

УДК 551.46.085

© А. В. Ермошкин*, И. А. Капустин, А. А. Мольков, Н. А. Богатов

Институт прикладной физики РАН, 603950, ул. Ульянова, д. 46, г. Нижний Новгород, Россия

*email: al-ermoshkin@yandex.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ТЕЧЕНИЯ НА МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ДОПЛЕРОВСКИМ РАДИОЛОКАТОРОМ X-ДИАПАЗОНА

Статья поступила в редакцию 22.04.2020, после доработки 18.06.2020

В работе предложена методика определения скорости и направления поверхностного течения по измерениям скоростных радиолокационных панорам доплеровским радиолокатором X-диапазона. На основе результатов численного моделирования доплеровской скорости брэгговских волн в поле ветрового волнения и течения выбран диапазон дальностей для измерения скорости поверхностного течения, при котором можно не учитывать эффект затенения участков морской поверхности гребнями волн. Проведены продолжительные натурные эксперименты, в ходе которых предлагаемая методика была проверена. Скорость и направление поверхностного течения вычислялись как векторная сумма скорости течения водной толщи и 3% скорости ветра, при этом одновременно измерялись скоростные радиолокационные панорамы морской поверхности. Показано, что при зондировании навстречу ветру/волнению средние скорости рассеивающих СВЧ радиоволны элементов морской поверхности существенно выше предсказаний двухмасштабной модели рассеивания, учет которых для восстановления скорости поверхностного течения, был проведен эмпирически. При зондировании по ветру/волнению наблюдалось хорошее согласие с результатами моделирования. Корреляционный анализ поверхностного течения, вычисленного через гидрометеорологические параметры и по скоростным радиолокационным панорамам, продемонстрировал максимальный коэффициент корреляции для величины скорости 0.88 со среднеквадратичной ошибкой 8 см/с, а для направления 0.98 — со среднеквадратичной ошибкой 14°. Отмечается, что пленочные слики на морской поверхности приводят к существенному уменьшению усредненной доплеровской скорости, что может выступать дополнительным критерием при дистанционном обнаружении разливов нефти и нефтепродуктов.

Ключевые слова: течения на морской поверхности, когерентное радиолокационное зондирование, эффект Доплера, пленочные слики, моделирование, эксперименты.

© А. В. Ermoshkin*, I. A. Kapustin, A. A. Molkov, N. A. Bogatov

Institute of Applied Physics RAS, 603950, Ulyanova Str., 46, Nizhny Novgorod, Russia

*email: al-ermoshkin@yandex.ru

DETERMINATION OF THE SEA SURFACE CURRENT BY A DOPPLER X-BAND RADAR

Received 22.04.2020, in final form 18.06.2020

The paper proposes a methodology for determining the speed and direction of the sea surface current from measurements of Doppler radar panoramas with an X-band Doppler radar. Numerical simulation of the Doppler velocity of the Bragg waves in the field of wind waves and currents were carried out. The range of distance was selected for measuring the velocity of the surface current at which the effect of shading of the sea surface sections by wave crests can be ignored. Long field experiments were conducted, during which the proposed method was tested. The velocity and direction of the surface current were calculated as the vectorial sum of the velocity of the water column and 3% of the wind speed, while at the same time Doppler radar panoramas of the sea surface were measured. It was shown that, for upwind/upwave radar sensing, the average Doppler velocity of the scattering microwave waves of sea surface elements are significantly higher than the predictions of the two-scale scattering model. To restore the velocity of the surface current the registration was carried out empirically. For downwind/downwaves radar sensing, good agreement with the simulation results was observed. A correlation analysis of the surface current, calculated through hydro meteorological parameters and Doppler radar panoramas, showed a maximum correlation coefficient for a velocity value is about 0.88 with a root mean square error of 8 cm/s, and for a direction is about 0.98 with a root mean square error of 14 degrees. It is noted that film slicks on the sea surface lead to a significant decrease in the average Doppler velocity, which may serve as an additional criterion for the remote detection of oil spills.

Key words: sea surface currents, coherent radar sensing, Doppler effect, film slicks, modeling, experiments.

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

For citation: 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, 13, 3, 93–103. doi: 10.7868/S2073667320030089

1. Введение

Измерение морских течений является традиционной океанологической проблемой. Морские течения в водной толще осуществляют транспорт тепла, кислорода, взвешенных веществ и оказывают влияние на климат, погоду, подводные объекты и гидротехнические сооружения. Приповерхностные течения влияют на судоходство, а течения на поверхности воды переносят поверхностные загрязнения, например, пленки поверхностно-активных веществ. Существует множество методов определения морских течений, имеющих различную точность [1]. В частности, в научных целях течения измеряются с помощью лагранжевых буев (дрифтеров) [2] или акустических доплеровских профилографов течения (ADCP) как с судов, так и с неподвижных оснований [3]. Использование ADCP позволяет вести непрерывный мониторинг течений в точке или производить пространственную экспресс-съемку поля течения с движущегося судна на временных масштабах, не превышающих характерные времена океанических процессов. Наиболее перспективным инструментом для измерения течений является применение дистанционных методов. Известно, что современные дистанционные, в частности радиолокационные (РЛ), устройства обладают преимуществами в плане одновременного покрытия значительных акваторий, достаточно высокого пространственного разрешения, независимостью от времени суток и относительной всепогодностью. Кроме того, радиолокаторы, в зависимости от решаемой задачи и размера антенны, могут размещаться на различных носителях: на берегу, на судах, на свайных основаниях в море, БПЛА, самолетах и ИСЗ [4, 5].

Для измерения приповерхностного течения с помощью радиолокаторов известны два подхода. Первый из них использует свойства когерентности радиосигнала, при котором возможно определить доплеровский сдвиг частоты радиоволны, связанный со скоростью рассеивателей на морской поверхности. Такой подход широко применяется в радиолокаторах, работающих в коротковолновом (КВ) диапазоне. КВ радиолокаторы могут определять вектор скорости приповерхностного течения на глубине $1/6$ длины морской волны, являющейся резонансной для длины волны такого радиолокатора [3]. Алгоритм определения скорости течения по РЛ данным основан на сравнении доплеровской скорости волны в направлении зондирования с теоретической фазовой скоростью, определенной по дисперсионному соотношению для волн на воде без течения. Радиолокаторы сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона обладают более высоким пространственным разрешением в сравнении с радиолокаторами КВ диапазона, однако для СВЧ диапазона существуют технические сложности с обеспечением когерентности излучения. Появление твердотельных генераторов радиоволн СВЧ диапазона со стабильными, в сравнении с магнетронами, характеристиками позволило решить данную проблему. В отличие от КВ радиолокаторов, для СВЧ радиолокаторов резонансными являются морские волны сантиметрового диапазона, а длинные (энергонесущие) волны модулируют как спектральную плотность сантиметровых волн, так и скорость их распространения. Предпринимаются попытки определения поверхностной скорости течения по прямым измерениям доплеровских скоростей в СВЧ диапазоне [6–8]. Так, например, в работе [6], минуя теоретические выкладки, приводится эмпирическое выражение, связывающее скорость течения на морской поверхности с доплеровской скоростью в X-диапазоне. В работе [7] сделаны попытки определения течения по измеренной когерентным радиолокатором X-диапазона доплеровской скорости с движущегося судна. Однако влияние скорости движения носителя РЛС не позволила определить скорость течения, но корреляция доплеровской скорости и скорости течения получилась высокой. В настоящее время доступны данные о доплеровском сдвиге СВЧ радиоволн, измеренном спутниковыми радиолокаторами с синтезированной апертурой (РСА), такими как Sentinel-1A/B, работающими в интерферометрическом режиме. В работе [8] описывается применение таких данных для определения радиальной скорости течения на морской поверхности. Учет вклада волнового поля в суммарный доплеровский сдвиг проводилось на основе геофизической модельной функции CDOP, полученной в работе [9]. Ограничением такого подхода является измерение радиальной компоненты скорости течения на морской поверхности только в одном направлении, совпадающем с направлением зондирования. Это ограничение снимается при использовании радиолокатора кругового обзора, данные которого приводятся в настоящей статье.

Следует отметить второй существующий подход для определения скорости поверхностных течений по данным радиолокационного зондирования, который можно считать хорошо развитым. В основе метода лежит анализ пространственно-временного спектра временной серии радиолокационных изображений морской поверхности, полученных СВЧ радиолокатором кругового обзора. Благодаря гидродинамической и геометрической модуляции длинная морская волна становится видимой на амплитудных радиолокационных изображениях. Для восстановления скорости течения по данным радиолокаторов СВЧ диапазона может быть применен алгоритм, основанный на сравнении дисперсионного соотношения для волн на воде

с экспериментальным пространственно-временным спектром радиолокационных изображений [10–12]. Если алгоритмы, использующие дисперсионное соотношение (второй подход), достаточно хорошо проработаны [10–12], то связь доплеровской скорости, измеренной в СВЧ диапазоне, со скоростью приповерхностного течения в настоящее время находится в стадии исследования (первый подход). Развитию методики определения скорости поверхностного течения по данным когерентного радиолокационного зондирования в X-диапазоне, включая теоретическую проработку и экспериментальную апробацию, посвящена настоящая статья.

