# Предварительные результаты сравнения измерений вектора скорости течения навигационным радаром Х-диапазона и донной станцией АDCP

Д.В. Ивонин<sup>1</sup>, П.В. Чернышов<sup>2</sup>, С.Б. Куклев<sup>2</sup>, С.А. Мысленков<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт Океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, 117997, Россия E-mail: ivonin@ocean.ru <sup>2</sup> Южное отделение Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Геленджик, 353470, Россия <sup>3</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, 119234, Россия

Некогерентные радары Х-диапазона являются перспективным инструментом для мониторинга и исследования поверхностных течений на расстояниях до 7 км от точки наблюдений. Одним из сдерживающих условий их применения для этого является отсутствие экспериментально подтвержденных исследованний точности таких измерений. В данной статье авторы намереваются частично восполнить указанный пробел. Для радиолокационных измерений применялся стандартный навигационный радар «Река» (Микран), адаптированный для океанографических целей. Радар был установлен на берегу Черного моря в Геленджике. Для обработки данных радара использовался разработанный авторами алгоритм (Ivonin et al., 2011), который позволяет определять вектор скорости течений при высоте волнения более 1 м. Алгоритм основан на использовании последовательности амплитудных радиолокационных изображений поверхности моря с шагом около 2 с и повторяет принципы обработки данных, изложенные в (Young et al., 1986; WaMoS II, 2003). В результате модуляционных механизмов на радиолокационных изображениях проявляются сигналы от гребней длинных поверхностных гравитационных волн и, при их обработке в спектральном пространстве, по дисперсионному соотношению для поверхностных гравитационных волн возможно определить радиальные компоненты скорости течения по нескольким направлениям, а затем и восстановить вектор скорости течения. Верификация радиолокационных измерений течений проводилась с помощью акустического доплеровского профилографа скорости течений (ADCP), расположенного на донной станции на глубине 23 м и расстоянии 1 км от радара. Радар определял течения в точке около ADCP с осреднением по площадке 0,5 км × 0,5 км. По результатам обработки данных для штормового события, длившегося 5 дней, 23–28 сентября 2013 г., были определены течения с амплитудами скорости от 10 до 80 см/с. Направление течения за этот период менялось на 180°. Было получено, что точность радиолокационных данных по отношению к ADCP составляет 20 см/с по амплитуде скорости и 20° по направлению. Это находится в согласии с заявленными характеристиками океанографических радаров WAMOS II.

Ключевые слова: скорость течений, радиолокационные наблюдения, Х-диапазон, точность измерений, АDCP

Одобрена к печати: 22.02.2016 DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-2-53-66

# Введение

Разработка средств исследования и мониторинга прибрежных течений является важной задачей дистанционного зондирования океана. В настоящее время для этих целей успешно применяются специализированные океанографические прибрежные доплеровские радары KB-диапазона (коротко-волновые), такие как CODAR SeaSonde (Barrick et al., 1985), WERA (Gurgel et al., 1999) с несущей частотой 15÷30 МГц и длиной радиоволны 10÷20 м. Океанографическая KB-радиолокация насчитывает уже более 60-ти лет истории (Crombie, 1955; Crombie, 1972). В настоящее время существует более 200 инсталляций KB-радаров CODAR SeaSonde и более 80 КВ радаров WERA по всему миру. Радиусы действия локаторов до 50–100 км от места установки позволяют организовать сеть океанографических наблюдений волнения и поверхностных течений, почти непрерывных вдоль побережья. Одним из ярких примеров является сеть РЛ (радиолокационных) океанографических наблюдений на Тайване (Fujii et al., 2013), где в режиме реального времени организованы наблюдения течений и волнения вокруг всего острова.

Другим направлением прибрежной океанографической радиолокации является использование некогерентных СВЧ радаров (сверхвысокая частота, длина радиоволны около 3 см) для измерений волнения и течений, что было впервые реализовано Янгом в 1985 г. (Young et al., 1985). В настоящее время на базе этой разработки созданы коммерческие океанографические CBЧ системы WAMOS II (Nieto Borge et al., 2000; WaMoS; WaMoS, 2003) и SeaDarQ (SeaDarQ; Groeneweg et al., 2011). Они обладают меньшим, чем КВ-радары, радиусом действия, до 7 км (Groeneweg et al., 2011), и требуют достаточно высокого места установки (вышки, маяки, нефтяные платформы с высотой 40-60 метров (Vogelzang et al., 2000; Groeneweg et al., 2011), чтобы обеспечить такую дальность наблюдений морской поверхности. Некогерентные СВЧ-радары более приспособлены для измерений волнения и не могут измерять ни высоту волны, ни скорость течения при скорости ветра менее 3 м/с и высоте волны (высоте значительных волн) ниже 1 м (Ивонин и др., 2013; WaMoS, 2003). По этим причинам некогерентные СВЧ-радары предпочтительно устанавливать в открытом море, где более интенсивно дует ветер и, соответственно, больше мелких волн и обрушений, дающих необходимый уровень отраженного от них радиосигнала. Системы WAMOS II и SeaDarQ предназначены преимущественно для работы на нефтяных платформах. Основным их предназначением является измерение высоты волнения, которое в открытом море ими измеряется достаточно хорошо, как показывает сравнение с буйковыми данными (WaMoS, 2003).

