

О верификации измерений скорости поверхностных течений когерентным радаром СВЧ-диапазона с помощью дрейфтеров

И. Г. Горбунов^{1✉}, В. И. Веремьев¹, В. Д. Шестак¹,
Г. В. Комаров¹, С. А. Мысленков^{2,3}, К. П. Сильвестрова²

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

² Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия

³ Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

✉ gor-ig@mail.ru

Аннотация

Введение. Традиционные контактные средства измерений гидрографических параметров зачастую не обеспечивают необходимую оперативность получаемых данных для решения задач мониторинга акваторий. Перспективным направлением является применение когерентных радаров, позволяющих непосредственно измерять скорости поверхностных течений.

Цель работы. Оценка достоверности результатов измерений приповерхностной скорости течения доплеровским радаром сравнением с данными дрейфтеров.

Материалы и методы. В июне 2022 г. был проведен эксперимент по прибрежной оперативной океанографии в Черном море на акватории гидрофизического полигона "Геленджик" Южного отделения Института океанологии РАН с использованием доплеровского радара. Скорость течения измерялась когерентизированным навигационным радиолокатором сантиметрового диапазона с цифровой обработкой, установленным на научно-исследовательском судне "Ашамба", одновременно с дрейфтерными экспериментами с использованием лагранжевых дрейфтеров приповерхностного слоя с подводным парусом высотой 0.5 м, с передачей координат по мобильной связи. Данные дрейфтеров о скорости и направлении течения использовались для верификации радарных измерений. Измерения проводились с борта научно-исследовательского судна на малом ходу на различном расстоянии от берега, вблизи дрейфтеров. В процессе измерений осуществлялась запись треков судна и дрейфтеров. Обработка данных радиолокатора основана на исследовании спектральных характеристик отраженного сигнала, позволяющих оценивать динамические процессы на морской поверхности.

Результаты. По результатам обработки доплеровских спектров были получены радиальные составляющие скорости приповерхностных течений, далее было выполнено сопоставление скорости течений по данным дрейфтеров и данным радиолокации.

Заключение. Настоящая работа является определенным шагом в усовершенствовании методов измерений поверхностных течений с борта движущегося судна доплеровским радаром. Результаты верификации подтверждают пригодность аппаратно-программной части радара и алгоритмов обработки сигнала для измерения течений. Данные радиолокационных измерений хорошо согласуются с данными дрейфтеров в диапазоне скоростей от 15 см/с.

Ключевые слова: когерентный радар, СВЧ, доплеровский спектр, скорость течения, дрейфтеры, гидрофизический полигон

Для цитирования: О верификации измерений скорости поверхностных течений когерентным радаром СВЧ-диапазона с помощью дрейфтеров / И. Г. Горбунов, В. И. Веремьев, В. Д. Шестак, Г. В. Комаров, С. А. Мысленков, К. П. Сильвестрова // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 3. С. 99–110. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-3-99-110

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Радиолокационные измерения выполнены при поддержке гранта Российского научного фонда, проект № 21-79-10375. <https://rscf.ru/project/21-79-10375/>
Работа Сильвестровой К. П. выполнялась в рамках темы Госзадания № FMWE-2021-0002.

Благодарности. Авторы статьи выражают благодарность сотрудникам Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН А. Г. Зацепину, В. А. Телегину, С. Б. Куклеву, В. И. Баранову, В. В. Очереднику за их неоценимый вклад в организацию и постановку эксперимента.

Статья поступила в редакцию 03.02.2023; принята к публикации после рецензирования 18.05.2023; опубликована онлайн 29.06.2023



Verifying Measurements of Surface Current Velocities by X-Band Coherent Radar Using Drifter Data

Igor G. Gorbunov^{1✉}, Vladimir I. Veremyev¹, Vadim D. Shestak¹,
Gleb V. Komarov¹, Stanislav A. Myslenkov^{2,3}, Ksenia P. Silvestrova²

¹ Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

² Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

✉ gor-ig@mail.ru

Abstract

Introduction. Conventional contact measurements of hydrographic parameters frequently fail to provide the necessary accuracy of data in the field of water area monitoring. This problem can be solved using coherent radars enabling direct measurements of surface current velocities.

Aim. To establish the accuracy of surface current velocities measured by a Doppler radar using drifter data.

Materials and methods. In June 2022, coastal operational oceanography studies were conducted at the hydrophysical test site of the Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences in the Black Sea near Gelendzhik. Measurements were carried out using a coherent X-band radar installed on the Ashamba research vessel simultaneously with drifter experiments using Lagrangian drifters of the near-surface layer with an underwater 0.5 m sail. Coordinates were transmitted via mobile communication. The drifter data on the current velocity and direction were used to verify radar measurements. Measurements were taken onboard of the research vessel at a low speed and different distances from the shore, near the drifters. The tracks of the vessel and drifters were recorded simultaneously. Processing of the radar data involved obtaining Doppler spectra of signals to estimate the dynamic processes on the sea surface, including the current velocity.

Results. Radial components of the near-surface current velocity were calculated. Then, the current velocity values obtained based on the drifter and radar data were compared.

Conclusion. The present work makes a contribution to the advancement of methods for measuring surface currents from the board of a moving ship by Doppler radars. The obtained results confirm the suitability of the radar hardware and software and signal processing algorithms for measuring currents. The radar measurement data were found agree well with drifter data in the velocity range from 15 cm/s.

Keywords: coherent radar, X-band, Doppler spectra, current velocity, drifters, hydrophysical test site

For citation: Gorbunov I. G., Veremyev V. I., Shestak V. D., Komarov G. V., Myslenkov S. A., Silvestrova K. P. Verifying Measurements of Surface Current Velocities by X-Band Coherent Radar Using Drifter Data. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023, vol. 26, no. 3, pp. 99–110. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-3-99-110

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Acknowledgements. This work was supported by Russian Science Foundation grant no. 21-79-10375. Work of K. P. Silvestrova was financed by "Goszadanie", grant no. FMWE-2021-0002. <https://rscf.ru/project/21-79-10375/>

The authors are grateful to colleagues from P. P. Shirshov Institute of Oceanology RAS: A. G. Zatsepin, V. A. Telegin, S. B. Kukleev, V. I. Baranov, V. V. Ocherednik for their invaluable contribution to organizing of the experiment.

