

ВОЗМОЖНОСТИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ X-ДИАПАЗОНА ДЛЯ МОНИТОРИНГА ПРИБРЕЖНОГО ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ

© 2016 г. Д. В. Ивонин^{1,2}, В. А. Телегин^{3,4}, П. В. Чернышов⁵,
С. А. Мысленков^{6,7}, С. Б. Куклев⁵

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

² Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург

³ Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН, Троицк

⁴ Научно-исследовательский институт дальней радиосвязи, Москва

⁵ Южное отделение Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Геленджик

⁶ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет

⁷ Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, Москва
e-mail: ivonin@ocean.ru

Поступила в редакцию 06.02.2015 г.

В статье представлены результаты тестирования прибрежной радиолокационной (РЛ) системы мониторинга ветрового волнения в Черном море (Геленджик), созданной на базе навигационных радиолокаторов X-диапазона. Приведены результаты сопоставления РЛ-наблюдений волнения относительно данных волнового буя и акустической донной станции. Применительно к радару X-диапазона с длиной антенны 2 м оказалось возможным успешно определять высоту волнения на расстоянии 1.2 км от радара при направлении волнения $\pm 31^\circ$ к направлению радиолокационного зондирования. Для высот значительных волн коэффициенты корреляции между данными радара и независимых измерителей составляют 0.82, стандартное отклонение – 0.26 м. Определены условия достижения наилучших характеристик РЛ-наблюдений волнения в условиях работы в прибрежной зоне.

DOI: 10.7868/S0030157416030102

1. ВВЕДЕНИЕ

Разработка средств исследования и мониторинга волнения является важной задачей дистанционного зондирования океана. В настоящее время, для этих целей возможно применение некогерентных радаров СВЧ-диапазона (сверхвысокая частота, длина радиоволны около 3 см) [5, 6, 31, 37, 38], а также океанографических прибрежных доплеровских радаров КВ-диапазона (коротко-волновых), таких как CODAR SeaSonde [14], WERA [21] (несущая частота 15–30 МГц, длина радиоволны 15–30 м).

Эксперименты [39] показывают достаточно хорошую точность радарных данных о волнении при их сопоставлении с буйковыми данными. При этом точность данных радаров СВЧ-диапазона о волнении выше [38], чем точность данных радаров КВ-диапазона [39], что объясняется различной спецификой КВ и СВЧ радаров. Радары КВ-диапазона используют береговой механизм рассеяния на одной резонансной волне (от поверхностной гравитационной волны длиной по-

рядка 10 м). Информация о скорости течения извлекается из первого порядка доплеровского спектра сигнала [4, 21, 23, 32], требуя минимальной и относительно простой обработки. В то время как информация о высоте волнения извлекается из второго порядка доплеровского спектра сигнала [28, 37], который, во-первых, значительно слабее первого порядка и, во-вторых, требует решения обратной задачи обращения сложного интегрального выражения [21, 27, 28, 39].

Радиолокационные изображения (РЛИ) некогерентных радаров СВЧ-диапазона формируются за счет как резонансного берегового, так и нерезонансного [26], механизмов рассеяния сигнала от коротких рассеивателей длиной менее 10 см. Волнение проявляется на РЛИ СВЧ-диапазона за счет модуляции интенсивности резонансных и нерезонансных рассеивателей длинными поверхностными гравитационными волнами [27]. При этом модуляция проявляется одновременно в широком диапазоне длин волн, от 1 до 600 м, что проявляется на РЛИ. Информация о волнении

извлекается из первого порядка спектра РЛИ СВЧ-диапазона. Для пересчета спектра РЛИ в спектр волнения в диапазоне от 1 до 600 м может использоваться модуляционно-передаточная функция (МПФ) [27, 29], а высоты значительных волн могут определяться по простым эмпирическим соотношениям [29]. По этим причинам точность данных о волнении радаров СВЧ-диапазона выше [38], чем точность данных радаров КВ-диапазона [39].

Впервые идея использования навигационных СВЧ радиолокаторов для измерения параметров волнения была реализована Янгом в 1985 г. [40]. Далее на базе этой разработки были созданы коммерческие океанографические СВЧ системы WAMOS II [29, 37] и SeaDarQ [18, 19, 31]. В настоящее время существует более 100 точек установок СВЧ радаров WAMOS II [37], SeaDarQ [31], которые достаточно плотно покрывают побережья США, Европы, Китая, Тайваня [17]. Океанографические РЛС СВЧ-диапазона позволяют определять высоту значительных волн (H_s), спектр волнения, поверхностные течения [22, 24], как в прибрежных районах, так и в открытом море. Радиусы действия СВЧ локаторов составляют до 7 км от места установки. Пространственно-временная дискретизация полученных результатов составляет 0.5–1 км по пространству и 15–30 минут по времени, что позволяет изучать динамические мезо- и субмезо-масштабные прибрежные процессы [22, 24]. Первичная обработка СВЧ РЛ измерений занимает несколько минут, поэтому подобные океанографические РЛС являются также удобным инструментом для создания на их основе оперативных систем наблюдения волнения. Относительная простота установки и обслуживания (по сравнению с буйковыми средствами) позволяет относительно просто организовать сети прибрежных РЛ-наблюдений, которые могут функционировать круглогодично и накапливать долговременные ряды наблюдений волнения и течений с разрешением один раз в 30 минут.

Ключевыми условиями для успешной работы подобных систем являются: а) использование достаточно длинной антенны, более 2 м (желательно 4–6 м [38]); б) высокое место установки локатора (вышки, маяки, нефтяные платформы с высотой 40–60 м [18]), что позволяет обеспечить большую дальность наблюдений морской поверхности; в) установка радара, по возможности, в открытом море, где ветер более интенсивный и, соответственно, наблюдается больше мелких волн и обрушений, дающих необходимый уровень отраженного от них радиосигнала; г) установка в местах, которые обеспечивают наиболее широкий круговой обзор морской поверхности (нефтяные платформы, маяки, острые мысы или пространство с зоной обзора около 180°). При выполнении таких условий подобные океанографи-

ческие системы показывают хорошую точность измерений высот волнения, с корреляцией около 0.8 и стандартным отклонением около 0.15 м при сравнении с буйковыми данными [36–38]. Необходимо отметить, что подобные РЛ-измерения были возможны для волнения с H_s более 1 м и скорости ветра более 3 м/с [38]. Для волнения с более низкими значениями H_s и более слабым ветром стабильность и точность измерений не удается обеспечить вследствие недостаточного количества отражателей (обрушений и мелких волн).

В сложных прибрежных акваториях возникают дополнительные ограничения на работу океанографических РЛС, связанные с сильной неоднородностью характеристик волнового поля у берега [22], таких как трансформация волнового поля из-за выхода волны на мелководье, или искривление волновых фронтов из-за оротографии берега. Площадка осреднения информации о волнении для радара составляет около 0.5 км [22, 24, 30]. По этой причине, если изменчивость волнового поля более медленная по пространству, неоднородность волнения не влияет на точность определения высоты значительных волн [22, 30], при условии надлежащей калибровки радара по буйковым данным [37]. Это делает перспективным также применение СВЧ-радаров в будущем для изучения процессов трансформации волнения у побережья.

