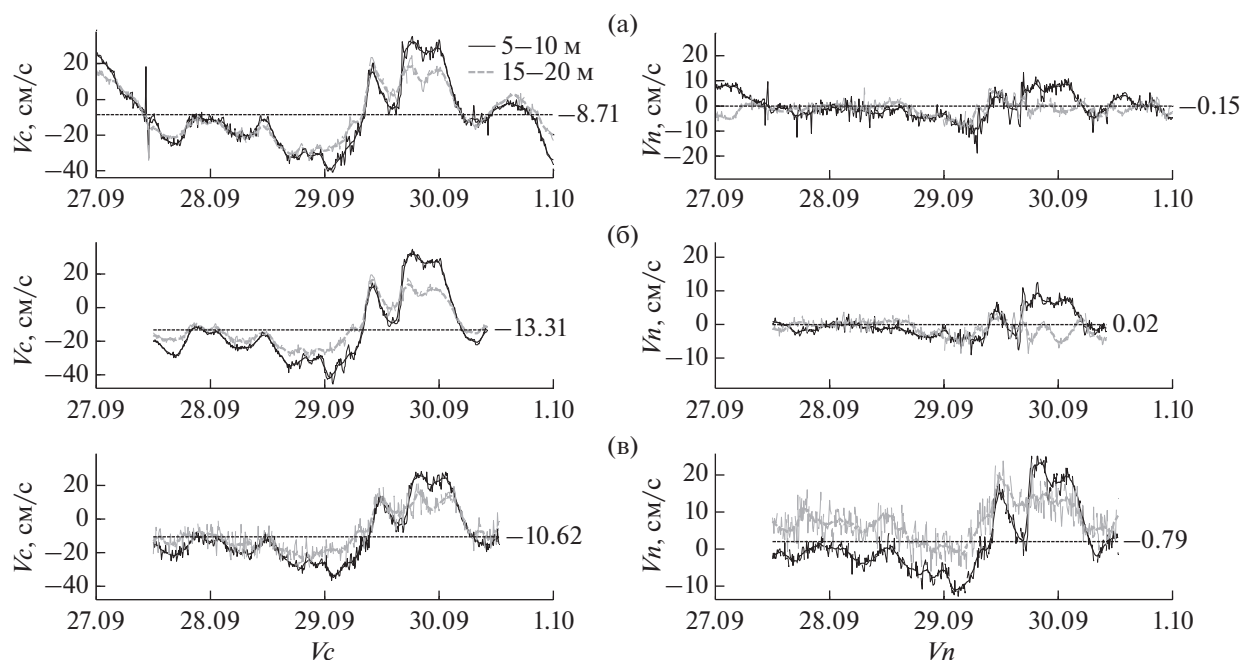


Рис. 6. Временные ряды значений вдольбереговой V_c (слева) и поперечной берегу V_n (справа) компонент течений в слоях 5–10 м и 15–20 м по данным ADCP RDI (а), AWAC (б), ADP SonTek (в).

(к берегу) в верхнем слое при одновременном отрицательном течении (от берега) в придонном слое. Можно отметить, что вдольбереговая компонента течений (левый столбец) оказывается менее зашумленной высокочастотными вариациями скорости, чем поперечная (правый столбец).

Для данных ADP SonTek продольная компонента V_c ведет себя сходным образом, однако относительный уровень ее шумов выше, особенно в глубинном слое, а абсолютные значения V_c оказались заниженными на 4–5 см/с относительно других приборов. Существенно иной характер имеют графики поперечной компоненты V_n – ее абсолютные значения примерно вдвое выше (до 20 см/с против 10 см/с). При этом временной ход графика $V_n(t)$ в верхнем слое (5...10 м) достаточно близок к ходу аналогичных графиков других ADCP. Однако его поведение в глубинном слое отличается очень значительно, что вряд ли можно объяснить столь значительными различиями в характере течений, а является, вероятно, приборным эффектом.

4.2. Количественное сопоставление временных рядов компонент течений. Корреляционные функции. Более детально степень сходства и различия данных различных ADCP оценивалась путем вычисления для них взаимных корреляционных функций. Для наглядности эта задача решалась в 2 этапа – наложение временных рядов, их визуализация, оценка максимальных коэффициентов корреляции, затем – собственно построение зависимостей корреляционных функций от величины временного сдвига между рядами данных.

На рис. 7 представлены графики временной изменчивости вдольбереговой $V_c(t)$ и поперечной $V_n(t)$ компонент течений с попарным наложением данных ADCP RDI и AWAC (а–б) и данных RDI и ADP SonTek (в–г) в верхнем (слева) и глубинном (справа) слоях в процессе тестового эксперимента. Нанесены максимальные значения коэффициентов взаимной корреляции R_{\max} для приведенных реализаций сигналов.