Submitted 03.02.2023; accepted 18.05.2023; published online 29.06.2023

Введение. Радиолокационные дистанционные методы и средства контроля гидрографических параметров широко используются во многих странах на протяжении нескольких десятилетий. Традиционные контактные средства измерений в акваториях со значительной изменчивостью гид-

родинамических процессов и ветрового режима, с изменяющимся рельефом дна не обеспечивают необходимую оперативность получаемых данных для решения задач мониторинга акваторий [1, 2].

Широко применяющиеся в океанографии доплеровские радары коротковолнового (КВ)

диапазона (Sea Sonde, CODAR, США; WERA, Helzel Messtechnik GmbH, Германия) с рабочей частотой 3...40 МГц позволяют измерять скорость поверхностных течений, ветровое волнение в прибрежных районах океана и внутренних морей, предупреждать о приближении цунами, контролировать последствия аварийных ситуаций в местах нефтяных разливов [3]. Однако системы КВ-диапазона имеют низкое разрешение по дальности (сотни метров и даже километры) и азимуту (5...10°) и большое время обработки сигнала, составляющее десятки минут, поэтому для прибрежной оперативной океанографии целесообразно применение наряду с КВ-радаром сверхвысокочастотных (СВЧ) радаров, как правило, X-диапазона. Эти радары обладают высоким разрешением по дальности и азимуту, малым временем обработки сигнала, могут быть легко размещены на судах, что позволяет вести мониторинг морской поверхности в ходе мореплавания.

Применяемые в океанографии СВЧ-радары в основном являются некогерентными. В России океанографические исследования с помощью некогерентных навигационных радаров проводились Институтом океанологии ИО РАН на гидрофизическом полигоне на побережье Черного моря в Геленджике [2–5], в Северной Атлантике и в Арктике [6], коллективом СПбГЭТУ "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина) в акватории Финского залива в рамках международного проекта HYMNE [1, 7].

Преимуществом перед некогерентными радаром обладают когерентные, позволяющие непосредственно измерять доплеровскую частоту отраженного радиолокационного сигнала. Применение когерентного СВЧ-локатора позволяет в реальном времени получать информацию о динамических характеристиках морской поверхности: направлении и скорости поверхностных течений, ветра, высоте морских волн с использованием эффекта Доплера [8, 9]. Создание когерентных доплеровских локаторов для использования исключительно в океанографических целях на сегодняшний день представляется нецелесообразным по экономическим соображениям, выходом является доработка навигационного некогерентного радара.

Коллектив СПбГЭТУ "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина) имеет опыт разработки когерентизированных радаров и многолетнего сотрудничества с исследовательским центром GKSS (HZG), Германия, в области радиолокационной гидрографии с их использованием [10, 11].

Псевдокогерентный локатор на основе навигационного радара X-диапазона "Furuno" создан в НИИ "Прогноз" СПбГЭТУ "ЛЭТИ". С помощью этого радара были проведены успешные измерения параметров морского волнения на гидрофизическом полигоне ИО РАН на побережье Черного моря с береговой линии [12, 13]. Известен также пример применения когерентного СВЧ-радаром разработки НПО "Микран" (Томск) для измерений скорости морских течений со стационарной позиции [14]. Опыт использования в России когерентных локаторов X-диапазона для измерений с подвижного носителя авторам неизвестен.

В ходе эксперимента по прибрежной оперативной океанографии в Черном море на акватории гидрофизического полигона "Геленджик" ИО РАН в июне 2022 г. были измерены скорости приповерхностного течения и характеристики поверхностного волнения радиолокатором НИИ "Прогноз", расположенным на борту малого научно-исследовательского судна (МНИС) "Ашамба". Для верификации результатов, полученных радаром, измерения проводились одновременно с дрефтерными экспериментами МГУ и ИО РАН с использованием GPS-ГЛОНАСС лагранжевых дрефтеров приповерхностного слоя [15–17] с передачей координат по мобильной связи. Цель настоящей статьи – представить результаты измерений скорости течения доплеровским СВЧ-радиолокатором на движущемся судне и оценить качество прямых измерений скорости течения по данным дрефтеров.

Оборудование и методика эксперимента.

Для радиолокационных доплеровских измерений приповерхностной скорости течения использовался когерентизированный доплеровский радар на основе навигационной РЛС трехсантиметрового диапазона Furuno 1623, созданный силами НИИ "Прогноз" (рис. 1).

Когерентность радара обеспечивается разделением опорного и информационного сигнала.

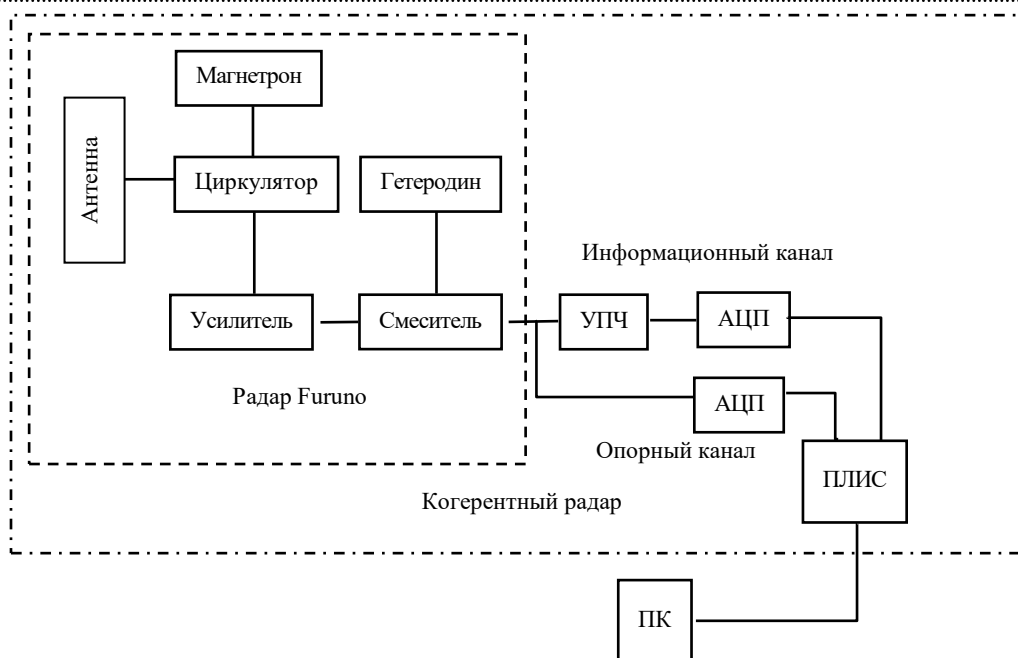


Рис. 1. Структурная схема когерентизированного радара НИИ "Прогноз"