В данной работе представлены результаты тестирования радиолокационной СВЧ-системы мониторинга ветрового волнения, созданной на базе навигационных радиолокаторов X-диапазона “Река” и “Фуруно М1715”. Приводятся результаты верификации РЛ системы по данным волнового буйа и донного акустического измерителя волнения. На примере условий РЛ-наблюдений волнения в бухте Голубая (Геленджик, Черное море) описывается степень влияния ограниченной зоны обзора на возможность таких измерений в прибрежных условиях. Приводится краткий обзор площадок радиофизических наблюдений волнения на Черном море, созданных за период 2006–2013 гг., и основные технические детали организации радио-гидрофизического полигона в г. Геленджик.

2. ПОДГОТОВЛЕННАЯ СЕТЬ ДЛЯ РАДИОФИЗИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ ВОЛНЕНИЯ НА ЧЕРНОМ МОРЕ

В течение 2006–2013 гг. на Черном море была развернута сеть радиофизических наблюдений волнения с помощью стандартных навигационных радиолокаторов, адаптированных для последующей обработки РЛ-сигнала. Она состоит из метеостанции в п. Тамань, гидрометеорологического бюро (ГМБ) порта Шехарис (г. Новорос-

сийск) и радиофизической экспериментальной площадки в Голубой бухте, Южное отделение Института океанологии (ЮО ИО РАН) в г. Геленджик. На рис. 1а показаны приборы данной сети наблюдений и места их стационарной или временной установки. Организация такого проекта стала возможной благодаря совместным усилиям института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), ОАО “НПК “НИИДАР” (НИИДАР), Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН и Географического факультета МГУ. В п. Тамань расположена вышка высотой 10 м, на которой была установлена РЛС “Фуруно М1715”. На территории ГМБ Шесхарис расположена вышка высотой 38 м, на которой также была установлена РЛС “Фуруно М1715” (см. рис. 1а). Для проведения независимых измерений волнения здесь использовался лазерный уровень Riegl LD90-3200HiP. На площадке в ЮО ИО РАН одновременно можно было использовать РЛС “Река”, акустическую доплеровскую донную станцию и волновой буй (см. рис. 1г и 1д). В период с 2010 по 2012 гг. здесь также работала РЛС “Фуруно М1715” (см. рис. 1а). Наиболее обширный и разнообразный материал по наблюдениям волнения был собран на этой площадке.

Радио-гидрофизическая экспериментальная площадка в Голубой бухте

Океанографическая радиолокационная станция.

В настоящее время площадка оборудована радиолокатором X-диапазона “Река”. РЛС стационарно установлена на крыше ангара вблизи берега (рис. 1б). Высота установки – 7 м от уровня моря. Такая высота установки сильно ограничивает потенциальную дальность работы радара, которая, как показывают эксперименты с системами SeaDarQ [18, 19, 31], может составлять до 7 км при высоте установки 60 м (на маяке). Эксперимент, проводившийся в Голубой бухте с радаром “Фуруно 1832”, установленным на высоком берегу (высота около 30 м над уровнем моря), показал, что дальность измерений волнения и течений может достигать до 4 км от радара [6, 24]. В настоящее время при высоте установки радара 7 м над уровнем моря достижимая дальность СВЧ радиолокационных океанографических измерений составляет около 1.5 км (от радара).

Другим важным обстоятельством, существенно влияющим на океанографические приложения РЛС, является ширина зоны обзора радара по углу. Как правило, океанографические РЛС устанавливаются на нефтяных и океанографических платформах в открытом море [37] с зоной обзора до 360°, или на берегу на островывступающих мысах с зоной обзора 180° и более [19, 36, 39]. При таких условиях радиолокатор хорошо “видит” вол-

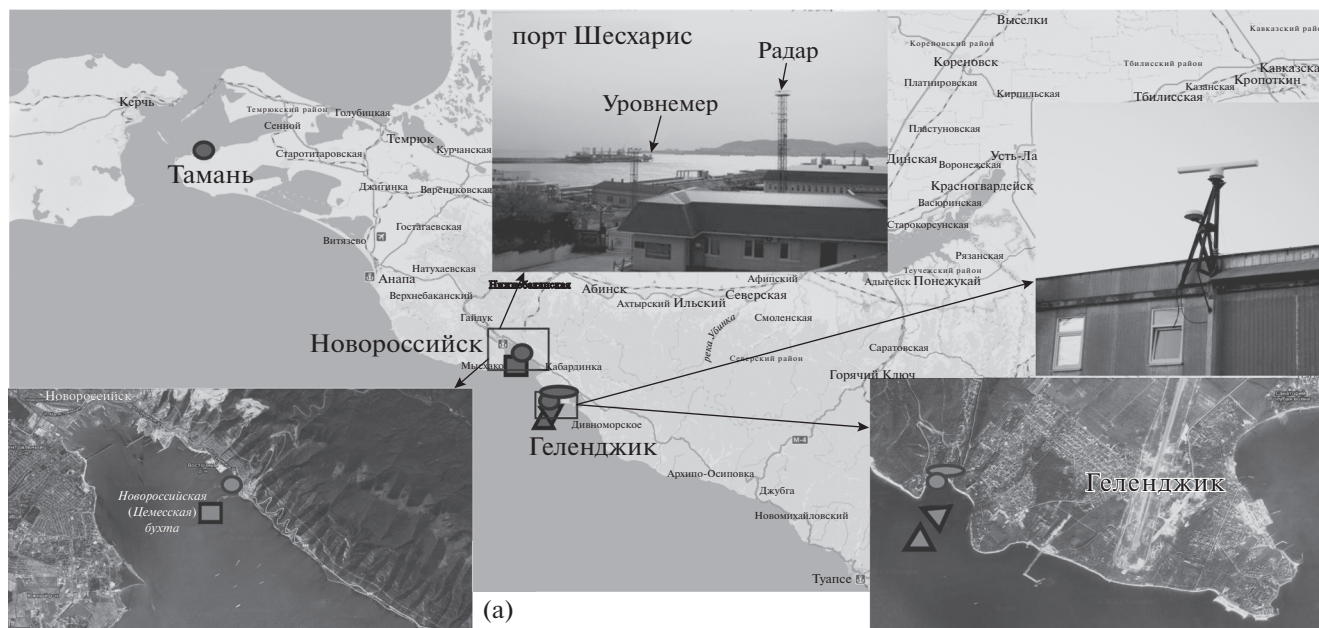
ну, приходящую с любого направления. В настоящее время океанографическая РЛС установлена в глубине бухты, и зона ее обзора составляет около 40° в сторону юга (см. рис. 1д). При таких условиях РЛС хорошо видит волнение, приходящее с южных направлений (S, SE, SW). Однако, если волна идет точно с запада (точно с востока волнение распространяться не может из-за орографии береговой линии), то такое направление оказывается “слепой зоной” для радара.

