# Сравнение характеристик течений, измеренных КВ и СВЧ радиолокаторами на гидрофизическом полигоне ИО РАН в Черном море, с данными ADCP и дрифтеров

А.Г. Зацепин<sup>1</sup>, В.В. Горбацкий<sup>2</sup>, С.А. Мысленков<sup>1,3</sup>, Д.И. Дудко<sup>2</sup>, Н.Н. Шпилев<sup>2</sup>, Д.В. Ивонин<sup>1</sup>, К.П. Сильвестрова<sup>1</sup>, В.И. Баранов<sup>1</sup>, В.А. Телегин<sup>1,4</sup>, С.Б. Куклев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, 117997, Россия E-mail: zatsepin@ocean.ru <sup>2</sup> Крыловский государственный научный центр, Санкт Петербург, 196158, Россия E-mail: v.gorbatskyi@gmail.com <sup>3</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова Москва, 119991, Россия E-mail: stasocean@gmail.com <sup>4</sup> Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова PAH, Москва, 108840, Россия E-mail: telvika@gmail.com

Представлены результаты комплексных измерений скорости течения, выполненных на гидрофизическом полигоне Института океанологии РАН на Черном море в районе г. Геленджика в сентябре-октябре 2015 г. и апреле 2016 г. В измерениях были задействованы следующие приборы: океанографический радиолокатор КВ-диапазона Sea Sonde (25 МГц), навигационный радиолокатор СВЧ-диапазона (9,7 ГГц), донные станции ADCP, установленные на глубинах 22 и 85 м, а также буксируемый за судном ADCP. В качестве лагранжевых измерителей скорости течения использовались дрифтеры, с подводным парусом высотой 1 м, располагаемым на различных глубинах. При этом решались следующие задачи: 1) тестирование различных вариантов расположения радиолокационных приборов; 2) комплексное использование различных средств измерения течений; 3) попарное сопоставление всех элементов измерительной системы. Анализ результатов показал, что степень совпадения результатов измерений различных приборов зависит от пространственно-временной изменчивости картины течений. Хорошее совпадение между различными приборами наблюдалось при наличии устойчивых квазистационарных течений (вихревых структур, при которых течение однородно по глубине и постоянно по времени в пределах нескольких часов), не связанных с ветровым воздействием. В случае неоднородного по глубине течения и его сильной пространственно-временной изменчивости расхождения между результатами измерений различными приборами становятся существенными, поскольку измерения течений физически проводятся ими на различных глубинах и с разным интервалом осреднения по времени и пространству. Наиболее хорошее совпадение получено при сопоставлении данных радиолокатора Sea Sonde с данными дрифтеров (среднеквадратическая ошибка составила 9,8 см/с, коэффициент корреляции 0,88). Показаны основные достоинства и недостатки используемых измерителей течений.

**Ключевые слова:** Черное море, течения, вихревые структуры, КВ доплеровский радиолокатор, СВЧ радиолокатор, АDCP, дрифтеры

Одобрена к печати: 03.11.2017 DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-7-250-266

## Введение

В прибрежной зоне гидрофизические процессы имеют сравнительно небольшие пространственные и временные масштабы, поэтому подходы к измерениям, используемые в открытом океане, не могут успешно применяться для экологического мониторинга и прогноза состояния водной среды (Зацепин и др., 2008). В прибрежной зоне Черного моря в районе г. Геленджика организован и функционирует подспутниковый гидрофизический полигон (Зацепин и др., 2014), одной из задач которого является долговременный оперативный мониторинг динамики вод с субмезомасштабным пространственным разрешением (Зацепин и др., 2011, 2012). Получаемые на полигоне натурные данные востребованы для калибровки технологий и алгоритмов, основанных на обработке спутниковых данных (Kubryakov et al., 2016). Также на акватории полигона внедряются дистанционные методы измерения течений и волнения с применением береговых радиолокаторов (Горбацкий, Сабинин, Телегин, 2015; Ивонин и др., 2013, 2016а, б). Разработка и тестирование радиолокаторов, предназначенных для измерения скорости поверхностных течений, является важной задачей развития современных технологий мониторинга морских прибрежных зон.

Для мониторинга и прогноза состояния Мирового океана используются методы численного моделирования с оперативным усвоением данных измерений (Марчук и др., 2013). В частности, в прогностических численных моделях циркуляции океана используются ассимилируемые данные динамического уровня свободной поверхности, получаемые при помощи спутниковой альтиметрии. Данный подход применяется и в отношении Черного моря (Korotaev, Saenko, Koblinsky, 2001; Kubryakov et al., 2016). Вместе с тем в прибрежных зонах морей шириной до 200 км вместо ассимиляции наблюдений уровня моря, которые вблизи берега не являются достоверными, возможно усвоение данных о скорости поверхностного течения, получаемых с использованием радиолокаторов КВ- и СВЧ-диапазона (Barrick, Evens, Weber, 1977; Ivonin et al., 2004).

Технология измерения скорости поверхностного течения в прибрежных зонах морей и океанов с помощью доплеровских радиолокаторов (радаров) широко используется за рубежом (в США, Канаде, Великобритании, Франции, Австралии и Японии) на протяжении почти 40 лет. Доплеровские радары КВ-диапазона (Sea Sonde, CODAR, США; WERA, Helzel Messtechnik GmbH, Германия) позволяют измерять скорость поверхностных течений в прибрежной зоне от 0,5-5 до 20-200 км от берега с пространственным разрешением 0,5-5 км в зависимости от диапазона рабочей частоты и дальности измерений. При наличии многих разнесенных вдоль берега радаров удается восстанавливать поле скорости поверхностных течений в протяженной вдоль берега полосе моря, как это делается, например, в Калифорнии, США (Lynch, Holboke, Naimie, 1997). Данный метод уже используется в ряде передовых стран для оперативного диагноза и прогноза поля течения в прибрежных зонах морей и океанов (Fujii et al., 2013; Lynch, Holboke, Naimie, 1997).

В России доплеровские радиолокаторы КВ-диапазона для измерения скорости морских течений не производятся: имеются только прототипы (Гарбацевич и др., 2011, 2012). Океанографические СВЧ-радиолокаторы являются штучными исследовательскими изделиями (Ивонин и др., 2011, 2016а, б; Ivonin et al., 2011). Положительный опыт в измерении скорости поверхностных течений на Балтийском и Черном морях с помощью доплеровского КВ-радара Sea Sonde описан в работах (Горбацкий, Сабинин, Телегин, 2015; Горбацкий и др., 2017). Применение СВЧ-радиолокатора для мониторинга волнения и течений описывается в работах (Гарбацевич и др., 2015; Ивонин и др., 2011, 2013, 2016а, 6; Ivonin et al., 2011).