Fig. 1. Block scheme of a coherent radar developed by the Prognosis research organization

ла, усиленного дополнительным усилителем промежуточной частоты УПЧ, и оцифровкой их на промежуточной частоте с формированием цифровых квадратур после блоков аналого-цифровых преобразователей АЦП и когерентной обработкой сигнала в программируемой логической интегральной схеме ПЛИС и персональном компьютере ПК. Характеристики радара приведены в таблице.

В ходе измерений радар располагался на борту МНИС ИО РАН "Ашамба". Эксперимент проводился в участке акватории полигона между Геленджикской бухтой и поселком Дивноморское.

Для планирования радарного эксперимента и последующей верификации использовались лагранжевы дрейферы. Радарные измерения проводились одновременно с дрейферными экспериментами МГУ и ИО РАН. Дрейферы были оснащены подводным парусом высотой 0.5 м, расположенным в приповерхностном горизонте, что позволяло сравнивать полученные

данные с данными радара для поверхностного слоя. Дискретность измерений по времени для дрейферов составляла 2 мин. Достоинством дрейферов является возможность отслеживания течений даже с очень маленькими скоростями: 2...5 см/с [17].

Схема проведения радарного эксперимента выглядела следующим образом: сначала выпускались дрейферы, оценивались скорость и направление течения, а затем проводилась съемка радаром вблизи дрейферов (на расстоянии 100...300 м). Радиолокационные измерения проводились с борта судна на малом ходу на различном расстоянии от берега, по возможности, вблизи спущенных дрейферов для последующей верификации измерений. Скорость хода МНИС "Ашамба" во время экспериментов составляла 3...6 уз. Антенна радара устанавливалась неподвижно, направление радиолокационного зондирования совпадало с курсом судна, который, по возможности, был сонаправлен наблюдаемому

Характеристики радара

Radar parameters

Параметр	Значение
Рабочая частота/длина волны	9420 МГц/3.2 см
Импульсная мощность передатчика	2 кВт
Разрешающая способность по дальности	12.5 и 45 м
Частота повторения импульсов	1200 и 3000 Гц
Поляризация антенны	Вертикальная
Ширина диаграммы направленности в горизонтальной плоскости	1.8°

течению. Производились последовательные записи сигнала длительностью по 120 с.

Во время эксперимента наблюдалось слабое нерегулярное волнение при слабом ветре. В этих условиях уровень отраженного сигнала очень мал, поэтому радар во время измерений работал в режиме "длинного" зондирующего импульса с параметрами: длительность импульса 330 нс, частота повторения 1200 Гц, что позволило несколько повысить энергетику принимаемого сигнала.

Обработка данных радиолокационных измерений. Компьютерная обработка радиолокационных данных производилась в средах MATLAB и LabView. Алгоритм обработки включал в себя предварительное когерентное накопление сигнала, устранение низкочастотного тренда фильтром нижних частот и фильтрацию верхних частот для согласования с полосой обрабатываемого сигнала. Данные взвешивались окном Хемминга, подвергались процедуре дискретного преобразования Фурье размерностью 512, что соответствовало времени накопления сигнала около 0.5 с и обеспечило разрешающую способность по скорости около 3 см/с. Исследование данных показало, что увеличение времени накопления нецелесообразно ввиду разрушения когерентности сигнала, отраженного от разных участков морской поверхности, в условиях хода судна и нерегулярного волнения. Данные дополнительно сглаживались в скользящем окне на 5 отсчетов. На дальнейших шагах алгоритма производилась двухпороговая обработка сигнала с целью устранения шумов и помех большой амплитуды, нахождение первого момента полученного спектра.

Метод вычисления радиальной компоненты скорости течения основан на исследовании доплеровских спектров сигнала (ДСС) [18, 19].

Общий доплеровский сдвиг спектра отраженного сигнала F_D складывается из частотных компонент, обусловленных радиальной составляющей скорости течения f_T , собственной скоростью судна f_V и детерминированной составляющей ДСС f_d :

$$F_D = f_T + f_V + f_d.$$

Детерминированная составляющая ДСС возникает за счет резонансного рассеяния радиоволн на элементах морской поверхности, сравнимых по размерам с длиной волны зондирующего сигнала [18, 20]. В [11, 19] приведены примеры измерения радиальной скорости течения когерентным радаром без учета детерминированной составляющей. В описываемом исследовании учитывался вклад детерминированной составляющей ДСС в общий доплеровский сдвиг спектра сигнала. Предварительно можно отметить улучшение адекватности результатов при таком подходе, так как без учета детерминированной составляющей абсолютные значения скоростей представляются завышенными.

Детерминированная составляющая ДСС по частоте определяется согласно дисперсионному соотношению для "глубокой" воды [21]:

$$f_d = \sqrt{gK_B + \frac{\sigma_B}{\rho_B} K_B^3} / (2\pi),$$

где g – гравитационная постоянная; σ_B – поверхностное натяжение на границе "воздух – морская вода"; ρ_B – плотность морской воды; волновое число $K_B = 2\pi/\Lambda_B$, причем

$$\Lambda_B = \lambda / (2 \cos \theta_c).$$

Здесь λ – длина радиоволны (3.2 см); θ_c – угол скольжения радиолокационного луча.

Как показано в [20], по результатам расчетов и моделирования, положение основного максимума детерминированной составляющей ДСС по частоте при малых углах скольжения составляет 15.6 Гц для случаев малого волнения со среднеквадратическим отклонением (СКО) ординат морской поверхности 0.025 и 0.1 м.