Можно видеть, что для пар данных ADCP RDI и AWAC значения V_c очень хорошо соответствуют друг другу как в верхнем, так и в нижнем слоях моря (рис. 7а) – коэффициент взаимной корреляции составляет 0.99. Взаимное соответствие значений поперечной компоненты течений V_n хуже, но также является достаточно высоким – коэффициенты корреляции составили 0.83 и 0.78. Для рядов данных ADCP RDI и ADP SonTek значения вдольбереговой компоненты V_c также показали высокое взаимное соответствие – коэффициенты корреляции составили 0.97 и 0.91 для верхнего и глубинного слоев соответственно. Для нормальной компоненты V_n , однако, расхождение между сигналами оказалось значительным, особенно для глубинного слоя – значения коэффициентов корреляции составили 0.74 и 0.34. Абсолютные значения V_n по данным ADP SonTek зачастую существенно (до 2-х раз) превышают данные ADCP RDI, что не может быть объяснено локальными особенностями течений, а, видимо, является приборным эффектом. В верхнем слое моря калибровка V_n данных ADP SonTek требует амплитуд-

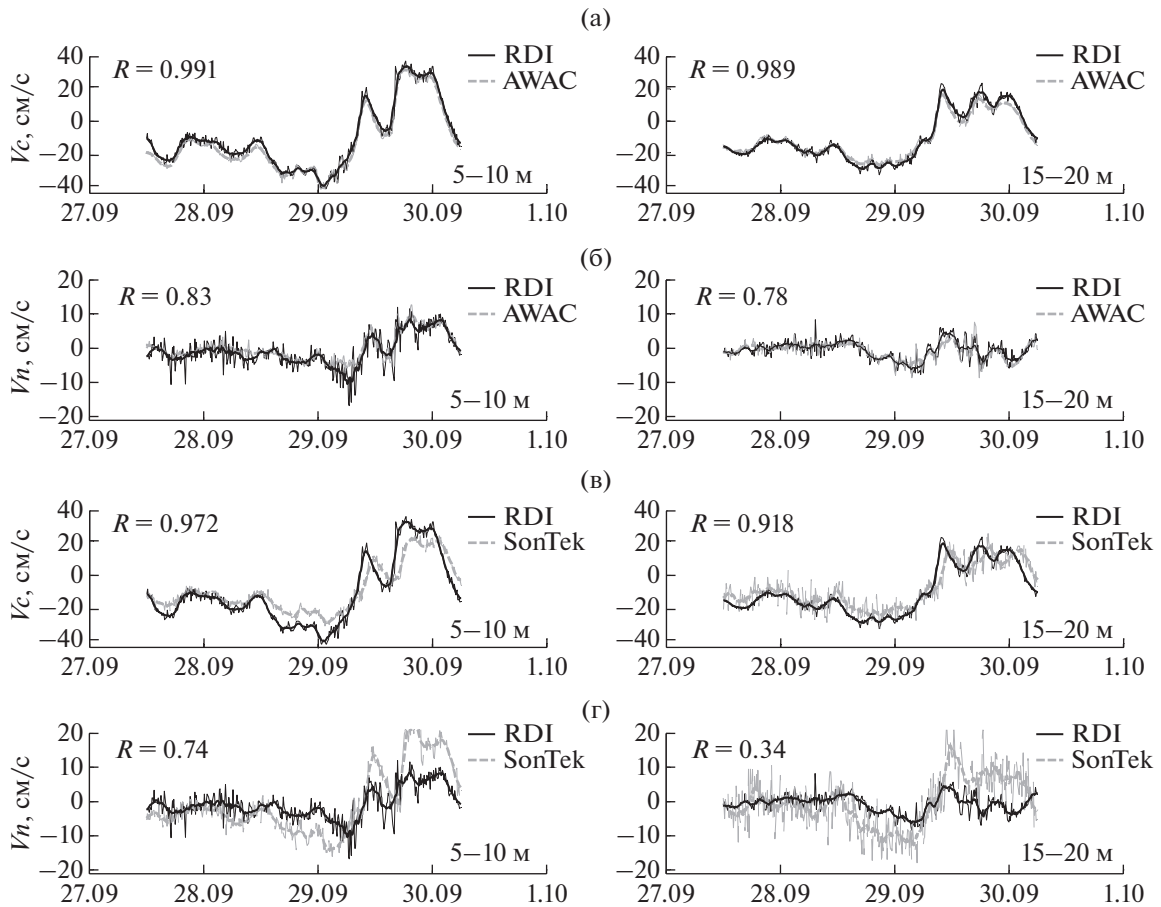


Рис. 7. Графики изменчивости вдольбереговой V_c (а, в) и поперечной берегу V_n (б, г) компонент течений по данным ADCP RDI и AWAC (а–б), RDI и ADP SonTek (в–г) верхнем (5–10 м) и нижнем (15–20 м) слоях моря.

ной коррекции, в нижнем слое ситуация еще более сложная.