Структура поля течения в районе гидрофизического полигона ИО РАН на Черном море — сложная и разнообразная, велика ее изменчивость как во времени, так и в пространстве (Зацепин и др., 2008, 2011). Полигон находится на узком шельфе, динамика вод которого находится под влиянием меандрирующего основного черноморского течения (ОЧТ) и мезомасштабных вихревых образований с диаметром 40–100 км (Зацепин и др., 2012). Кроме того, на акватории полигона часто обнаруживаются субмезомасштабные вихри с диаметром 2–10 км (Зацепин и др., 2011, 2012). Под влиянием меандров ОЧТ и вихревых образований, а также ветрового воздействия и берегового стока скорость течения на шельфе изменяется как по амплитуде (от нуля до 80–100 см/с), так и по направлению, причем преобладает вдольбереговая составляющая скорости течения (Зацепин и др., 2008, 2012; Калашникова и др., 2013; Лаврова и др., 2013). В настоящее время на гидрофизическом полигоне скорость течения измеряется при помощи заякоренных акустических доплеровских профилографов течений (ADCP), зонда-профилографа «Аквалог» (Островский и др., 2013), а также эпизодически производится буксировока ADCP (Зацепин и др., 2012) и запуск лагранжевых дрифтеров (Мысленков и др., 2014, Сильвестрова и др., 2016). Учитывая разномасштабную пространственно-временную изменчивость прибрежных течений, данные методы измерений не позволяют осуществлять полноценный мониторинг динамики вод.

Доплеровские радиолокаторы могут регистрировать поле скорости поверхностного течения на акватории полигона с интервалом по времени в один час и могут служить весьма эффективным средством мониторинга прибрежных течений. Однако для определения вектора скорости течения желательно иметь как минимум два разнесенных вдоль берега радиолокатора, а это условие не выполнялось в рамках данной работы. Кроме того, радиолокатор позволяет измерять скорость течения только в самом приповерхностном слое, характеристики течения в котором не обязательно совпадают с характеристиками течения в толще воды.

Целью работы является представление результатов совместных измерений скорости течения КВ- и СВЧ-радиолокаторами, а также ADCP и дрифтерами на гидрофизическом полигоне ИОРАН на Черном море в районе г. Геленджика в сентябре-октябре 2015 г. и апреле 2016 г. Проведены и проанализированы результаты сравнения данных измерений, выполненных различными приборами.

#### Данные и методы

Дистанционные измерения скорости поверхностного течения в прибрежной зоне моря проводились при помощи доплеровского KB-радиолокатора Sea Sonde, имеющегося в одном экземпляре. Радиолокатор имеет комплект передающих и приемных антенн и позволяет производить измерения в полосе моря шириной порядка 20 км (www.codaros.com). Технические характеристики радиолокатора Sea Sonde представлены в работе (Горбацкий и др., 2017). Для полноценного измерения поля скорости поверхностных течений необходимо использование двух радиолокаторов, разнесенных вдоль береговой линии на расстояние, при котором их радиальные лучи в рабочем поле пересекаются между собой. В распоряжении авторов данной работы имелся всего один радиолокатор. Тем не менее делались попытки измерения поля скорости поверхностных поряжении авторов данной работы имелся всего один радиолокатор. Тем не менее делались попытки измерения поля скорости поверхностных поря методика, описанная в статье (Горбацкий и др., 2017), заключается в последовательном перемещении с временным лагом радиолокатора из одной береговой точки в другую. Это перемещение вместе с настройкой локатора занимает несколько часов. При построении поля скорости течения предполагается, что за период времени измерения из двух точек поле течения не изменялось. Очевидно, что применение данной методики оправдано только при условии квазистационарности поля течения в районе измерений. Это условие выполняется далеко не всегда. Кроме того, частое перемещение локатора из одной точки в другую сопряжено с большими трудовыми затратами. Вторая методика заключается в стационарной постановке прибора в одной точке на берегу. Вектор скорости определяется на основе совместного анализа данных измерений по близким радиальным лучам, имеющим разные углы по отношению к берегу. Считая, что поле скорости одинаково на расстоянии этих лучей, можно определить вектор скорости для промежуточного луча (Горбацкий и др., 2017). Данная методика является более удобной и адекватной для проведения долговременных и непрерывных измерений, но ухудшает пространственное разрешение получаемых данных. При сравнении с данными измерений донных станций АDCP использовались также данные только одной радиальной компоненты скорости течения, измеренной радиолокатором.

Измерения скорости течения на морской поверхности доплеровским радаром Sea Sonde основаны на определении доплеровского сдвига в спектре рассеянного радиолокационного сигнала, вызываемого отражением от волн с длинами, равными половине длины излучаемых радиолокатором электромагнитных волн. Для данного радиолокатора с рабочей частотой 25 МГц длина таких волн составляет около 6 м. Спектр ветровых волн, амплитуда, направление их распространения определяют возможность и точность определения поля течений радиолокатором. Излучение происходит в импульсном режиме, который обеспечивает оптимальное соотношение сигнал—шум и позволяет контролировать пространственное разрешение измерений. Конструкция приемной антенны радиолокатора Sea Sonde позволяет формировать систему лучей, выходящих из точки установки антенны с угловым интервалом 5°, вдоль которых измеряются радиальные (вдоль лучей) скорости течений, осредненные по длинам 32 смежных отрезков каждого луча. Режимы работы радиолокатора позволяют получать разрешение вдоль лучей от 500 до 1500 м в зависимости от дальности зондирования. В Черном море при содержании солей 17 кг/м<sup>3</sup> дальность составляет около 20 км.

Измеряемые кросс-спектры радиолокационного сигнала осредняются по 10-минутным интервалам для минимизации влияния различных шумов и получения более устойчивых и достоверных данных. Полученные данные дополнительно осреднялись за шесть интервалов. В результате радиальные скорости течений представлены в виде картин радиальных скоростей, осредненных за один час.

В первом эксперименте, проходившем с 14 по 27 сентября 2015 г., радиолокатор последовательно устанавливался в двух точках: в точке Б (район Голубой бухты) на высоком берегу (около 60 м над уровнем моря) и в точке Д на территории базы отдыха «Витязь» в Дивноморском на расстоянии 13–14 км от точки Б. На *рис. 1* показаны точки установки прибора и размеры области поверхности моря, покрываемой радиолокационным зондированием. Во втором эксперименте, с 5 по 10 октября 2016 г., радиолокатор был стационарно установлен на пирсе в Голубой бухте (*puc. 1*) и измерения выполнялись круглосуточно.



