

Перспективы радиолокационного мониторинга скорости ветра, спектров ветровых волн и скорости течения с океанографической платформы

Ю. Ю. Юровский, В. В. Малиновский, А. Е. Кориненко *,
Л. А. Глухов, В. А. Дулов

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

** e-mail: korinenko.alex@mhi-ras.ru*

Аннотация

Цель статьи – представить перспективы радиолокационного мониторинга морской среды с океанографической платформы, расположенной вблизи поселка Кацивели на Южном берегу Крыма на Черноморском гидрофизическом подспутниковом полигоне Морского гидрофизического института РАН. Работа радиолокационной станции с платформы в Кацивели позволила бы регистрировать в непрерывном режиме кругового обзора поля скорости ветра, спектров ветровых волн и вектора скорости течения в акватории радиуса 1 км с разрешением до 100 м. Описаны подходы и проблемы при оценке полей скорости ветра, спектров ветровых волн и вектора скорости течения с помощью навигационного радара. Показано, что для восстановления перечисленных полей по сигналу радара пригодны уже известные методы, развитые в спутниковой и корабельной радиолокации, если воспользоваться результатами исследований обрушений ветровых волн, проведенных с платформы в Кацивели. Апробация подходов выполнена осенью 2022 г. с платформы в Кацивели на основе радиолокационных станций *MRS-1011* (*X*-диапазон, длина электромагнитной волны 3 см) и *MRS-3000* (*Ka*-диапазон, длина электромагнитной волны 8 мм). Обе станции имеют мощностные и доплеровские каналы, горизонтальные поляризации излучения и приема и осуществляют круговой обзор акватории под скользящими углами к морской поверхности, не превышающими 10°. Специализированный эксперимент включал работу радара одновременно со штатным оборудованием платформы, а обработка данных основывалась на описанных алгоритмах восстановления. В результате эксперимента показано, что восстановленные частотные спектры ветровых волн согласуются со спектрами, измеренными традиционным струнным волнографом, восстановленные пространственные поля ветра и течений отвечают традиционным представлениям, причем поле течений согласуется на качественном уровне с данными доплеровского канала. Данные, полученные с помощью радиолокационных станций, демонстрируют возможности восстановления полей скорости ветра, векторов скорости течения и частотных спектров волнения в акватории радиусом около километра с пространственным разрешением в десятки метров. Радиолокационный мониторинг с платформы в Кацивели

© Юровский Ю. Ю., Малиновский В. В., Кориненко А. Е.,
Глухов Л. А., Дулов В. А., 2023



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0
International (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0
International (CC BY-NC 4.0) License

предоставляет техническую базу для исследований взаимодействия океана и атмосферы, взаимодействия ветровых волн и течений, для отработки и валидации спутниковых технологий и региональных моделей морской среды.

Ключевые слова: радиолокатор, морская поверхность, удельная эффективная площадь рассеяния, доплеровский спектр, скаттерометрия, спектры волн, скорость течения, натурные измерения, мониторинг, океанографическая платформа

Благодарности: работа выполнена в рамках госзадания МГИ РАН по темам № FNNN-2021-0005 и № FNNN-2021-0004.

Для цитирования: Перспективы радиолокационного мониторинга скорости ветра, спектров ветровых волн и скорости течения с океанографической платформы / Ю. Ю. Юровский [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2023. № 3. С. 40–54. EDN OFYNOG.

Prospects for Radar Monitoring of Wind Speed, Wind Wave Spectra and Velocity of Currents from an Oceanographic Platform

**Yu. Yu. Yurovsky, V. V. Malinovsky, A. E. Korinenko *,
L. A. Glukhov, V. A. Dulov**

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

** e-mail: korinenko.alex@mhi-ras.ru*

Abstract

The article aims to present the prospects of radar monitoring of the marine environment from an oceanographic platform located near the village of Katsiveli on the South coast of Crimea at the Black Sea hydrophysical sub-satellite test site of the Marine Hydrophysical Institute of the Russian Academy of Sciences. Operation of the radar station from the platform in Katsiveli would allow continuous round-view mode recording of the wind speed fields, wind wave spectra, and a current velocity vector in the water area of a 1 km radius with a resolution of up to 100 meters. The paper describes approaches and problems in estimating wind speed fields, wind wave spectra, and current velocity vectors using a navigation radar. It is shown that the already known methods developed in satellite and ship radar are suitable for the reconstruction of the mentioned fields from the radar signal if we use the results of wind wave-breaking studies carried out from the Katsiveli platform. The approaches were tested in autumn 2022 from the Katsiveli platform using radar stations MRS-1011 (X-band, electromagnetic wavelength 3 cm) and MRS-3000 (Ka-band, electromagnetic wavelength 8 mm). Both stations have power and Doppler channels, horizontal polarizations of emission and reception, and perform all-around scanning of the water area at grazing angles to the sea surface not exceeding 10°. The specialized experiment included the radar operation simultaneously with the standard equipment of the platform, and data processing was based on the described recovery algorithms. As a result of the experiment it is shown that the recovered frequency spectra of wind waves agree with the spectra measured with a conventional string wave recorder, the recovered spatial fields of wind and currents meet the traditional concepts, and the field of currents agrees qualitatively with the Doppler channel data. The data obtained with radar stations demonstrate the possibility of recovery of wind speed fields, vectors of the velocity of currents, and wave frequency spectra in a water area with a radius of about 1 km

with a spatial resolution of tens of meters. Radar monitoring from the Katsiveli platform provides a technical base for studies of air-sea interactions and wave-current interactions and for the development and validation of satellite technologies and regional models of the marine environment.

Keywords: radar, sea surface, normalized radar cross-section, Doppler spectrum, scatterometry, wave spectra, current velocity, in situ measurements, monitoring, oceanographic platform

Acknowledgements: The work was performed under state assignment of MHI RAS on topics no. FNNN-2021-0005 and no. FNNN-2021-0004.