Одновременно с этим производители океанографических СВЧ систем заявляют о возможности измерения скорости течений с точностью 20 см/с по амплитуде и 20° по направлению (WaMoS, 2003). Данная опция СВЧ систем находит все больший интерес у пользователей. В работах российских и зарубежных авторов (Ивонин и др., 2011; Раев, Скворцов, 2015; Cui et al., 2010; Groeneweg et al., 2011; Ivonin et al., 2011) были приведены примеры измерения скорости течений СВЧ радарами. В результате этих работ были показаны возможности исследования и мониторинга течений в прибрежной зоне на расстоянии до 7 км от берега (в зависимости от конструкции радара и высоты его установки). Пространственно-временная дискретизация полученных результатов составляет 0,5–1 км по пространству и 15–30 минут по времени. Это позволяет дистанционным способом исследовать субмезомасштабные прибрежные процессы, в том числе вихри (Ivonin et al., 2011) и их динамику. В связи с этим планируется широкое применение океанографических СВЧ систем в составе радио-гидрофизического полигона на Черном море около Геленджика (Гарбацевич и др., 2011, 2012; Ивонин и др., 2013; Зацепин и др., 2014).

Однако в открытой литературе в настоящее отсутствуют экспериментальные работы, подтверждающие или опровергающие заявленные характеристики CBЧ систем (WaMoS, 2003) по точности измерений течений. Существует лишь один пример сопоставления результатов численного моделирования и CBЧ измерений скорости течений для случая сильных приливных течений с амплитудами скоростей более 1 м/с (Groeneweg et al., 2011). Сопоставления радиолокационных CBЧ-данных с инструментальными и др. (например, ADCP – акустическим доплеровским профилографом скорости течений) до сих пор не сделано.

В данной работе представлены первые результаты сопоставления вектора скорости течений в прибрежной зоне Черного моря (г. Геленджик), полученным по данным нави-

гационного радара X-диапазона и по данным акустического доплеровского профилографа скорости течений.

### Условия эксперимента

Дистанционные исследования поверхностных течений проводились в 2013 г. на побережье Черного моря (г. Геленджик). Для измерения использовался навигационный радиолокатор Х-диапазона «Река» (Радар «Река», 2015), который располагался внутри Голубой бухты (*puc. 1a*). Радар был установлен на крыше ангара вблизи берега (*puc. 16*) на высоте 7 м от уровня моря. Такая высота установки ограничивала дальность работы радара по фону (поверхности моря). Максимальная дальность РЛИ (РЛ-изображений), из которых удалось извлечь информацию о течении, составила около 1,5 км. При этом максимально полученная дальность при измерений течений составляет 7 км при установке на маяке высотой 60 м (см. Groeneweg et al., 2011).

На удалении 1 км от радара на глубине 23 м (*рис. 1a*) находилась донная станция с акустическим доплеровским профилографом скорости течений (ADCP) Workhorse 600. Передача данных ADCP осуществлялась по телеметрическому каналу на берег в режиме реального времени. Частота записи данных по течениям – один раз в 20 минут. Заявленная производителем точность измерений скорости течения составляет 2 см/с.



Рис. 1. а) Схема установки приборов и батиметрическая карта Голубой бухты (Геленджик). Квадратом с размером стороны ~500 м обозначена область обработки РЛ-сигнала. Радиальными линиями от радара обозначены границы зоны обзора РЛС. б) Место стационарной установки РЛС «Река». в) Акустический профилограф скорости течения

В период с 23 по 28 сентября 2013 г. было зарегистрировано штормовое событие с волнением, распространявшимся с юга, юго-запада и запада, и высотой волны (значительной) от 1 до 2,5 м. Это создало благоприятные условия для радиолокационных наблюдений течений в продолжение нескольких дней.

### Дистанционные измерения

Радиолокатор «Река» является изначально обычным судовым навигационным локатором Х-диапазона производства НПО «Микран» (Томск) (Радар «Река», 2015). Длина радиоволны радара – около 3 см (несущая рабочая частота – 9,41 ГГц). Традиционно в навигационных радарах используется горизонтальная поляризация сигнала. Это является хорошим решением для обнаружения судов, но относительно плохо приспособлено для зондирования фона. Для последнего более удобной является вертикальная поляризация как с точки зрения теории рассеяния электромагнитного сигнала от морской поверхности (Valenzuela, 1968; Kudryavtsev et al., 2003), так и для практического использования (Vogelzang et al., 2000; Cui et al., 2010). Радиолокатор «Река» (см. *табл. 1*) имеет возможность выбора пространственного разрешения по дальности луча радара от 0,7 до 16 м (для текущих измерений использовалось разрешение 2 м). Угловое разрешение составляет 1° (при антенне длиной 2 м). Это позволяет получать на дальности 1 км пространственное разрешение поперек луча радара 17 м, на дальности 2 км – соответственно 34 м. Радар изначально использует цифровую аппаратуру для формирования и обработки сигнала, что значительно упрощает его адаптацию для океанографических исследований.

Характеристика	Значение
Частота	9,41 ГГц
Размер антенны	2 м
Разрешение по азимуту	1°
Разрешение по дальности	0,7; 2,0; 5,0; 16 м
Разрешение по азимуту на расстоянии 1 км от радара	17 м
Дальность действия по целям	36 км
Дальность действия по фону (при высоте установки 7 м)	1,5 км
Частота вращения антены	24 об/мин

Таблица 1. Основные технические характеристики радара «Река» (Микран)

# Принцип обработки РЛ-изображений

Навигационные СВЧ локаторы допускают получение только яркостного РЛ-изображения (РЛИ) морской поверхности. Такими отражателями в СВЧ-диапазоне выступают:

a) короткая гравитационно-капиллярная рябь длиной около 1,5 см для длины радиоволны 3 см (условие резонансного обратного брегговского рассеяния при настильных углах) (Басс, Фукс, 1972; Plant, 1986; Valenzuela, 1968);

б) обрушения волн (так называемые «микрообрушения» (Булатов и др., 2003; Шарков, 2009), фронтальные зоны обрушений, шероховатые «языки» обрушений (Ericson et al., 1999; Kudryavtsev et al., 2003), пена, острые гребни волн, а также участки поверхности с сильной кривизной (Guerin et al., 2010).