Рис. 1. Расположение приборов в районе исследования и области покрытия радиолокационным зондированием

Измерение поверхностных течений проводились также при помощи навигационного радиолокатора Х-диапазона «Река», который был установлен на крыше ангара Южного отделения ИО РАН вблизи берега Голубой бухты на высоте 7 м от уровня моря (*puc. 1*). Радиолокатор «Река» произведен в НПО «Микран» (www.micran.ru/productions/rls/river/). Максимальная дальность РЛИ (РЛ-изображений), из которых удается извлечь информацию о течении, составляет около 1,5 км. Длина радиоволны радара — около 3 см (несущая рабочая частота — 9,41 ГГц). Подробно описание радиолокатора и схема обработки данных представлены в статье (Ивонин и др., 2016а). Точность данного метода относительно измерений ADCP, согласно работе (Ивонин и др., 2016а), составила 20 см/с по амплитуде и 20° по направлению. Место обработки РЛ-данных (квадрат со стороной 600 м) выбиралось так, чтобы сильно не захватывать мелкую воду, но в то же время включать точку расположения донной станции ADCP (*puc. 1*).

Для сопоставления с данными радиолокаторов использовались данные GPS-дрифтеров, оснащенных GSM-связью, подробно описанные в работах (Мысленков и др., 2014; Сильвестрова и др., 2016). В данном случае использовался подводный парус высотой 1 м, расположенный на горизонтах 3–4 и 0,5–1,5 м. Дискретность измерений по времени составляла 15–20 мин. Преимуществом дрифтеров является возможность отслеживания течений даже с очень маленькими скоростями — 2–5 см/с, и в том числе — в самом поверхностном слое. Основным ограничением для их использования является отсутствие GSM-связи, исчезающей при удалении от берега на 15–20 км.

Для проведения долговременных измерений профиля скорости течения в заданной точке акватории использовались стационарно установленные ADCP Workhorse 600 кГц на глубине 22 м и удалении около 1 км от берега на траверзе Голубой бухты и ADCP Workhorse 300 кГц на глубине 85 м и удалении 7,5 км от пирса Южного отделения ИО РАН на траверзе Геленджикской бухты (Зацепин и др., 2014). Также измерение течений проводилось с помощью буксируемого в специальной гондоле ADCP Workhorse 300 кГц в шельфовой зоне до глубин 200–250 м на пяти перпендикулярных берегу галсах (*puc. 1*). ADCP работал в режиме, позволяющем вычислять реальную скорость течения во время движения судна (bottom tracking). Точность измерения скорости течения составляла 2–3 см/с с вертикальным разрешением 1,5-2,5 м. Верхний горизонт измерений составлял 3,5 м (Зацепин и др., 2011, 2012).

#### Результаты

# Сопоставление данных измерения скорости течения, полученных при буксировке ADCP и при радиолокационных измерениях радиолокатором Sea Sonde

С 16 по 24 сентября 2015 г. на гидрофизическом полигоне ИО РАН проводились двухточечные (с перемещением радиолокатора между пунктами в Голубой бухте и Дивноморском) измерения скорости течения с помощью радиолокатора Sea Sonde. Практически одновременно с радарными измерениями выполнялась буксировка профилографа ADCP. Поля скорости течения, получаемые по данным радиолокации, относятся к приповерхностному слою воды толщиной около 0,5 м. По данным буксировки ADCP, верхний горизонт, где измеряются течения, расположен на глубине около 3,5 м.

На *рис. 2а* и *б* показаны совмещенные поля скорости течения, построенные по данным радиолокатора и буксировки ADCP в разные дни. Для 17 и 18 сентября (*рис. 2а* и *б* соответственно), по данным буксировки, выделяется вдольбереговое течение на юго-восток со скоростью 10-20 см/с. По данным радиолокации, в эти дни наблюдаются течения разного направления, которые слабо согласованы с данными буксировки. Для 23 и 24 сентября (*рис. 2в и г*) в поле течений наблюдаются антициклонические вихри диаметром 5–10 км со скоростью течения до 40-50 см/с, и в этом случае поля течений по данным радиолокации и буксировки ADCP хорошо совпадают и по модулю, и по направлению.



Рис. 2. Сопоставление поля скорости течения по данным измерений радиолокатора Sea Sonde с данными буксировки ADCP: a) 17.09.2015; б) 18.09.2015; в) 22.09.2015; г) 24.09.2015

Плохое совпадение для данных от 17 и 18 сентября объясняется несколькими причинами. В данном районе картина течений имеет весьма сложный характер (Зацепин и др., 2012) и формируется под воздействием различных факторов (ветер, ОЧТ, вихри). При слабом фоновом течении локальное влияние нестационарного ветра на приповерхностный слой усиливается, и можно предположить, что течения на горизонтах 0,5 и 3,5 м могут иметь разную скорость и направление. Также следует учитывать возможную изменчивость течения во времени. Буксировка выполняется за 6–8 ч, а данные о течении по радиолокации получены при совмещении съемок из двух пунктов, выполненных с разницей в несколько часов. Очевидно, что получаемые поля течений могут быть не вполне адекватны друг другу.

В случаях с хорошим совпадением данных 22 и 24 сентября ветер был слабый — около 2—4 м/с. Для наблюдаемых на полигоне вихрей, как было показано в работах (Зацепин и др., 2011, 2012), скорость течения однородна в верхнем слое толщиной 10—20 м, и эти вихри не теряют своей когерентности и не успевают существенно переместиться в пространстве на протяжении нескольких часов, занимаемых радиолокационной и ADCPсъемками.

Усиление западного ветра до 10 м/с, наблюдавшееся в дневные часы 18 сентября в западной части полигона, проявляется на данных радиолокации (*puc. 26*), тогда как на данных ADCP такого влияния не зафиксировано. Очевидно, что под нестационарным ветровым воздействием происходит быстрое усиление течения в тонком приповерхностном слое воды, тогда как глубже этого не наблюдается. Проблема учета влияния ветрового воздействия на скорость течения, измеряемую радаром, требует особого исследования.

Для более корректного сравнения следует использовать только радиальные компоненты скорости по данным одноточечной радиолокации и соответствующие им во времени и пространстве проекции скорости по данным ADCP. По результатам сопоставления радиальных компонент скорости, по данным радиолокации и ADCP, для съемок 23 и 24 сентября коэффициент корреляции составил около 0,8, а среднеквадратическая ошибка (СКО) — 9–10 см/с. Для съемок 17 и 18 сентября корреляция отсутствует, по-видимому, из-за неоднородности вертикального профиля течений в слое 0–4 м, а также значительной временной изменчивости скорости течения, которая сглаживается в пределах интервала осреднения данных измерений радиолокатором Sea Sonde.