For citation: Yurovsky, Yu.Yu., Malinovsky, V.V., Korinenko, A.E., Glukhov, L.A. and Dulov, V.A., 2023. Prospects for Radar Monitoring of Wind Speed, Wind Wave Spectra and Velocity of Currents from an Oceanographic Platform. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 40–54.

1. Введение

Со стационарной океанографической платформы вблизи поселка Кацивели (далее – «платформа в Кацивели») традиционно выполняются как специализированные морские эксперименты (см., например, сборник¹⁾ и работы [1–5]), так и непрерывный мониторинг прибрежной зоны [6]. Платформа с окружающей ее акваторией образуют экспериментальный полигон (Черноморский гидрофизический подспутниковый полигон Морского гидрофизического института РАН, ЧГПП МГИ), где работает штатное измерительное оборудование [6], а данные некоторых измерений выводятся в реальном времени на общедоступные сайты (см., например, текущую информацию о состоянии моря на постоянно работающем сайте <http://dvs.net.ru/mhiplatform/index.shtml>). За десятилетия исследовательских работ накоплены обширные архивные данные о характеристиках морской среды на полигоне и их изменчивости [1, 6]. Таким образом, имеются широкие возможности как для оптимального планирования экспериментальных работ на полигоне, так и для расширенного контроля внешних условий во время экспериментов. Поэтому условия проведения работ на полигоне оказываются аналогичными лабораторным. На сегодняшний день такого рода «натурные лаборатории» необходимы прежде всего для разработки и отладки региональных моделей морской среды и валидации спутниковых технологий мониторинга океана.

Естественным шагом для усиления измерительных возможностей «натурной лаборатории» в Кацивели явилось бы осуществление непрерывного радиолокационного мониторинга окружающей платформу акватории радиусом около 1 км (рис. 1). Такой мониторинг мог бы дать поля поверхностных течений, приводной скорости ветра и спектров ветровых волн с пространственным разрешением до десятков метров. Подходящим для таких целей прибором является когерентный навигационный радар, способный, помимо стандартной мощности

¹⁾ Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. К 30-летию океанографической платформы в Кацивели : сборник научных трудов / В. А. Иванов (гл. ред.). Севастополь, 2010. Вып. 21. 265 с.

отражения, регистрировать фазу сигнала (доплеровский сдвиг частоты), а значит, и скорость облучаемой поверхности.

На рис. 1, *a* схематически показана область мониторинга, на рис. 1, *b* – реальное радиолокационное изображение ее фрагмента, на рис. 1, *c*, *d* – отечественные радиолокационные станции (РЛС), приобретенные МГИ для выполнения подобных работ. На изображении (рис. 1, *b*) показана мощность сигнала, в поле которой хорошо различаются ветровые волны. Каждый пиксель изображения можно рассматривать как «виртуальную станцию», где регистрируется временной ряд характеристик сигнала. Набор «виртуальных станций», схематично показанный на рис. 1, *a*, обеспечивает получение подробных пространственно-временных полей исследуемых характеристик морской среды.

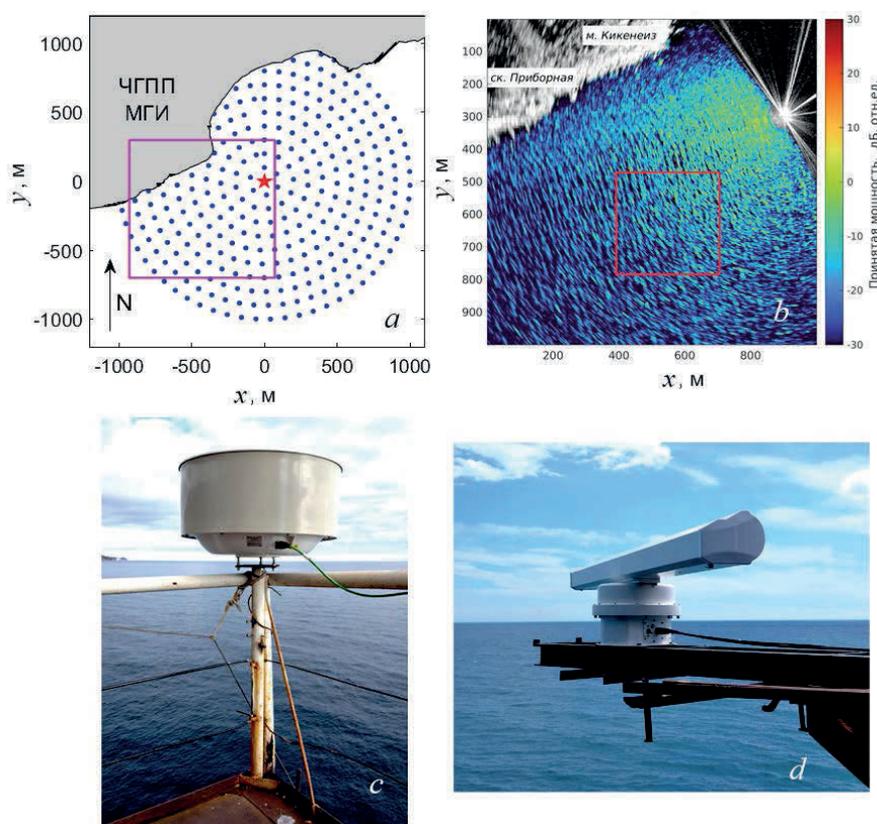


Рис. 1. Радиолокационный мониторинг с платформы в Кацивели: *a* – область мониторинга (звездочкой обозначено расположение платформы, точками – виртуальные станции); *b* – радиолокационное изображение выделенной на рис. 1, *a* прямоугольной области; *c* – РЛС MRS-3000; *d* – РЛС MRS-1011

Fig. 1. Radar monitoring from the Katsiveli platform: *a* – monitoring area (the star denotes the platform location, the dots are virtual stations); *b* – radar image of the rectangular area selected in Fig. 1, *a*; *c* – MRS-3000 radar; *d* – MRS-1011 radar

Радиолокационный мониторинг с платформы в Качивели обеспечил бы экспериментальную базу для выполнения актуальных исследований взаимодействия океана и атмосферы, взаимодействия ветровых волн и течений, проведения подспутниковых экспериментов, отработки и валидации региональных моделей морской среды. В то же время развитые в последние десятилетия методы восстановления скорости ветра, спектров ветровых волн и скорости течения по спутниковым измерениям предоставляют теоретическую базу для осуществления проекта.