На рис. 8 приведены результаты расчетов взаимных корреляционных функций $R(\Delta t)$ для рядов данных ADCP RDI/AWAC и RDI/ADP SonTek (для продольной и поперечной компонент течений, в верхнем и нижнем слоях моря) в зависимости от временного сдвига Δt между соответствующими рядами данных. Корреляции вычислялись по неосредненным рядам с шагом 10 мин, а в связи с тем, что ряды имели конечную длину (2.75 сут), они были “закольцованы” – при временных сдвигах на интервал Δt использовались ряды данных полной длины, в которых к “хвосту” временного ряда пристыковывались недостающие фрагменты из его начальной части. В формализованном виде $R(\Delta t) = \text{Corr}(V_i^k(t), V_j^l(t + \Delta t))$, где $V_{j,j}^{k,l}$ – вдольбереговая и поперечная компоненты течений по данным ADCP RDI и AWAC, либо RDI и SonTek, в слоях 5–10 м и 15–20 м.

Все корреляционные функции имеют один относительно четко выраженный максимум, различный по своей максимальной величине и име-

ющий тот или иной временной сдвиг Δt относительно показаний встроенного таймера ADCP RDI. Значения максимальной корреляции и соответствующих им временных сдвигов приведены на рисунках. В отдельных случаях вычислялись значения корреляций до 3-го знака, что, вообще говоря, малозначительно, но позволяет оценивать очень малые относительные различия. Они составляют для пары сенсоров ADCP RDI и AWAC для вдольбереговой компоненты $R(\Delta t) = 0.991$ и 0.989 для верхнего и нижнего слоев соответственно при временных сдвигах $\Delta t = 10$ мин и 0 мин, а для поперечной компоненты – 0.83 и 0.78 при временных сдвигах 0 мин и 10 мин. Для пары сенсоров ADCP RDI и ADP SonTek – для вдольбереговой компоненты $R(\Delta t) = 0.97$ и 0.92 для верхнего и нижнего слоев соответственно при временных сдвигах $\Delta t = 100$ мин и 90 мин; для поперечной компоненты – 0.74 и 0.34 при временных сдвигах 90 мин и 80 мин.

Таким образом, взаимные корреляционные функции, зависящие от временного сдвига, оказываются эффективным инструментом для вычисления интервалов временных рассогласова-

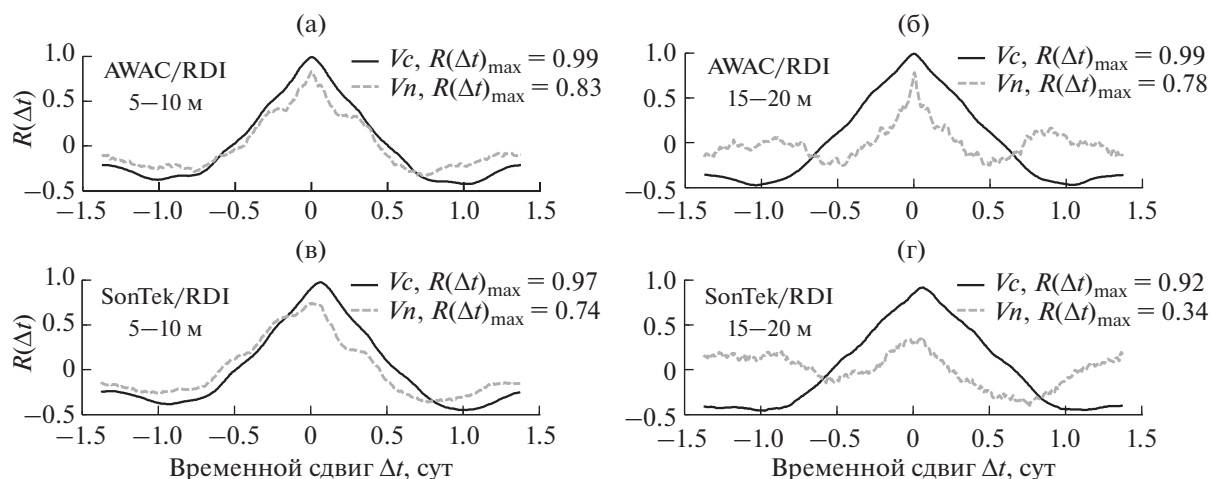


Рис. 8. Значения коэффициентов взаимной корреляции $R(\Delta t)$ как функции временных сдвигов между рядами данных ADCP RDI и AWAC (а), ADCP RDI и ADP SonTek (б) для вдольбереговой V_c (сплошные линии) и поперечной берегу V_n (пунктир) компонент течений в слоях 5–10 м (слева) и 15–20 м (справа).