ДСС по частоте пересчитываются в спектры доплеровской скорости по известной формуле

$$V_D = \frac{\lambda}{2 \cos \theta_c} F_D. \quad (1)$$

Радиальная составляющая скорости течения V_T получается после вычитания из доплеровской скорости V_D (1) собственной скорости V_V и детерминированной составляющей ДСС V_d .

Данные по скорости усредняются на интервале 20 с, что соответствует длине отрезка, проходимого судном, в среднем около 50 м, т. е. приблизи-

тельно элементу разрешения радара по дальности (45 м) и затем на двухминутном отрезке.

Результаты радиолокационных измерений. Практическая максимальная дальность измерений составила 200...270 м.

Типичный частотный спектр сигнала, отраженного от морской поверхности, полученного на ходу судна при зондировании по курсу, показан на рис. 2.

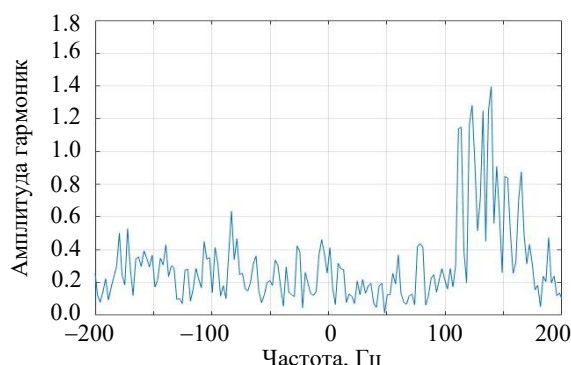


Рис. 2. Мгновенный доплеровский спектр сигнала от морской поверхности

Fig. 2. Instantaneous Doppler spectrum of a signal from the sea surface

Пример спектра сигнала после обработки приведен на рис. 3. Доплеровская частота спектра пересчитана в скорость по (1), вычтены собственная скорость и детерминированная составляющая ДСС. Ось абсцисс отградуирована в сантиметрах в секунду, по оси ординат – безразмерная амплитуда гармоник. Время накопления сигнала 0.5 с. Расположение максимума спектра (рис. 3) соответствует значению радиальной компоненты скорости течения, в данном случае – около 27 см/с. Отрицательный знак скорости свидетельствует о том, что направление течения противоположно ходу судна.

Измеренные радиальные составляющие скорости течения на разных участках трека судна при усреднении на интервале 20 с со-

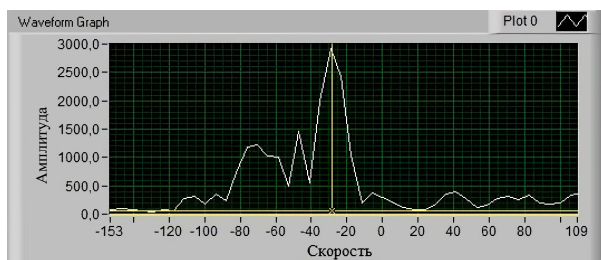


Рис. 3. Доплеровский спектр радиальной составляющей скорости течения

Fig. 3. Doppler spectrum of the radial component of current velocity

ставляли от 15 до 60 см/с со среднеквадратическим отклонением измерений 13 %. При усреднении на двухминутном интервале получены значения скоростей от 20 до 50 см/с с СКО измерений 10 %. Для меньших скоростей течений (15...20 см/с по данным радара) СКО составило более 40 % (около 8 см/с), что сравнимо с самими измеряемыми значениями. Такие значения были измерены от расстояния 6.2 км и ближе к берегу (ближние к берегу оранжевые треугольники на рис. 4). При удалении более 6.2 км измеренные скорости опять возрастали до 0.4...0.5 м/с. К сожалению, для этого участка нет данных дрейфтеров.

Малые радиальные скорости течений (менее 10...15 см/с), наблюдавшиеся согласно данным дрейфтеров, измерить в условиях эксперимента не удалось ввиду больших флуктуаций спектра сигнала морской поверхности, составляющих несколько десятков герц (рис. 2).

Результаты сопоставления радиолокационных измерений с данными дрейфтеров. Было выпущено 10 дрейфтеров парами, с парусами на глубине 0...0.5 м в районе Геленджик–Дивноморск. Радиолокационные измерения проводились до и после выпуска дрейфтеров с покрытием участка морской поверхности, в котором находилась пара дрейфтеров. К сожалению, ввиду ряда технических причин радиолокационными измерениями был охвачен достаточно небольшой участок акватории (рис. 4). Существенных различий траекторий дрейфтеров и скорости течения в точках радарных измерений не наблюдалось. Синими стрелками (рис. 4) показаны векторы скорости течения, измеренные радаром, оранжевыми стрелками – дрейфтерами.

Однопозиционный радар измеряет только радиальную компоненту скорости, для получения истинного вектора течения необходима работа двух радаров на разных позициях. В данном случае измеренная радаром абсолютная скорость течения вычисляется по данным дрейфтеров по формуле

$$V = \frac{V_r}{\cos \Phi},$$

где V_r – радиальная компонента; Φ – угол между истинным направлением течения по данным дрейфтеров и курсом судна. Направле-