# Сопоставление скорости течения, измеренной донными ADCP, с данными радиолокатора Sea Sonde

В период эксперимента с 5 по 10 октября 2016 г. скорость течений измерялась радиолокатором, установленным стационарно на пирсе в Голубой бухте (*puc. 1*, точка Б) и сопоставлялась с измерениями на верхнем горизонте (3,5 м) донных станций ADCP, установленных на глубине 22 м (ближний) и 85 м (дальний) (*puc. 1*). Результаты сравнения для радиальной компоненты скорости течения ADCP (осреднение 1 ч) и радиолокатора приведены



на *рис. 3.* Исходя из расположения донных станций ADCP, из данных радиолокатора были выбраны лучи, проходящие наиболее близко от точек их постановки.

*Рис. 3. Скорость течения по данным донных станций ADCP (Vadcp), радиолокатора Sea Sonde (Vrad)* и скорость ветра (Va) с 5 по 10 октября 2016

Для луча, проходящего через ближний ADCP, угол к линии берега составляет 100° и, следовательно, это не позволяет измерять вдольбереговое течение (преобладающее в данном районе). Радиальная компонента течения по данным ближнего ADCP в среднем составляет 5–10 см/с, по данным радиолокатора скорость практически всегда выше (*puc. 3*). При сопоставлении всего ряда данных с 5 по 10 октября получен коэффициент корреляции 0,8 и СКО 6,9 см/с. Динамика изменчивости течения по данным радиолокатора воспроизводится верно, однако СКО сравнима с абсолютными значениями скорости.

Для луча, проходящего через дальний ADCP, угол к линии берега уже составляет 132°. Радиальная компонента течения по данным дальнего ADCP на глубине 85 м с 5 по 8 октября составляет 5–10 см/с, а с 8 по 10 октября — 20–30 см/с (*puc. 3*). Как видно на *puc. 3*, течения, измеренные радиолокатором и ADCP, в целом хорошо согласованы с 5 по 8 октября, а после 9 октября наблюдается сильное расхождение. При сопоставлении всего ряда данных с 5 по 10 октября получен коэффициент корреляции 0,65 и СКО 11,7 см/с. С 9 на 10 октября скорость ветра достигала 12–13 м/с и наблюдался шторм. 10 октября шторм стал затухать и наблюдалась пологая зыбь с длиной волны 40–50 м, что, скорее всего, является причиной значительного расхождения при сравнении скорости течений по ADCP и радиолокации. В пределах 10 см/с СКО является приемлемой для используемого радиолокатора (Fujii et al., 2013).

К сожалению, в случае донного ADCP, так же как и для буксируемого ADCP, сравнение с данными радиолокации проводится на разных горизонтах, и это может служить причиной расхождения данных.

Сопоставление скорости течения, измеренной СВЧ-радаром, с данными измерений донными ADCP и радиолокатором Sea Sonde

10 апреля 2015 г. проведен эксперимент по исследованию течений в районе Голубой бухты с помощью CBЧ-радиолокатора «Река», донного ADCP на глубине 22 м и радиолокатора ра Sea Sonde, установленного на пирсе (*puc. 1*). По данным измерения радиолокатора «Река» и профилографа ADCP (осреднение за 1 ч по горизонтам 2–4 м) рассчитаны радиальные компоненты скорости течения, соответствующие ближайшему к станции ADCP лучу Sea Sonde. На *puc. 4* представлено сопоставление радиальной скорости течения по всем приборам. Скорость течения по данным ADCP не превышает 11 см/с. Данные радиолокатора «Река» доступны только за несколько часов утром и днем 10 апреля, поскольку только в это время была достаточная для определения скорости течения амплитуда ветровых волн. Видно, что данные всех приборов достаточно хорошо согласуются между собой. Скорость течения по радиолокатора катору «Река» практически точно совпадает с данными ADCP. Течения по данным Sea Sonde хорошо коррелируют с данными ADCP, но абсолютные скорости завышены.



Рис. 4. Скорость течения по данным радиолокаторов «Река», Sea Sonde и донного ADCP

#### Сопоставление радиолокационных измерений с данными дрифтеров

В период проведения радиолокационных измерений выполнялись измерения характеристик течений с помощью дрифтеров. На *рис. 5* показаны траектории дрифтеров за период с 22 по 23 сентября 2015 г. Всего было выпущено шесть дрифтеров парами с парусами на глубине 0,5–1,5 и 3–4 м для каждой пары дрифтеров. Дрифтеры были выпущены на разрезе через вихрь, выявленный по данным буксировки ADCP 22 сентября (*рис. 2в*).

Первая пара дрифтеров, выпущенная ближе к берегу, описала петлю антициклонического направления, и далее один дрифтер с парусом 3-4 м зашел в Геленджикскую бухту, а другой, с парусом 0,5-1,5 м, продолжил движение в западном направлении. Остальные две пары дрифтеров попали в антициклонический вихрь, перемещающийся на северо-запад (*puc. 5*). Существенных различий траекторий и скорости течения у дрифтеров с парусами на разных глубинах не наблюдалось, что свидетельствует об однородности течения в верхнем слое по глубине в период прохождения вихрей.



Рис. 5. Радиальные скорости течения по данным радиолокатора Sea Sonde и траектории дрифтеров

С 22 по 23 сентября 2015 г. выполнялись измерения скорости течения с помощью радиолокатора Sea Sonde из точек, расположенных в Голубой бухте и в Дивноморском (*puc. 1*). В эти дни было получено 19 осредненных за один час полей радиальной скорости течения. Для сопоставления с данными радиолокации по траекториям дрифтеров были восстановлены вектора скорости, соответствующие радиальным компонентам радиолокации также с часовым осреднением. Всего для сопоставления было получено 66 пар векторов, согласованных по времени и находящихся на расстоянии не более 400 м друг от друга.

На *рис. 6* представлена диаграмма рассеяния при сопоставлении скорости течения по данным дрифтеров и радиолокации, а также основные статистические параметры. В целом данные радиолокации хорошо коррелируют с данными дрифтеров. Систематическая ошибка отрицательная, что указывает на занижение скорости радиолокатором. В целом СКО соответствует результатам других исследований (Paduan et al., 2006).