В результате модуляции количества элементарных отражателей наклонами и орбитальными скоростями длинных гравитационных волн (Каневский, 2003, 2004; Kanevsky, 2008; Kudryavtsev et al., 2003) на экране радара возникает изображение (*puc. 2*), на котором при интенсивном волнении можно проследить гребни волн и их движение во времени.



Рис. 2. Схема накопления и обработки РЛИ

Обработка серии РЛИ, каждое из которых получено за один оборот антенны, позволяет получить трехмерную спектральную информацию (в координатах – два волновых числа и частота) о движении элементарных отражателей. Часть этой информации соответствует спекл-шуму (Каневский, 2004; Kanevsky, 2008), обусловленному интерференцией элементарных отражателей. Другая часть – модуляции отражателей длинными поверхностными гравитационными волнами (Каневский, 2004; Kanevsky, 2008; Kudryavtsev et al., 2003), что проявляется на пространственно-частотных спектрах РЛИ (Nieto Borge et al., 2000; Ivonin et al., 2011; Ивонин и др., 2013) в виде хорошо различимого сигнала (*рис. 3*), расположенного в области дисперсионного соотношения для поверхностных гравитационных волн:

$$\Omega = \sqrt{gk \tanh(kH)} + \vec{k}\vec{U}_{eff}.$$
(1)

57

Здесь  $\Omega$  (рад/с) – частота волны, g = 9,81 (м/с<sup>2</sup>) – ускорение свободного падения,  $k, \bar{k}$  (рад/м) – волновое число и волновой вектор, H (м) – глубина,  $\vec{U}_{eff}$  (м/с) – вектор эффективной скорости течения. Понятие эффективной скорости течения,  $\vec{U}_{eff}$ , было введено Стюартом и Джоем (Stewart, Joy, 1974) применительно к задачам радиолокации скорости течений и является некоторым средневзвешенным интегралом от скорости течения по глубине:

$$\vec{U}_{eff} = 2k \int_{-H}^{0} \vec{U}(z) e^{2kz} dz.$$
 (2)

На *рис. 2* показана схема накопления и обработки РЛИ: i) на первом этапе накапливаются РЛИ 80 оборотов антенны (минимум требуется 48 оборотов, Nieto Borge et al., 2000), для этого требуется около 3 минут накопления информации; ii) на следующем этапе из РЛИ всего оборота антенны вырезается кусок РЛИ с размерами 0,5 км × 0,5 км, который находится около интересующей исследователя точки измерений; iii) затем делается трехмерное преобразование Фурье (по двум координатам и времени); iv) к трехмерной спектральной информации применяется дисперсионное соотношение (1) для определения вектора скорости течения. Подробно процедура обработки РЛИ изложена в (Ivonin et al., 2011; Ивонин и др., 2011).

На *рис. 3* показан двумерный пространственно-частотный спектр, полученный по результатам обработки 80 последовательных РЛИ. Он соответствует «нулевому» направлению радара, т.е. волнам, идущим прямо на радар вдоль радиального направления (от радара), проходящего через центр площадки размерами 0,5 км × 0,5 км и обозначенно-го пунктирной линией на *рис. 1a*. На спектре видны области трех различных сигналов.



Рис. 3. Двумерный (2D) пространственно-частотный спектр РЛИ. Синяя сплошная линия обозначает частоту из дисперсионного соотношения для основной гармоники. Зеленая линия – частота второй, связанной, гармоники  $ω_2 = \sqrt{2gk \tanh(2kH)}$ . Красные пунктирные линии – смещения частоты из-за течения ±50 см/сек

В области частот, соответствующих дисперсионному соотношению (1), видно проявление сигнала от поверхностных гравитационных волн. Также видно проявление сигнала от второй, связанной, гармоники поверхностных гравитационных волн с частотой  $\omega_2 = \sqrt{2gk} \tanh(2kH)$ , которая появляется в результате нелинейных взаимодействий основных, первых, гармоник. Вторая гармоника наблюдалась также в работах (Булатов и др., 2006; Шарков, 2009). Вблизи начала координат виден сигнал, связанный течением, возбуждаемым группами нелинейных волн (Slunyaev et al., 2012). Все остальное – это проявления спекл-шума (Каневский, 2004; Kanevsky, 2008). На *рис. 3* видно, что положение сигнала от поверхностных гравитационных волн несколько смещено относительно положения дисперсионной кривой (1), построенной для нулевой скорости течения  $\vec{U}_{eff}$ . Данное смещение происходит из-за поправки  $\vec{k}\vec{U}_{eff}$  в дисперсионном соотношении (1), благодаря чему и возможно определение скорости течения по РЛ-данным.