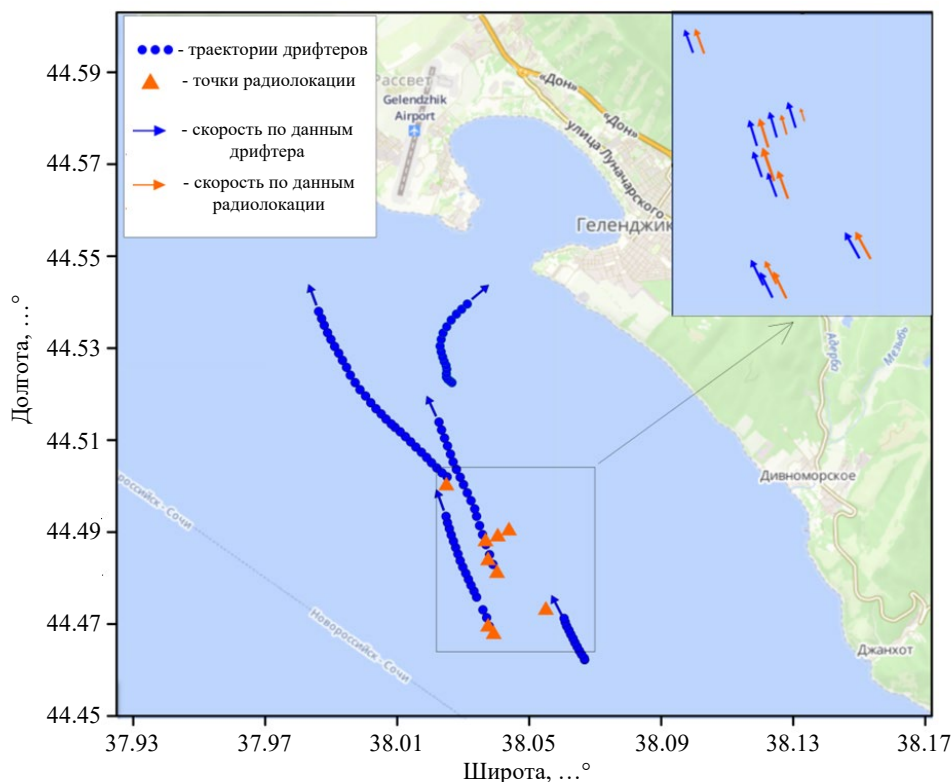


Рис. 4. Скорости течения по данным радара и дрейфтеров

Fig. 4. Current velocity according to the radar and drifters data

ние стрелок на врезке рис. 4 соответствует истинному направлению течения, длина – измеренной скорости.

Среднеквадратическая ошибка радарных измерений относительно дрейферных составила 5.9 см/с для скоростей течения 20...50 см/с. Систематическая ошибка измерений отсутствует. Коэффициент корреляции по всем измерениям 0.86.

Заключение. Описанное исследование является определенным шагом в разработке методики радиолокационных измерений поверхностных течений с борта движущегося судна.

В целом результаты верификации подтверждают пригодность аппаратно-программной части радара и примененных методов обработки сигнала для измерения радиальных скоростей течений, что свидетельствует о перспективности применения когерентизированного СВЧ-радар для целей оперативного мониторинга морской поверхности. В проведенном эксперименте наблюдается достаточно хорошая корреляция данных радара с данными дрейфтеров для скоростей течений от 15 см/с. Высокое разрешение и оперативность обработки данных

позволяют построить достаточно подробную картину поля радиальных скоростей течений.

Наряду с этим выявлен ряд ограничений оборудования и метода при измерениях с движущегося судна. Так, например, при малых углах скольжения, зависящих от высоты антенны радара, и слабом волнении удельная эффективная площадь рассеяния (ЭПР) морской поверхности стремится к нулю [22] и низкий уровень отраженного сигнала ограничивает практическую дальность измерений 200...300 м. Высота установки антенны ограничена особенностями судовой конструкции. Целесообразно применение радара при высоте волны, большей 0.5 м. Тогда с ростом удельной ЭПР морской поверхности максимальная дальность может составлять несколько сотен метров.

Измерение малых скоростей течения (менее 15 см/с) при движении судна также затруднительно, поскольку ширина флуктуаций спектров сигнала может составлять несколько десятков герц (см. рис. 2), очевидно, ввиду попадания большого количества случайно движущихся отражателей в элемент разрешения по площади. В результате переноса спектра в око-

лонулеву область частот после вычитания спектрального сдвига, соответствующего собственной скорости, спектральные составляющие, соответствующие малым скоростям течения, сосредоточены около нуля и перекрываются флуктуациями. Вопрос повышения разрешения по частоте и компенсации больших флуктуаций спектра сигнала для измерения малых доплеровских сдвигов в условиях движущегося судна требует дальнейшего теоретического и экспериментального исследования.

Направление радиолокационного зондирования в части экспериментов совпадало с направлением хода судна, в нескольких экспериментах направление было поперечным, под углом 90° к курсу. Значительного различия в характере спектров сигнала не обнаружено. Очевидно, существенно большее влияние на радиолокационное отражение должно иметь направление зондиро-

вания относительно генерального направления распространения морских волн.

Методика проведения последующих экспериментов должна предусматривать направление зондирования вдоль направления распространения волн, т. е. "поперек" гребней. При этом возрастает амплитуда и доплеровская информативность отраженного сигнала. Кроме того, скорость судна в эксперименте была достаточно велика, как правило, не менее 4 уз. Представляется необходимым во время эксперимента двигаться на скоростях не более 2...3 уз для уменьшения флуктуаций, возникающих за счет движения судна. Разумеется, выполнение этих требований ограничивается погодными условиями и характеристиками судна.

Результаты исследования будут использованы при дальнейшем развитии темы измерений гидрографических параметров когерентными радаром СВЧ-диапазона.

Авторский вклад

Горбунов Игорь Геннадьевич – подготовка статьи; проведение экспериментальных и теоретических исследований.

Веремьев Владимир Иванович – руководство научными исследованиями; обсуждение результатов.

Шестак Вадим Дмитриевич – программная реализация алгоритмов обработки сигнала.

Комаров Глеб Владимирович – проведение экспериментальных исследований; подготовка статьи.

Мысленков Станислав Александрович – проведение экспериментальных исследований; обсуждение результатов; подготовка статьи.

Сильвестрова Ксения Петровна – подготовка и проведение дрейфтерных экспериментальных исследований.

Author's contribution

Igor G. Gorbunov, preparation of the paper text; carrying out measurements and calculations.

Vladimir I. Veremyev, management of the work; discussion of the results.

Vadim D. Shestak, software of signal processing.

Gleb V. Komarov, carrying out measurements; preparation of the paper text.

Stanislav A. Myslenkov, carrying out measurements; discussion of the results; preparation of the paper text.

Ksenia P. Silvestrova, preparing and carrying out drifter measurements.

Список литературы

1. Бархатов А. В., Веремьев В. И., Попов А. Г. Радиолокационный гидрографический мониторинг Невской губы // Материалы НПК "Проблемы прогнозирования и предотвращения чрезвычайных ситуаций и их последствий", СПб., 20 нояб. 2003. С. 30–32.