Рис. 6. Сопоставление скорости течения по данным радиолокатора Sea Sonde и дрифтеров

Наблюдается более высокая корреляция данных радиолокации с течениями по дрифтерам, чем по данным ADCP. Это может быть вызвано несколькими причинами. Сравнение проводится более корректно, так как часть дрифтеров имеет парус на глубине 0,5-1,5 м, а дрифтеры с более глубоким парусом в эти дни двигались примерно с той же скоростью. Осреднение за один час позволяет исключить краткосрочные пульсации скорости. При средней скорости 30 см/с дрифтер за 1 ч проходит около 1 км и, следовательно, при точности определения координат 5 м погрешность при измерении скорости по дрифтерам не превышает 1 см/с. Однако дрифтеры находятся в зоне действия радиолокатора не более 1-2 сут, и это не позволяет набрать большее количество данных для сравнения.

#### Заключение

Оперативный мониторинг течений в прибрежной зоне моря является важной частью оперативного экологического мониторинга, поскольку динамика вод определяет перенос загрязнений и вентиляцию вод шельфа. Наиболее перспективной технологией непрерывного измерения поля скорости морских поверхностных течений на шельфе является радиолокационная, основанная на использовании доплеровских радиолокаторов КВ- и СВЧ-диапазонов. Однако существует ряд методических вопросов, от решения которых зависит репрезентативность получаемых данных и возможность их интерпретации. Настоящая работа является определенным шагом вперед в решении некоторых из этих вопросов.

В 2015—2016 гг. на гидрофизическом полигоне ИО РАН в районе г. Геленджика осуществлена апробация технологии мониторинга течений на основе использования береговых радиолокаторов Sea Sonde (CODAR) и «Река» («Микран»).

Преимуществом радиолокатора Sea Sonde является большая площадь измерения скорости течения (порядка 20 км<sup>2</sup>), что позволяет оценивать пространственный масштаб прибрежных субмезомасштабных вихрей, их перемещение, время существования. Буксировка ADCP и дрифтеры не могут дать такого количества данных и такого площадного покрытия. Однако пространственное разрешение данных Sea Sonde составляет ~750 м, что не всегда позволяет восстанавливать сложную структуру течений. Другой проблемой использования Sea Sonde в данной работе является наличие только одного локатора, тогда как для построения полных векторов скорости течения по стандартной методике требуется наличие данных от двух разнесенных вдоль берега приборов. Попытки проводить двухточечные измерения последовательным перемещением прибора из одной точки в другую нельзя признать успешными, так как это слишком трудозатратно. Кроме того, временная изменчивость поля течения часто слишком велика, и гипотеза о квазистационарности поля на протяжении цикла двухточечных измерений выполняется далеко не всегда.

Для долговременного мониторинга поля скорости течения также применялась стационарная установка прибора Sea Sonde в одной точке. Однако в прибрежной зоне моря вдольбереговая составляющая скорости течения в несколько раз превосходит поперечную берегу составляющую. Поскольку радиолокатор измеряет составляющую скорости только вдоль луча (радиальную составляющую), то в данных радиолокационных измерений возникает «слепая» зона там, где лучи пересекают течение под углом, близким к 90°. Следовательно, часть вдольберегового течения не может быть корректно восстановлена по методу «одноточечных» измерений.

СВЧ-радиолокатор «Река» показал хорошее совпадение радиальной составляющей скорости с данными ADCP. Однако данный прибор корректно работает при высоте волн, превышающей определенное значение (1 м), что наблюдается не часто в районе исследований, а значит, продуктивное использование этого радиолокатора для измерения скорости течения возможно лишь эпизодически.

Расхождение между измерениями скорости, выполняемыми с помощью ADCP и радиолокаторами, в ряде случаев связано с наличием вертикальной неоднородности течения в приповерхностном слое моря. Запуск поверхностных дрифтеров на разных горизонтах — 0,5; 1,5; 3 м — позволяет установить вертикальные неоднородности в течениях или их отсутствие, что особенно важно при сравнении данных радиолокаторов (измеряющих скорость в верхнем слое 0-1 м) и ADCP (горизонты 3-4 м).

Эксперименты 2015 и 2016 гг. показали, что степень совпадения результатов измерения различных приборов, вероятно, зависит от характеристик локального ветра и от степени волнения. Данные обстоятельства указывают на целесообразность прямого измерения скорости ветра и характеристик волнения на акватории полигона, а также использования результатов моделирования ветра и волнения с высоким пространственно-временным разрешением для последующего учета их влияния на радиолокационные измерения скорости течения.

Работа в части проведения измерений, обработки и анализа данных выполнена при поддержке проекта РНФ, проект № 14-50-00095. При работе над статьей и ее подготовке к публикации С.Б. Куклев использовал поддержку регионального гранта РФФИ\_№ 16-45-230781, а А.Г. Зацепин — гранта РФФИ\_РГО\_17-05-41089.