Для определения вектора скорости течения использовался подход, аналогичный предложенному в работе (Ивонин и др., 2011), при котором трехмерный пространственно-временной спектр РЛИ разбивался на несколько направлений и для каждого из них определялась радиальная скорость течения. В настоящей работе использовалось разбиение трехмерного пространственно-временного спектра РЛИ на 9 направлений с шагом 15° и сектором осреднения сигнала 15° (в работе (Ивонин и др., 2011) применялось разбиение на 4 сектора по 22,5°). Для каждого сектора вычислялся двумерный пространственно-временной спектр (аналогичный приведенному на *рис. 3*), по которому определялась радиальная скорость течения  $U_{eff,i}$  по *i*-му направлению ( $i = -5 \div 3$ ). Направление –  $\phi_0$  и амплитуду –  $U_{eff}$  скорости течения определяли, используя метод наименьших квадратов и минимизацию невязки, *res*<sub>U</sub>, по скорости течения:

$$res_{U} = \sum_{i=-5}^{3} \left[ U_{eff,i} - U_{eff} \cos(\varphi_{0} - (\varphi_{radar} + \varphi_{i})) \right]^{2}.$$
 (3)

Здесь  $U_{eff,i}$  (м/с) – радиальные скорости течения по *i*-му направлению,  $\varphi_i = i \cdot 15^\circ$ ,  $i = -5 \div 3$ ,  $\varphi_{radar} = (180^\circ + 14^\circ)$  – азимут центра площадки относительно места установки радара (*puc. 1a*).

### Измерения скорости течений с донной станции

Независимые измерения вектора скорости течений проводились с помощью ADCP Workhorse 600, установленном в составе донной станции на глубине 23 м. На *рис. 4* показаны результаты измерений ADCP амплитуды и направления скорости течения в период с 23 по 28 сентября 2013 г. Представлен диапазон глубин от -2 до -20 м с шагом 1 м. Ближайшие к поверхности горизонты (выше -2 м), как правило, не используются для обработки, поскольку могут содержать значительные ошибки определения скорости течений. Последние могут происходить из-за сложных переотражений сигнала ADCP у взволнованной поверхности, поскольку высота значительных волн в это время достигала 1,5÷2,5 м.



Рис. 4. Профили скорости и направления течения согласно данным донной станции ADCP (стрелками показаны горизонты осреднения сигнала для сравнения с данными радара)

Видно, что для диапазона глубин от -4 м до -20 м течения имели однородный характер (по глубине), с относительно небольшими изменениями по амплитуде скорости и направлению. Отличие наблюдалось только в верхнем слое, выше -4 м глубины. Данное отличие особенно заметно в момент прохождения пика высоты волнения 27 сентября в 00:00 МСК (*puc. 4*), когда высота значительных волн достигала 2,5 м (Ивонин и др., 2013). По этой причине, чтобы минимизировать возможное влияние волнения на данные ADCP, для сравнения с данными радара использовались данные ADCP ниже горизонта -4 м. С другой стороны, радиолокатор может давать информацию о скорости течений только в приповерхностном слое толщиной от 1 до 5 м в зависимости от длины поверхностных гравитационных волн, которые учитываются при обработке радиолокационных данных (Stewart, Joy, 1974; Ивонин, Брош, 2004).

По спектрам на *рис.* 4 видно, что для условий эксперимента в сентябре 2013 г. радиолокатор Х-диапазона позволял получать информацию о волнах с длинами от 70 м (0,09 рад/м) до 16 м (0,4 рад/м). Существует простое эмпирическое правило, предложенное Стюартом и Джоем (Stewart, Joy, 1974), о том, что радиолокатор усредняет информацию о скорости течения по глубине, равной примерно 1/8÷1/10 длины поверхностной гравитационной волны, которая используется для интерпретации данных. Учитывая его, можно определить, что нижний горизонт данных ADCP, которые можно использовать для сравнения с радаром, равняется -7 м. Таким образом, для сравнения данных радара и ADCP о скорости течения использовались горизонты ADCP от -4 до -7 м (*рис.* 4).

# Результаты сравнения данных радара и ADCP

На *рис. 5* приведено сравнение данных радара и ADCP по амплитуде и направлению скорости течения. Видно, что радиолокационные данные в целом согласуются с данными ADCP. При этом радиолокационные данные хорошо описывают динамику изменения амплитуды и направления скорости течения. Если в первой фазе измерений в течение 2-х дней, с 23 по 25 сентября, наблюдалось юго-восточное течение (направление 130° от N) со скоростью  $10\div30$  см/с, то во второй фазе измерений, с 26 по 28 сентября, наблюдалось практически противоположное по направлению западное течение (направление -80° от N) со скоростью  $60\div90$  см/с. Такая динамика течений хорошо объясняется наблюдаемым в данном районе периодическим чередованием циклонических и антициклонических субмезомасштабных вихревых движений, возникающих в результате отрыва струи OЧT (Основного Черноморского Течения) в районе мыса Идокопас (Зацепин и др., 2011).



Рис. 5. Сравнение направления и амплитуды скорости течения согласно РЛ-данным и АДСР

В период с 25 сентября 18:00 МСК по 26 сентября 16:00 МСК наблюдалось слабое волнение с высотой значительных волн менее 1 м, что не позволяло определять по РЛИ сигнала от волн и, соответственно, определять скорость течения. Ошибка в определении направления течения 25 сентября с 9:00 МСК по 18:00 МСК связана с практически нулевой, менее 10 см/с, скоростью течения в данный период времени. В период с 23 сентября 16:00 МСК по 25 сентября 9:00 МСК наблюдаются эпизодические выбросы в определении направления течения и его скорости. Высота волнения в этот период времени находилась

в пределах от 1 м до 1,5 м. В период достаточно высоких волн, более 2 м, которые наблюдались с 26 сентября 12:00 МСК по 27 сентября 12:00 МСК, радар стабильно, без выбросов, определяет направление течения. При этом амплитуда скорости течения, определенная радаром, отличается сначала в меньшую сторону по сравнению с измеренной ADCP, а затем в большую. Это может быть связано с динамикой течений в верхнем слое выше глубины -4 м, которые в данном сравнении не учитывались.