2. Эксперименты

Основным источником данных когерентного радиолокационного зондирования являлась цифровая доплеровская РЛС кругового обзора, работающая на горизонтальной поляризации в X-диапазоне [13–14]. За один оборот антенны РЛС осуществляется измерение панорамы доплеровских скоростей на морской поверхности. Технические характеристики используемой РЛС приведены в табл. 1.

Диапазон углов зондирования ψ с учетом мертвой зоны составляет от 70° до 89° . Когерентная РЛС производства АО «НПФ «Микран» работала в режиме непрерывного линейного частотно-модулированного (ЛЧМ) излучения с максимальной полосой частоты модуляции до 191.2 МГц. Для такой полосы модуляции

разрешение по дальности составляло $\Delta_r = 0,79$ м, по азимуту $\Delta_\theta = \frac{\pi R}{180}$, где R — расстояние до элемента разрешения на морской поверхности. Таким образом, практически для любых условий морского волнения выполняется условие $\Lambda > 2\Delta_r$, где Λ — длина энергонесущей волны. Принимаемый сигнал биений (разность между отраженным и излученным ЛЧМ сигналом) подвергался преобразованию Фурье, в результате чего получался вектор $Q(r, \theta)$, состоящий из амплитуды A и фазы ϕ отраженного РЛ сигнала на дальностях до $3.5 \times \Delta_r$ км с шагом Δ_r . Возможно использование двух режимов обзора пространства: боковой и круговой. При работе РЛС в режиме бокового обзора получается последовательный набор векторов $Q(r, \theta_0, t) = A(r, \theta_0, t)e^{i\phi(r, \theta_0, t)}$ с временным интервалом t между ними, при фиксированном положении азимутально-го угла антенны θ_0 . При вращающейся антенне происходит периодический обзор пространства $Q(r, \theta, n_r T_r)$ с периодом вращения антенны T_r , где n_r — номер оборота.

В работе используется алгоритм определения доплеровских скоростей по данным когерентного радиолокационного зондирования, описанный в работе [5]. Для k -ого вектора будем иметь фазу $\phi_k(r, \theta_0) = \phi_0(r, \theta_0) - 2\pi f_d(r, \theta_0)\tau k$, тогда при условии зондирования той же площадки разность фаз двух соседних векторов вычисляется как $\Delta\phi = \arg(Q(k) \times Q^*(k+1)) = \arg(A^2(r, \theta_0)e^{-i2\pi f_d(r, \theta_0)\tau}) = -2\pi f_d(r, \theta_0)\tau$. Используя

Таблица 1

Характеристики используемой РЛС
Characteristics of the used radar

Характеристика	MRS-1000
Мощность излучения	1 Вт
Несущая частота (длина волны λ)	9.4 ГГц (3.2 см)
Макс. дальность (R)	3000 м
Ширина ДНА в ГП	1°
Ширина ДНА в ВП	30°
Режим работы	ЛЧМ (максимальная $f_m = 191.2$ МГц)
Вид поляризации	Горизонтальная
Длительность (τ)	3.5 мс
Тип сигнала	Сигнал биений
Разрешение по пеленгу (Δ_θ)	0.5°
Разрешение по дальности (Δ_r)	0.79 м; 0.97 м; 1.91 м
Режим обзора пространства	Круговой/ боковой
Период обзора пространства	2.5–15 с
Высота установки (H)	14 м

соотношение $f_d = \frac{2u_d}{\lambda} \sin \psi$ и выражения для разности фаз $\Delta \varphi$ доплеровскую скорость можно записать как

$u_d = \frac{\Delta \varphi \lambda}{4\pi \tau \sin \psi}$. Скоростная флуктуационная чувствительность метода согласно работе [5] определяется как

$(u_d)_{sens} = \frac{q_0}{\frac{\partial(\Delta \varphi)}{\partial(u_d)} \sqrt{N}}$, где $q_0 > 1$ — пороговый коэффициент, N — число независимых отсчётов сигнала на

заданной площадке, $\frac{\partial(\Delta \varphi)}{\partial(u_d)} = \frac{4\pi \tau \sin \psi}{\lambda} \approx 1,4$ — крутизна характеристики. Диапазон однозначно измеряемых

доплеровских скоростей определяется $u_d^{max} = \pm \frac{\pi \lambda}{4\pi \tau \sin \psi} \approx \pm 2.3$ м/с. В режиме бокового обзора пространства

число независимых отсчётов сигнала N будет определяться только временем измерения. При круговом обзоре пространства N зависит от скорости вращения антенны. Скоростная флуктуационная чувствительность РЛС оценена для площадки 40×40 м² при минимальной скорости вращения антенны с периодом 15 с/оборот и значении $q_0 = 3$, и равна 2 см/с.

Эксперименты для развития методики измерения течений с помощью когерентной радиолокационной станции X-диапазона проводились в 2019 году на стационарной океанографической платформе (СОП) Морского гидрофизического института РАН. Измерительный полигон представлен на рис. 1. Скорость и направление течения по глубине на горизонтах 1–25 м с шагом 0.5 м восстанавливались по данным акустического доплеровского профилографа течений (ADCP WorkHorse Monitor 1200 kHz, RDI), опускаемого на тросах с выноса на нижней палубе СОП. Профилограф течений оснащен опцией Bottom Track, которая позволяет определять скорость дна относительно прибора и учитывать ее при расчетах истинных скорости и направления течения. При проведении экспериментов технические требования к корректности измерений ADCP были соблюдены. С учетом заглубления ADCP и его мертвой зоны, измерения течения начинались с глубины около 1 м. Скорость и направление приводного ветра регистрировались на высоте 30 м с помощью метеостанции WantagePro2 Davis Instrument и акустического измерителя ветра WindSonic, установленных на мачте. Вся указанная аппаратура устанавливалась на СОП (рис. 1).

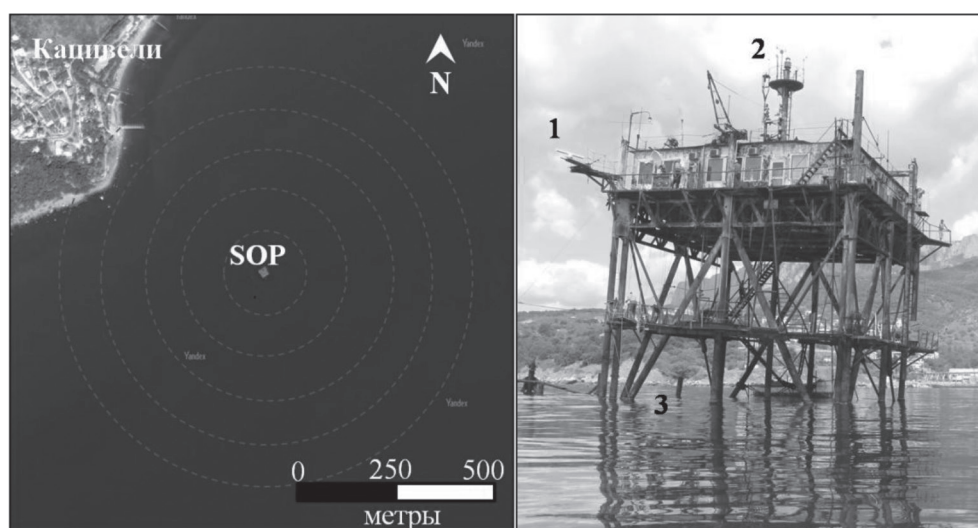


Рис. 1. Экспериментальный полигон. Окружности соответствуют дальностям (углу зондирования) 100 м (80.8°), 200 м (85.4°), 300 м (87°), 400 м (87.7°) и 500 м (88.2°). 1 — когерентная РЛС X-диапазона, 2 — ультразвуковой анемометр и метеостанция, 3 — акустический доплеровский профилограф течения.

Fig. 1. Experimental facilities. The circles correspond to ranges (sensing angle) of 100 m (80.8°), 200 m (85.4°), 300 m (87°), 400 m (87.7°) and 500 m (88.2°). 1 — coherent X-band radar, 2 — ultrasonic anemometer and weather station, 3 — acoustic Doppler current profiler.

Таблица 2

Серии экспериментов
Series of experiments

Номер серии	Даты начала и окончания серии в формате (гггг-мм-дд/чч: мм)
№ 1	2019–05–22/08:00–2019–05–24/20:00
№ 2	2019–05–28/12:00–2019–05–30/20:00
№ 3	2019–05–03/08:00–2019–06–06/20:00

Эксперименты проводились в мае — июне 2019 года. Для удобства представления результатов эксперименты были разделены на три серии (табл. 2).