### Литература

- 1. Гарбацевич В.А., Ермошкин А.В., Иванов И.И., Телегин В.А. Измерение пространственно-временных характеристик морского волнения навигационными РЛС малой мощности // Гелиофизические исследования. 2015. Вып. 13. С. 91–96.
- Гарбацевич В.А., Телегин В.А., Лапшин В.С., Шаболдин Н.А., Иванов И.И., Ивонин Д.В. Малогабаритная многочастотная РЛС декаметрового диапазона для мониторинга океана и ионосферы. Концепции разработки и первые результаты // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 4. С. 100–106.
  Гарбацевич В.А., Лапшин В.С., Телегин В.А., Бузинский Н.Л., Шаболдин Н.А., Максимова Н.С., Иванов И.И.,
- 3. Гарбацевич В.А., Лапшин В.С., Телегин В.А., Бузинский Н.Л., Шаболдин Н.А., Максимова Н.С., Иванов И.И., Ивонин Д.В. РЛС декаметрового диапазона, предназначенная для радиолокационного мониторинга природных сред // Специальная техника. 2012. № 3. С. 30–34.
- Горбацкий В.В., Сабинин К.Д., Телегин В.А. Измерение вихревой структуры течений на морской поверхности в Черном море доплеровским КВ-радиолокатором // Труды XXIX Всерос. симп. «Радиолокационное исследование природных сред». Санкт-Петербург, 25–26 марта 2015 / под ред. М.М. Пенькова. 2015. Вып. 11.
- 5. Горбацкий В.В., Сабинин К.Д., Телегин В.А., Зацепин А.Г, Куклев С.Б. Применение доплеровского КВ-радиолокатора для исследования пространственной структуры течений в Черном море // Морской гидрофизический журн. 2017. № 3. С. 63–73.
- 6. Зацепин А.Г., Корж А.О., Кременецкий В.В., Островский А.Г., Поярков С.Г., Соловьев Д.М. Изучение гидрофизических процессов на шельфе и верхней части континентального склона Черного моря с использованием традиционных и новых методов измерений // Океанология. 2008. Т. 48. № 4. С. 510–519.
- 7. Зацепин А.Г., Кондрашов А.А., Корж А.О., Корж А.О., Кременецкий В.В., Островский А.Г., Соловьев Д.М. Субмезомасштабные вихри на кавказском шельфе Черного моря и порождающие их механизмы // Океанология. 2011. Т. 51. № 4. С. 592–605.
- 8. Зацепин А.Г., Пиотух В.Б., Корж А.О., Куклева О.Н., Соловьев Д.М. Изменчивость поля течений в прибрежной зоне Черного моря по измерениям донной станции ADCP // Океанология. 2012. Т. 52. № 5. С. 629–642.
- Зацепин А.Г., Островский А.Г., Кременецкий В.В., Низов С.С., Пиотух В.Б., Соловьев В.А., Швоев Д.А., Цибульский А.Л., Куклев С.Б., Куклева О.Н., Москаленко Л.В., Подымов О.И., Баранов В.И., Кондрашов А.А., Корж А.О., Кубряков А.А., Соловьев Д.М., Станичный С.В. Подспутниковый полигон для изучения гидрофизических процессов в шельфово-склоновой зоне Черного моря // Физика атмосферы и океана. 2014. № 1. С. 16–29.
- Ивонин Д.В., Телегин В.А., Азаров А.И., Ермошкин А.В., Баханов В.В. Определение вектора скорости течения по измерениям навигационного радара с широкой диаграммой направленности антенны // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 4. С. 219–227.
  Ивонин Д.В., Мысленков С.А., Чернышов П.В., Архипкин В.С., Телегин В.А, Куклев С.Б., Чернышова А.Ю.,
- 11. Ивонин Д.В., Мысленков С.А., Чернышов П.В., Архипкин В.С., Телегин В.А, Куклев С.Б., Чернышова А.Ю., Пономарев А.И. Система мониторинга ветрового волнения в прибрежной зоне Черного моря на основе радиолокации, прямых наблюдений и моделирования: первые результаты // Проблемы региональной экологии. 2013. № 4. С. 172–183.

- 12. Ивонин Д.В., Чернышов П.В., Куклев С.Б., Мысленков С.А. (2016а) Предварительные результаты сравнения измерений вектора скорости течения навигационным радаром Х-диапазона и донной станцией ADCP // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 2. С. 53–66.
- 13. Ивонин Д.В., Телегин В.А., Чернышов П.В., Мысленков С.А., Куклев С.Б. (2016б) Возможности радиолокационных навигационных систем Х-диапазона для мониторинга прибрежного ветрового волнения // Океанология. 2016. Т. 56. № 4. С. 647–658.
- 14. *Калашникова Н.А., Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Серебряный А.Н.* Влияние вихревых структур на распространение загрязнений в прибрежной зоне // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 3. С. 228–240.
- 15. Лаврова О.Ю., Серебряный А.Н., Митягина М.И., Бочарова Т.Ю. Подспутниковые наблюдения мелкомасштабных гидродинамических процессов в северо-восточной части Черного моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 4. С. 308–322.
- 16. *Марчук Г.И., Патон Б.Е., Коротаев Г.К., Залесный В.Б.* Информационно-вычислительные технологии: новый этап развития оперативной океанографии // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49. № 6. С. 629–642.
- 17. *Мысленков С.А., Зацепин А.Г., Сильвестрова К.П., Баранов В.И.* Использование дрейфующих буев и буксируемого профилографа для исследования течений на шельфе // Вестн. Моск. ун-та. Серия 5: География. 2014. № 6. С. 73–80.
- 18. Островский А.Г., Зацепин А.Г., Соловьев В.А., Цибульский А.Л., Швоев Д.А. Автономный мобильный аппаратно-программный комплекс вертикального зондирования морской среды на заякоренной буйковой станции // Океанология. 2013. Т. 53. № 2. С. 259–268.
- 19. Сильвестрова К.П., Мысленков С.А., Зацепин А.Г., Краюшкин Е.В., Баранов В.И., Самсонов Т.Е., Куклев С.Б. Возможности использования GPS-дрифтеров для исследования течений на шельфе Черного моря // Океанология. 2016. Т. 56. № 1. С. 159–166.
- Barrick D.E., Evens M.W., Weber B.L. Ocean surface currents mapped by radar // Science. 1977. Vol. 198. Issue 4313. P. 138–144.
- Fujii S., Heron M.L., Kim K., Lai J.-W., Lee S.-H., Wu X., Wu X., Wyatt L.R., Yang W.-C. An overview of developments and applications of oceanographic radar networks in Asia and Oceania countries // Ocean Science J. 2013. Vol. 48. No. 1. P. 69–97.
- 22. *Ivonin D.V., Broche P., Devenon J.L., Shrira V.I.* Validation of HF radar probing of the vertical shear of surface currents by ADCP measurements // J. Geophysical Research. 2004. Vol. 109. Issue C4. P. 1–8.
- Ivonin D.V., Telegin V.A., Bakhanov V.V., Ermoshkin A.V., Azarov A.I. Sample application of a low-cost X-band monitoring system of surface currents at the Black Sea shore // Russian J. Earth Sciences. 2011. Vol. 12. P. 1–8. ES2003. DOI: 10.2205/2011ES000507.
- 24. *Lynch D.R., Holboke M.J., Naimie C.E.* The Maine coastal current: spring climatological circulation // Continental Shelf Research. 1997. Vol. 17. Issue 6. P. 605–634.
- 25. *Korotaev G.K., Saenko O.A., Koblinsky C.J.* Satellite altimetry observations of the Black Sea level // J. Geophysical Research. 2001. Vol. 106. Issue. C4. P. 917–933.
- 26. *Kubryakov A.A., Stanichny S.V., Zatsepin A.G., Kremenetskiy V.V.* Long-term variations of the Black Sea dynamics and their impact on the marine ecosystem // J. Marine Systems. 2016. Vol. 163. P. 80–94.
- 27. *Paduan J.D., Kim K.C., Cook M.S. Chávez F.P.* Calibration and validation of direction-finding HighFrequency radar ocean surface current observations // IEEE J. Oceanic Engineering. 2006. Vol. 31. No. 4. P. 862–875.