Непосредственно в помещении под радаром расположено место оператора (рис. 1в). Управление РЛС ведется с водозащищенного моноблока, работающего под ОС Windows. Реализована возможность удаленного управления моноблоком и радаром по сети Интернет, поэтому нет жесткой необходимости для оператора постоянно находиться около локатора. Запись данных ведется на внешние USB диски. В случае незапланированной остановки записи данных оператору отправляется сообщение на электронную почту. Типичная периодичность записи данных составляла один раз в 5–10 минут (в некоторых экспериментах – раз в 30 минут). Объем одной записи – около 1 Гб вследствие высокого пространственного разрешения (2 м), которое используется на океанографической РЛС.

Акустический доплеровский профилограф скорости течений и измеритель волнения (ADCP) Workhorse 600 установлен стационарно в составе донной станции в Голубой бухте на глубине 23 м и удалении 1 км от радара (рис. 1д). Передача данных осуществляется по телеметрическому каналу на берег в режиме реального времени. Наряду с измерениями скорости течений, прибор имеет возможность определения высоты волнения. Заявленная производителем точность измерений высоты значительных волн, H_s , составляет 5% (около 5–20 см для $H_s = 1–4$ м). Частота записи данных по волнению – один раз в 20 минут.

Волномерный буй Datawell DWRG-4 в течение 2013–2014 гг. устанавливался несколько раз для проведения дополнительных верификационных работ на глубине 10 м и удалении около 400 м от радара (рис. 1д). Для измерений волнения буй определяет свое вертикальное положение при помощи GPS антенны. Заявленная точность измерений высоты значительных волн составляет 1.5% (или 1–5 см для $H_s = 1–4$ м). Частота записи данных – один раз в 30 минут.

За предшествующий период времени, начиная с 2011 г., проводилась подготовка приборов для обеспечения непрерывной круглогодичной работы всего комплекса. В настоящее время ADCP работает непрерывно. Радар включается во время прохождения штормовых явлений, что связано с экономией дискового пространства (запись од-



- Лазерный уровнемер Riegl LD90-3200NIP
- РЛС "Фуруно" M1715
- РЛС "Река" Микран
- DataWell DWRG-4
- ADCP WorkHorse 600

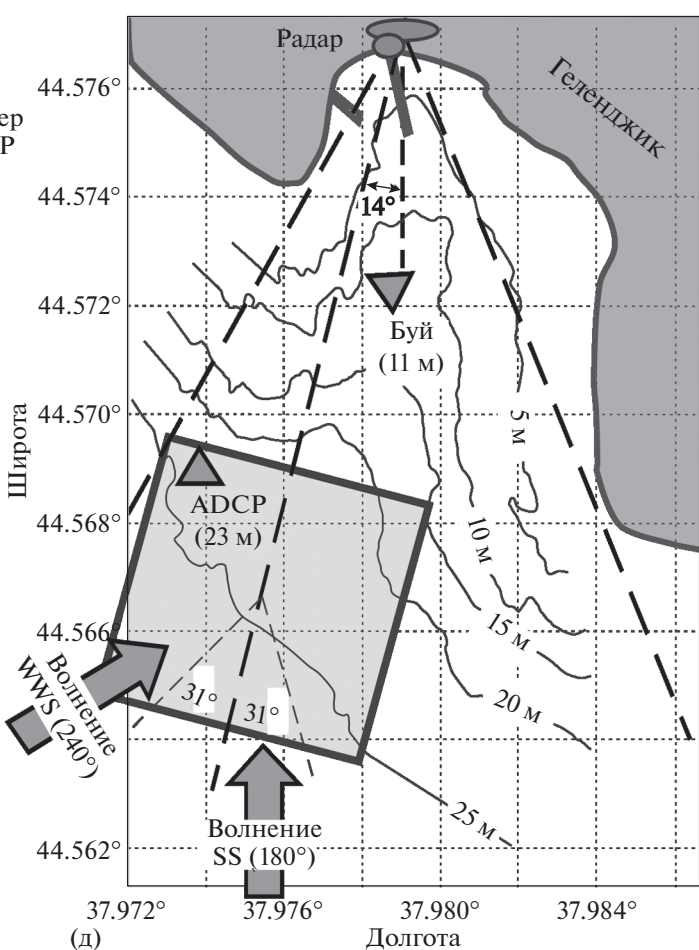


Рис. 1. (а) – Сеть радиофизических наблюдений волнения на побережье Черного моря, развернутая в течение 2006–2013 гг.; (б) – место стационарной установки РЛС “Река” и (в) – рабочее место оператора РЛС в Геленджике; (г) – используемые приборы. (д) – Схема установки приборов и батиметрическая карта Голубой бухты (г. Геленджик). Квадратом с размером стороны ~600 м обозначена область обработки РЛ-сигнала. Радиальными линиями от радара обозначены границы зоны обзора РЛС.

Основные технические характеристики ОРЛС “Река” и “Фуруно М1715”

Характеристика	“Река”	“Фуруно М1715”
Частота	9.41 ГГц	9.41 ГГц
Размер антенны	2 м	0.45 м
Разрешение по азимуту	1°	5°
Разрешение по дальности	0.7, 2.0, 5.0 м	12.0 м
Разрешение по азимуту на расстоянии 1 км от радара	17 м	85 м
Дальность действия по целям	36 км	36 км
Дальность действия по фону (при высоте установки 7 м)	1.5 км	1.5 км
Потенциальная дальность действия по фону (при высоте установки 60 м)	7 км	7 км
Частота вращения антенны	24 об/мин	24 (48) об/мин

ного шторма продолжительностью 2–3 дня может занимать до 1 ТБ дискового пространства).

3. ОКЕАНОГРАФИЧЕСКАЯ РАДИОЛОКАЦИОННАЯ СВЧ СТАНЦИЯ

Радар. Океанографический радиолокатор “Река” является изначально обычным судовым навигационным локатором X-диапазона производства НПО “Микран” (Томск) [11]. Он использует цифровую аппаратуру для формирования и обработки сигнала, что значительно упрощает его адаптацию для океанографических исследований. РЛС “Фуруно” имеет аналоговую схему, которая требует установки дополнительной платы аналого-цифрового преобразования (АЦП) для обеспечения последующей обработки сигнала (радиолокационные океанографические системы WaMoS II [37, 38] также построены на использовании традиционных аналоговых РЛС).