Радиолокационные измерения морской поверхности при малых углах скольжения, не превышающих 10° , характерные для береговых или судовых РЛС, имеют особенности формирования отраженного радиосигнала, которые определяются не резонансным брегговским рассеянием, а отражением от обрушивающихся гребней ветровых волн (см., например, работу [7] и цитируемую в ней литературу).

Для решения прикладных задач, в частности восстановления скорости ветра, используют построенные по данным РЛС геофизические модельные функции (ГМФ). В работе [8] для оценки скорости ветра по морским навигационным РЛС было предложено использовать ГМФ третьего порядка. При скоростях ветра ~ 4 и 22 м/с ошибки восстановления скорости составили ~ 0.8 и ~ 0.1 м/с соответственно. Эмпирическая ГМФ, учитывающая угол скольжения и азимут наблюдения, приведена в работе [5], где показано, что зависимость эффективной площади рассеяния от скорости ветра описывается степенной функцией с показателем 2.8.

Морские навигационные РЛС широко используются также для определения характеристик морской среды [9, 10]. Для оценки скорости поверхностного течения и глубины моря по деформации дисперсионной кривой предложена методика анализа последовательностей изображений индикатора кругового обзора РЛС [11], впоследствии усовершенствованная до коммерческого продукта [12]. В таком же ключе развиваются и другие способы восстановления мониторинга морской поверхности. Примером может служить система *WaMos* [13], объединяющая подсистемы наблюдения волн, ледовой обстановки, нефтяных разливов, а также ее отечественный аналог *SeaVision* [14]. Новым, но пока в должной мере не раскрывшим свой потенциал источником информации является доплеровская скорость рассеивателей, измерение которой стало сравнительно простым с внедрением твердотельных когерентных РЛС [15].

Цель данной статьи – обсудить использование морских навигационных радаров для мониторинга полей приводной скорости ветра, спектров ветровых волн и поверхностных течений с платформы в Качивели. Ниже описано радиолокационное оборудование, установленное на платформе, представлена идеология получения оценок перечисленных полей и приведены предварительные результаты испытаний навигационных радаров в натуральных условиях осенью 2022 г.

2. Данные и методы

2.1. Оборудование и общее описание работ

Осенью 2022 г. на платформе в Кацивели были установлены РЛС *MRS-1011* и *MRS-3000* (рис. 1). Обе станции работают на горизонтальных поляризациях излучения и приема, осуществляя круговой обзор акватории под скользящими углами к морской поверхности. Станция *MRS-1011* работает в *X*-диапазоне (длина электромагнитной волны 3 см), общепринятом для навигационных радаров. Станция *MRS-3000* работает в *Ka*-диапазоне (длина электромагнитной волны 8 мм), который в настоящее время рассматривается как перспективный для улучшения пространственного разрешения спутниковых радаров [16]. Сбор данных проводится на носители, расположенные на платформе, а управление работой и контроль ее правильности осуществляются в удаленном режиме через интернет.

При проведении работ с платформы непрерывно регистрировались сигналы с решетки струнных волнографов. Подробное описание использованной для этого аппаратуры и обработки ее сигналов приведено в разделах 2.3 и 3.4 монографии [6]. Скорость и направление ветра, температура и влажность воздуха и температура воды в верхнем метровом слое непрерывно регистрировались установленной на платформе метеостанцией *DavisVantagePro*.

2.2. Идеология восстановления скорости ветра

Скорость и направление приводного ветра почти для всего Мирового океана восстанавливаются по данным со спутниковых скаттерометров с помощью геофизических модельных функций, которые оценены экспериментально по массивам подспутниковых измерений с океанографических буев. Аналоги ГМФ для радара, работающего с платформы, можно получить тем же методом, накопив массив одновременных измерений сигнала радара и скорости ветра с помощью штатного оборудования, установленного на платформе. Однако, в отличие от спутниковых скаттерометров, навигационный радар работает под скользящими углами к морской поверхности. Это обуславливает специфику ГМФ, поскольку наблюдаемое радиолокационное рассеяние формируется лишь видимыми из точки расположения радара наиболее высокими гребнями волн [17]. При скоростях ветра выше примерно 5 м/с, когда радиолокационный сигнал от морской поверхности достаточно мощный для работы радара, такие гребни, как правило, соответствуют обрушивающимся волнам. Результаты исследований статистики обрушений волн, полученные в последние годы [18, 19], в том числе и с платформы в Кацивели [1, 4, 6], позволяют предопределить форму ГМФ для радара, работающего на скользящих углах.