ний между данными различных ADCP. Для анализируемого случая точность определения интервала рассинхронизации по времени составила 10 мин (1 интервал дискретизации) для пары ADCP RDI и AWAC. Можно сделать вывод, что данные приборов ADCP RDI и AWAC оказались высоко коррелированными друг с другом, что позволяет их в дальнейшем использовать при синхронных измерениях в разнесенных точках. Данные ADP SonTek отличаются значительно, при этом отличия в поведении вдольбереговой компоненты V_c оказались в разумном диапазоне рассогласования, они пригодны для практического использования, однако значения поперечной компоненты V_n отличаются более значительно, а в придонном слое — очень значительно. Исходя из значений корреляционных коэффициентов, ряды V_n в верхнем слое моря, полученные с помощью тестируемого экземпляра ADP SonTek, с некоторой коррекцией использовать можно, однако измерения V_n в нижнем слое моря следует признать недостаточно достоверными.

5. К ОБОСНОВАНИЮ КРИТЕРИЕВ ВЫЧИСЛЕНИЯ НАПРАВЛЕНИЯ БЕРЕГОВОЙ ЛИНИИ И УГЛА ПОВОРОТА ОСЕЙ КООРДИНАТ ADCP

5.1. Об “истинных” и “приборных” направлениях V_x и V_y и о направлении главной моды прибрежных течений V_c . Как отмечалось в п. 3.3 и было показано в работе [3], доминирующей модой течений в прибрежной зоне Черного моря являются вдольбереговые знакопеременные течения, практически параллельные направлению береговой линии в районе места установки донных станций. Причем главное направление (направление оси доминирующей вдольбереговой компоненты V_c)

течений может, в принципе, зависеть от точки установки прибора, донного рельефа, сезона измерений, диапазона глубин, длительности интервала измерений. При достаточно длительных измерениях можно выявить “истинное” главное направление вектора V_c для конкретной точки наблюдений, а те или иные отклонения от него могут использоваться при анализе сезонной или глубинной изменчивости течений.

По данным [3], в которых использовались результаты измерений донной станции ADCP RDI 600 кГц, осредненные по всему водному столбу 20 м за период более чем 1 календарный год, средняя амплитуда вдольбереговых течений $|V_c|$ примерно на порядок превышает среднюю амплитуду поперечных берегу течений $|V_n|$. В связи с этим для определения направления береговой линии был предложен критерий максимизации отношения $F(f_i) = |V_c|/|V_n|$, зависящий от угла поворота f_i ортогональной системы координат $\{V_c, V_n\}$ относительно местных декартовых координат $\{X, Y\}$, ориентированных по географическим параллели и меридиану соответственно. Здесь мы зачастую используем одни и те же термины V_c и V_n как для обозначения вдольберегового и поперечного берегу направлений (т.е. единичных векторов $\{\zeta_c, \zeta_n\}$), так и для значений скоростей вдоль этих направлений, что не должно вызвать затруднений, т.к. по контексту ясно, что именно имеется в виду — сами направления или значения скоростей вдоль них (см. схему на рис. 9а). Необходимо заметить, что, используя аналогичным образом обозначения V_x, V_y для ортогональных компонент течений, мы имеем в виду не столько значения по географическим направлениям — широтному и долготному, а те компоненты течений, которые фигурируют в записанных сериях измерений ADCP. В случае корректных показаний встроен-