Длина радиоволны РЛС – около 3 см (несущая рабочая частота – 9.41 ГГц). Традиционно в навигационных РЛС 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 [26, 35], так и для практического использования [15, 36]. РЛС 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. По этой причине радар обладает ограниченными возможностями для измерения волн, кото-

рые подходят перпендикулярно к лучу радара. Поскольку для получения спектральной информации о волне необходимо измерить несколько точек на ее длину (хотя бы 4–5), это означает, что при дальностях более 1 км РЛС не может “видеть” волны короче ~80 м, подходящие поперек луча. В специализированных исследовательских океанографических радарах иногда используют более длинные антенны (длиной более 4 м) [36], что позволяет РЛС на больших расстояниях “видеть” волны, подходящие поперек направления луча радара.

РЛС “Фуруно М1715” (Япония) обладает схожими частотными характеристиками. Ее существенным отличием от РЛС “Река” является угловое разрешение, которое составляет 5°. На дальности 1 км это означает разрешение 85 м по азимуту, на дальности 2 км – соответственно 170 м. Т.е. такой локатор может “видеть” только волну, бегущую исключительно вдоль луча радара. Худшее разрешение по дальности (12 м) практически не отразилось на возможности РЛС определять высоту значительных волн, поскольку вклад в сигнал поверхностных гравитационных волн короче 12 м на порядки уступал по амплитуде вкладу энергонесущих волн с длинами порядка 70–80 м. Основные технические характеристики РЛС “Река” и “Фуруно М1715” приведены в таблице.

Принцип обработки РЛ-изображений (РЛИ). Навигационные СВЧ локаторы, предлагаемые в данной работе для определения высоты волнения, допускают получение только яркостного РЛ-изображения морской поверхности. Последнее само по себе может дать представление только о количестве и “яркости” элементарных отражателей на поверхности. Такими отражателями в СВЧ-диапазоне выступают: а) короткая гравитационно-капиллярная рябь длиной около 1.5 см для длины радиоволны 3 см (условие резонансного обратного брегговского рассеяния при на-

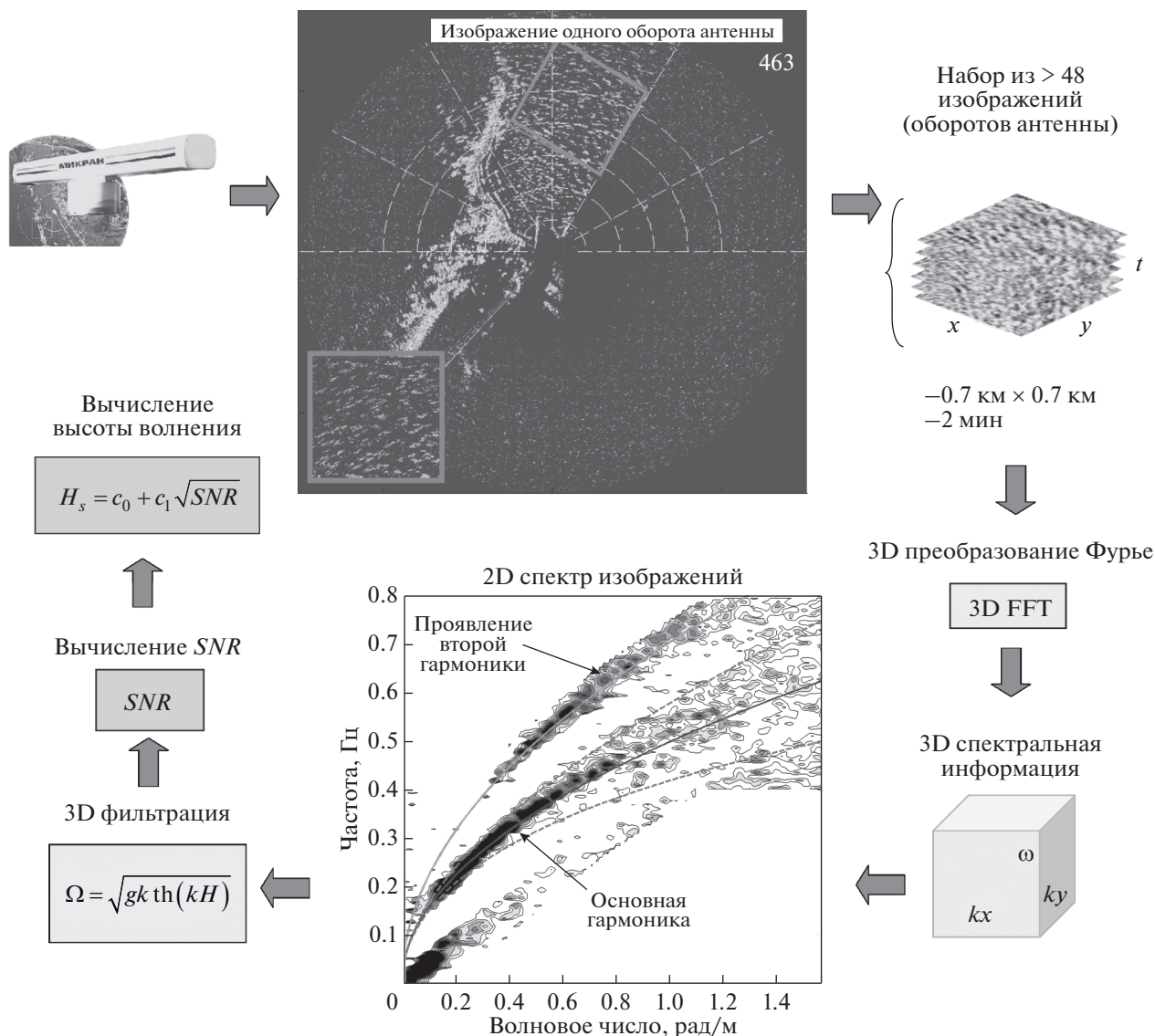


Рис. 2. Схема накопления и обработки РЛИ. Внизу по центру – пространственно-частотный спектр РЛИ. Нижняя сплошная линия – дисперсионное соотношение (2) для основной гармоники. Верхняя сплошная линия – дисперсионное соотношение $\omega_2 = \sqrt{2gk \operatorname{th}(2kH)}$ для второй, связанной, гармоники. Пунктирные линии обозначают смещения основной частоты из-за течения со скоростью ± 50 см/с.

стильных углах) [1, 30, 35], и б) обрушения волн (так называемые “микрообрушения” [2, 12], фронтальные зоны обрушений, шероховатые “языки” обрушений [16, 26], пена, острые гребни волн) а также участки поверхности с сильной кривизной [20]. В результате модуляции количества элементарных отражателей наклонами и орбитальными скоростями длинных гравитационных волн [7, 8, 25, 27] на экране радара возникает изображение (см. рис. 2), на котором при интенсивном волнении можно проследить гребни волн и их движение во времени.