Вклад обрушений волн в удельную эффективную площадь рассеяния (УЭПР) морской поверхности представляется в виде

$$\sigma_{wb} \propto \int \sigma_{0wb} dq, \quad (1)$$

где σ_{0wb} – УЭПР зоны обрушений; dq – доля морской поверхности, покрытой обрушениями. Согласно О. Филлипсу [20] и многочисленным исследованиям, основанным на его подходе (см., например, [4, 18, 19]),

$dq \propto k^{-1} \Lambda(k) dk$, где $\Lambda(k) dk$ – длина обрушивающихся гребней на единице поверхности в интервале волновых чисел $(k, k + dk)$. Следуя [21], будем описывать длину гребней обрушающихся волн как

$$\Lambda(k, \varphi) = \frac{1}{2k} \left(\frac{B(k, \varphi)}{\alpha} \right)^{n+1}, \quad (2)$$

где $B(k, \varphi) = k^{-4} S(k, \varphi)$ – спектр насыщения ветрового волнения, связанный со спектром возвышений $S(k, \alpha; \varphi)$ и n – безразмерные параметры; φ – направление распространения волн. Из выражения (1) с учетом $B(k, \infty) \varphi (U^2/c^2)^{1/n}$ и формулы (2) получаем соотношение для УЭПР при скользящих углах

$$\sigma_{wb} \propto \int \sigma_{0wb} \left(\frac{U^2}{c^2} \right)^{\frac{n+1}{n}} dk d\varphi, \quad (3)$$

где c – фазовая скорость волны; U – скорость ветра. Мощность принимаемого РЛС сигнала описывается основной радиолокационной формулой

$$P = C \sigma_{wb} R^{-3}, \quad (4)$$

где C – параметр РЛС; R – расстояние до рассеивателя. Отсюда с учетом выражения (3) следует выражение общего вида для формулы (4), являющееся аналогом ГМФ:

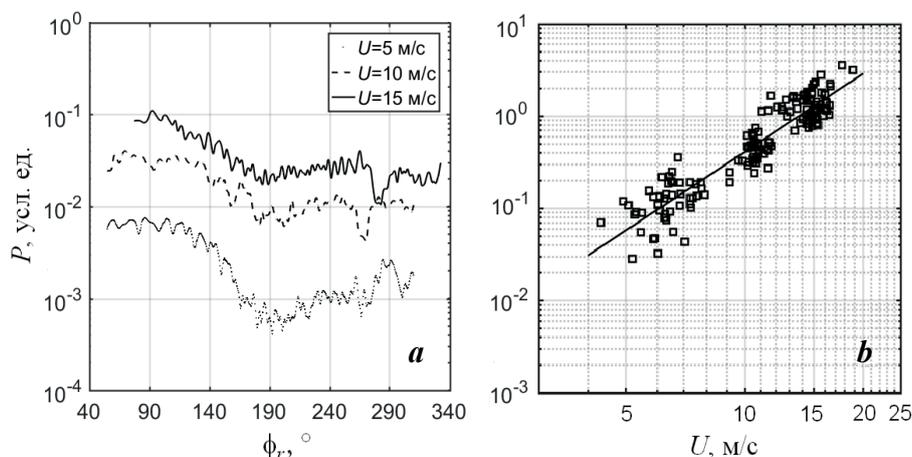
$$P = C(\varphi_r) U^m, \quad (5)$$

где φ_r – азимут радиолокационных наблюдений, отсчитываемый от направления ветра.

Константа m и функция $C(\varphi_r)$ в выражении (5) определяются экспериментально по массивам одновременных измерений скорости ветра и сигнала радара. Такой массив был накоплен при измерениях с платформы в Кацивели радаром с характеристиками, аналогичными станции MRS-1011, в рамках работ по теме госзадания МГИ РАН № 0827-2014-0010, представленных в статье [5]. Обобщение этих данных для дальности 200 м, выбранной в качестве примера, показано на рис. 2. Функции $C(\varphi_r)$ для различных скоростей ветра имеют максимальные значения при измерениях навстречу ветру, $\varphi = \varphi_0$ (рис. 2, а). Зависимость мощности сигнала от скорости ветра при $\varphi = \varphi_0$ представлена на рис. 2, б, где сплошной линией показана степенная зависимость $P \propto U^m$ при $m = 2.8$. Используя выражение (5) и полученные зависимости мощности сигнала от азимута наблюдений, выполним оценку скорости ветра по следующей формуле:

$$U = (P/C(\varphi_{up}))^{1/m}, \quad (6)$$

где φ_{up} – направление радиолокационных (РЛ) измерений навстречу ветру.



Р и с . 2 . Мощность сигнала РЛС в зависимости от азимута наблюдений (а) и скорости ветра (b)

F i g . 2 . Radar signal power depending on the observation azimuth (a) and wind speed (b)

Как следует из формулы (6), значения U удовлетворительно описываются степенной функцией $U = (13.2 \pm 0.4) \cdot P^{0.30 \pm 0.02}$. Ошибка определения скорости ветра, полученная по данным, представленным на рис. 2, b, составляет $U = \pm 0.1U$. Таким образом, например, при $U = 15$ м/с точность восстановления скорости ветра составит ± 1.5 м/с.

2.3. Идеология восстановления спектров ветровых волн и скорости приповерхностного течения

Идеология оценки спектров ветровых волн и скорости приповерхностного течения по радиолокационным изображениям поверхности океана известна относительно давно [22]. Характеристики ветровых волн можно восстановить путем Фурье-преобразования фрагментов РЛ-изображения, как это следует из рис. 1, b, на котором волны отчетливо видны. Получаемый при этом радиолокационный спектр $S_R(k_x, k_y)$, где k_x, k_y – составляющие волнового вектора, связан со спектром возвышений морской поверхности $S(k_x, k_y)$, как

$$S_R(k_x, k_y) = M(U, k, \phi) S(k_x, k_y), \quad (7)$$

где $M(U, k, \phi)$ – модуляционная передаточная функция (МПФ); k – модуль волнового вектора, а ϕ – его направление, отсчитываемое от направления ветра [23]. Такой подход аналогичен восстановлению волновых спектров по изображениям океана, получаемым оптическими сканерами [1, 24]. Трехмерная функция $M(U, k, \phi)$ для случая радиолокации под скользящими углами обсуждалась в работах [14, 17, 23]. В принципе, ее вид можно получить экспериментально, выполняя одновременные оценки спектров волн с помощью радара и решетки струнных волнографов при известных скоростях ветра. При известной МПФ $M(U, k, \phi)$ двумерный спектр $S(k_x, k_y)$ можно восстанавливать в штатном режиме по формуле (7).