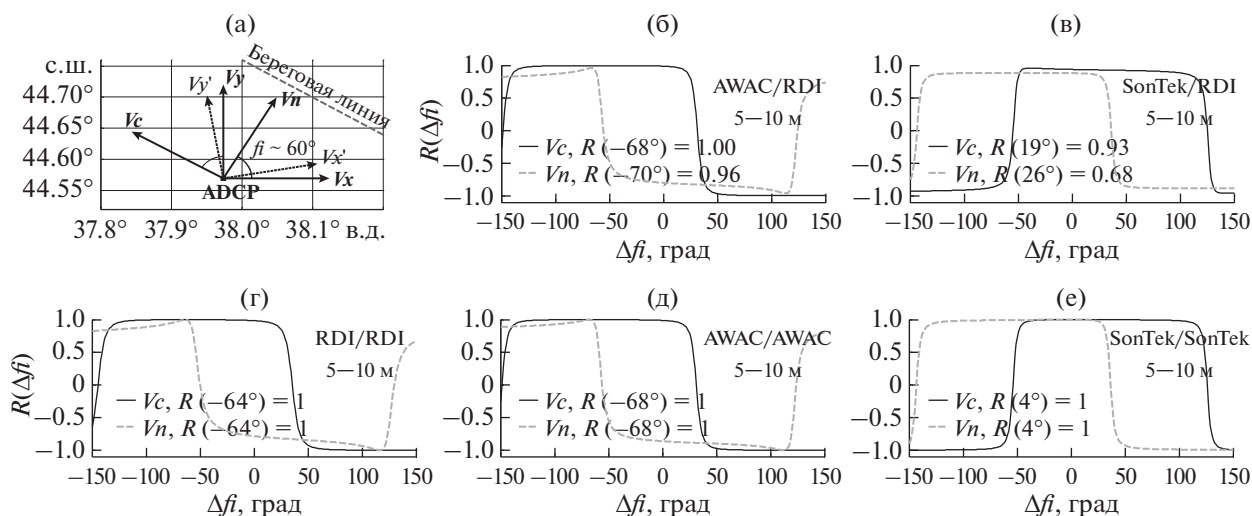


Рис. 9. Схема расположения направлений осей координат V_x, V_y и направлений V_c, V_n (а). Верхний ряд – угловые взаимные корреляционные функции $\Phi_{ij}(\Delta fi)$, для вдольбереговой V_c и поперечной компонент V_n течений в верхнем слое моря по данным AWAC и RDI (б), SonTek и RDI (в). Нижний ряд – угловые автокорреляционные функции по данным ADCP RDI (г), AWAC (д) и ADP SonTek (е).

ных компасов ADCP эти направления должны совпадать с широтным и долготным, но, как будет показано ниже, это далеко не всегда так. На рис. 9а отображены как “истинные” географические направления V_x и V_y , так и условные “приборные” направления V_x' и V_y' , в проекции на которые вычисляются скорости течений при угловом сдвиге показаний компаса ADCP и которые могут быть разными в каждом конкретном случае их донной установки. Разность углов между осями координат $\{V_x, V_y\}$ и $\{V_x', V_y'\}$ является априорно неизвестной величиной, но, благодаря существованию “истинного” направления главной моды прибрежных течений V_c , можно определить необходимый угол поворота fi “приборных” осей координат и, тем самым, обойти проблему возможной неточности компасов ADCP.

В ходе практической работы с донными станциями ADCP было выявлено, что в разных сериях измерений одного и того же ADCP, установленного примерно в одной точке, максимизации функционала $F(fi) = \langle |V_c(fi)|/|V_n(fi)| \rangle$, происходила при различных значениях угла fi , причем различия иногда составляли более 10° . Возможными причинами могут быть: а) разкалибровка встроенных магнитных компасов, б) остаточная намагниченность установочной оснастки, грузов и/или блока питания. С практической точки зрения результат эквивалентен – показания компасов оказываются недостоверными, а вычисление главного направления V_c необходимо проводить заново для каждой новой серии измерений, т.е. каждой новой донной установки ADCP.

Для вычисления главного направления вдольберегового течения и угла поворота осей коор-

динат fi относительно текущей системы координат ADCP (вне зависимости от корректности показаний компаса) рассматривались различные критерии: а) максимизация функционала $F(fi) = \langle |V_c(fi)|/|V_n(fi)| \rangle$, для каждого ADCP; б) максимизация модуля главной моды вдольбереговой скорости $|V_c(fi)|$; в) попарная максимизация взаимных угловых корреляционных функций для двух ADCP.

5.2. Угловые взаимные и автокорреляционные функции. Угловые корреляционные функции рассчитывались для временных рядов компонент V_c и V_n , использованных ранее в п. 4.2 при вычислении временных (сдвиговых) корреляционных функций $R(\Delta t)$. В данном случае переменным параметром являлся не временной сдвиг, а угол поворота осей координат, т.е. рассчитывались значения $\Phi_{ij}^k(\Delta fi) = \text{Corr}(V_i^k(t, fi), V_j^k(t, \Delta fi))$, где t – время, $fi, \Delta fi$ – переменные углы поворота осей координат 1- и 2-го ADCP, i, j – индексы ADCP, k – индекс продольной либо или поперечной компоненты течения в слое 5...10 м. Напомним, что временные ряды $V_c(t), V_n(t)$ были построены по данным $V_x(t), V_y(t)$ путем поворота осей координат ADCP RDI на угол fi , для отрицательных fi – против часовой стрелки, т.е. обычным образом для морской навигации, см. рис. 9а, аналогичным образом отсчитывался угол Δfi для 2-го ADCP, т.е. максимизация $\Phi_{ij}^k(\Delta fi)$ ожидается при примерном совпадении $\Delta fi \sim fi$.

На рис. 9 представлены результаты расчетов угловых автокорреляционных функций для каждого из 3-х ADCP и взаимных корреляционных функций AWAC – RDI и SonTek – RDI. Как мож-