Скорость и направление ветра (u_w , φ_w), приведенные к стандартной высоте 10 м, скорость и направление течения на горизонтах 1 м (u_c^1, φ_c^1) и 5 м (u_c^5, φ_c^5) усреднялись за временной интервал в 1 минуту. Результаты измерений для каждой из трех серий приведены на рис. 2–4. В экспериментальной серии № 1 наблюдались относительно стабильные ветровые условия (рис. 2, см. вклейку). Величина скорости ветра не превышала 10 м/с и большую часть времени варьировалась в пределах 4–6 м/с при западном направлении. 24 мая направление сменилось на восточное, при этом смена направления сопровождалась уменьшением ветра до 1–2 м/с. Величина скорости течения в серии № 1 преимущественно не превышала 20 см/с, однако в отдельных случаях наблюдались короткие увеличения до 50 см/с, что связано с прохождением внутренних волн.

Экспериментальная серия № 2 характеризуется продолжительным действием относительно высоких скоростей ветра, превышающих 10 м/с, преимущественно восточного направления с переходом к штилю (рис. 3, см. вклейку). Смена направления ветра произошла 30 мая, что сопровождалось штилевыми условиями. В первой половине данной серии наблюдается сильное течение, со значениями до 50 см/с. Направление ветра и течения совпадают на протяжении всей серии.

Экспериментальная серия № 3 характеризуется сильной изменчивостью параметров течения и ветра (рис. 4, см. вклейку). Продолжительные штилевые условия с усилением скорости ветра до 10 м/с, скорости течения до 50 см/с.

3. Моделирование

Горизонтальная компонента скорости течения на морской поверхности может быть определена по измерениям доплеровской скорости рассеивающих элементов волн. Рассмотрим рассеяние радиоволн СВЧ диапазона на взволнованной водной поверхности в приближении двухмасштабной модели [15]. Тогда доплеровскую скорость можно записать как

$$u_d(r, \vartheta, t) = (u_{br} + u(r, \vartheta, t) + u_c + u_w^d) \cos \vartheta \sin \psi, \quad (1)$$

где ϑ — азимутальный угол зондирования относительно направления распространения волн, u_c — компонента скорости течения в направлении распространения волнения, u_w^d — ветровой снос, совпадающий с направлением ветра, u_{br} — фазовая скорость рассеивающих (Брэгговских) волн $u_{br} = \sqrt{\frac{g\lambda}{4\pi \sin \psi} + \frac{2\pi\sigma}{\rho\lambda}} \sin \psi$, λ — длина зондирующей радиоволны, ψ — угол падения радиоволны, σ — коэффициент поверхностного натяжения, ρ — плотность воды. Будем считать u_{br} , u_c , u_w^d постоянными добавками к переменной горизонтальной составляющей орбитальной скорости ветровых волн $u(r, \vartheta, t)$.

Для линейных свободных бегущих волн, распространяющихся вдоль оси r на поверхности жидкости $z = 0$ в приближении глубокой воды $kh \gg 1$, выражение для горизонтальной компоненты орбитальной скорости имеет вид $u(r, \vartheta, t) = \frac{gk}{\omega} \eta_0 \cos(\omega t - kr \cos \vartheta + \alpha)$, где η_0 — амплитуда волны, ω и k — частота и волновой вектор. В случае ветрового волнения, необходимо рассматривать набор волн, описываемых одним из модельных спектров и удовлетворяющих дисперсионному соотношению для волн на глубокой воде. В качестве модельного спектра для моделирования трехмерного волнового поля применялся спектр Naval Research Laboratory (NRL) [16].

Моделирование яркостного радиолокационного изображения морской поверхности рассмотрено в работе [17] для решения задачи восстановления значимой высоты волнения. Основную сложность при зондировании под скользящими углами порядка 90° создает эффект затенения участков морской поверхности гребнями волн. При моделировании волнового поля можно ввести функцию затенения $m(r, \vartheta)$, которая принимает значение «1» если нет затенения, «0» если участок поверхности затенен гребнем волны [17]. Функция $m(r, \vartheta)$ (рис. 5, а, см. вклейку) определяется из анализа модельного поля возвышений морской поверхности $\eta(r, \vartheta)$,

по которому вычисляется локальный угол падения $\theta_0(r, \vartheta) = \text{atan}\left(\frac{r}{H - \eta(r, \vartheta)}\right)$. Тогда затенению ($m(r, \vartheta) = 0$)

соответствует условие $\theta_0(r_1, \vartheta) > \theta_0(r, \vartheta)$, $r_1 < r$. Итоговая скоростная панорама с учетом затенения определяется, как $u_d^m(r, \vartheta, t) = u_d(r, \vartheta, t) \cdot m(r, \vartheta)$ и для параметров $u_w = 7$ м/с, $u_{br} = 0,23$ м/с, $u_c = 0,1$ м/с, $u_w^d = 0,21$ м/с приведена на рис. 5, б.

На основе результатов моделирования была оценена возможность определения скорости поверхностного течения по данным когерентного зондирования в СВЧ-диапазоне, а также тестировались методы обработки скоростных радиолокационных панорам. Обработка модельной радиолокационной панорамы заключалась в нахождении среднего значения доплеровской скорости на площадках размером 10° по азимуту и 40 м по дальности. Сетка площадок усреднения приведена на рис. 6, а (см. вклейку). В результате получается массив размерами 36 на 12 значений усредненной доплеровской скорости, приведенный на рис. 6, б. На этом же рисунке приведена азимутальная зависимость усредненной доплеровской скорости на дальности 80–120 м (черная линия) и 440–480 м (синяя линия). Пунктирной линией приведена сумма u_{br} , u_c , u_w^d , которая для этого модельного случая равна 0,54 м/с. При такой обработке среднее значение горизонтальной составляющей орбитальной скорости ветровых волн $u(r, \vartheta, t)$ на площадке усреднения равно нулю. Из этого следует, что вид модельного спектра, который описывает переменную составляющую доплеровской скорости, связанной с волновым полем, в рамках рассматриваемой задачи не принципиален. Видно, что на больших дальностях, где существенен эффект затенения, усредненная доплеровская скорость меньше значения 0,54 м/с, а на ближних дальностях, где затенением можно пренебречь, полностью соответствует этому значению. Таким образом, находя максимальное (минимальное) значение азимутальной зависимости усредненной доплеровской скорости на малых дальностях, можно определить сумму скорости поверхностного течения и скорости рассеивателей, которая в модельном случае равна 0,54 м/с. Модуль скорости поверхностного течения и его направление в модельном случае в представлении двухмасштабной модели рассеяния будут определяться как

$$|u_s| = \left| u_d^{\max(\min)} \right| - u_{br}, \quad \varphi_s = \vartheta(u_d^{\min}) = \vartheta(u_d^{\max}) - 180^\circ. \quad (2)$$

Далее осуществляется апробация развитого подхода с использованием данных экспериментальных исследований 2019 года и проводится статистический анализ результатов сопоставления.

4. Экспериментальная проверка, сопоставление и анализ результатов

При круговом обзоре пространства, в отличие от бокового обзора, добавляется информация об угловом распределении ветрового волнения и поверхностного течения, однако теряется разрешение по времени. Один и тот же участок морской поверхности наблюдается при этом с интервалом, равным периоду вращения антенны радиолокатора. За один оборот антенны РЛС формируется скоростная панорама морской поверхности, которая была обработана с помощью метода, заключающегося в нахождении среднего значения доплеровской скорости в 10 градусных секторах с шагом по дальности 40 м. При такой обработке достигаются значения скоростной флуктуационной чувствительности РЛС, приведенные ранее. Усредненные орбитальные скорости ветровых волн при этом равняются нулю, и средняя доплеровская скорость на площадке должна определяться скоростью приповерхностного течения и средней скоростью рассеивателей. Для последующего анализа были выбраны три диапазона дальностей 40–80 м, 80–120 м, 120–160 м. Как видно из результатов моделирования, на таких дальностях эффектами затенения участков морской поверхности гребнями волн можно пренебречь. Пример экспериментальной скоростной радиолокационной панорамы, полученной за один оборот антенны РЛС 22 мая в 17:00, приведен на рис. 7, а (см. вклейку). На рис. 7, б приведен пример результата обработки серии радиолокационных скоростных панорам за 1 час и средняя по времени азимутальная зависимость доплеровской скорости. На азимутах $20^\circ < \vartheta < 60^\circ$ име-

ет место затенение части РЛ панорамы конструкциями СОП. В целом азимутальная зависимость хорошо согласуется с теоретической косинусной зависимостью от ϑ (синяя линия на рис. 7, б), однако функция не симметрична относительно нуля. Средняя доплеровская скорость выше при зондировании навстречу волне приблизительно на 0.2 м/с, чем при зондировании по волне. Причиной такой асимметрии могут являться нерезонансные рассеиватели: обрушающиеся волны, заостренные гребни и клиновидные структуры, приводящие к возникновению зеркального отражения. Очевидно, что перечисленные механизмы анизотропны и имеют максимум рассеяния в направлении распространения волны [18].