Однако этот подход требует исключительно продолжительных экспедиционных работ. Упрощенный подход заключается в замене МПФ константой M_0 для области спектрального пика ветровых волн. Тогда частотный спектр возвышений $S(f)$, где f – частота волн, измеряемая в Гц, можно найти из формулы

$$S_R(f) = M_0 S(f),$$

где $S_R(f) = \int S_R(k \cdot \cos(\phi), k \cdot \sin(\phi)) k (dk / df) d\phi$, а dk/df определяется из дисперсионного соотношения для поверхностных волн

$$2\pi f = \sqrt{gk \tanh(kH)} + k_x V_x + k_y V_y, \quad (8)$$

где g – ускорение свободного падения; H – глубина моря в точке наблюдения; V_x и V_y – составляющие скорости течения. В рамках упрощенного подхода для оценки спектров волн при измерениях с неподвижной платформы можно положить скорость течения равной нулю. Для случая измерений с платформы в Кацивели, когда длины ветровых волн не превышают удвоенной глубины, можно использовать приближение глубокой воды. Тогда дисперсионное соотношение (8) сводится к $2\pi f = \sqrt{gk}$ и в таком виде используется для пересчета $S_R(f, k_x, k_y)$. Упрощенный подход был недавно валидирован как по измерениям с волнографического буя, так и по расчетам с помощью волновой модели *WaveWatch-3* [14].

Идеология восстановления скорости приповерхностного течения по последовательности радиолокационных изображений [22] аналогична идеологии восстановления течений по изображениям оптического диапазона со спутников (см., например, [25]) и видеозаписям с беспилотного летательного аппарата [26]. Поскольку радар позволяет наблюдать изменчивость волнового поля в пространстве и времени, то путем трехмерного Фурье-преобразования последовательности радиолокационных изображений можно оценить радиолокационные пространственно-временные спектры $S_R(f, k_x, k_y)$. Так как ветровые волны подчиняются дисперсионному соотношению (8), параметры f, k_x, k_y спектра $S_R(f, k_x, k_y)$ также удовлетворяют уравнению (8). Имея большой набор точек (f, k_x, k_y) , находим из переопределенного уравнения (8) составляющие скорости течения. Этот подход при использовании видеозаписей вместо последовательностей радиолокационных изображений был недавно тщательно валидирован в лабораторных условиях [27]. При радиолокационном мониторинге с платформы в Кацивели этот подход дает радиолокационную оценку вектора скорости течения независимо от механизма проявления волн в радиолокационном сигнале.

Измерение фазы сигнала радара позволяет оценивать доплеровские спектры морской поверхности $S_D(f)$, формируемые движущимися рассеивателями [2, 3]. Центр тяжести доплеровского спектра, «доплеровский центроид»

$$f_D = \int f S_D(f) df / \left(\int S_D(f) df \right), \quad (9)$$

содержит информацию о средней величине составляющей скорости рассеивателей вдоль луча радара V_D : $f_D = k_R V_D / \pi$, где k_R – волновое число электромагнитной волны [28]. Поле f_D , измеряемое со спутников, дает качественно

правильную картину основных океанских течений [28], что инициировало специальные проекты *SKIM* (Европейское космическое агентство) и *WaCM/DopplerScatt (NASA)* по разработке спутниковых миссий для доплеровских измерений течений [16]. Однако кроме течений существенный вклад в V_D дают уклоны и орбитальные скорости энергонесущих ветровых волн, обрушения волн, а при сильном шторме капельная фракция в воздухе искажает доплеровский сигнал [3, 16, 28, 29]. Исследования доплеровских сдвигов в рамках радиолокационного мониторинга с платформы в Кацивели позволят, с одной стороны, решать фундаментальные задачи актуальной тематики восстановления течений из космоса, с другой – будут давать альтернативные оценки скорости течения в дополнение к оценкам, полученным методом анализа дисперсионного соотношения.