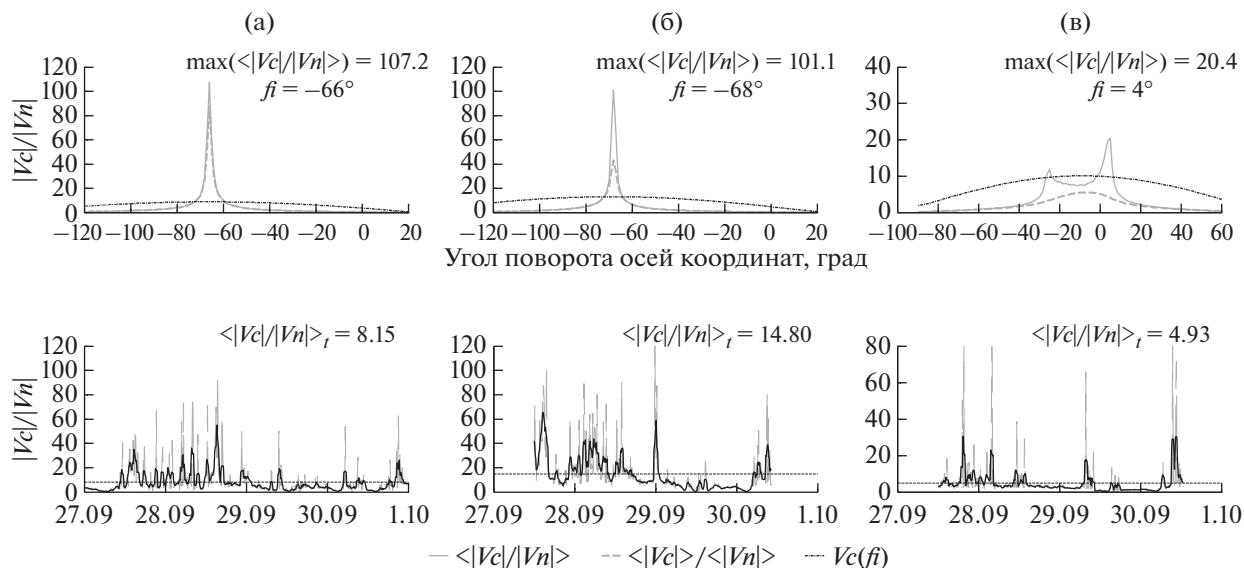


Рис. 10. Значения функционала $F(t, fi)$ (в безразмерных единицах) в верхнем слое 5–10 м по данным ADCP RDI (а), AWAC (б), ADP SonTek (в). Верхний ряд – значения $\langle F(t, fi) \rangle_t$ при разных параметрах осреднения, а также значения $\langle V_c|fi \rangle_t$. Нижний ряд – временные ряды $F(t, fi = \text{const})$, сплошные линии – при 2-х часовом скользящем осреднении, тонкие пунктирные – без осреднения.

но видеть, они не имеют четко выраженных максимумов, а являются практически гладкими. Это, в общем, не удивляет, т.к. временные ряды $V_c(t)$ и $V_n(t)$ самоподобны при умножении на постоянный коэффициент, а величина множителя при изменении угла поворота осей почти полностью определяется поведением функции $\cos(\Delta fi - fi)$, т.е. близка к единице при близких значениях углов $\Delta fi \sim fi$.

Максимальные значения угловых автокорреляционных функций $\Phi_{ij}(\Delta fi) = 1.0$ достигались при следующих углах поворота осей координат: $fi = -64^\circ, -68^\circ, +4^\circ$ – для ADCP RDI, AWAC и ADP SonTek соответственно. Максимальные значения угловых взаимных ($i \neq j$) корреляционных функций: $\Phi_{ij}(\Delta fi) = 0.99$ и 0.93 для вдольбереговой компоненты V_c достигались при углах поворота осей координат $\Delta fi = -68^\circ$ для парных рядов данных AWAC и ADCP RDI и $\Delta fi = +19^\circ$ для рядов данных ADP SonTek и ADCP RDI.

Можно сделать вывод, что методика определения главного вдольберегового направления течений путем вычисления взаимных угловых корреляционных функций двух разных ADCP для временных реализаций $V_c(t)$ и $V_n(t)$ в зависимости от углов поворота осей координат оказалась мало чувствительной к угловым поворотам осей в области максимальных значений корреляции.

5.3. Отношение вдольбереговой и поперечной компонент течений как критерий определения главного направления прибрежных течений. Вычисле-

ния функционала $F(t, fi) = \langle |V_c(t, fi)|/|V_n(t, fi)| \rangle_t$ с различными значениями влияющих параметров – угла поворота осей координат fi , интервала усреднения по времени, разными глубинными горизонтами – позволили углубить представления о достоинствах и ограничениях этого параметра в качестве критерия определения главного вдольберегового направления течений в прибрежной зоне.

Значения $F(fi)$ как функции угла поворота осей координат имеют резкий единственный максимум (рис. 10а и 10б). В зависимости от различных вариантов временного осреднения, амплитуда максимума менялась, однако угол fi , при котором достигалась максимизация $F(fi)$, сохранял свое значение. В верхнем ряду на рис. 10 представлены два различных варианта осреднения отношения $F(t, fi) = |V_c(t, fi)|/|V_n(t, fi)|$, а именно – сплошной линией отображается угловой ход величины $\langle F(t, fi) \rangle_t$ – т.е. осредненные по времени мгновенные отношения модулей вдольбереговой и поперечной компонент течений. Пунктиром показан угловой ход $\langle |V_c(t, fi)| \rangle / \langle |V_n(t, fi)| \rangle$ – отношение предварительно осредненных за время измерений величин. Штрих-пунктир – значения $\langle |V_c(fi)| \rangle_t$ – осредненные значения модулей компоненты V_c при различных значениях угла поворота осей fi . Все три варианта дают либо одинаковые, либо очень сходные значения угла fi , при этом существенно более ярко выраженным является критерий максимизации отношения $F(fi) = \langle |V_c(t, fi)|/|V_n(t, fi)| \rangle_t$, а

наиболее сглаженным и неявным – критерий максимизации модуля вдольбереговой скорости $\langle |V_c(fi)| \rangle_t$.