В целом, исходя из анализа представленных данных, можно заключить, что данные радиолокатора хорошо согласуются с данными ADCP по направлению и амплитуде скорости течения, при условии, что скорости течения превышают 10 см/с. Отличие данных радара от данных ADCP в среднем составляет 20 см/с по амплитуде и 20° по направлению.

# Заключение

В ходе натурных наблюдений проведено сопоставление радиолокационных данных о векторе скорости поверхностных течений, полученных с помощью некогерентного навигационного радара Х-диапазона, и данных ADCP, расположенного на глубине 23 м. Были представлены результаты обработки штормового события имевшего место с 23 по 28 сентября 2013 г. на побережье Черном моря около Геленджика. В этот период времени наблюдалось волнение, распространявшееся со стороны моря в сторону побережья, и имевшее высоту волны (значительной) от 1 до 2,5 м, что создало благоприятные условия для радиолокационных наблюдений течений в продолжении нескольких дней.

У побережья на удалении 0,5 км от берега и 1,2 км от радара (который находился в глубине бухты) радиолокатор зафиксировал вектор скорости течения. Амплитуды скорости находились в диапазоне от 0 до 75 см/с. В середине измерений был зафиксирован разворот течения на противоположное – с юго-восточного на западное, – что хорошо согласуется с часто наблюдаемым в данном районе периодическим чередованием циклонических и антициклонических субмезомасштабных вихревых движений, возникающих в результате отрыва струи основного черноморского течения в районе мыса Идокопас.

Данные радиолокатора о скорости и направлении течения показали хорошее согласие с данными ADCP, при условии, что скорости течения превышали 10 см/с. Отличие данных радара от данных ADCP в среднем составляет 20 см/с по амплитуде и 20° по направлению, что совпадает с заявленными точностями для аналогичных зарубежных океанографических систем типа WaMoS II.

Важность полученного результата обусловлена тем, что подобное сопоставление радиолокационных данных о скорости течений, полученных с помощью прибрежных СВЧ океанографических систем, и измерений независимых измерителей типа ADCP в отечественной и зарубежной литературе приводится впервые. Например, помимо заявленных точностей, подобных экспериментальных данных для океанографических систем типа WaMoS II не приводится. Одновременно с этим прибрежные радиолокационные системы X-диапазона

находят все большее распространение в качестве океанографических средств, предназначенных для мониторинга и исследования динамики субмезомасштабных процессов, и поэтому требуют экспериментально подтвержденного понимания точности их измерений.

Необходимо отметить, что при сопоставлении данных радара и данных ADCP существует значительный элемент неопределенности, который связан с различными элементами осреднения информации о скорости течения. Акустический профилограф скорости течений измеряет скорость течения «в точке». При этом для расположенного на дне ADCP остается недоступным для надежных измерений верхний, наиболее динамичный, горизонт толщиной около 2 м. Радиолокатор, наоборот, усредняет информацию о скорости течения по площадке с горизонтальными размерами 0,5 км × 0,5 км. При этом он также усредняет скорость течения по верхнему слою толщиной от 0 до 7 м, а самый верхний горизонт толщиной около 2 м оказывается для радиолокатора наиболее важным. По данной причине корректное сравнение данных радара, частности данных спутниковой радиолокационной съемки и других измерителей остается весьма сложной задачей, для решения которой требуется моделирование поверхностных течений с привлечением геострофических моделей, моделирование ветровых дрейфовых течений и учета течений Стокса индуцированного поверхностными гравитационными волнами (Ardhuin et al., 2009).

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ, проект №14-50-00095.

#### Литература

- 1. Басс Ф.Г., Фукс И.М. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. М.: Наука, 1972. 424 с.
- 2 Булатов М.Г., Кравцов Ю.А., Лаврова О.Ю., Литовченко К.Ц., Митягина М.И., Раев М.Д., Сабинин К.Д., *Трохимовский Ю.Г., Чюрюмов А.Н., Шуган И.В.* Физические механизмы формирования аэрокосмических радиолокационных изображений океана // Успехи физических наук. 2003. Т. 173. № 1. С. 69–87.
- 3. Булатов М.Г., Раев М.Д., Скворцов Е.И. Радиолокационные наблюдения нелинейных волновых процессов в прибрежной зоне // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2006. Т. 2. № 3. C. 50–55.
- 4. 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. T. 8. № 4. Č. 100–106.
- 5. 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.
- В. С. 50–54.
   Зацепин А.Г., Баранов В.И., Кондрашов А.А., 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.
   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 техника В.В., Станичный С.В. Подспутниковый полигон для изучения станитех на станичных С.В. Подспутниковый полигон для изучения станичных станичных станичных С.В. Подспутниковый полигон для изучения станичных станичных станичных С.В. Подспутниковый полигон для изучения станичных гидрофизических процессов в шельфово-склоновой зоне Черного моря // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2014. Т. 50. № 1. С. 16.
- 8. Ивонин Д.В., Брош П. Определение толщины речного потока на приустьевом взморье по измерениям доплеровского высокочастотного радара // Океанология. 2004. Т. 44. № 2. С. 305-312.
- 9. 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.
- 10. 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.