Количество и “яркость” отражателей прямо не связаны с высотой волны, больше – со скоростью

ветра. Теоретическое обоснование возможности использования яркостных РЛИ (спутниковых) для определения высоты волнения было предложено в работе Альперса и Хассельмана в 1982 г. [13]. Ими было показано для спутниковых изображений, что спектр вариаций интенсивности сигнала может быть связан с высотой волнения как

$$H_s = c_0 + c_1 \sqrt{SNR}. \tag{1}$$

Здесь H_s (м) – высота значительных волн, c_0 и c_1 – некоторые калибровочные коэффициенты (константы), которые зависят от характеристик РЛС, SNR – некоторое соотношение, называемое “сигнал/шум”, определенное как отношение интен-

сивности медленных вариаций сигнала, связанного с волнением, к интенсивности быстрых флуктуаций сигнала (спекл-шум). Подробные технические детали вычисления SNR приведены в работах [5, 29].

Схематично весь процесс обработки представлен на рис. 2 (впервые в таком виде он был предложен в работе [40]). Ключевым параметром для разделения медленных вариаций и быстрых флуктуаций является использование дисперсионного соотношения для поверхностных гравитационных волн

$$\Omega = \sqrt{gk \operatorname{th}(kH) + \bar{k}\bar{U}}. \quad (2)$$

Здесь Ω (рад/с) – частота волны, $g = 9.81$ (м/с²) – ускорение свободного падения, k, \bar{k} (рад/м) – волновое число и волновой вектор, H (м) – глубина, \bar{U} (м/с) – вектор скорости течения. На рис. 2 показан пространственно-частотный спектр, полученный в процессе обработки серии нескольких последовательных РЛИ, на котором в области частот, соответствующих дисперсионному соотношению, видно проявление сигнала от поверхностных гравитационных волн. Также видно проявление сигнала от второй, связанной, гармоники (см. рис. 2), которая наблюдалась также в работах [3, 12]. Вблизи начала координат виден сигнал, связанный с течением, возбуждаемым группами нелинейных волн [33]. Все остальное – это проявления спекл-шума [8, 25]. Для определения SNR производится суммирование сигнала возле дисперсионной кривой (2) и последующая его нормировка на спекл-шум (см. подробнее в [5, 29]).

В настоящее время коэффициенты c_0 и c_1 подбираются эмпирическим путем отдельно для каждого локатора, каждого нового места его установки и дальности измерений волнения. Как правило, в течение некоторого времени производится первоначальная калибровка радара (по нескольким штормам, можно даже по одному-двум) с помощью буя или другого независимого измерителя волнения. По известным H_s и SNR из соотношения (1) определяются коэффициенты c_0 и c_1 , которые затем используются для данного радара. После калибровки необходимость дальнейшего использования буя отпадает.

4. ВЕРИФИКАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЙ ВОЛНЕНИЯ ОКЕАНОГРАФИЧЕСКОЙ РЛС

Океанографическая РЛС “Река”. За сезон осень 2013 г.–весна 2014 г. было записано 19 штормовых явлений различной продолжительности с высотой значительных волн от 1 до 3 м. На рис. 3в приведено количество записанных штормовых явлений, когда высота волны H_s составля-

ла более 1 м, а также, их примерная длительность и количество сохраненных для них РЛ записей в течение 2013–2014 гг. Отсутствие РЛ записей летом объясняется относительно тихой летней погодой, отсутствие в другие промежутки времени – вынужденными техническими перерывами работы системы, связанными с ее отладкой.

Наиболее распространенным зарегистрированным случаем было волнение с высотой около 1.5 м около берега на глубине 23 м (в месте установки ADCP, см. рис. 1д) длившееся около 2 дней, что соответствовало ситуациям усиления ветра при прохождении циклона. Из 19-ти записанных штормов для 9-ти существуют одновременные данные и радара, и ADCP или буя, результаты для которых представлены ниже.

На рис. 3г показан пример измерений волнения в течение трехдневного шторма 2–5 февраля 2013 г., когда одновременно работал и радар, и волновой буй. Радар хорошо описывает рост волны от 90 см до 1.4 м в начале шторма, а также уменьшение высоты волны в конце шторма. В пике шторма наблюдается хорошее согласие данных, полученных радаром и буюм, с максимальным разбросом данных до 20 см по высоте волны и среднеквадратическим отклонением 7 см. Коэффициент корреляции составляет для этого случая 0.89.

Другой характерный пример показан на рис. 3а для относительно длительного шторма с 23 по 28 сентября 2013 г. При этом шторм можно разделить на 2 фазы. Первая длилась трое суток, с вечера 23 по вечер 26 сентября, в продолжение которых ветер дул с запада и волнение приходило с запада (WSW, 240°) последовательно затухая от 2 до 1.2 м. Затем (вторая фаза) ветер сменился на южный (S, 180°, см. рис. 3б) и разогнал волну с юга высотой 2 м. Видно, что для южного направления совпадение данных радара и ADCP очень хорошее (с коэффициентом корреляции 0.92 и среднеквадратическим отклонением 14 см), а для западного направления волнения совпадения практически нет. Анализ данных по направлению прихода волны (рис. 3б) показывает, что все “плохие” данные радара расположены при направлении прихода волнения западнее 225°.

Для пояснения причин такой ситуации на рис. 1д приведено расположение квадрата обработки данных радара возле ADCP, его ориентация относительно сторон света и углы прихода южного и западного волнений. Ось квадрата, расположенная вдоль радиального направления от радара, повернута на 14° на запад относительно юга. Это крайнее западное расположение квадрата, при котором он находится наиболее близко к ADCP и при этом не сильно заходит в область малых глубин. Крайнее западное положение квадрата ограничено западным берегом бухты, край которого