Что касается данных тестируемого экземпляра ADP SonTek, то для него расчет отношения $F(fi)$ привел к получению не одного, а двух максимумов при различных значениях угла fi (рис. 10в). В качестве гипотезы можно предположить, например, что оси акустических лучей данного образца не составляли правильную геометрическую конфигурацию с равным разносом лучей по угловым координатам. В результате этого результаты обработки оказались существенно отличными от данных ADCP RDI и AWAC.

На рис. 10 в нижнем ряду представлены зависимости отношения $F(t, fi) = |V_c(t, fi)|/|V_n(t, fi)|$ от времени при фиксированном значении угла fi , обеспечивающем максимизацию отношения $F(fi)$. Можно видеть, что графики $F(t, fi = \text{const})$ носят неоднородный пиковый характер. Это связано, очевидно, с разнозначностью поперечной компоненты V_n и переходом ее величины через область околонулевых значений. Для сглаживания эффекта “деления на ноль” к знаменателю отношения $F(t, fi)$ была добавлена малая положительная добавка $v0 \sim 0.1$ см/с, что несколько снизило амплитуду выбросов и общую величину отношения $F(t, fi) = |V_c(t, fi)|/(|V_n(t, fi)| + v0)$, но не повлияло на значение угла fi , при котором достигается максимизация $F(t, fi)$. Абсолютная величина отношения $F(t, fi)$ зависит, также, от диапазона глубин измерений – при вычислении отношения по полному диапазону глубин его величина возрастает относительно значений, вычисленных в верхнем слое моря. Это свидетельствует о высокой чувствительности данного параметра к знакопеременности поперечной компоненты течений V_n , которая может иметь в прибрежной зоне разные направления в верхнем и нижнем слоях моря.

Судя по острой неоднородности временного хода $F(t, fi)$ – интервал временного осреднения этой величины также имеет значение. Судя по приведенным графикам, одно- или двухсуточное осреднение может быть недостаточным – желательно усреднять отношение модулей компонент по более длительному интервалу времени. Предполагается, что величина $\langle F(t, fi, h) \rangle$ может зависеть от длительности интервалов осреднения, от диапазона глубин измерений, а также, вероятно, от сезонной изменчивости течений.

6. ВЫВОДЫ

1. Использование стационарных донных ADCP позволяет проводить долговременные измерения вертикальных профилей скорости течений, а также вариаций прозрачности воды – важных характеристик состояния и изменчивости водной сре-

ды. Проведение в прибрежной зоне Черного моря тестового эксперимента по сопоставлению результатов измерений различных донных ADCP, установленных в одно время в одном месте, позволило выявить особенности измерительных данных каждого прибора, их сходство и различия, в т.ч. в форматах и качестве выходных данных, приобрести опыт совместной синхронной обработки данных нескольких ADCP.

2. Была показана практическая целесообразность использования унифицированных промежуточных форматов данных, что позволяет в значительной мере стандартизировать вторичную обработку, положительно сказывается на качестве и достоверности получаемых результатов.

3. Совместный анализ профилей сигналов обратного рассеяния в сопоставлении с информацией о реальных глубинах установки приборов позволил сделать однозначный вывод о неинформативности эхо-сигналов из близкой к поверхности “зоны интерференции” и выше, определены диапазоны корректных отсчетов для каждого из приборов.

4. Проведенный анализ и сопоставление результатов измерений показали высокую степень взаимного соответствия основных измерительных данных для тестируемых экземпляров ADCP RDI и AWAC Nortek практически по всем значимым параметрам, тогда как результаты измерений использованного образца ADP SonTek имели ограниченную область соответствия – качество его данных оказалось вполне удовлетворительным для вдольбереговой компоненты течений в верхнем слое моря, но недостаточно удовлетворительным в придонных слоях, особенно для поперечной берегу компоненты течений.

5. Разложение вектора скорости течения на вдольбереговую V_c и поперечную берегу V_n компоненты оказывается удобным и эффективным методом анализа течений в прибрежной зоне. Были рассчитаны углы поворота осей координат для данных каждого ADCP, обеспечивающие максимизацию отношения $F(fi) = \langle |V_c(fi)|/|V_n(fi)| \rangle_t$. Для ADCP RDI и AWAC значения угла fi оказались близкими друг к другу, а для ADP SonTek значительно отличались. Рассогласование можно объяснить разкалибровкой встроенных компасов и/или влиянием локальных магнитных полей, например, остаточной намагниченности установочной конструкции или батарей питания.