## Comparison of coastal currents measured by HF and X-band radars with ADCP and drifter data at the IO RAS hydrophysical test site in the Black Sea

## A.G. Zatsepin<sup>1</sup>, V.V. Gorbatskiy<sup>2</sup>, S.A. Myslenkov<sup>1,3</sup>, N.N. Shpilev<sup>2</sup>, D.I. Dudko<sup>2</sup>, D.V. Ivonin<sup>1</sup>, K.P. Silvestrova<sup>1</sup>, V.I. Baranov<sup>1</sup>, V.A. Telegin<sup>1,4</sup>, S.B. Kuklev<sup>1</sup>

 <sup>1</sup>P.P. Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow 117997, Russia E-mail: zatsepin@ocean.ru
 <sup>2</sup> Krylov State Research Center, Saint Petersburg 196158, Russia E-mail: v.gorbatskyi@gmail.com
 <sup>3</sup> M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia E-mail: stasocean@gmail.com
 <sup>4</sup> N.V. Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism and Radio Wave Propagation RAS Moscow 108840, Russia

*E-mail: telvika@gmail.com* 

Results of complex sea current velocity measurements are presented. Experiments were held on the hydrophysical test site of the Institute of Oceanology RAS (IO RAS) in the Black Sea (near Gelendzhik) in September-October 2015 and in April 2016. Current velocity was measured by high frequency (HF) radar Sea Sonde (25 MHz), X-band radar

(9.7 GHz), two moored ADCPs at 22 m and 85 m, towed bottom-tracked ADCP and also Lagrangian drifters. Drifter underwater sails (0.5-1 m) could be located at different depths. The aims of the experiments were: 1) testing of different radar locations; 2) complex measurements of sea currents; 3) cross-verification of all available equipment. Agreement of all the measurement data were observed in conditions of intensive currents (and eddies, when current is quasi stable) without local wind forcing. The difference between the results was significant in case of variable vertical profile and high spatial and temporal variability of the current. Such difference is due to diverse range of measurement depths and averaging intervals. Also, a good result was obtained by comparing the Sea Sonde radar data with drifters data: correlation coefficient was 0.88 and the RMSE was 9.8 cm/s. The paper presents main advantages and disadvantages of used measurement equipment.

Keywords: Black Sea, coastal currents, submesoscsale eddies, HF radar, X-band radar, ADCP, drifters

Accepted: 03.11.2017 DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-7-250-266

## References

- 1. Garbatsevich V.A., Ermoshkin A.V., Ivanov I.I., Telegin V.A., Izmerenie prostranstvenno-vremennykh kharakteristik morskogo volneniya navigatsionnymi RLS maloi moshchnosti (Use low power marine radar X-band to measure the spatial-temporal characteristics of the ocean wave), *Geliofizicheskie issledovaniya*, 2015, Vol. 13, pp. 91–96.
- Garbatsevich V.A., Telegin V.A., Lapshin V.S., Shaboldin N.A., Ivanov I.I., Ivonin D.V., Malogabaritnaya mnogochastotnaya RLS dekametrovogo diapazona dlya monitoringa okeana i ionosfery. Kontseptsii razrabotki i pervye rezul'taty (Compact multifrequency HF radar for ocean and ionosphere monitoring. Conception and first tests), Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa, 2011, Vol. 8, No. 4, pp. 100–106.
- 3. Garbatsevich V.A., Lapshin V.S., Telegin V.A., Buzinskii N.L., Shaboldin N.A., Maksimova N.S., Ivanov I.I., Ivonin D.V., RLS dekametrovogo diapazona, prednaznachennaya dlya radiolokatsionnogo monitoringa prirodnykh sred (Radar of decametric band designed for radar monitoring of natural environments), *Spetsial'naya tekhnika*, 2012, No. 3. pp. 30–34.
- 4. Gorbatskii V.V., Sabinin K.D., Telegin V.A., Izmerenie vikhrevoi struktury techenii na morskoi poverkhnosti v Chernom more doplerovskim KV-radiolokatorom (Measurement of the eddy structure on the sea surface in the Black Sea by Doppler HF radar), *Trudy XXIX Vserossiiskii simpozium "Radiolokatsionnoe issledovanie prirodnykh sred"*, Sankt-Peterburg 25–26 marta 2015.
- 5. Gorbatskii V.V., Sabinin K.D., Telegin V.A., Zatsepin A.G, Kuklev S.B., Primenenie doplerovskogo KVradiolokatora dlya issledovaniya prostranstvennoi struktury techenii v Chernom more (Application of Doppler HF radar to study the spatial structure of currents in the Black Sea), *Morskoi gidrofizicheskii zhurna*l, 2017, No. 3, pp. 63–73.
- 6. Zatsepin A.G., Korzh A.O., Kremenetskii V.V., Ostrovskii A.G., Poyarkov S.G., Solov'ev D.M., Izuchenie gidrofizicheskikh protsessov na shel'fe i verkhnei chasti kontinental'nogo sklona Chernogo morya s ispol'zovaniem traditsionnykh i novykh metodov izmerenii (Studies of the hydrophysical processes over the shelf and upper part of the continental slope of the black sea with the use of traditional and new observation techniques), *Okeanologiya*, 2008, Vol. 48, No. 4, pp. 510–519.
- Zatsepin A.G., Kondrashov A.A., Korzh A.O., Korzh A.O., Kremenetskii V.V., Ostrovskii A.G., Solov'ev D.M., Submezomasshtabnye vikhri na kavkazskom shel'fe Chernogo morya i porozhdayushchie ikh mekhanizmy (Submesoscale eddies at the caucasus Black Sea shelf and the mechanisms of their generation), *Okeanologiya*, 2011, Vol. 51, No. 4, pp. 592–605.
- 8. Zatsepin A.G., Piotukh V.B., Korzh A.O., Kukleva O.N., Solov'ev D.M., Izmenchivost' polya techenii v pribrezhnoi zone Chernogo morya po izmereniyam donnoi stantsii ADCP (Variability of currents in the coastal zone of the Black Sea from long-term measurements with a bottom mounted ADCP), *Okeanologiya*, 2012, Vol. 52, No. 5, pp. 629–642.
- Zatsepin A.G., Ostrovskii A.G., Kremenetskii V.V., Nizov S.C., Piotukh V.B., Solov'ev V.A., Shvoev D.A., Tsibul'skii A.L., Kuklev S.B., Kukleva O.N., Moskalenko L.V., Podymov O.I., Baranov V.I., Kondrashov A.A., Korzh A.O., Kubryakov A.A., Solov'ev D.M., Stanichnyi S.V., Podsputnikovyi poligon dlya izucheniya gidrofizicheskikh protsessov v shel'fovo-sklonovoi zone Chernogo morya (Subsatellite polygon for studying hydrophysical processes in the Black Sea shelf-slope zone), *Fizika atmosfery i okeana*, 2014, No. 1, pp. 16–29.
- Ivonin D.V., Telegin V.A., Azarov A.I., Ermoshkin A.V., Bakhanov V.V., Opredelenie vektora skorosti techeniya po izmereniyam navigatsionnogo radara s shirokoi diagrammoi napravlennosti antenny (Possibility to measure velocity vector of surface currents by means of nautical radar with wide beamwidth antenna), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No 4, pp. 219–227.
   Ivonin D.V., Myslenkov S.A., Chernyshov P.V., Arkhipkin V.S., Telegin V.A, Kuklev S.B., Chernyshova A.
- Ivonin D.V., Myslenkov S.A., Chernyshov P.V., Arkhipkin V.S., Telegin V.A, Kuklev S.B., Chernyshova A. Yu., Ponomarev A.I., Sistema monitoringa vetrovogo volneniya v pribrezhnoi zone Chernogo morya na osnove radiolokatsii, pryamykh nablyudenii i modelirovaniya: pervye rezul'taty (Monitoring system of wind waves in coastal area of the Black Sea using coastal radars, direct wave measurements and modeling: First results), *Problemy regional'noi ekologii*, 2013, No. 4, pp. 172–183.
- 12. Ivonin D.V., Chernyshov P.V., Kuklev S.B., Myslenkov S.A. (2016a), Predvaritel'nye rezul'taty sravneniya izmerenii vektora skorosti techeniya navigatsionnym radarom Kh-diapazona i donnoi stantsiei ADCP (Preliminary comparisons of sea current velocity vector measurements by a nautical X-band radar and moored ADCP), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 2, pp. 53–66.