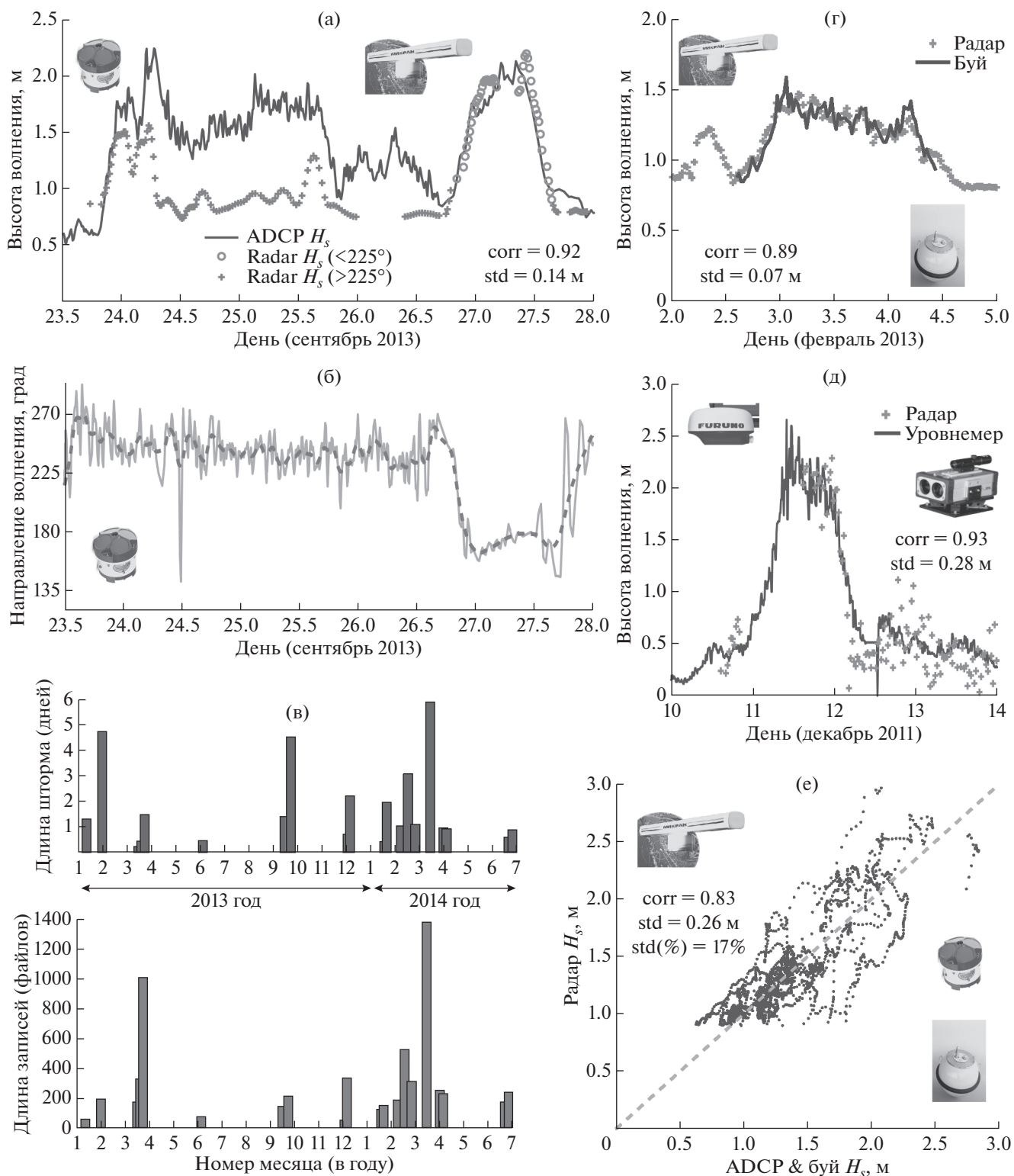


Рис. 3. (а) – Сравнение высот значительных волн, измеренных радаром “Река” и ADCP, для случая, когда меняется направление волнения; (б) – направление волнения согласно ADCP (жирная линия получена сглаживанием данных окном Ханнинга шириной 6 часов); (в) – длительность записанного шторма (вверху) и количество записей (внизу) для штормовых событий в 2013–2014 гг.; (г) – сравнение высот значительных волн, измеренных радаром “Река” и буйем; (д) – сравнение высот значительных волн, измеренных лазерным уровнем и РЛС “Фуруно”; (е) – график рассеяния для высоты значительных волн, полученных РЛС “Река” vs. ADCP и буйа (по 9 штормам за период 2013–2014 гг.).

находится в направлении около 28° на запад от радара. Сама бухта представляет крайне ограниченное по азимуту (около 45°) пространство для измерений радара. Это хорошо видно на РЛИ на рис. 2. Как уже упоминалось выше, в силу различной разрешающей способности РЛИ радара кругового обзора по дальности и азимуту (соответственно, 2 и 20 м на средней дальности квадрата 1.2 км для радара X-диапазона с антенной длиной 2 м), радар по-разному “видит” волны, приходящие с различных направлений. Соответствующие ограничения на видимость волны будут 10 м по дальности и 100 м по азимуту (при 5 точках на период волны). При типичной длине штормовой волны для Черного моря от 50 до 80 м радар не «увидит» волну не только с азимутального направления РЛИ, но и некоторых промежуточных направлений между радиальным и азимутальным. Экспериментально полученное пороговое направление 225° , когда еще успешно работает методика обработки РЛИ, описанная выше, означает направление 31° относительно радиальной оси квадрата обработки РЛИ (рис. 1д). В пересчете на разрешение это означает 10 м по пикселю РЛИ или 50 м по длине волны (при 5 точках на период волны) для данного квадрата. Т.е. для условий Черного моря большая часть спектра волнения западного направления не отобразится на РЛИ при текущем расположении радара. Южные шторма при этом будут отображаться полноценно.

Руководствуясь данными ограничениями, были обработаны все 9 штормов. Для них были рассмотрены только данные для волнения, приходящего в секторе $\pm 31^\circ$ от радиального направления квадрата обработки РЛИ. Это составляет диапазон направлений от 163° до 225° для схемы, показанной на рис. 1д. Также было принято во внимание, что радар, использующий горизонтальную поляризацию сигнала, обладает худшей модуляционно-передаточной функцией, по сравнению с радаром с вертикальной поляризацией [27]. Связано это с тем, что изображающими элементами для РЛИ радара с вертикальной поляризацией является гравитационно-капиллярная рябь, которая быстро появляется с ростом ветра и волнения. А изображающими элементами при горизонтальной поляризации являются обрушения [2, 26] и сильно искривленные участки морской поверхности [20], которые в достаточном количестве появляются позже с ростом ветра и высоты волны. По этой причине устойчивая передача картины волнения на РЛИ с горизонтальной поляризацией начинается позже (с ростом скорости ветра и волны), чем на РЛИ с вертикальной поляризацией. Порог, который нами был определен экспериментально для горизонтальной поляризации, составил высоту значительных волн 0.9 м. Более

низкие значения волны не рассматривались как статистически мало достоверные.

На рис. 3е приведен суммарный график рассеяния для высоты значительных волн между данными, полученными РЛС “Река” и независимыми измерителями волнения (ADCP и буй). Корреляция между данными этих двух типов измерений составила 0.83, среднеквадратическое отклонение по высоте волны – 26 см, среднеквадратическое относительное отклонение по высоте волны – 17%. Эти значения близки к показателям аналогичных систем, таких как WaMoS II, где заявлен коэффициент корреляции 0.8 и среднеквадратическое отклонение 15 см [38]. При этом данные для системы WaMoS II приводятся для условий открытого моря [38], где волнение более однородно и условия работы для океанографической РЛС более благоприятны.

Океанографическая РЛС “Фуруно M1715”. Исторически перед началом ввода в эксплуатацию РЛС “Река” на всех трех площадках (Тамань, Новороссийск, Геленджик) в тестовом режиме проводилась отработка метода измерений волнения с помощью РЛС “Фуруно M1715”. Наиболее репрезентативные ряды РЛ-записей с количеством сохраненных оборотов антенны более 30-ти (для которых возможно применение РЛ-метода, описанного выше) были выполнены только в Геленджике. Однако эти записи относятся к периоду времени, когда донная станция ADCP либо еще не была установлена, либо находилась в ремонте. По этой причине полноценную верификацию работы РЛС “Фуруно M1715” по совмещенным в пространстве измерениям волнения провести не удалось.