6. Расчеты взаимных корреляционных функций данных различных ADCP при поворотах осей координат $\Phi_{ij}^k(\Delta fi) = \text{Corr}(V_i^k(t, fi), V_j^k(t, \Delta fi)), j \neq i$, показали низкую чувствительность данного метода – отсутствие явно выраженного максимума корреляции, что подтверждено расчетами угловых автокорреляционных функций $\Phi^k(fi), j = i$.

Вместе с тем, значения углов f_i , при которых происходит максимизация взаимных корреляционных функций $\Phi_{ij}(f_i), j \neq i$, оказались близки к значениям, вычисляемым методом максимизации отношения $F(f_i) = \langle |Vc(f_i)|/|Vn(f_i)| \rangle_t$. Для вдольбереговой и поперечной компонент течений значения максимизирующего угла f_i оказались несколько различными.

7. Анализ функционала $F(f_i, t) = |Vc(f_i, t)|/|Vn(f_i, t)|$ показал как его высокую чувствительность к углу поворота осей координат, так и высокую вариативность значений по времени и зависимость от диапазона глубин. Параметр $F(f_i, t, h)$ является эффективным индикатором генерального направления течений, при этом он чувствителен к выбору диапазона усреднения по времени и по глубине, т.е. его использование требует определенной аккуратности. Использование метода максимизации $\langle F(f_i, t) \rangle_t$ позволяет достаточно успешно обойти проблему разкалибровки встроенных компасов ADCP.

8. Опыт проведения совместных измерений и сопоставления измерительных данных различных ADCP оказался весьма полезным. Были разработаны либо доработаны методики и программные средства обработки измерительных данных для использованных приборов, приобретен определенный опыт для совместной обработки и сопоставления синхронных измерительных данных различных ADCP. В результате обработки были сделаны практические выводы о качестве измерительной информации тех образцов приборов, которые участвовали в тестовом эксперименте. С учетом перспектив использования донных станций ADCP при разнесенной установке и совместной обработке данных представляется важным этапом будущих работ проведение предварительных тестирований приборов ADCP в условиях подобных тестовых экспериментов.

Авторы благодарят А.Г. Зацепина, А.Н. Серебряного, А.Н. Морозова за помощь и ценные обсуждения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 17-14-00382).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блатов А.С., Иванов В.А. Гидрология и гидродинамика шельфовой зоны Черного моря. К.: Наукова думка, 1992. 242 с.
2. Зацепин А.Г., Островский А.Г., Кременецкий В.В. и др. Подспутниковый полигон для изучения гидрофизических процессов в шельфово-склоновой зоне Черного моря // Изв. РАН. Физ. атм. и океана. 2014. Т. 50. № 1. С. 16–29.
3. Зацепин А.Г., Пиотух В.Б., Корж А.О. и др. Изменчивость поля течений в прибрежной зоне Черного моря по измерениям донной станции ADCP // Океанология. 2012. Т. 52. № 5. С. 629–642.
4. Морозов А.Н., Лемешко Е.М. Методические аспекты использования акустического доплеровского измерителя течений (ADCP) в условиях Черного моря // Морск. гидрофиз. журн. 2006. № 4. С. 31–48.
5. Островский А.Г., Зацепин А.Г., Соловьёв В.А. и др. Автономный мобильный аппаратно-программный комплекс вертикального зондирования морской среды на заякоренной буйковой станции // Океанология. 2013. Т. 53. № 2. С. 259–268.
6. Сабинин К.Д., Серебряный А.Н. Применение акустических доплеровских профилометров течений для изучения пространственной структуры морской среды // Акустический журн. 2012. Т. 58. № 5. С. 639–648.
7. ADP® Acoustic Doppler Profiler Standard System // [электронный ресурс]: <http://www.sontek.com/productsdetail.php?ADP-Acoustic-Doppler-Profiler-4>
8. AWAC Acoustic Wave And Current Profiler // [электронный ресурс]: <http://www.nortek-as.com/lib/brochures/datasheet-awac>
9. Sentinel ADCP // [электронный ресурс]: <http://www.rdinstruments.com/sen.aspx>

Results of the Test Experiment Comparing the ADCP Measurements at Three Closely Located Bottom Stations

V. B. Piotukh, V. I. Baranov, S. B. Kuklev, O. I. Podymov

The results of the test experiment comparing of quasi-synchronous data of three different Acoustic Doppler Current's Profilers (ADCP) mounted close to each other on the seabed in the shelf zone of the Black sea in September 2014 were analyzed. The immediate goal of the experiment was to obtain quantitative estimates of the data of different ADCP located in the most similar conditions and conducting simultaneous measurement of sea currents in the same geographic location. The objective goals and the scheme of the experiment are described, as well as the method of processing of the measured data, the main results, their interpretation and analysis, including obtained practical results and conclusions.