2. Сравнение характеристик течений, измеренных КВ и СВЧ радиолокаторами на гидрофизическом полигоне ИО РАН в Черном море, с данными ADCP и дрейфтеров / А. Г. Зацепин, В. В. Горбачкий, С. А. Мысленков, Н. Н. Шпилев, Д. И. Дудко, Д. В. Ивонин, К. П. Сильвестрова, В. И. Баранов, В. А. Телегин, С. Б. Куклев // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космо-

са. 2017. Т. 14, № 7. С. 250–266. doi: 10.21046/2070-7401-2017-14-7-250-266

3. Определение скорости течения по измерениям навигационного радара с широкой диаграммой направленности антенны / Д. В. Ивонин, В. А. Телегин, А. И. Азаров, А. В. Ермошкин, В. В. Баханов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8, № 4. С. 219–227.

4. Булатов М. Г., Раев М. Д., Скворцов Е. И. Исследование динамики морских волн в прибрежной зоне по данным радиолокационных наблюдений высокого разрешения // Современные проблемы

дистанционного зондирования Земли из космоса. 2005. Т. 5, № 2. С. 76–81.

5. Предварительные результаты сравнения измерений вектора скорости течения навигационным радаром X-диапазона и донной станцией ADCP / Д. В. Ивонин, П. В. Чернышов, С. Б. Куклев, С. А. Мысленков // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13, № 2. С. 53–66. doi: 10.21046/2070-7401-2016-13-2-53-66

6. Wind Waves in the North Atlantic from Ship Navigational Radar: SeaVision Development and Its Validation with the Spotter Wave Buoy and WaveWatch III / N. Tilinina, D. Ivonin, A. Gavrikov, V. Sharmar, S. Gulev, A. Suslov, V. Fadeev, B. Trofimov, S. Bargman, L. Salavatova, V. Koshkina, P. Shishkova, E. Ezhova, M. Krinitsky, O. Razorenova, K. P. Koltermann, V. Tereschenkov, A. Sokov // Earth Syst. Sci. Data. 2022. Vol. 14. P. 3615–3633. doi: 10.5194/essd-14-3615-2022

7. Remote sensing in the Neva Bight / F. Ziemer, C. Brockmann, R. A. Vaughan, A. Barkatov // EARSeL eProceedings. 2004. Vol. 3, № 2. P. 276–281.

8. Hwang P. A., Sletten M. A., Toporkov J. V. A note on Doppler processing of coherent radar backscatter from the water surface: With application to ocean surface wave measurements // J. of Geophysical Research: Oceans. 2010. Vol. 115, № C03026. P. 1–8. doi: 10.1029/2009JC005870

9. On the Interpretation of Coherent Marine Radar Backscatter From Surf Zone Waves / M. Streßer, J. Seemann, R. Carrasco, M. Cysewski, J. Horstmann, B. Baschek, G. Deane // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2022. Vol. 60. Art № 5105514. P. 1–14. doi: 10.1109/TGRS.2021.3103417

10. Determination of the Sea Surface Current Field from the Doppler Shift of the Coherent Radar Backscatter with Grazing Incidence / H. Hatten, J. Seemann, Ch. M. Senet, A. Bezuglov, V. Veremjiev, F. Ziemer // OCEANS 2000 MTS/IEEE Conf. & Exhibition Providence. Conf. Proc. Providence, USA, 11–14 Sept. 2000. IEEE, 2002. P. 549–554. doi: 10.1109/OCEANS.2000.881312

11. Ziemer F., Braun N., Bezuglov A. Sea-Surface Current Features Observed by Doppler Radar // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2008. Vol. 46, № 4. P. 1125–1133. doi: 10.1109/TGRS.2007.910221

12. О проведении измерений характеристик морской поверхности с использованием когерентного радара СВЧ-диапазона / В. И. Веремьев, И. Г. Горбунов, А. Г. Зацепин, С. Б. Куклев, Д. Ю. Куликова, В. А. Телегин // Сб. ст. IV Междунар. науч.-практ. конф. "Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных

систем" "Радиоинфоком-2019". М.: МИРЭА, 2019. С. 8–12.

13. Kulikova D. Yu., Gorbunov I. G. Analysis of the Sea Surface Parameters by Doppler X-Band Radar in the Coastal Zone of the Black Sea // Proc. of the IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). Saint Petersburg and Moscow, Russia, 28–31 Jan. 2019. IEEE, 2019. P. 1185–1188. doi: 10.1109/EIConRus.2019.8657257

14. Определение скорости течения на морской поверхности доплеровским радиолокатором X-диапазона / А. В. Ермошкин, И. А. Капустин, А. А. Мольков, Н. А. Богатов // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2020. Т. 13, № 3. С. 93–103. doi: 10.7868/S2073667320030089

15. Изучение гидрофизических процессов на шельфе и верхней части континентального склона Черного моря с использованием традиционных и новых методов измерений / А. Г. Зацепин, А. О. Корж, В. В. Кременецкий, А. Г. Островский, С. Г. Поярков, Д. М. Соловьев // Океанология. 2008. Т. 48, № 4. С. 510–519.

16. Использование дрейфующих буев и буксируемого профилографа для исследования течений на шельфе Черного моря / С. А. Мысленков, А. Г. Зацепин, К. П. Сильвестрова, В. И. Баранов // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5: География. 2014. № 6. С. 73–80.

17. Возможности использования GPS-дрифтеров для исследования течений на шельфе Черного моря / К. П. Сильвестрова, С. А. Мысленков, А. Г. Зацепин, Е. В. Краюшкин, В. И. Баранов, Т. Е. Самсонов, С. Б. Куклев // Океанология. 2016. Т. 56, № 1. С. 159–166. doi: 10.7868/S0030157416010111

18. X-Band Microwave Backscattering from Ocean Waves / P. Y. Lee, J. D. Barter, K. L. Beach, C. L. Hindman, B. M. Lade, H. Rungaldier, J. C. Shelton, A. B. Williams, R. Yee, H. C. Yuen // J. of Geophysical Research. 1995. Vol. 100, № 2. P. 2591–2611. doi: 10.1029/94JC02741

19. Ziemer F., Cysewski M., Seemann J. Sea Surface Current Mapping by Radar Doppler Current Profiler // Oceans'10 IEEE Sydney. 2010. P. 1–7. doi: 10.1109/OCEANSSYD.2010.5603894

20. Бородин М. А., Михайлов В. Н., Филиппова П. А. Математическая модель доплеровского спектра сигнала, рассеянного морской поверхностью, при скользких углах облучения // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2019. Т. 22, № 3. С. 63–73. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-3-63-73

21. Давидан И. Н., Лопатухин Л. И., Рожков В. А. Ветровое волнение в мировом океане / под ред. И. Н. Давидана. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 256 с.