Тем не менее, оказалось, что, несмотря на скромные технические возможности, РЛС “Фуруно M1715” также обладает хорошим потенциалом для определения высоты волнения. Мы воспользовались достаточно типичной ситуацией для российского побережья Черного моря, когда шторм приходит почти точно с южного направления. При волне, идущей точно с юга, штормовые условия для входов в Цемесскую и Голубую бухты очень схожи, что подтверждается расчетами волнения по ветро-волновой модели SWAN [9, 10]. Для одного из таких штормов, имевшего место 10–12 октября 2012 г., было проведено сопоставление РЛ данных “Фуруно M1715” о высоте значительных волн, рассчитанных для входа в Голубую бухту на расстоянии 1.2 км от радара (см. рис. 1д), и данных лазерного уровнемера, установленного на конце нефтеналивного терминала порта Шесхарис (см. рис. 1а). Коэффициенты c_1 и c_2 в формуле (1) соответственно определялись с привязкой к Цемесской бухте. Результат итогового сопоставления высоты значительных волн, полученных по РЛ-изображениям “Фуруно” в Голу-

бой бухте и лазерному уровнемеру в Цемесской бухте, для южного направления шторма оказался очень хорошим (см. рис. 3д), с коэффициентом корреляции 0.92 и среднеквадратическим разбросом данных 0.26 м. В силу прекращения использования РЛС “Фуруно М1715” на станциях в Новороссийске и Геленджике, более тщательных исследований повторяемости таких совпадений не проводилось. Однако данный пример, по мнению авторов статьи, говорит о хороших потенциальных возможностях РЛС “Фуруно М1715” для измерений волнения и по этой причине приводится здесь.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе были описаны результаты создания и развития системы круглогодичного мониторинга ветрового волнения в прибрежной зоне Черного моря около г. Геленджик. К настоящему времени в г. Геленджик удалось организовать исследовательскую площадку для круглогодичных радиофизических наблюдений морской поверхности с помощью нескольких радиолокационных средств СВЧ-диапазона, а также проведения независимых измерений волнения с помощью донной станции ADCP и волнового буя. Радиолокационная система работает круглогодично в полуавтоматическом режиме, управляется удаленно. Это позволяет по мере ее развития и совершенствования автоматикой записи данных накапливать ряды длительных океанографических наблюдений волнения в Черном море. Помимо этого подготовлены и протестированы еще две площадки для подобных измерений в Цемесской бухте (Новороссийск) и около Керченского пролива (Тамань).

Запуск данной системы стал возможен благодаря разработке и адаптации методик восстановления волнения по данным навигационных СВЧ-радаров, и создания соответствующего программного обеспечения для обработки сигнала радиолокаторов “Река” и “Фуруно М1715”. Работоспособность предложенных систем была проверена экспериментально на материале, собранном за период 2013–2014 г.

Были определены условия достижения наилучших характеристик РЛ наблюдения волнения в условиях работы в прибрежной зоне. Существенной помехой для надежных РЛ-измерений волнения оказалось ограничение зоны обзора радара по углу при работе в узких бухтах. Применительно к радару X-диапазона с длиной антенны 2 м оказалось возможным успешно определять высоту волнения на расстоянии 1.2 км от радара при направлении волнения $\pm 31^\circ$ к направлению зондирования. При условиях измерений волнения, когда локатор расположен в глубине бухты (как, например, в Голубой бухте около г. Геленджик), он может “видеть” только те штормовые явления,

которые приходят с направления открытого моря (т.е. с юга, юго-юго-запада и юго-юго-востока для Голубой бухты). Высота волны для штормов, приходящих со стороны по касательной к береговой линии (с запада и юго-запада для Голубой бухты) определяется некорректно. Для возможности корректного измерения любых штормовых явлений локатор необходимо выносить на участки с сектором обзора 180° .

Для радара, использующего горизонтальную поляризацию сигнала, было подтверждено ограничение по минимальной корректно измеримой величине высоты значительных волн около 0.9 м (для WaMoS II эта величина составляет 1 м). Высота волны один метр является небольшой с точки зрения безопасности судоходства. По этой причине это не является каким-либо ограничением для применения океанографических РЛС с горизонтальной поляризацией в составе систем предупреждения об опасности для судоходства. С точки зрения исследовательских задач, таких как наблюдения ежедневной бризовой волны, которая достигает высоты около 0.5 м, а также мониторинга поверхностных течений [5, 24], возможность наблюдения волнения ниже 1 м является важным. Для этого необходимо использование РЛС с вертикальной поляризацией [15].

С учетом изложенных ограничений (направление волнения $\pm 31^\circ$ для участка на расстоянии 1.2 км от радара X-диапазона с длиной антенны 2 м), по девяти штормам были определены погрешности и коэффициенты корреляции измерений волнения радаром по отношению к волновому бую и ADCP. Погрешность измерения высоты значительных волн составила 26 см, коэффициент корреляции – 0.83, что очень близко к характеристикам системы WaMoS II с коэффициентом корреляции 0.8 и среднеквадратическим отклонением 15 см.

Таким образом, были продемонстрированы хорошие возможности навигационных РЛС X-диапазона для измерения волнения, а также большой потенциал их использования в составе сетей наблюдения волнения вдоль побережья. Локатор при удачном расположении: а) может заменить несколько буюв, расположенных в различных частях прибрежной зоны; б) может позволить вести наблюдения трансформации прибрежного волнения на различном удалении от берега и т.п. Стоимость зарубежных радиолокационных систем [37] примерно равна стоимости волновых буюв. Радиолокационные системы, построенные на локаторах “Река” и других, обещают быть в несколько раз дешевле.

Другим дополнительным преимуществом использования радиолокаторов по сравнению с буюями является простота и относительная дешевизна их годового обслуживания. Радиолокатор на-

ходится на берегу, в ежедневной доступности, в защищенном месте, в отличие от буев и донных станций, которые требуют выхода в море для их обслуживания, замены батарей, передачи данных. РЛС также более защищены от вандализма и других несанкционированных вмешательств (траления и т.п.), которому могут подвергаться объекты расположенные как на поверхности моря, так и на дне.