- 11. Каневский М.Б. О механизмах формирования РСА-изображения океана // Изв. высших учебных заведений. Радиофизика. 2003. Т. 46. № 1. С. 13–20.
- Каневский М.Б. Теория формирования радиолокационного изображения поверхности океана. Н. Новгород: Ин-тут прикл. физики РАН, 2004. 64 с.
- 13. Раев М.Д., Скворцов Е.И. Комбинированный метод радиолокационных измерений параметров поверхностного течений // Исследования Земли из космоса. 2015. № 6. С. 15-20.
- 14. Радар «Река» // http://www.micran.ru/productions/rls/river/.
- 15. Шарков Е.А. Обрушающиеся морские волны: структура, геометрия, электродинамика. М.: Научный мир, 2009. 304 с.
- Ardhuin F., Marie L., Rascle N., Forget P., Roland A. Observation and Estimation of Lagrangian, Stokes, and Eulerian Currents Induced by Wind and Waves at the Sea Surface // Journal of physical oceanography. 2009. Vol. 39. No. 11. P. 2820-2838.
- 17. Barrick D.E., Lipa B.J., Crissman R.D. Mapping Surface Currents with CODAR // CODAR System Incorporated. 1985. 4 p.
- 18. Crombie D.D. Doppler spectrum of sea echo at 13.56 Mc/s // Nature. 1955. Vol. 175. P. 681-682.
- *19. Crombie D.D.* Resonant backscatter from the sea and its application to physical oceanography // Proc. IEEE Int. Conf. on Engineering in the Ocean Environment, IEEE New York. 1972. P. 174–179.
- Cui L., He Y., Shen H., Lu H. Measurements of ocean wave and current field using dual polarized X-band radar // Chinese Journal of Oceanology and Limnology. 2010. Vol. 28. P. 1021–1028.
- Ericson E.A., Lyzenga D.R., Walker D. T. Radar backscatter from stationary breaking waves // J. of Geophys. Res. 1999. Vol. 104. No. C12. P. 29679–29695.
- 22. 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. P. 69–97.
- 23. Groeneweg J., Gautier C., Swinkels C., van der Westhuysen A. Application of navigation radar data to analyse spatial current and wave fields in the tidal inlet of Ameland // Waves In Shallow Environments (WISE) 2011 Meeting, Qingdao, China. 2011. P. 1–21.
- 24. Guerin C.-A., Soriano G., Chapron B. The weighted curvature approximation in scattering from sea surfaces // Waves in Random and Complex Media. 2010. Vol. 20. No. 3. P. 364–384.
- 25. Gurgel K.W., Antonischki G., Essen H.H., Schlick T. Wellen Radar (WERA): a new ground-wave HF radar for ocean remote sensing // Coastal Engineering. 1999. Vol. 37. No. 3. P. 219–234.
- Hessner K., Reichert K., Borge J.C.N., Stevens C.L., Smith M.J. High-resolution X-Band radar measurements of currents, bathymetry and sea state in highly inhomogeneous coastal areas // Ocean Dynamics. 2014. Vol. 64. No. 7. P. 1–10.
- 27. 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 // Russ. J. Earth. Sci. 2011. Vol. 12. P. 1–8.
- 28. Kanevsky M.B. Radar imaging of the ocean waves. Oxford: Elsevier, 2008. 207 p.
- 29. Kudryavtsev V.N., Hauser D., Caudal G., Chapron B.A semiempirical model of the normalized radar crosssection of the sea surface: 1. Background model // J. Geophys. Res. 2003. Vol. 108. No. C3. P. 2–24.
- Kudryavtsev V.N., Hauser D., Caudal G., Chapron B.A semiempirical model of the normalized radar crosssection of the sea surface: 2. Modulation transform function // J. Geophys. Res. 2003. Vol. 108. No. C3. P. 25–45.
- Nieto Borge J.C., Guedes C. Analysis of Directional Wave Fields Using X-Band Navigation Radar // Coastal Engineering. 2000. Vol. 40. P. 375–391.
- *32. Plant W.J.* A two-scale model of short wind-generated waves and scatterometry // J. Geophys. Res. 1986. Vol. 91. P. 10735–10749.
- 33. SeaDarQ radar systems. http://www.seadarq.com/.
- Slunyaev A.V., Sergeeva A.V., Pelinovsky E.N. Modelling of deep-water rogue waves: different frameworks // CENTEC Anniversary Book, Marine Technology and Engineering / Eds. by Guedes Soares C.et al. London: Taylor & Francis Group, 2012. P. 199–216.
- 35. Stewart R.H., Joy J.W. HF radio measurements of surface currents // Deep Sea Res. 1974. Vol. 21. P. 1039–1049.
- *36. Valenzuela G.* Scattering of electromagnetic waves from a tilted slightly rough surface // Radio Science. 1968. Vol. 3. P. 1057–1066.
- Vogelzang J., Vogelzang J., Boogaard K., Reichert K., Hessner K. Wave height measurements with navigation radar // International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. 2000. Vol. 33. No. B7/4; PART 7. P. 1652–1659.
- 38. WaMoS II // http://www.oceanwaves.de.
- 39. WaMoS II Wave and Surface Current Monitoring System Operating Manual. Version 4.0. OceanWaveS GmbH. Germany, April 2003. 146 p.
- 40. Young I., Rosenthal W., Ziemer F. A three-dimensional analysis of marine radar images for the determination of ocean wave directionality and surface currents // J. Geophys. Res. 1985. Vol. 90. No. C1. P. 1049–1059.