Для дальнейшего анализа формировался массив данных, содержащий максимальные и минимальные значения доплеровской скорости на каждой из трех дальностей $u_d^{\max}(1;2;3)$, $u_d^{\min}(1;2;3)$ и азимут этих значений $\vartheta_d^{\max}(1;2;3)$, $\vartheta_d^{\min}(1;2;3)$. Проанализировав плотность вероятности распределения максимальных и минимальных значений усредненной доплеровской скорости на трех дальностях для каждой из трех серий экспериментов, было обнаружено, что значения максимальной доплеровской скорости увеличиваются с увеличением дальности, в то время как значения минимальной доплеровской скорости практически не зависят от выбранной дальности. Такую особенность также можно объяснить влиянием нерезонансных рассеивателей на среднюю доплеровскую скорость. Усредняемая площадь морской поверхности для разных дальностей (1,2,3) различна и равна 420, 700, 980 м², соответственно. Таким образом, с увеличением дальности в усредняемую площадку попадает большее количество нерезонансных рассеивателей, которые имеют большую скорость, чем брэгговские волны [18], что и приводит к увеличению среднего значения. Для минимальных значений усредненной доплеровской скорости, получаемых при зондировании по ветру, вклад нерезонансных механизмов не значителен. Следует отметить, что нулевые (околонулевые) значения усредненной доплеровской скорости не имеют физического смысла, и получены при штилевых условиях, в которых отсутствует обратное рассеяние радиоволн морской поверхностью при зондировании под скользящими углами.

Сопоставление результатов измерений

Далее проводится сопоставление максимальных и минимальных значений доплеровской скорости на каждой из трех дальностей $u_d^{\max}(1;2;3)$, $u_d^{\min}(1;2;3)$ и азимутов этих значений $\vartheta_d^{\max}(1;2;3)$, $\vartheta_d^{\min}(1;2;3)$ со скоростью и направлением поверхностного течения. Скорость течения на морской поверхности в общем случае складывается из течения толщи воды, ветрового и волнового дрейфа. Скорость течения водной толщи измерялась с помощью акустического доплеровского профилографа течений, а суммарный ветровой и волновой дрейф может быть приближенно оценен как 3% от скорости ветра на высоте 10 м [19]. Скорость и направление поверхностного течения определяются следующими выражениями:

$$|u_s| = \sqrt{(u_c^x + 0.03u_w^x)^2 + (u_c^y + 0.03u_w^y)^2}, \quad \varphi_s = \arctan\left(\frac{u_c^y + 0.03u_w^y}{u_c^x + 0.03u_w^x}\right). \quad (3)$$

Скорость поверхностного течения также может быть оценена по скорости дрейфа пленочных сликов [20].

На рис. 8, а (см. вклейку) представлены скорости поверхностного течения u_s и максимальные значения усредненной доплеровской скорости ($u_d^{\max}(1) - 0,3$; $u_d^{\max}(2) - 0,35$; $u_d^{\max}(3) - 0,4$). Из-за отмеченного выше роста максимальных значений усредненной доплеровской скорости с дальностью, приходилось вводить эмпирические величины, отвечающие за среднюю скорость рассеивателей на площадке усреднения. Данные величины находились из критерия совпадения доплеровской скорости на трех дальностях. На рис. 8, б проведено сопоставление направления поверхностного течения φ_s с азимутом максимума усредненной доплеровской скорости ($\vartheta_d^{\max}(1;2;3) - 180^\circ$). В целом, наблюдается схожее поведение и близкие величины скорости и направления поверхностного течения, восстановленных по данным когерентного радиолокатора X-диапазона и по данным гидрометеорологических измерений (формулы (2), (3)).

Несколько иначе обстоят дела при сопоставлении минимальной усредненной доплеровской скорости со скоростью поверхностного течения (рис. 9, а, см. вклейку). Согласно двухмасштабной модели рассеяния, скорости брэгговских волн (свободная рябь) составляют 0.23 м/с для длины волны радиолокатора 3.2 см. При вычитании этого значения из модуля минимальной усредненной доплеровской скорости (2), наблюдается хорошее соответствие со скоростью поверхностного течения, определенной по формуле (3). Рис. 9, б демонстрирует неплохое соответствие направления поверхностного течения φ_s с азимутом минимума усредненной доплеровской скорости $\vartheta_d^{\min}(1;2;3)$.

Далее представлены результаты статистического анализа данных. Для этого был проведен корреляционный анализ данных наблюдений и линейной регрессии, которая соответствует полному совпадению результатов. Коэффициент корреляции R , среднеквадратичное отклонение СКО и количество точек N для трех экспериментальных серий приведены в табл. 3 для скорости поверхностного течения и в табл. 4 для направления поверхностного течения. Из анализа табл. 3 видно, что лучшие корреляции, достигающие 0.88, и наименьшие среднеквадратичные ошибки наблюдаются для минимального значения усредненной доплеровской скорости $u_d^{\min}$. Для максимального значения усредненной доплеровской скорости $u_d^{\max}$ приемлемые коэффициенты корреляции наблюдаются только для экспериментальной серии № 2. Это может быть объяснено упрощенным учетом скорости нерезонансных рассеивателей, которые в общем случае зависят не только от угла зондирования, но и от скорости ветра. При этом коэффициент корреляции направления поверхностного течения (табл. 4) высок для направления минимума и максимума усредненной доплеровской скорости.

Наблюдаемые на рис. 8–9 периодические уменьшения максимальных и минимальных значений усредненной доплеровской скорости, которые не коррелируют со значениями скорости поверхностного течения, вычисленными по формуле (3), связаны с прохождением искусственных пленочных сликов. Проявление искусственных пленочных сликов в усредненной доплеровской скорости с 09:00 до 12:50 23 мая и на средней за 1 минуту скоростной радиолокационной круговой панораме в 10:10 23 мая представлены на рис. 10 (см. вклейку). На рис. 10, а, как и на рис. 7, б, наблюдаются положительные и отрицательные значения доплеровских скоростей, которые соответствуют зондированию навстречу волне и по волне. На таком фоне отчетливо различаются проявления искусственных сликов в виде узких изогнутых полос, наклон которых определяется скоростью прохождения слика, а ширина полос — размерами слика. Как выглядят пленочные слики на морской поверхности, хорошо видно на скоростной радиолокационной круговой панораме, приведенной на рис. 10, б. Доплеровская скорость в слике и вне его существенно отличаются (см. [21] и список литературы), что может служить дополнительным параметром для обнаружения пленочных

Таблица 3

Статистические параметры сравнения скоростей поверхностного течения, вычисленных по формулам (2) и (3)

Statistical parameters for comparing surface current velocities calculated by formulas (2) and (3)

Параметр	№	$u_d^{\max}(1) \text{ vs. } u_s$	$u_d^{\max}(2) \text{ vs. } u_s$	$u_d^{\max}(3) \text{ vs. } u_s$	$u_d^{\min}(1) \text{ vs. } u_s$	$u_d^{\min}(2) \text{ vs. } u_s$	$u_d^{\min}(3) \text{ vs. } u_s$
R	1	0.42	0.27	0.44	0.73	0.81	0.79
СКО. см/с	1	10	11	11	6	5	6
N	1	1657	1660	1634	1638	1655	1641
R	2	0.84	0.79	0.72	0.56	0.79	0.88
СКО. см/с	2	8	9	10	12	9	8
N	2	705	703	688	711	718	715
R	3	0.42	0.36	0.43	0.46	0.79	0.79
СКО. см/с	3	9	10	10	7	5	6
N	3	1080	1073	1045	1005	1042	1054

Таблица 4

Статистические параметры сравнения направлений поверхностного течения, вычисленных по формулам (2) и (3)

Statistical parameters for comparing surface current directions calculated by formulas (2) and (3)

Параметр	№	$\vartheta_d^{\max}(1) \text{ vs. } \varphi_s$	$\vartheta_d^{\max}(2) \text{ vs. } \varphi_s$	$\vartheta_d^{\max}(3) \text{ vs. } \varphi_s$	$\vartheta_d^{\min}(1) \text{ vs. } \varphi_s$	$\vartheta_d^{\min}(2) \text{ vs. } \varphi_s$	$\vartheta_d^{\min}(3) \text{ vs. } \varphi_s$
R	1	0.98	0.98	0.97	0.98	0.97	0.97
СКО. °	1	14	15	21	20	20	20
N	1	1657	1660	1634	1638	1655	1641
R	2	0.96	0.96	0.85	0.89	0.93	0.90
СКО. °	2	12	12	26	22	18	21
N	2	705	703	688	711	718	715
R	3	0.92	0.93	0.93	0.95	0.94	0.92
СКО. °	3	32	31	33	28	30	32
N	3	1080	1073	1045	1005	1042	1054

загрязнений на морской поверхности по данным когерентного радиолокационного зондирования. Как показано в работе [21], скорость распространения пленочного загрязнения на морской поверхности близка к оценкам скорости поверхностного течения, сделанным по данным когерентного радиолокационного зондирования в X-диапазоне.