Авторы благодарят А.И. Пономарева, начальника Гидрометеорологического бюро “Новороссийск”, за предоставленные данные лазерного уровнемера, и А.И. Азарова, сотрудника Южного отделения Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Геленджик, за обслуживание радара и сбор РЛ данных в 2011–2013 гг.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 14-50-00095).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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. и др.* 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. С. 50–55.
4. *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.
5. *Ивонин Д.В., Мысленков С.А., Чернышов П.В. и др.* 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.
6. *Ивонин Д.В., Телегин В.А., Азаров А.И. и др.* 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.
7. *Каневский М.Б.* О механизмах формирования РСА-изображения океана // Изв. высших учебных заведений. Радиофизика. 2003. Т. 46. № 1. С. 13–20.
8. *Каневский М.Б.* Теория формирования радиолокационного изображения поверхности океана. Н. Новгород: Ин-тут прикл. физики РАН, 2004. 64 с.
9. *Лопатухин Л.И., Бухановский А.В., Иванов С.В. и др.* Справочные данные по режиму ветра и волнения Балтийского, Северного, Черного, Азовского и Средиземного морей. СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2006. 450 с.
10. *Мысленков С.А., Архипкин В.С.* Анализ ветрового волнения в Цемесской бухте Черного с использованием модели SWAN // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2013. № 350. С. 58–67.
11. Радар “Река” [интернет-ресурс <http://www.migran.ru/productions/rls/river/>]
12. *Шарков Е.А.* Обрушающиеся морские волны: структура, геометрия, электродинамика. М.: Научный мир, 2009. 304 с.
13. *Alpers W., Hasselmann K.* Spectral signal to clutter and thermal noise properties of ocean wave imaging synthetic aperture radars // International Journal of Remote Sensing. 1982. V. 3. № 4. P. 423–446.
14. *Barrick D.E., Lipa B.J., Crissman R.D.* Mapping Surface Currents with CODAR // CODAR System Incorporated. 1985. 4 p.
15. *Cui L., He Y., Shen H. et al.* Measurements of ocean wave and current field using dual polarized X-band radar // Chinese Journal of Oceanology and Limnology. 2010. V. 28. P. 1021–1028.
16. *Ericson E.A., Lyzenga D.R., Walker D.T.* Radar backscatter from stationary breaking waves // J. of Geophys. Res. 1999. V. 104. № C12. P. 29679–29695.
17. *Fujii S., Heron M.L., Kim K. et al.* An overview of developments and applications of oceanographic radar networks in Asia and Oceania countries // Ocean Science Journal. 2013. V. 48. № 1. P. 69–97.
18. *Gautier C., van der Westhuysen A.* Wave propagation under influence of currents // Project report 1202119-003. Deltares. 2010. 129 p.
19. *Groeneweg J., Gautier C., Swinkels C. et al.* 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.
20. *Guerin C.-A., Soriano G., Chapron B.* The weighted curvature approximation in scattering from sea surfaces // Waves in Random and Complex Media. 2010. V. 20. № 3. P. 364–384.
21. *Gurgel K.W., Antonischki G., Essen H. et al.* Wellen Radar (WERA): a new ground-wave HF radar for ocean remote sensing // Coastal Engineering. 1999. V. 37. № 3. P. 219–234.
22. *Hessner K., Reichert K., Borge J.C.N. et al.* High-resolution X-Band radar measurements of currents, bathymetry and sea state in highly inhomogeneous coastal areas // Ocean Dynamics. 2014. V. 64. № 7. P. 1–10.
23. *Ivonin D.V., Broche P., Devenon J.L. et al.* Validation of HF radar probing of the vertical shear of surface currents by ADCP measurements // J. of Geophys. Res. 2004. V. 109. № C4. P. 1–8.
24. *Ivonin D.V., Telegin V.A., Bakhanov V.V. et al.* Sample application of a low-cost X-band monitoring system of surface currents at the Black Sea shore // Russ. J. Earth. Sci. 2011. V. 12. P. 1–8.
25. *Kanevsky M.B.* Radar imaging of the ocean waves. Oxford: Elsevier, 2008. 207 p.
26. *Kudryavtsev V.N., Hauser D., Caudal G. et al.* A semiempirical model of the normalized radar cross-section of the sea surface: 1. Background model // J. Geophys. Res. 2003. V. 108. № C3. P. 2–24.

27. *Kudryavtsev V.N., Hauser D., Caudal G. et al.* A semiempirical model of the normalized radar cross-section of the sea surface: 2. Modulation transform function // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. № C3. P. 25–45.
28. *Lipa B.J., Barrick D.E.* Extraction of sea state from HF radar sea echo: Mathematical theory and modeling // *Radio Science.* 1986. V. 21. № 1. P. 81–100.
29. *Nieto Borge, J.C., Guedes C.* Analysis of Directional Wave Fields Using X-Band Navigation Radar // *Coastal Engineering.* 2000. V. 40. P. 375–391.
30. *Plant W.J.* A two-scale model of short wind-generated waves and scatterometry // *J. Geophys. Res.* 1986. V. 91. P. 10735–10749.
31. SeaDarQ radar systems [интернет-ресурс <http://www.seadarq.com/>]
32. *Shrira V.I., Ivonin D.V., Broche P. et al.* On Remote Sensing of Vertical Profile of Ocean Surface Currents by Means of Single-frequency VHF Radars // *Geophys. Res. Letters.* 2001. V. 28. № 20. P. 3955–3958.
33. *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. Guedes Soares C. et al.* London: Taylor & Francis Group, 2012. P. 199–216.
34. *Stewart R.H., Joy J.W.* HF radio measurements of surface currents // *Deep-Sea Res.* 1974. V. 21. P. 1039–1049.
35. *Valenzuela G.* Scattering of electromagnetic waves from a tilted slightly rough surface // *Radio Science.* 1968. V. 3. P. 1057–1066.
36. *Vogelzang J., Vogelzang J., Boogaard K. et al.* Wave height measurements with navigation radar // *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing.* 2000. V. 33. № B7/4; PART 7. P. 1652–1659.
37. WaMoS II [интернет-ресурс <http://www.oceanwaves.de/>]
38. WaMoS II Wave and Surface Current Monitoring System Operating Manual. Version 4.0 // *OceanWaveS GmbH.* Germany. April 2003. 146 P.
39. *Wyatt L.R., Green J.J., Gurgel K.-W. et al.* Validation and intercomparisons of wave measurements and models during the EuroROSE experiments // *Coastal Engineering.* 2003. V. 48. № 1. P. 1–28.
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. V. 90. № C1. P. 1049–1059.

Possibilities of X-band Nautical Radars for Monitoring of Wind Waves near Coast

D. V. Ivonin, V. A. Telegin, P. V. Chernyshov, S. A. Myslenkov, S. B. Kuklev

We present the results of development and testing of a coastal X-band radar system for monitoring of wind waves and currents at the Black Sea (near Gelendzhik) created on the base of nautical radars. Radar measurements of wave heights were validated by the data of a wave bouy and a moored ADCP. The conditions for successful radar measurements of waves in coastal environment have been determined. It was shown that a radar with aperture 1° could successfully measure the wave heights at the distance of 1.2 km from the radar when waves come $\pm 31^\circ$ to the main direction of sensing. In this case, for wave height measurements the correlation coefficient between radar and independent data is 0.82, and standard deviation is 0.26 m.