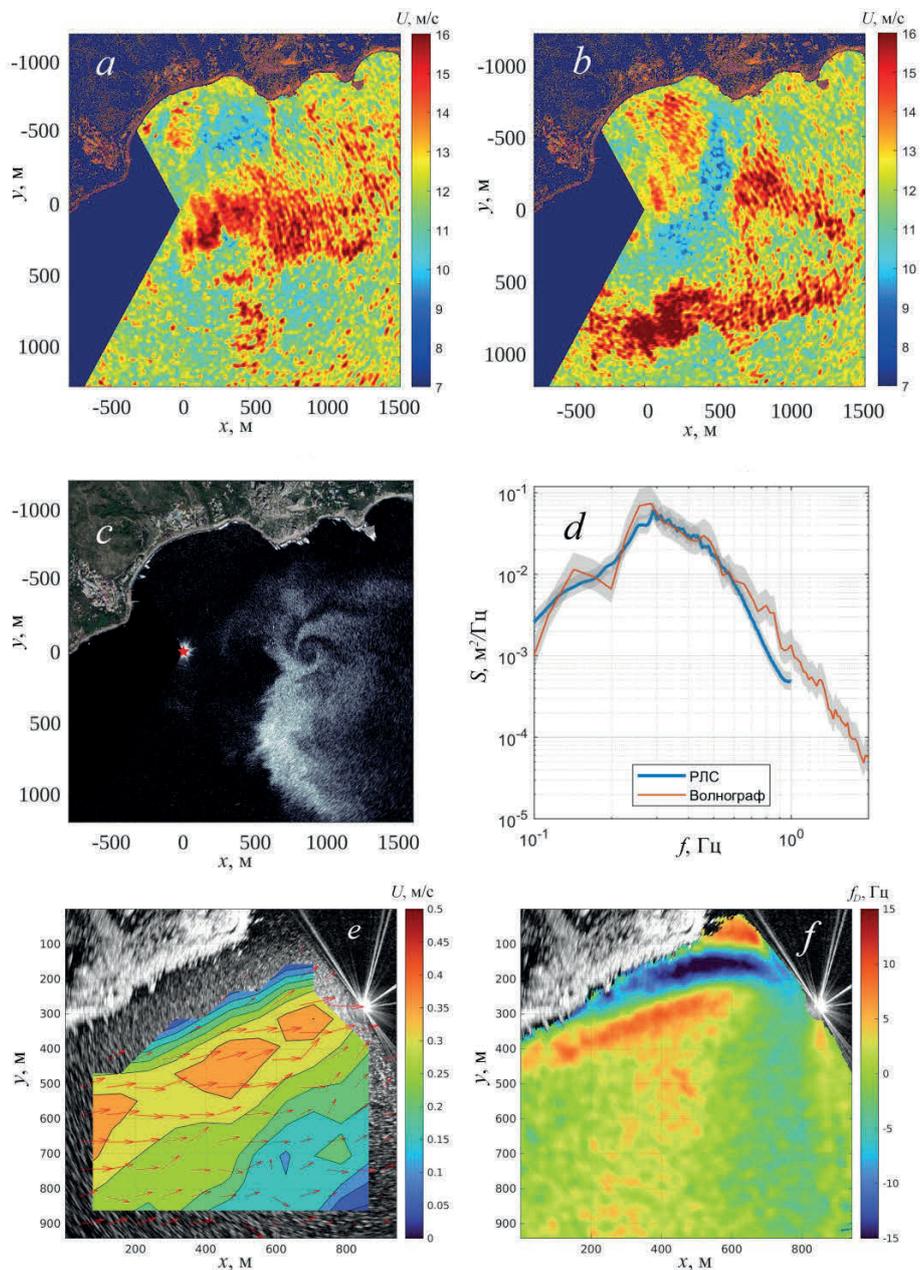
3. Результаты

Рис. 3 демонстрирует возможности радиолокационного мониторинга, подтвержденные в ходе испытаний РЛС. Рис. 3, *a, b* показывают пространственно-временную изменчивость восстановленных полей скорости ветра. В данном случае наблюдался кatabатический ветер («береговик») со средней скоростью 12 м/с. Области повышенной скорости ветра протяженностью более километра, ориентированные примерно параллельно береговой черте, переносились со скоростью ветра в сторону открытого моря. Рисунки показывают одну и ту же структуру со сдвигом по времени около минуты.

Рис. 3, *c* соответствует ситуации дождя в условиях слабого ветра. Сигнал радара при этом определяется объемным рассеянием на дождевых каплях, и приведенное поле показывает горизонтальное распределение капельной фракции в слое приводного воздуха толщиной порядка высоты установки радара (~ 10 м) [3]. В этом распределении явно прослеживается вихревая структура. РЛС позволяют наблюдать фронтальные и вихревые структуры с масштабами от сотни метров до километра, эволюционирующие в приводном слое атмосферы. Наблюдения таких структур с помощью линейки оптических датчиков описаны в работе [30].

На рис. 3, *d* приведен пример восстановленного частотного спектра волнения. Оценка спектра выполнена для фрагмента изображения, выделенного на рис. 1, *b* прямоугольником розового цвета. Хотя для расчета применен вышеописанный упрощенный метод, сравнение со спектром, оцененным по волнографической записи, показывает хорошее согласие в области энергонесущих волн (рис. 3, *d*).

Рис. 3, *e* демонстрирует пример восстановленного поля векторов скорости течения. В поле выделяется вдольбереговая струя со скоростью течения 30–35 см/с и направлением, совпадающим с направлением ветра и волн. Течение ослабевает в зоне ветровой тени возле берега и с мористой стороны. Рис. 3, *f* показывает одновременно зарегистрированное поле доплеровского центроида f_D (9). Несмотря на артефакты f_D в северной части, связанные с особенностями регистрации сигнала, оба поля имеют близкую пространственную структуру. Это можно рассматривать как подтверждение на качественном уровне оценки поля течений, выполненной на основе принципиально иных данных – с помощью дисперсионного анализа мощности сигнала радара.



Р и с . 3 . Полученные в результате радиолокационного мониторинга восстановленные поля скорости ветра (*a*, *b*), поле каплевой фракции (на качественном уровне) (*c*), оценки частотного спектра волн по сигналу радара и волнографическим измерениям (*d*), восстановленное поле векторов скорости течения (*e*), соответствующий полю течений (*e*) доплеровский сдвиг частоты (*f*)

Fig. 3. Radar-derived recovered fields of wind speed (*a*, *b*), raindrop fraction field (qualitatively) (*c*), wave frequency spectrum estimated from radar signal and wave gauge measurements (*d*), recovered field of current velocity vectors (*e*), Doppler frequency shift (*f*) corresponding to the field of currents (*e*)

4. Заключение

Данная статья представляет проект оснащения океанологической платформы в Кацивели радиолокационной станцией на основе навигационного радара с целью существенного расширения исследовательских возможностей «натурной лаборатории» на Черноморском гидрофизическом подспутниковом полигоне. Работа станции позволит осуществлять мониторинг полей скорости ветра, спектров ветровых волн и вектора скорости течения в акватории радиусом 1 км с разрешением до 100 м. Изучение этих полей, очевидно, представляет самостоятельный интерес. Однако при проведении экспериментальных работ по тематике взаимодействия океана и атмосферы, взаимодействия ветровых волн и течений, а также при отработке и валидации спутниковых технологий и региональных моделей морской среды подробная информация о текущих полях скорости ветра и вектора скорости течения, о спектрах ветровых волн намного усилит надежность и обоснованность экспериментальных выводов.