5. Заключение

В работе предложена методика дистанционного определения скорости и направления течения на морской поверхности с помощью когерентного радиолокационного зондирования в X-диапазоне. Используемый подход был апробирован на результатах численного моделирования скоростной радиолокационной панорамы морского волнения. Для моделирования использовалась двухмасштабная модель рассеяния радиоволн взволнованной водной поверхностью. В данной работе рассмотрены углы зондирования, для которых эффектом затенения можно пренебречь. Было показано, что при зондировании навстречу волнам (ветру) присутствуют существенные расхождения экспериментальных данных с результатами моделирования. Это, предположительно, связано с влиянием нерезонансных механизмов рассеяния радиоволн СВЧ-диапазона. Данный вклад был учтен эмпирически введением постоянных значений скоростей рассеивателей для разных дальностей (углов зондирования) из условия совпадения доплеровских скоростей на рассматриваемых дальностях. Однако при проведении корреляционного анализа с данными о поверхностных течениях, только для одной из трех экспериментальных серий наблюдался удовлетворительный результат. Очевидно, что необходимо введение геофизической модельной функции, по аналогии с CDOP, введенной в работе [9], которая должна зависеть и от скорости ветра. Это планируется сделать при дальнейшем развитии описанной методики определения скорости поверхностного течения. Однако при рассмотрении зондирования по волне (ветру), экспериментальные результаты хорошо согласуются результатами моделирования. Наблюдаются высокие коэффициенты корреляции и сравнительно низкие среднеквадратичные отклонения. Такой результат позволяет сделать вывод, что нерезонансные механизмы рассеяния при зондировании по волне (ветру) не имеют существенного значения. Определение направления течения на морской поверхности с помощью когерентной радиолокационной станции X-диапазона продемонстрировало хорошее соответствие с измеренными значениями (3). Следует отметить, что практически во всех экспериментах наблюдались близкие направления скорости течения и скорости ветра.

У предлагаемой методики существуют ограничения, которые связаны как с физикой рассеяния радиоволн взволнованной водной поверхностью, так и с работой алгоритма. Возможность определения скорости и направления поверхностного течения появляется при скорости ветра больше 3 м/с, когда морская поверхность в достаточной степени покрыта резонансными (брэгговскими) волнами. Такое же ограничение по скорости ветра имеет метод, предложенный в работе [11], однако, это условие не является достаточным. Для работы всех методов [10–12], использующих для оценки скорости течения дисперсионное соотношение для волн на воде необходимо, чтобы эти волны были различимы на радиолокационных изображениях морской поверхности. Рассматриваемые в [10–12] радиолокаторы имеют пространственное разрешение порядка 10 м, что накладывает ограничение на длину ветровой волны, различаемую такими средствами. Соответственно, для работы методов [10–12] дополнительно необходимо наличие ветровых волн с длиной более 20 м, что реализуется при существенно превышающих 3 м/с ветрах. Предлагаемая в настоящей статье методика лишена данного ограничения. Алгоритм определения скорости и направления течения основан на поиске максимального и/или минимального значения усредненной доплеровской скорости и его азимута. Для этого должен быть обеспечен хороший круговой обзор морской поверхности радиолокационной станцией, который может быть реализован на морских платформах и судах. При наличии пленочных загрязнений на морской поверхности возникает существенное занижение скорости поверхностного течения, однако, оно может быть определено по скорости дрейфа пленочного слика [21].

Разработанная методика может быть применена для измерения течений на морской поверхности с помощью когерентной радиолокационной станции X-диапазона, установленной, например, на нефтяной платформе. За один оборот антенны радиолокатора может быть определена скорость и направление поверхностного течения, которое определяет дрейф пленочных (нефтяных) загрязнений. Скорость поверхностного течения для прогноза распространения нефтяных загрязнений обычно определяется согласно формуле (3) [20]. Предложенная методика может являться альтернативным подходом для решения задачи мониторинга и прогнозирования распространения нефтяных загрязнений на морской поверхности. В частности, снижение доплеровской скорости в пленочных сликах, связанное с гашением резонансных волн, может выступать дополнительным критерием обнаружения загрязнения.

6. Финансирование

Проведение эксперимента в части радиолокационных наблюдений, обработка и анализ экспериментальных данных и написание статьи выполнено при поддержке проекта РНФ № 18–77–00072. Эксперименты с пленочными загрязнениями проведены при поддержке гранта РФФИ № 18–35–20054.

Литература

1. *Стехновский Д. И., Зубков А.Е.* Навигационная гидрометеорология. М.: Транспорт, 1977. 264 с.
2. *Будянский М. В.* и др. Лагранжев анализ Курильских вихрей // Вестник ДВО РАН. 2017. № 4. С. 81–88.
3. *Зацепин А. Г.* и др. Сравнение характеристик течений, измеренных КВ и СВЧ радиолокаторами на гидрофизическом полигоне ИО РАН в Черном море, с данными ADCP и дрейфтеров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14, № 7. С. 250–266.
4. *Булатов М. Г.* и др. Физические механизмы формирования аэрокосмических радиолокационных изображений океана // УФН. 2003. 173 (1). С. 69–87.
5. *Переслегин С. В.* и др. Формирование скоростных радиолокационных изображений морской поверхности со стационарных, авиационных и космических носителей // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2019. Т. 12, № 1. С. 21–29.
6. *Braun N., Ziemer F., Bezuglov A., Cysewski M., Schymura G.* Sea-surface current features observed by Doppler radar // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2008. V. 46, Iss. 4. P. 1125–1133. doi: 10.1109/TGRS.2007.910221
7. *Nyman L., Lund B., Romeiser R., Graber H., Horstmann J.* A New Approach to Detect Surface Currents of Complex Flows Using Doppler Marine Radar // IGARSS2018–2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Valencia, 2018. P. 1493–1496. doi: 10.1109/IGARSS.2018.8519168
8. *Moiseev A.* et al. Evaluation of radial ocean surface currents derived from Sentinel-1 IW Doppler shift using coastal radar and Lagrangian surface drifter observations // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2020. 125. e2019JC015743. doi: <https://doi.org/10.1029/2019JC015743>
9. *Mouche A.A.* et al. On the use of Doppler shift for sea surface wind retrieval from SAR // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2012. 50(7). P. 2901–2909. doi: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2174998>
10. *Lund B.* et al. Marine X-band radar currents and bathymetry: An argument for a wave number-dependent retrieval method // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2020. 125. e2019JC015618. doi: <https://doi.org/10.1029/2019JC015618>
11. *Ivonin D.V.* et al. Monitoring system of surface currents on the base of low-cost X-band radar. First application on the Black Sea // Russian Journal of Earth Sciences. 2011. V. 13. ES1001000. doi: 10.2205/2009ES000245
12. *Dankert H.* Retrieval of surface-current fields and bathymetries using radar-image sequences // Proc. IGARSS. Toulouse, France, 2003. doi: 10.2205/2009ES000245
13. *Ermoshkin A.V., Kapustin I.A.* Estimation of the wind-driven wave spectrum using a high spatial resolution coherent radar // Russian Journal of Earth Sciences. 2019. V. 19, N 3. P. ES1005 1–9.
14. *Ermoshkin A.V.* et al. On the features of Doppler velocities estimation with coherent radar of high spatial resolution // Proc. SPIE. 2019. 111501I.
15. *Valenzuela G.R.* Theories for the interaction of electromagnetic and oceanic waves — a review // Boundary-Layer Meteorology. 1978. V. 13. P. 61–85.
16. *Johnson J.T., Chuang C.W.* Quantitative Evaluation of Ocean Surface Spectral Model Influence on Sea Surface Backscattering // Technical Report 738927–1. Office of Naval Research, 2000. 47 p.
17. *Salcedo-Sanz S.* et al. Significant Wave Height Estimation using SVR Algorithms and Shadowing Information from Simulated and Real measured X-band radar images of the sea surface // Ocean Engineering. 2015. V. 101. P. 244–253. doi: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.04.041>
18. *Hwang P.A., Sletten M.A., Toporkov J.V.* Breaking wave contribution to low grazing angle radar backscatter from the ocean surface // Journal of Geophysical Research. 2008. V. 113, C09017. doi:10.1029/2008JC004752
19. *Wu J.* Sea-surface drift currents induced by wind and waves // Journal of Geophysical Research. 1983. 13(8). P. 1441–1451.
20. *Капустин И.А.* и др. Об оценке вклада приводного ветра в кинематику сликов на морской поверхности в условиях ограниченных разгонов волнения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16, № 2. С. 163–172.
21. *Ermoshkin A.V.* et al. Statistical characteristics of Doppler velocity shift in artificial slick on sea surface // Proc. SPIE11150, 2019, 111501L.

References

1. *Stehnovskiy D.I., Zubkov A.E.* Navigation and hydrometeorology. Moscow, Transport, 1977. 264 p. (in Russian).