# Preliminary comparisons of sea current velocity vector measurements by a nautical X-band radar and moored ADCP

D.V. Ivonin<sup>1</sup>, P.V. Chernyshov<sup>2</sup>, S.B. Kuklev<sup>2</sup>, S.A. Myslenkov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> P.P. Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow 117997, Russia E-mail: ivonin@ocean.ru <sup>2</sup> Southern Branch of P.P. Shirshov Institute of Oceanology RAS, Gelendzhik 353470, Russia <sup>3</sup> M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119234, Russia

Non-coherent X-band radars are promising tools for monitoring and investigation of surface currents at distances of up to 7 km from the observation point. One of the limiting conditions of their use is the lack of experimentally confirmed investigations of accuracy of such measurements. This article is aims at filling this gap. For radar measurements we used standard navigation radar "River" (Micran) adapted for oceanographic purposes. The radar was installed on the Black Sea shore near Gelendzhik. For radar data processing we used an algorithm presented in (Ivonin et al., 2011), which allows to determine the velocity vector of currents in the case of sea wave heights greater than 1 m. The algorithm draws on works (Young et al., 1986; WaMoS II, 2003) and uses a sequence of amplitude radar images of sea surface acquired in increments of about 2 s. The modulation mechanisms manifest signals from the crests of long surface gravity waves, which becomes visible in radar images. After processing the latter in the spectral space, using the dispersion relation for surface gravity waves one may determine the radial components of current velocity in several directions, and then restore the vector velocity. The verification of the radar measurements of current swas performed by an acoustic Doppler current profiler (ADCP), located at the mooring station at a depth of 23 m, and 1 km away from the radar. The radar sensed the current near ADCP with averaging over the area of 0.5 km × 0.5 km. For a storm event, which lasted 5 days, 23–28 September, 2013, currents with amplitudes of 10 to 80 cm/s were registered. During this period the direction of currents changed by 180°. It was found that the accuracy of the radar measurements with respect to ADCP was 20 cm/s for the amplitude and 20° for the direction. These values are in agreement with the declared characteristics of the oceanographic radars WAMOS II.

Keywords: surface currents, radiowave oceanography, X-band, nautical radar, accuracy of remote measurements, ADCP

Accepted: 22.02.2016 DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-2-53-66

#### References

- 1. Bass F.G., Fuks I.M., *Rasseyanie voln na statisticheski nerovnoi poverkhnosti* (Wave scattering from statistically rough surfaces), Moscow: Nauka, 1972, 424 p.
- Bulatov M.G., Kravtsov Yu.A., Lavrova O.Yu., Litovchenko K.Ts., Mityagina M.I., Raev M.D., Sabinin K.D., Trokhimovskii Yu.G., Chyuryumov A.N., Shugan I.V., Fizicheskie mekhanizmy formirovaniya aerokosmicheskikh radiolokatsionnykh izobrazhenii okeana (Physical mechanisms of aerospace radar imaging of the ocean), Uspehi fizicheskih nauk, 2003, Vol. 173, No. 1, pp. 69–87.
- Uspehi fizicheskih nauk, 2003, Vol. 173, No. 1, pp. 69–87.
  Bulatov M.G., Raev M.D., Skvortsov E.I. Radiolokatsionnye nablyudeniya nelineinykh volnovykh protsessov v pribrezhnoi zone (Radar observations of nonlinear wave processes in the coastal zone), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2006, Vol. 2, No. 3, pp. 50–55.
- 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 multi-frequency HF radar to monitor the ocean and the ionosphere. Concept and first results), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 4, pp. 100–106.
   Garbatsevich V.A., Lapshin V.S., Telegin V.A., Buzinskii N.L., Shaboldin N.A., Maksimova N.S., Ivanov I.I., Ivo-
- 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 (HF radar designed for monitoring of earth environment), *Spetsial'naya tekhnika*, 2012, No. 3, pp. 30–34.
- Zatsepin A.G., Baranov V.I., Kondrashov A.A., Korzh A.O., Kremenetskiy V.V., Ostrovskii A.G., Soloviev 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), *Oceanology*, 2011, Vol. 51, No. 4, pp. 554–567.
- Zatsepin A.G., Östrovskii A.G., Kremenetskiy V.V., Nizov S.S., Piotukh V.B., Soloviev V.A., Moskalenko L.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), *Izvestiya*. *Atmospheric and Oceanic Physics*, 2014, Vol. 50, No. 1, pp. 13–25.
- Ivonin D.V., Broch P., Opredelenie tolshchiny rechnogo potoka na priust'evom vzmor'e po izmereniyam doplerovskogo vysokochastotnogo radara (Reconstruction of the Thickness of a Riverine Plume by the Measurements of One Single-Frequency VHF Radar), *Oceanology*, 2004, Vol. 44, No. 2, pp. 305–312.
- Ivonin D.V., Telegin V.A., Azarov A.I., Opredelenie vektora skorosti techeniya po izmereniyam navigatsionnogo radara s shirokoi diagrammoi napravlennosti antenny (Determination of the current velocity by means of a navigation radar with a broad antenna pattern), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz* kosmosa, 2011, Vol. 8, No. 4, pp. 219–227.