22. Морская радиолокация / под ред. В. И. Винокурова. Л.: Судостроение, 1986. 256 с.

Информация об авторах

Горбунов Игорь Геннадьевич – научный сотрудник НИИ "Прогноз" Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 30 научных работ по теме: "Верификация измерений скорости поверхностных течений когерентным радаром СВЧ-диапазона с помощью дрейфтеров".
Verifying Measurements of Surface Current Velocities by X-Band Coherent Radar Using Drifter Data

работ. Сфера научных интересов – комплексные вопросы построения радиолокационных систем; радиолокационные методы исследования морской поверхности; комплексный экологический мониторинг.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: gog-ig@mail.ru

Веремьев Владимир Иванович – кандидат технических наук (2000), профессор кафедры радиотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), директор НИИ "Прогноз". Автор более 100 научных работ. Сфера научных интересов – комплексный экологический мониторинг; комплексные вопросы построения радиолокационных систем; многодиапазонные многопозиционные радиолокационные комплексы для мониторинга воздушного пространства и морской поверхности.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: vervladiv@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-8167-6616>

Шестак Вадим Дмитриевич – студент Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина) по специальности "Радиоэлектронные системы и комплексы" (год окончания 2023). Автор одной научной публикации. Сфера научных интересов – информационно-измерительные системы.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: shestak.01@inbox.ru

Комаров Глеб Владимирович – инженер по специальности "Радиоэлектронные системы и комплексы" (2020), аспирант кафедры радиотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор пяти научных публикаций. Сфера научных интересов – антенные системы; электродинамическое моделирование; распространение радиоволн.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: komarov_gleb@list.ru

Мысленков Станислав Александрович – кандидат физико-математических наук (2017), старший научный сотрудник кафедры океанологии Московского государственного университета им. М. И. Ломоносова. Старший научный сотрудник Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН. Автор более 160 научных работ. Сфера научных интересов – ветровое волнение; структура вод, циркуляция вод.

Адрес: Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, географический факультет, кафедра океанологии, Ленинские горы, Москва, 119991, Россия

E-mail: stasoccean@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-7700-4398>

Сильвестрова Ксения Петровна – кандидат географических наук (2019), старший научный сотрудник лаборатории экспериментальной физики океана Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН. Автор более 30 научных работ. Сфера научных интересов – исследования динамики вод; гидрофизические процессы.

Адрес: Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Нахимовский пр., д. 36, Москва, 117997, Россия

E-mail: office@ocean.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7515-6398>

References

1. Barkhatov A. V., Veremjev V. I., Popov A. G. *Radiolocationny gidrograficheskii monitoring Nevskoi guby* [Radar Hydrographic Monitoring of the Neva Bay]. Proc. of Conf. "Problems of Forecasting and Prevention of Emergencies and Their Consequences", 20 Nov. 2003, SPb, pp. 30–32. (In Russ.)

2. Zatsepin A. G., Gorbatskiy V. V., Myslenkov S. A., Shpilev N. N., Dudko D. I., Ivonin D. V., Silvestrova K. P., Baranov V. I., Telegin V. A., Kuklev S. B. 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. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current Problems in Remote Sensing of

the Earth From Space]. 2017, vol. 14, no. 7, pp. 250–266. doi: 10.21046/2070-7401-2017-14-7-250-266 (In Russ.)

3. Ivonin D. V., Telegin V. A., Azarov A. I., Ermoshkin A. V., Bakhanov V. V. Possibility to Measure Velocity Vector of Surface Current by Means of Nautical Radar with Wide Beamwidth. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space]. 2011, vol. 8, no. 4, pp. 219–227. (In Russ.)

4. Bulatov M. G., Raev M. D., Skvortsov E. I. Investigation of the Dynamics of Sea Waves in the Coastal Zone Based on High-Resolution Radar Observations. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current Problems in Re-

mote Sensing of the Earth from Space]. 2005, vol. 2, no. 5, pp. 76–81. (In Russ.)

5. Ivonin D. V., Chernyshov P. V., Kuklev S. B., Myslenkov S. A. Preliminary Comparisons of Sea Current Velocity Vector Measurements by a Nautical X-Band Radar and Moored ADCP. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current Problems in Remote Sensing of the Earth From Space]. 2016, vol. 13, no. 2, pp. 53–66. doi: 10.21046/2070-7401-2016-13-2-53-66 (In Russ.)

6. Tilinina N., Ivonin D., Gavrikov A., Sharmar V., Gulev S., Suslov A., Fadeev V., Trofimov B., Bargman S., Salavatova L., Koshkina V., Shishkova P., Ezhova E., Krinitsky M., Razorenova O., Koltermann K. P., Tereschenkov V., Sokov A. Wind Waves in the North Atlantic from Ship Navigational Radar: SeaVision Development and its Validation with the Spotter Wave Buoy and WaveWatch III. *Earth Syst. Sci. Data*. 2022, vol. 14, pp. 3615–3633. doi: 10.5194/essd-14-3615-2022

7. Ziemer F., Brockmann C., Vaughan R. A., Barakatov A. Remote Sensing in the Neva Bight EARSel eProceedings. 2004, vol. 3, no. 2, pp. 276–281.