2. *Budyanskiy M.V.* et al. Lagrange analysis of the Kuril vortices. *Vestnik DVO RAN*. 2017, 4, 81–88 (in Russian).
3. *Zatsepin A.G.* et al. 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 Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2017, 14, 7, 250–266 (in Russian).
4. *Bulatov M.G.* et al. Physical mechanisms for the formation of aerospace radar images of the ocean. *UFN*. 2003, 173 (1), 69–87 (in Russian).
5. *Pereslegin S.V.* et al. The forming of sea surface velocity images from stationary, airborne and spaceborne platforms. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2019, 12, 1, 21–29 (in Russian).
6. *Braun N., Ziemer F., Bezuglov A., Cysewski M., Schymura G.* Sea-surface current features observed by Doppler Radar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2008, 46, 4, 1125–1133. doi: 10.1109/TGRS.2007.910221
7. *Nyman L., Lund B., Romeiser R., Graber H., Horstmann J.* A new approach to detect surface currents of complex flow using Doppler marine radar. *IGARSS2018–2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Valencia*, 2018, 1493–1496. doi: 10.1109/IGARSS.2018.8519168
8. *Moiseev A.* et al. Evaluation of radial ocean surface currents derived from Sentinel-1 IW Doppler shift using coastal radar and Lagrangian surface drifter observations. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2020, 125, e2019JC015743. doi: <https://doi.org/10.1029/2019JC015743>
9. *Mouche A.A.* et al. On the use of Doppler shift for sea surface wind retrieval from SAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2012, 50(7), 2901–2909. doi: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2174998>
10. *Lund B.* et al. Marine X-band radar currents and bathymetry: An argument for a wave number-dependent retrieval method. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2020, 125, e2019JC015618. doi: <https://doi.org/10.1029/2019JC015618>
11. *Ivonin D.V.* et al. Monitoring system of surface currents on the base of low-cost X-band radar. First application on the Black Sea. *Russian Journal of Earth Sciences*. 2011, 13, ESES1001000.
12. *Dankert H.* Retrieval of surface-current fields and bathymetries using radar-image sequences. *Proc. IGARSS*. 2003. doi: 10.2205/2009ES000245
13. *Ermoshkin A.V., Kapustin I.A.* Estimation of the wind-driven wave spectrum using a high spatial resolution coherent radar. *Russian Journal of Earth Sciences*. 2019, 19, 3, ES1005 1–9.
14. *Ermoshkin A.V.* et al. On the features of Doppler velocities estimation with coherent radar of high spatial resolution. *Proc. SPIE*. 2019, 111501L.
15. *Valenzuela G.R.* Theories for the interaction of electromagnetic and oceanic waves — a review. *Boundary-Layer Meteorology*. 1978, 13, 61–85.
16. *Johnson J.T., Chuang C.W.* Quantitative Evaluation of Ocean Surface Spectral Model Influence on Sea Surface Backscattering. *Technical Report 738927–1. Office of Naval Research*. 2000. 47 p.
17. *Salcedo-Sanz S.* et al. Significant Wave Height Estimation using SVR Algorithms and Shadowing Information from Simulated and Real measured X-band radar images of the sea surface. *Ocean Engineering*. 2015, 101, 244–253. doi: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.04.041>
18. *Hwang P.A., Sletten M.A., Toporkov J.V.* Breaking wave contribution to low grazing angle radar backscatter from the ocean surface. *Journal of Geophysical Research*. 2008, 113, C09017.
19. *Wu J.* Sea-surface drift currents induced by wind and waves. *Journal of Geophysical Research*. 1983, 13(8), 1441–1451. doi:10.1029/2008JC004752
20. *Kapustin I.A.* et al. On the estimation of the contribution of near-surface wind to the kinematics of slicks on the sea surface under conditions of finite wave fetch. *Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2019, 16, 2, 163–172 (in Russian).
21. *Ermoshkin A.V.* et al. Statistical characteristics of Doppler velocity shift in artificial slick on sea surface. *Proc. SPIE*. 2019, 111501L.

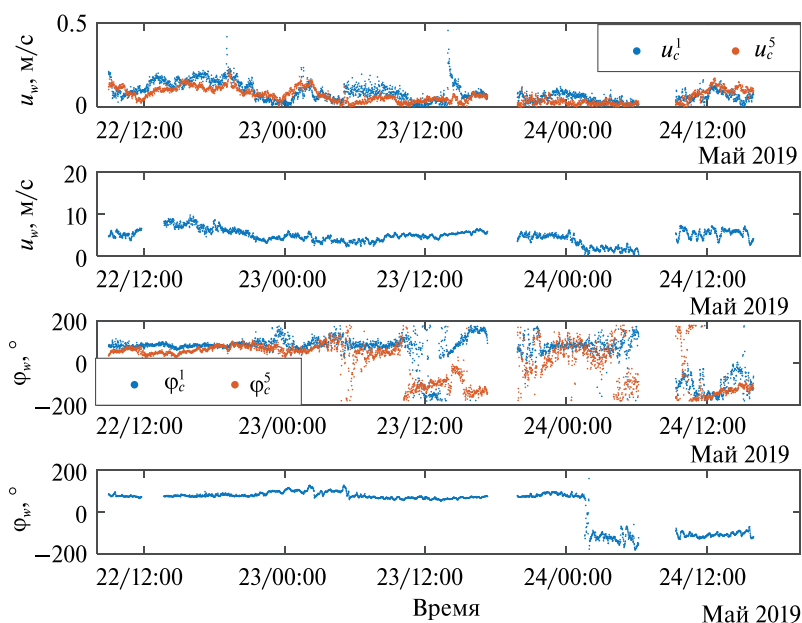


Рис. 2. Результаты измерений в серии № 1.

Fig. 2. Measurement results in series No. 1.

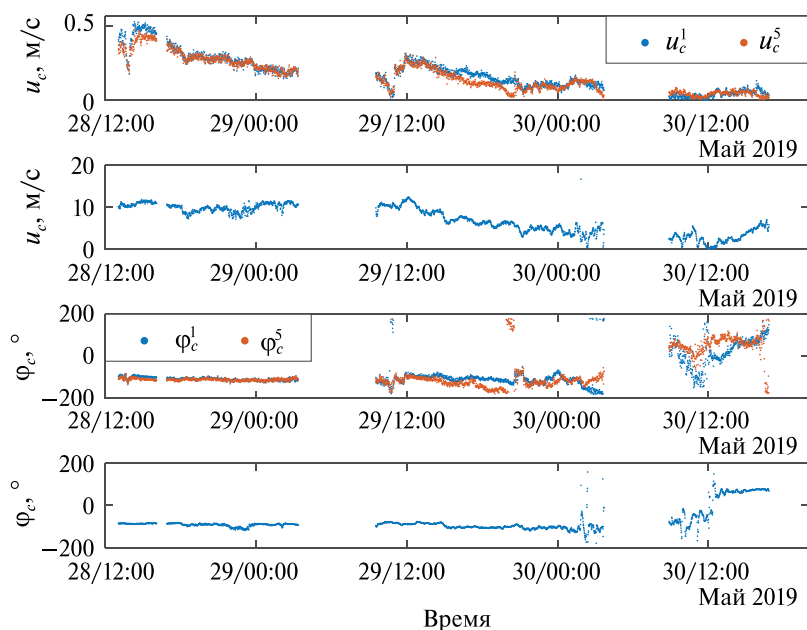


Рис. 3. Результаты измерений в серии № 2.

Fig. 3. Measurement results in series No. 2.

К статье *Ермошкин А.В., Капустин И.А., Мольков А.А., Богатов Н.А.* Определение скорости течения...
Ermoshkin A.V., Kapustin I.A., Molkov A.A., Bogatov N.A. Determination of the sea surface current...

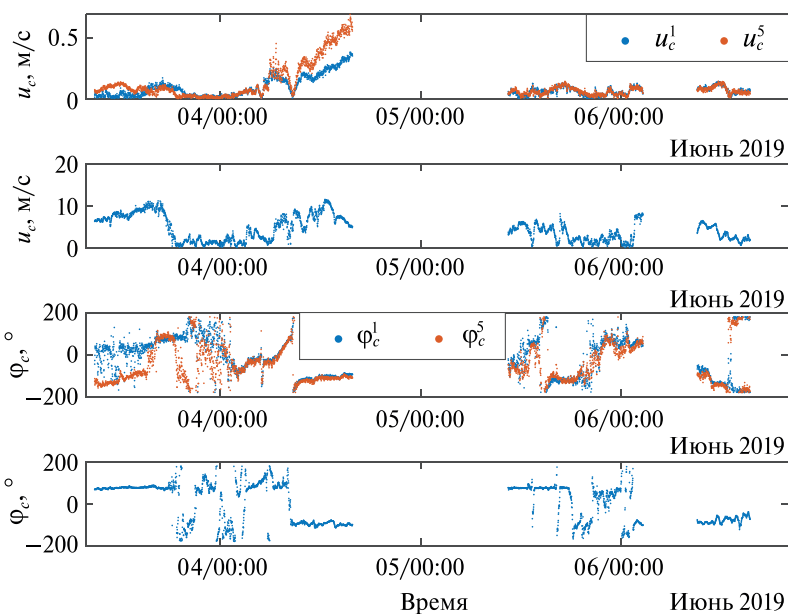


Рис. 4. Результаты измерений в серии № 3.

Fig. 4. Measurement results in series No. 3.