В статье показано, что восстановление перечисленных полей по сигналу радара основано на уже известных методах, развитых в спутниковой и корабельной радиолокации, а также на результатах исследований обрушений ветровых волн, проведенных с платформы в Кацивели. С целью апробации восстановления полей осенью 2022 г. с платформы в Кацивели был выполнен специальный эксперимент с применением двух новых навигационных радиолокационных станций *MRS-1011* и *MRS-3000*, работающих на длинах электромагнитных волн 3 см и 8 мм. Описанные в статье подходы к оценке полей скорости ветра, спектров ветровых волн и вектора скорости течения были приложены к восстановлению перечисленных полей.

Предварительный анализ данных показал:

– Поле скорости ветра содержит распространяющиеся фронтальные и вихревые структуры с масштабами от сотни метров до километра, эволюционирующие в приводном слое атмосферы, которые наблюдались ранее другими методами.

– Восстановленные частотные спектры ветровых волн согласуются со спектрами, измеренными традиционным струнным волнографом.

– Поле течений содержит вдольбереговую струю с максимальными значениями скорости, достигающими 35 см/с, направление которой совпадает с направлением ветра и волн. Эта картина течений на качественном уровне подтверждается полем доплеровского сигнала, полученным с радара.

Результаты проведенных работ демонстрируют перспективы выполнения непрерывного радиолокационного мониторинга на Черноморском гидрофизическом подспутниковом полигоне и связанные с этим новые возможности «натурной лаборатории» в Кацивели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Validation of the satellite method for measuring spectra of spatially inhomogeneous sea waves / V. Bondur [et al.] // Journal of Marine Science and Engineering. 2022. Vol. 10, iss. 10. 1510. doi:10.3390/jmse10101510

2. Retrieval of the statistical characteristics of wind waves from the width and shift of the Doppler spectrum of the backscattered microwave signal at low incidence angles / M. Panfilova [et al.] // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2020. Vol. 58, iss. 3. P. 2225–2231. doi:10.1109/TGRS.2019.2955546
3. Ka-Band doppler scatterometry: a strong wind case study / Y. Yurovsky [et al.] // *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14, iss. 6. 1348. doi:10.3390/rs14061348
4. Статистические характеристики обрушений и их связь с диссипацией энергии ветровых волн по данным натурных измерений / А. Е. Кориненко [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2020. Т. 36, № 5. С. 514–531. doi:10.22449/0233-7584-2020-5-514-531
5. *Малиновский В. В., Кориненко А. Е., Кудрявцев В. Н.* Эмпирическая модель радиолокационного рассеяния в диапазоне длин волн 3 см на морской поверхности при больших углах падения // *Известия высших учебных заведений. Радиофизика*. 2018. Т. 61, № 2. С. 110–121. EDN XSAOHB.
6. Мониторинг прибрежной зоны на Черноморском экспериментальном подспутниковом полигоне / Под ред. В. А. Иванова, В. А. Дулова. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2014. 526 с. EDN TZMZJT.
7. *Ермошкин А. В., Баханов В. В., Богатов Н. А.* Развитие эмпирико-теоретической модели рассеяния радиолокационных сигналов взволнованной водной поверхностью при скользящих углах наблюдения // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2015. Т. 12, № 4. С. 51–59. EDN UITZQL.
8. Real-Time ocean wind vector retrieval from marine radar image sequences acquired at grazing angle / R. Vicen-Bueno [et al.] // *Journal Atmospheric and Oceanic Technology*. 2013. Vol. 30, iss. 1. P. 127–139. doi:10.1175/JTECH-D-12-00027.1
9. Coastal oceanography applications of digital image data from marine radar / I. S. Robinson [et al.] // *Journal Atmospheric and Oceanic Technology*. 2000. Vol. 17, iss. 5. P. 721–735. doi:10.1175/1520-0426(2000)017<0721:COAODI>2.0.CO;2
10. *Huang W., Liu X., Gill E. W.* Ocean wind and wave measurements using X-band marine radar: a comprehensive review // *Remote Sensing*. 2017. Vol. 9, iss. 12. 1261. doi:10.3390/rs9121261
11. *Young I. R., Rosenthal W., Ziemer F.* A three-dimensional analysis of marine radar images for the determination of ocean wave directionality and surface currents // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1985. Vol. 90, iss. C1. P. 1049–1059. doi:10.1029/JC090iC01p01049
12. Determination of bathymetric and current maps by the method DiSC based on the analysis of nautical X-band radar image sequences of the sea surface (no-vember 2007) / C. M. Senet [et al.] // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2007. Vol. 46, iss. 8. P. 2267–2279. doi:10.1109/TGRS.2008.916474
13. *Hessner K. G., Nieto-Borge J. C., Bell P. S.* Nautical radar measurements in Europe: Applications of WaMoS II as a sensor for sea state, current and bathymetry // *Remote Sensing of the European Seas* / V. Barale, M. Gade (eds). Dordrecht, The Netherlands : Springer, 2008. P. 435–446. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6772-3_33
14. 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 [et al.] // *Earth System Science Data*. 2022. Vol. 14, iss. 8. P. 3615–3633. doi:10.5194/essd-14-3615-2022