8. Hwang P. A., Sletten M. A., Toporkov J. V. A Note on Doppler Processing of Coherent Radar Backscatter from the Water Surface: with Application to Ocean Surface Wave Measurements. *J. of Geophysical Research: Oceans*. 2010, vol. 115, no. C03026, pp. 1–8. doi: 10.1029/2009JC005870

9. Streßer M., Seemann J., Carrasco R., Cysewski M., Horstmann J., Baschek B., Deane G. On the Interpretation of Coherent Marine Radar Backscatter From Surf Zone Waves. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2022, vol. 60, art no. 5105514, pp. 1–14. doi: 10.1109/TGRS.2021.3103417

10. Hatten H., Seemann J., Senet Ch. M., Bezuglov A., Veremjev V., Ziemer F. Determination of the Sea Surface Current Field from the Doppler Shift of the Coherent Radar Backscatter with Grazing Incidence. *OCEANS 2000 MTS/IEEE Conf. & Exhibition Providence. Conf. Proc. Providence, USA, 11–14 Sept. 2000. IEEE, 2002. P. 549–554. doi: 10.1109/OCEANS.2000.881312*

11. Ziemer F., Braun N., Bezuglov A. Sea-Surface Current Features Observed by Doppler Radar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2008, vol. 46, no. 4, pp. 1125–1133. doi: 10.1109/TGRS.2007.910221

12. Veremjev V. I., Gorbunov I. G., Zatsepin A. G., Kuklev S. B., Kulikova D. Y., Telegin V. A. *O provedenii izmerenii kharakteristik morskoi poverkhnosti s ispol'zovaniem kogerentnogo radara SVCh-diapazona* [On Measuring the Characteristics of the

Sea Surface Using a Coherent Microwave Radar]. *Proc. of the Conf. "Radioinfocom 2019", Moscow, MIREA, 2019, pp. 8–12. (In Russ.)*

13. Kulikova D. Yu., Gorbunov I. G. Analysis of the Sea Surface Parameters by Doppler X-Band Radar in the Coastal Zone of the Black Sea. *Proc. of the IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). Saint Petersburg and Moscow, Russia, 28–31 Jan. 2019. IEEE, 2019, pp. 1185–1188. doi: 10.1109/EIConRus.2019.8657257*

14. Ermoshkin A. V., Kapustin I. A., Molkov A. A., Bogatov N. A. Determination of the Sea Surface Current by a Doppler X-Band Radar. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2020, vol. 13, no 3, pp. 93–103. doi: 10.7868/S2073667320030089 (In Russ.)

15. Zatsepin A. G., Korzh A. O., Kremenetskii V. V., Ostrovskii A. G., Poyarkov S. G., Solov'ev D. M. 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. *Oceanology*. 2008, vol. 48, no. 4, pp. 510–519. (In Russ.)

16. Myslenkov S. A., Zatsepin A. G., Silverstova K. P., Baranov V. I. Application of Drift Buoys and Towed Profiler for Investigation of Currents within the Black Sea Continental Shelf. *Vestnik Moskovskogo universiteta, Seriya 5, Geografiya*. 2014, no. 6, pp. 73–80. (In Russ.)

17. Silverstova K. P., Myslenkov S. A., Zatsepin A. G., Krayushkin E. V., Baranov V. I., Samsonov T. E., Kuklev S. B.. GPS-Drifters for the Study of Water Dynamics in the Black Sea Shelf Zone. *Okeanologiya*. 2016, vol. 41, no. 5, pp. 159–166. doi: 10.7868/S0030157416010111 (In Russ.)

18. Lee P. Y., Barter J. D., Beach K. L., Hindman C. L., Lade B. M., Rungaldier H., Shelton J. C., Williams A. B., Yee R., Yuen H. C. X-Band Microwave Backscattering from Ocean Waves. *J. of Geophysical Research*. 1995, vol. 100, no. 2, pp. 2591–2611. doi: 10.1029/94JC02741

19. Ziemer F., Cysewski M., Seemann J. Sea Surface Current Mapping by Radar Doppler Current Profiler. *Oceans'10 IEEE Sydney*. 2010, pp. 1–7. doi: 10.1109/OCEANSSYD.2010.5603894

20. Borodin M. A., Mikhaylov V. N., Filippova P. A. Doppler Spectrum Mathematical Model of Signal Scattering from Sea Surface. *J. of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2019, vol. 22, no. 3, pp. 63–73. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-3-63-73

21. *Vetrovoe volnenie v mirovom okeane* [Wind Waves in the World Ocean]. Ed. by I. N. Davidan. Leningrad, *Gidrometeoizdat*, 1985, 256 p. (In Russ.)

22. *Morskaya radiolokatsiya* [Marine Radiolocation]. Ed. by V. I. Vinokurov. Leningrad, *Sudostroenie*, 1986, 256 p. (In Russ.)

Information about the authors

Igor G. Gorbunov, Scientist of the Research Institute "Prognoz" in Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 30 scientific publications. Area of expertise: complex issues of building radar systems; radar systems for sea surface research; integrated environmental monitoring.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: gor-ig@mail.ru

Vladimir I. Veremyev, Cand. Sci. (2000), Professor of the Department of Radio Engineering Systems in Saint Petersburg Electrotechnical University, director of the Research Institute "Prognoz". The author of more than 100 scientific publications. Area of expertise: integrated environmental monitoring; complex issues of building radar systems; multi-band multi-position radar systems for airspace and sea surface monitoring.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: vervladiv@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-8167-6616>

Vadim D. Shestak, A student of Saint Petersburg Electrotechnical University in "Radioelectronic systems and complexes". The author of 1 scientific publication. Area of expertise: information and measurement systems.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: shestak.01@inbox.ru

Gleb V. Komarov, Engineer in "Radioelectronic systems and complexes" (2020), Postgraduate Student of the Department of Radio Engineering Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University. Author of 5 scientific publications. Area of expertise: antenna systems; electrodynamic simulation and radio wave propagation.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: komarov_gleb@list.ru

Stanislav A. Myslenkov, Cand. Sci. (2017), Senior Researcher of the Department of Oceanology in Lomonosov Moscow State University. Senior Researcher of the Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences. The author of more than 160 scientific publications. Area of expertise: oceanography; wind waves; water structures; water circulation.

Address: Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, GSP-1, Leninskie gory, Moscow 119991, Russia

E-mail: stasocean@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-7700-4398>

Ksenia P. Silvestrova, Cand. Sci. (2019), Senior Researcher of the Department of Physics Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences. The author of more than 30 scientific publications. Area of expertise: hydrophysics; ocean currents and circulation.

Address: Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences, 36, Nakhimovskiy pr., Moscow 117997, Russia

E-mail: office@ocean.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7515-6398>