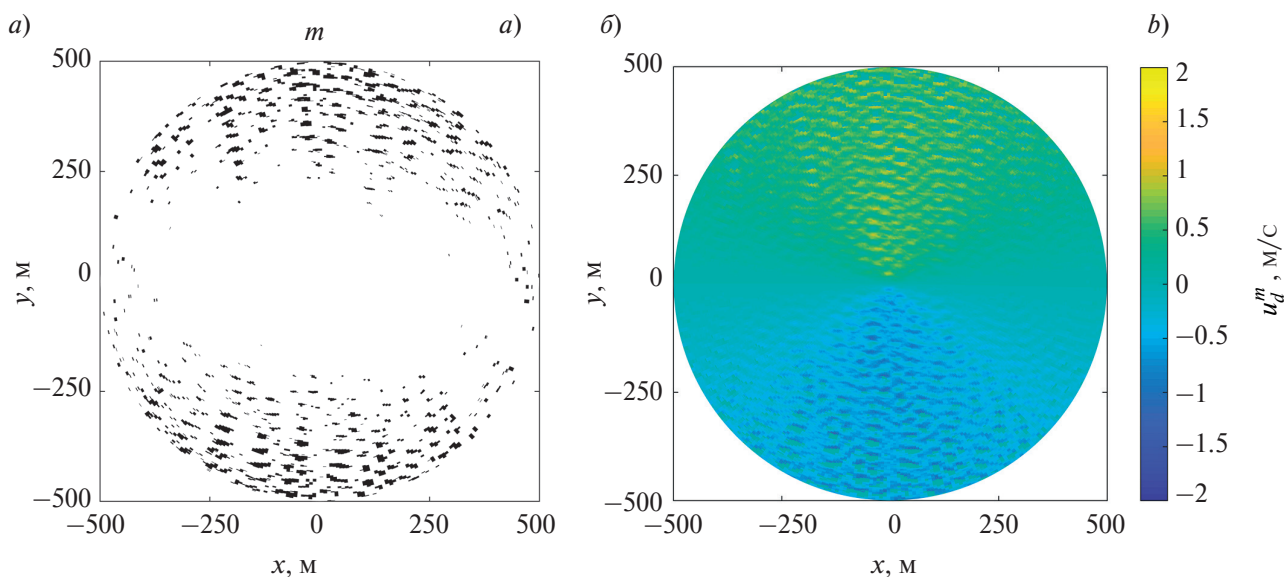


Рис. 5. Результаты моделирования. Маска затенений m (а) и модельная радиолокационная скоростная панорама u_d^m (б).

Fig. 5. Simulation results. Shading mask m (a) and model radar Doppler panorama u_d^m (b).

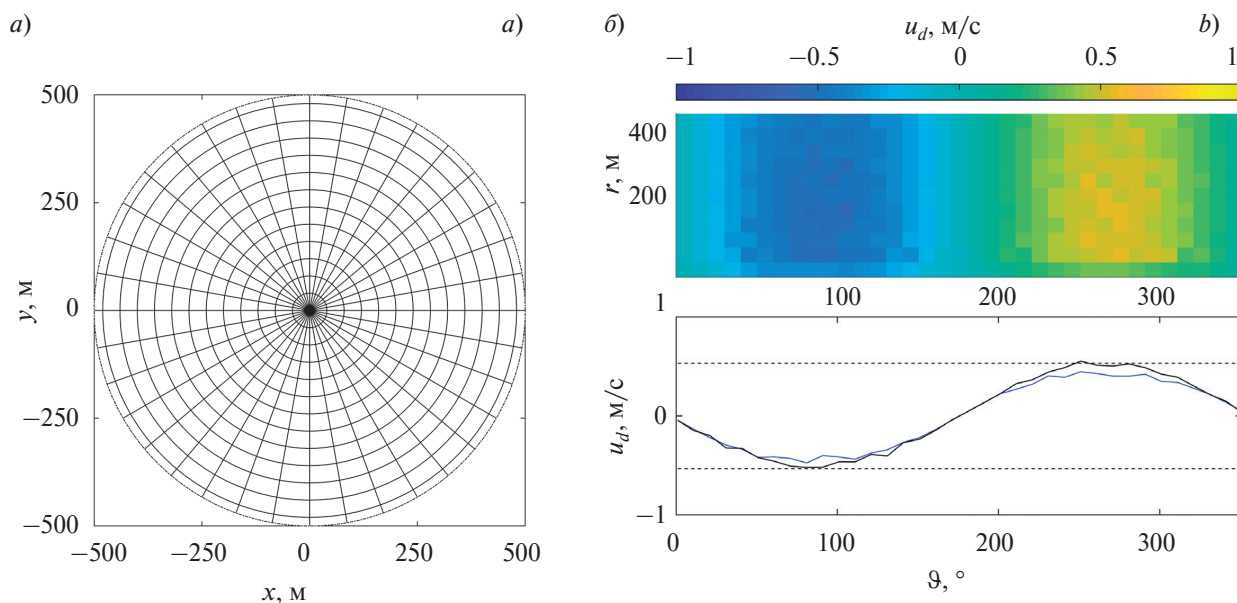


Рис. 6. Обработка модельной скоростной радиолокационной панорамы: *a* — площадки усреднения модельной радиолокационной скоростной панорамы, *b* — результат усреднения модельной радиолокационной скоростной панорамы и азимутальная зависимость доплеровской скорости на дальности 80–120 м (черная линия) и 440–480 м (синяя линия), пунктир — сумма u_{br}, u_c, u_w^d .

Fig. 6. Processing of the model radar Doppler panorama: *a* — averaging areas of a model radar Doppler panorama, *b* — averaging results of a model radar Doppler panorama and azimuthally dependence of Doppler speed at a distance of 80–120 m (black line) and 440–480 m (blue line), dotted line — amount u_{br}, u_c, u_w^d .

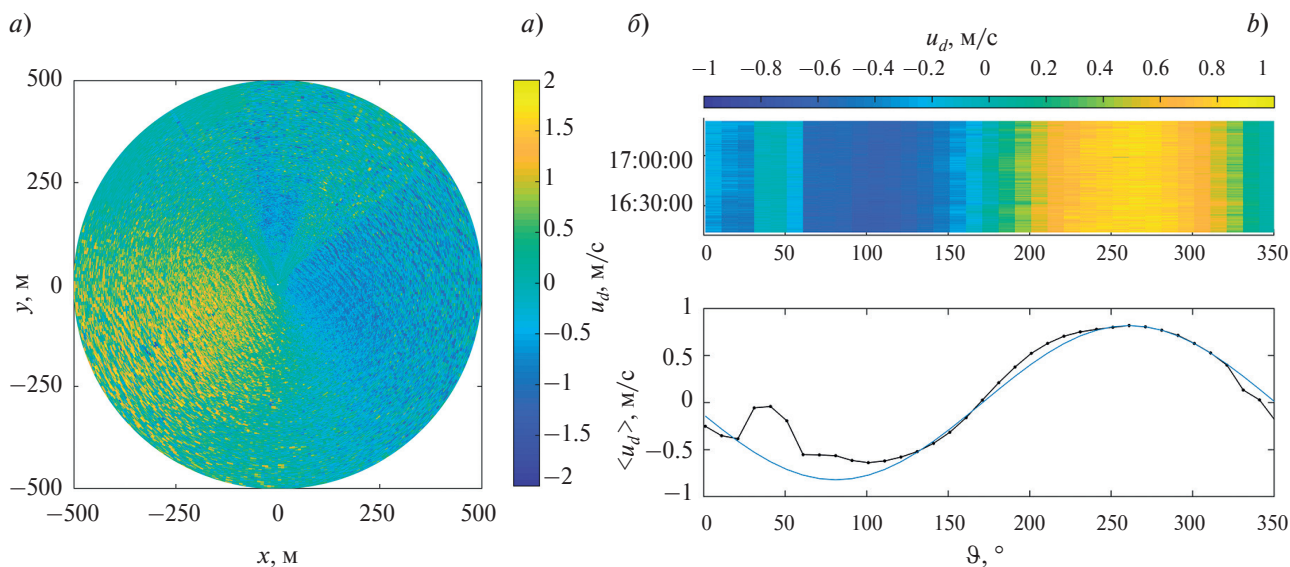


Рис. 7. Обработка экспериментальных скоростных радиолокационных панорам: *a* — скоростная радиолокационная панорама морской поверхности за один оборот антенны, полученная 22.05.2019 в 17:00; *b* — результат усреднения серии скоростных панорам на дальности 80–120 м за время с 16:15 до 17:15 22.05.2019 и средняя по времени азимутальная зависимость доплеровской скорости.

Fig. 7. Processing of the experimental radar Doppler panoramas: *a* — radar Doppler panorama of the sea surface in one revolution of the antenna, obtained on 05.22.2019 at 17:00; *b* — the result of averaging a series of Doppler panoramas at a distance of 80–120 m during the time from 16:15 to 17:15 05/22/2019 and the average time azimuthally dependence of the Doppler speed.