- 13. Ivonin D.V., Telegin V.A., Chernyshov P.V., Myslenkov S.A., Kuklev S.B. (2016b), Vozmozhnosti radiolokatsionnykh navigatsionnykh sistem X-diapazona dlya monitoringa pribrezhnogo vetrovogo volneniya (Possibilities of X-band nautical radars for monitoring of wind waves near the coast), *Okeanologiya*, 2016, Vol. 56, No. 4, pp. 647–658.
- 14. Kalashnikova N.A., Lavrova O.Yu., Mityagina M.I., Serebryanyi A.N., Vliyanie vikhrevykh struktur na rasprostranenie zagryaznenii v pribrezhnoi zone (Influence of the vortex structures on the spread of pollution in the coastal zone), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 3, pp. 228–240.
- 15. Lavrova O.Yu., Serebryanyi A.N., Mityagina M.I., Bocharova T.Yu., Podsputnikovye nablyudeniya melkomasshtabnykh gidrodinamicheskikh protsessov v severo-vostochnoi chasti Chernogo morya (Subsatellite observations of small-scale hydrodynamic processes in the northeastern Black Sea), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 4, pp. 308–322.
- 16. Marchuk G.I., Paton B.E., Korotaev G.K., Zalesnyi V.B., Informatsionno-vychislitel'nye tekhnologii: novyi etap razvitiya operativnoi okeanografii (Data-computing technologies: A new stage in the development of operational oceanography), *Izvestiya RAN, Fizika atmosfery i okeana*, 2013, Vol. 49, No. 6, pp. 629–642.
- 17. Myslenkov S.A., Zatsepin A.G., Sil'vestrova K.P., Baranov V.I., Ispol'zovanie dreifuyushchikh buev i buksiruemogo profilografa dlya issledovaniya techenii na shel'fe (Coastal dynamics of the Black Sea shelf zone investigated by drifting buoys and towed ADCP), *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya*, 2014, No. 6, pp. 73–80.
- Ostrovskii A.G., Zatsepin A.G., Solov'ev V.A., Tsibul'skii A.L., Shvoev D.A., Avtonomnyi mobil'nyi apparatnoprogrammnyi kompleks vertikal'nogo zondirovaniya morskoi sredy na zayakorennoi buikovoi stantsii (Autonomous system for vertical profiling of the marine environment at a moored station), *Okeanologiya*, 2013, Vol. 53, No. 2, pp. 259–268.
- Sil'vestrova K.P., Myslenkov S.A., Zatsepin A.G., Krayushkin E.V., Baranov V.I., Samsonov T.E., Kuklev S.B., Vozmozhnosti ispol'zovaniya GPS-drifterov dlya issledovaniya techenii na shel'fe Chernogo moray (GPS-drifters for study of water dynamics in the Black Sea shelf zone), *Okeanologiya*, 2016, Vol. 56, No. 1, pp. 159–166.
- 20. Barrick D.E., Evens M.W., Weber B.L., Ocean surface currents mapped by radar, *Science*, 1977, Vol. 198, Issue 4313, pp. 138–144.
- Fujii S., Heron M.L., Kim K., Lai J.-W., Lee S.-H., Wu X., Wu X., Wyatt L.R., Yang W.-C., An overview of developments and applications of oceanographic radar networks in Asia and Oceania countries, *Ocean Science Journal*, 2013, Vol. 48, No. 1, pp. 69–97.
- 22. Ivonin D.V., Broche P., Devenon J.L., Shrira V.I., Validation of HF radar probing of the vertical shear of surface currents by ADCP measurements, *Journal of Geophysical Research*, 2004, Vol. 109, Issue C4, pp. 1–8.
- 23. Ivonin D.V., Telegin V.A., Bakhanov V.V., Ermoshkin A.V., Azarov A.I., Sample application of a low-cost X-band monitoring system of surface currents at the Black Sea shore, *Russian Journal of Earth Sciences*, 2011, Vol. 12, pp.1–8, ES2003. DOI: 10.2205/2011ES000507.
- 24. Lynch D.R., Holboke M.J., Naimie C.E., The Maine coastal current: spring climatological circulation, *Continental Shelf Research*, 1997, Vol. 17, Issue 6, pp. 605–634.
- 25. Korotaev G.K., Saenko O.A., Koblinsky C.J., Satellite altimetry observations of the Black Sea level, *Journal of Geophysical Research*, 2001, Vol. 106, Issue C4, pp. 917–933.
- 26. Kubryakov A.A., Stanichny S.V., Zatsepin A.G., Kremenetskiy V.V., Long-term variations of the Black Sea dynamics and their impact on the marine ecosystem, *J. Marine Systems*, 2016, Vol. 163, pp. 80–94.
- 27. Paduan J.D., Kim K.C., Cook M.S. Chávez F.P., Calibration and validation of direction-finding HighFrequency radar ocean surface current observations, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2006, Vol. 31, No. 4, pp. 862–875.