15. О проведении измерений характеристик морской поверхности с использованием когерентного радара СВЧ диапазона / В. И. Веремьев [и др.] // Сборник научных статей по материалам IV Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем» («Радиоинфоком-2019»), г. Москва, РТУ МИРЭА. Москва : МИРЭА – Российский технологический университет, 2019. С. 8–13.
16. Measuring currents, ice drift, and waves from space: the Sea Surface Kinematics Multiscale monitoring (SKIM) concept / F. Arduin [et al.] // *Ocean Science*. 2018. Vol. 14, iss. 3. P. 337–354. doi:10.5194/os-14-337-2018
17. Inversion of marine radar images for surface wave analysis / J. Nieto Borge [et al.] // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2003. Vol. 21, iss. 8. P. 1291–1300. doi:10.1175/1520-0426(2004)021<1291:IOMRIF>2.0.CO;2
18. *Kleiss J. M., Melville W. K.* Observations of wave breaking kinematics in fetch-limited seas // *Journal of Physical Oceanography*. 2010. Vol. 40, iss. 12. P. 2575–2604. doi:10.1175/2010JPO4383.1
19. *Sutherland P., Melville W. K.* Field measurements and scaling of ocean surface wave-breaking statistics // *Geophysical Research Letters*. 2013. Vol. 40, iss. 12. P. 3074–3079. doi:10.1002/grl.50584
20. *Phillips O. M.* Spectral and statistical properties of the equilibrium range in wind-generated gravity waves // *Journal of Fluid Mechanics*. 1985. Vol. 156. P. 505–531. doi:10.1017/S0022112085002221
21. A semiempirical model of the normalized radar cross-section of the sea surface. 1. Background model / V. Kudryavtsev [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2003. Vol. 108, iss. C3. 8054. doi:10.1029/2001JC001003
22. *Young I. R., Rosenthal W., Ziemer F.* A three-dimensional analysis of marine radar images for the determination of ocean wave directionality and surface currents // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1985. Vol. 90, iss. C1. P. 1049–1059. doi:10.1029/JC090iC01p01049
23. *Plant W. J.* The modulation transfer function: concept and applications // *Radar Scattering from Modulated Wind Waves* / Eds. G. J. Komen and W. A. Oost. Dordrecht : Springer, 1989. P. 155–172. https://doi.org/10.1007/978-94-009-2309-6_13
24. Sun glitter imagery of ocean surface waves. Part 1: Directional spectrum retrieval and validation / V. Kudryavtsev [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2017. Vol. 122, iss. 2. P. 1369–1383. doi:10.1002/2016JC012425
25. *Юровская М. В., Кудрявцев В. Н., Станичный С. В.* Восстановление кинематических характеристик поверхностного волнения и батиметрии по многоканальным оптическим снимкам комплекса «Геотон-Л1» на спутнике «Ресурс-П» // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2019. Т. 16, № 2. С. 218–226. doi:10.21046/2070-7401-2019-16-2-218-226
26. Submesoscale currents from UAV: An experiment over small-scale eddies in the coastal Black Sea / Y. Yurovsky [et al.] // *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14, iss. 14. 3364. doi:10.3390/rs14143364
27. An improved method for determining near-surface currents from wave dispersion measurements / B. Smeltzer [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2014. Vol. 124, iss. 12. P. 8832–8851. doi:10.1029/2019JC015202
28. *Chapron B., Collard F., Arduin F.* Direct measurements of ocean surface velocity from space: Interpretation and validation // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2005. Vol. 110, iss. C7. C07008. doi:10.1029/2004JC002809

29. Modulation of Ka-band doppler radar signals backscattered from the sea surface / Y. Yurovsky [et al.] // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2018. Vol. 56, iss. 5. P. 2931–2948. doi:10.1109/TGRS.2017.2787459
30. Мониторинг состояния поверхности моря по пространственно-временным оптическим изображениям / В. И. Титов [и др.] // Исследование Земли из космоса. 2014. № 5. С. 3–14. EDN SMMQUL. doi:10.7868/S0205961414050078

Поступила 15.05.2023 г.; одобрена после рецензирования 08.06.2023 г.; принята к публикации 28.06.2023 г.; опубликована 25.09.2023 г.

Об авторах:

Юровский Юрий Юрьевич, старший научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, 2), кандидат физико-математических наук, **Scopus Author ID: 24377122700**, **ORCID ID: 0000-0002-9995-3965**, **SPIN-код: 8482-5777**, yuyurovsky@gmail.com

Малиновский Владимир Васильевич, старший научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, 2), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0002-5799-454X**, **ResearcherID: F-8709-2014**, **SPIN-код: 9206-3020**, **Scopus Author ID: 23012976200**, vladimir.malinovsky@mhi-ras.ru

Кориненко Александр Евгеньевич, научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, 2), кандидат физико-математических наук, **Scopus Author ID: 23492523000**, **ORCID ID: 0000-0001-7452-8703**, **SPIN-код: 7288-8023**, korinenko.alex@mhi-ras.ru

Глухов Лев Алексеевич младший научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, 2)

Дулов Владимир Александрович, главный научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, 2), доктор физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0002-0038-7255**, **ResearcherID: F-8868-2014**, **SPIN-код: 8303-6244**, **Scopus Author ID: 6602725409**, dulov@mhi-ras.ru

Заявленный вклад авторов:

Юровский Юрий Юрьевич – разработка методик и проведение экспериментальных исследований, обработка, анализ и описание результатов исследования, подготовка текста статьи

Малиновский Владимир Васильевич – постановка проблемы, участие в обсуждении материалов статьи, подготовка текста статьи

Кориненко Александр Евгеньевич – разработка методик и проведение экспериментальных исследований, обработка и анализ результатов исследования, участие в обсуждении материалов статьи

Глухов Лев Алексеевич – обзор литературы по проблеме исследования, качественный анализ результатов и их интерпретация, обсуждение результатов работы

Дулов Владимир Александрович – общее научное руководство исследованием, постановка проблемы, анализ и описание результатов исследования, подготовка текста статьи

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.