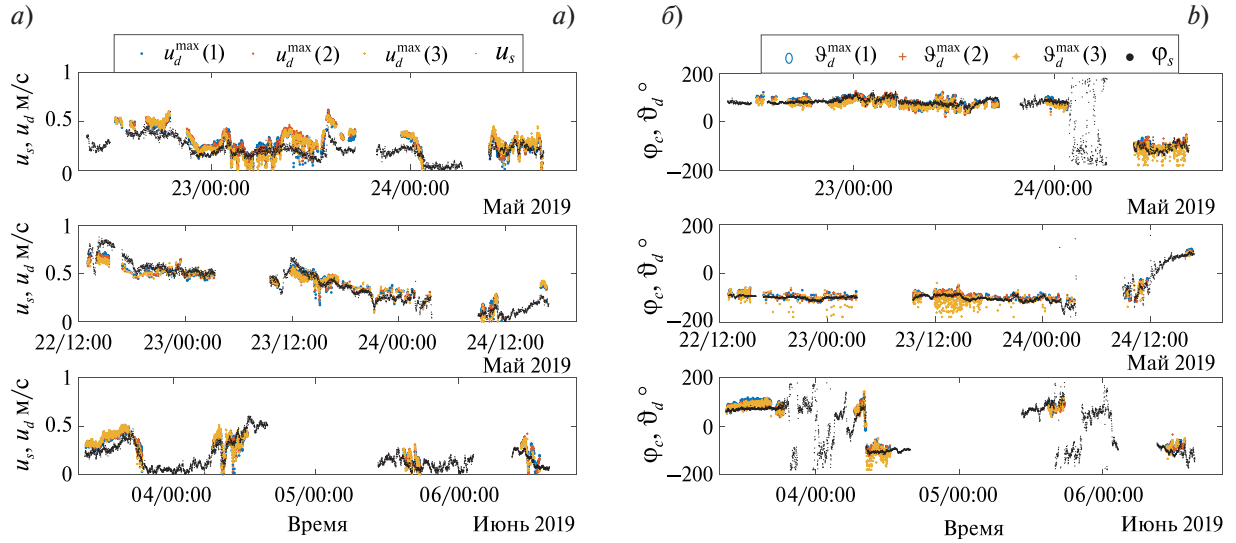


Рис. 8. Скорость и направление поверхностного течения: *a* — сопоставление скорости поверхностного течения u_s (черные точки) с максимальным значением усредненной доплеровской скорости ($u_d^{\max}(1;2;3) - (0.3; 0.35; 0.4)$) (цветные символы); *b* — сопоставление направления поверхностного течения φ_s (черные точки) с азимутом максимума усредненной доплеровской скорости ($\vartheta_d^{\max}(1;2;3) - 180^\circ$) (цветные символы).

Fig. 8. Surface current velocity and direction: *a* — comparison of the surface current velocity u_s (black dots) with the maximum value of the averaged Doppler velocity ($u_d^{\max}(1;2;3) - (0.3; 0.35; 0.4)$) (colored symbols); *b* — a comparison of the direction of the surface current φ_s (black dots) with the azimuth of the maximum of the average Doppler velocity ($\vartheta_d^{\max}(1;2;3) - 180^\circ$) (colored symbols).

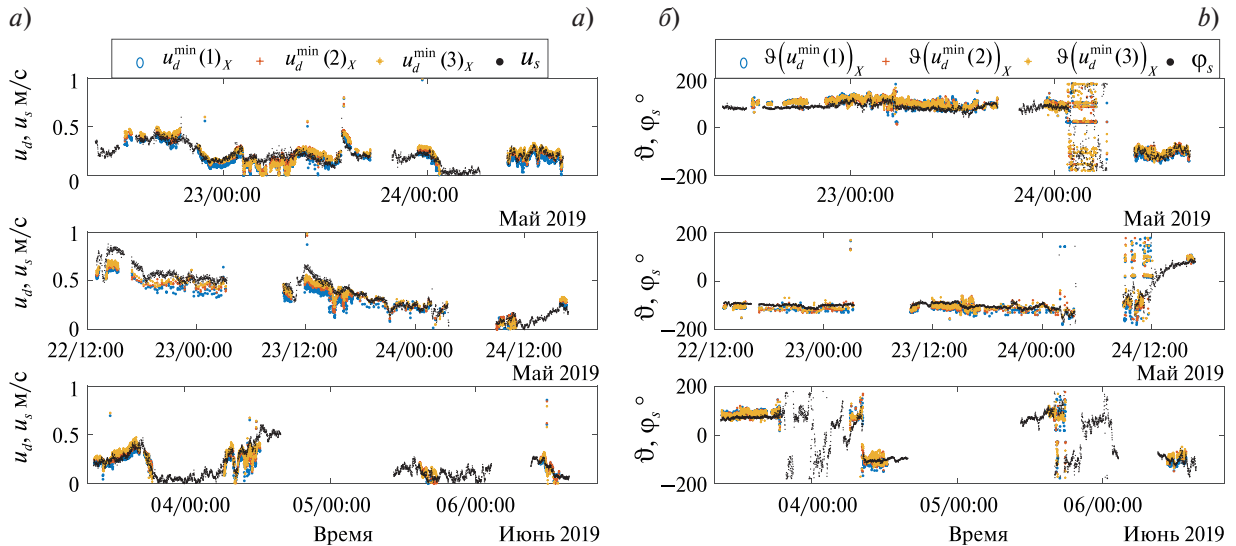


Рис. 9. Скорость и направление поверхностного течения: *a* — сопоставление скорости поверхностного течения u_s (черные точки) с минимальным значением усредненной доплеровской скорости ($u_d^{\min}(1;2;3) - 0.23$) (цветные символы); *b* — сопоставление направления поверхностного течения φ_s (черные точки) с азимутом минимума усредненной доплеровской скорости ($\vartheta_d^{\min}(1;2;3)$) (цветные символы).

Fig. 9. Surface current velocity and direction: *a* — comparison of the surface current velocity u_s (black dots) with the minimum value of the average Doppler velocity ($u_d^{\min}(1;2;3) - 0.23$) (colored symbols); *b* — comparison of the direction of the surface current φ_s (black dots) with the azimuth of the minimum of the average Doppler velocity ($\vartheta_d^{\min}(1;2;3)$) (colored symbols).

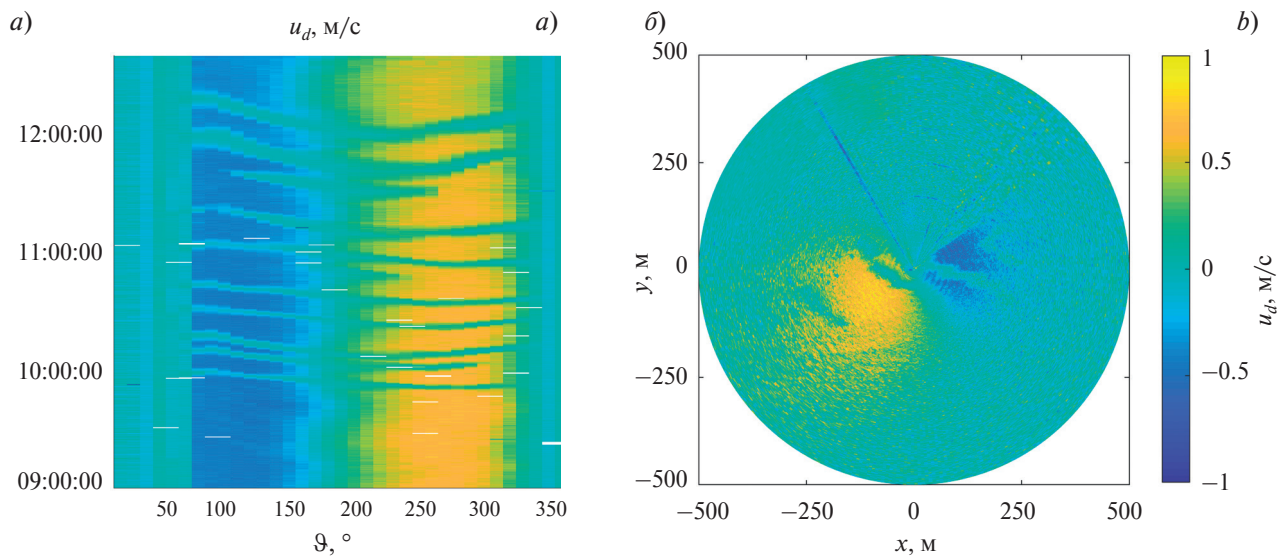


Рис. 10. Проявление искусственных пленочных сликов в усредненной доплеровской скорости с 09:00 до 12:50 (а) и на скоростной радиолокационной круговой панораме в 10:10 (б) 23 мая 2019.

Fig. 10. Manifestation of artificial film slicks in the average Doppler velocity from 09:00 to 12:50 (a) and on the radar Doppler circular panorama at 10:10 (b) on May 23, 2019.

Редакционный комментарий

В статье:

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

Ранее опубликованный текст на с. 97:

Тогда доплеровскую скорость можно записать как

$$u_d(r, \vartheta, t) = (u_{br} + u(r, \vartheta, t) + u_c + u_w^d) \cos \vartheta \sin \psi \quad (1)$$

Следует читать как:

В общем случае u_{br} следует вынести за скобки в формуле (1), однако для рассмотрения значений $\vartheta = [0^\circ; 90^\circ; 180^\circ]$ можно использовать следующее приближенное представление:

$$u_d(r, \vartheta, t) = (u_{br} + [u(r, \vartheta, t) + u_c + u_w^d] \sin \psi) \cos \vartheta \quad (1)$$