- 10. Ivonin D.V., Myslenkov S.A., Chernyshov P.V., Kuklev S.B., Cistema 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. 11. Kanevsky M.B., O mekhanizmakh formirovaniya RSA-izobrazheniya okeana (On the mechanisms of formation of the SAR images of the ocean), Izv. vysshikh uchebnykh zavedenii. Radiofizika, 2003, Vol. 46, No. 1, pp. 13–20.
- Kanevsky M.B., Teoriya formirovaniya radiolokatsionnogo izobrazheniya poverkhnosti okeana (Theory of radar 12 imaging of the ocean surface), Nizhny Novgorod: Institute of Applied Physics, 2004, 64 p.
- 13. Raev M.D., Skvortsov E.I., Kombinirovannyi metod radiolokatsionnykh izmerenii parametrov poverkhnostnogo techenii (Combined method of radar measurements of the parameters of the surface currents), Issledovaniya Zemli iz kosmosa, 2015, No. 6, pp. 15-20.
- 14. http://www.micran.ru/productions/rls/river/.
- 15. Sharkov E.A., Obrushayushchiesya morskie volny: struktura, geometriya, elektrodinamika (The breaking waves of the sea: the structure, geometry, electrodynamics), Moscow: Nauchnyi mir, 2009, 304 p.
- Ardhuin F., Marie L., Rascle N., Forget P., Roland A., Observation and Estimation of Lagrangian, Stokes, and 16 Eulerian Currents Induced by Wind and Waves at the Sea Surface, J. Phys. Oceanography, 2009, Vol. 39, No. 11, pp. 2820-2838.
- 17. Barrick D.E., Lipa B.J., Crissman R.D., Mapping Surface Currents with CODAR, CODAR System Incorporated, 1985, 4 p
- 18. Crombie D.D., Doppler spectrum of sea echo at 13.56 Mc/s, Nature, 1955, Vol. 175, pp. 681-682.
- Crombie D.D., Resonant backscatter from the sea and its application to physical oceanography, Proc. IEEE Int. Conf. on Engineering in the Ocean Environment, IEEE New York, 1972, pp. 174–179.
- 20. Cui L., He Y., Shen H., Lu H., Measurements of ocean wave and current field using dual polarized X-band radar, Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2010, Vol. 28, pp. 1021–1028.
- Ericson E.A., Lyzenga D.R., Walker D.T., Radar backscatter from stationary breaking waves, J. Geophys. Res., 1999, Vol. 104, No. C12, pp. 29679–29695.
- 22. 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 Sci. Journal, 2013, Vol. 48, No. 1, pp. 69-97.
- 23. Groeneweg J., Gautier C., Swinkels C., van der Westhuysen A., Application of navigation radar data to analyse spatial current and wave fields in the tidal inlet of Ameland, *Waves in Shallow Environments (WISE) 2011 Meeting*, Qingdao, China, 2011, pp. 1–21.
- 24. Guerin C.-A., Soriano G., Chapron B., The weighted curvature approximation in scattering from sea surfaces, Waves in Random and Complex Media, 2010, Vol. 20, No. 3, pp. 364-384.
- 25. Gurgel K.W., Antonischki G., Essen H.H., Schlick T., Wellen Radar (WERA): a new ground-wave HF radar for ocean remote sensing, *Coastal Engineering*, 1999, Vol. 37, No. 3, pp. 219–234.
  26. Hessner K., Reichert K., Borge J.C.N., Stevens C.L., Smith M.J., High-resolution X-Band radar measurements
- of currents, bathymetry and sea state in highly inhomogeneous coastal areas, Ocean Dynamics, 2014, Vol. 64, No. 7, pp. 1–10.
- 27. 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, Russ. J. Earth. Sci., 2011, Vol. 12, pp. 1-8.
- Kanevsky M.B., Radar imaging of the ocean waves, Oxford: Elsevier, 2008, 207 p.
- Kudryavtsev V.N., Hauser D., Caudal G., Chapron B., A semiempirical model of the normalized radar cross-29 section of the sea surface: 1. Background model, J. Geophys. Res., 2003, Vol. 108, No. C3, pp. 2-24.
- 30. Kudryavtsev V.N., Hauser D., Caudal G., Chapron B., A semiempirical model of the normalized radar cross-
- section of the sea surface: 2. Modulation transform function, *J. Geophys. Res.*, 2003, Vol. 108, No. C3, pp. 25–45. 31. Nieto Borge, J.C., Guedes C., Analysis of Directional Wave Fields Using X-Band Navigation Radar, *Coastal* Engineering, 2000, Vol. 40, pp. 375-391.
- 32. Plant W.J., A two-scale model of short wind-generated waves and scatterometry, J. Geophys. Res., 1986, Vol. 91, pp. 10735–10749.
- http://www.seadarq.com/.
- 34. Slunyaev A.V., Sergeeva A.V., Pelinovsky E.N., Modelling of deep-water rogue waves: different frameworks, In: CENTEC Anniversary Book, Marine Technology and Engineering, London: Taylor & Francis Group, 2012, pp. 199-216.
- Stewart R.H., Joy J.W., HF radio measurements of surface currents, Deep Sea Res., 1974, Vol. 21, pp. 1039–1049. 35
- Valenzuela G., Scattering of electromagnetic waves from a tilted slightly rough surface, Radio Science, 1968, Vol. 36. 3, pp. 1057–1066.
- Vogelzang J., Vogelzang J., Boogaard K., Reichert K., Hessner K., Wave height measurements with navigation 37. radar, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2000, Vol. 33, No. B7/4, Part 7, pp. 1652-1659
- 38. http://www.oceanwaves.de.
- 39. WaMoS II Wave and Surface Current Monitoring System Operating Manual. Version 4.0, OceanWaveS GmbH. Germany, April 2003, 146 p.
- 40. Young I., Rosenthal W., Ziemer F., A three-dimensional analysis of marine radar images for the determination of ocean wave directionality and surface currents, J. Geophys. Res., 1985, Vol. 90, No. C1, pp. 1049–1059.