

Особенности проявления донной топографии на спутниковых РСА-изображениях

П. Д. Пиваев^{1,*}, В. Н. Кудрявцев^{1,2}, Е. А. Балашова¹,
Б. Шапрон^{1,3}

¹ *Российский государственный гидрометеорологический университет,
Санкт-Петербург, Россия*

² *Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*

³ *Institute Francais de Recherche pour l'Exploitation de la Mer, Plouzane, France*

*E-mail: pivaev.pavel@gmail.com

Поступила в редакцию 30.11.2019 г., после доработки – 17.01.2020.

Цель. Рассматриваются эффекты проявления неоднородностей дна северной части Белого моря на изображениях, полученных с помощью радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА), установленных на спутниках *Sentinel-1A*, *Sentinel-1B*.

Методы и результаты. Неоднородности дна проявляются в виде светлых и темных аномалий яркости РСА-изображений. Аномалии фиксировались при скорости ветра в диапазоне от 2,6 до 10,8 м/с. Аномалии удельной эффективной площади рассеяния становились инверсными (яркие становились темными, и наоборот) при смене направления приливного течения. Показано, что наблюдаемые контрасты РСА-изображения коррелируют с дивергенцией течения, формируемого при взаимодействии приливного потока с неоднородностями донной топографии. Модельные расчеты контрастов РСА-изображений согласуются с наблюдениями и подтверждают связь наблюдаемых аномалий РСА-сигнала с дивергенцией течения, индуцируемого при взаимодействии приливного течения с неоднородностями рельефа. Совместно с моделированием РСА-контрастов произведена качественная оценка вклада различных механизмов в формирование наблюдаемых модуляций удельной эффективной площади рассеяния. Особый акцент делается на эффекте обрушения волн. Предлагается подход к восстановлению рельефа дна, основанный на соотношении между градиентом глубины и контрастами РСА-изображения.

Выводы. Положение неоднородностей рельефа дна в мелководном районе в целом совпадает с положением дивергенции и конвергенции приливного течения, которые наблюдаются в виде аномалий яркости РСА-изображений. Основной вклад в наблюдающиеся РСА-контрасты приходится на обрушения поверхностных волн. Наблюдается согласие между реконструированным по РСА-данным и фактическим рельефом дна, а расхождения интерпретируются как возможные изменения глубины и формы особенностей донной топографии, вызванные воздействием интенсивных течений и волн.

Ключевые слова: донная топография, *Sentinel-1*, РСА, обрушения волн, дивергенция течения.

Благодарности: работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 17-77-30019. Авторы выражают благодарность А. В. Зимину за предоставление данных о донной топографии в Белом море.

Для цитирования: Особенности проявления донной топографии на спутниковых РСА-изображениях / П. Д. Пиваев [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36, № 3. С. 313–328. doi:10.22449/0233-7584-2020-3-313-328

SAR Imaging Features of Shallow Water Bathymetry

P. D. Pivaev^{1,*}, V. N. Kudryavtsev^{1,2}, E. A. Balashova¹, B. Chapron^{1,3}

¹ Russian State Hydrometeorological University, Saint-Petersburg, Russia

² Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia

³ Institute Francais de Recherche pour l'Exploitation de la Mer, Plouzane, France

*e-mail: pivaev.pavel@gmail.com

Purpose. The aim of the article is to study manifestations of the underwater topography features in the northern part of the White Sea in the images made by the spaceborn synthetic aperture radars (SAR) *Sentinel-1A*, *Sentinel-1B*.

Methods and Results. In the SAR images, the bottom features are revealed as bright and dark brightness anomalies. The anomalies were observed at the wind speed ranging from 2.6 to 10.8 m/s, and became reverse (bright anomalies turned dark and vice versa), when a tidal current changed its direction. It is shown that the observed SAR imagery contrasts correlate to divergence of a current formed by interaction of a tidal flow with the bottom topography inhomogeneities. The simulated SAR contrasts agree with the observations, and confirm the relation between the observed SAR contrasts and the current divergence. Together with modeling the SAR contrasts, the contribution of different mechanisms to formation of the observed modulations of the normalized radar cross section was qualitatively estimated. The wave breaking effect was especially accentuated. The method for retrieving the underwater bottom topography based on the relationship between the bottom gradient and the SAR imagery contrasts is proposed.

Conclusions. Location of the bottom inhomogeneities in the shallow water region on the whole coincides with that of the tidal current divergence and convergence zones, which are observed as brightness anomalies in the SAR images. Breaking of surface waves is the main contributor to the observed SAR contrasts. The bottom topography reconstructed from the SAR contrasts, and the actual one resulted from the bathymetry maps are in good agreement. Some discrepancies are interpreted as possible changes in depth and shape of the bottom topography features induced by action of strong currents and waves.

Keywords: underwater topography, *Sentinel-1*, SAR, wave breaking, current divergence.

Acknowledgments: the work was carried out within the framework of project No. 17-77-30019 supported by Russian Science Foundation; the authors are grateful to Zimin A.V. for providing the bottom topography data of the White Sea.

For citation: Pivaev, P.D., Kudryavtsev, V.N., Balashova, E.A. and Chapron, B., 2020. SAR Imaging Features of Shallow Water Bathymetry. *Physical Oceanography*, [e-journal] 27(3), pp. 290-304. doi:10.22449/1573-160X-2020-3-290-304

1. Введение

Информация о донной топографии является крайне важной для обеспечения безопасного судоходства, прокладки трубопроводов и кабелей, планирования и осуществления дноуглубительных работ. В некоторых мелководных районах (например, побережья Германии, Нидерландов, Российской Арктики) фарватеры прокладываются в акваториях с разными донными отложениями. Эти отложения могут размываться и перемещаться интенсивными течениями или штормами, что может приводить к обмелению, миграции мелководья и представлять потенциальную угрозу судоходству.

Хорошо известно, что спутниковые радиолокаторы с синтезированием апертуры (РСА) – эффективный инструмент исследования и мониторинга различных океанических явлений и процессов, в частности изменения формы особенностей донной топографии (см. главу 10 в работе [1, с. 245–262]).

При благоприятных условиях (умеренный ветер, сильное течение) неоднородности рельефа дна могут проявляться в виде локальных контрастов РСА-изображений, что было описано в ряде работ [2–8].

Одним из важных практических приложений этого эффекта является решение обратной задачи – восстановление донной топографии по данным измерений РСА. Примеры решения такой задачи представлены, например, в работах [2, 7–11]. Обратная задача в [9, 10] основывается на эффектах рефракции, связывающих кинематические характеристики поверхностных волн с рельефом дна на мелководье, и на оценке скорости диссипации волновой энергии у берега. В работе [11] решение обратной задачи основывалось на формальном математическом аппарате, не учитывающем природу явления.

Существуют и другие подходы к решению этой задачи, когда устанавливается связь контрастов радиолокационных (РЛ) изображений с характеристиками ветрового волнения. Контрасты модулируются поверхностными течениями, индуцируемыми при взаимодействии основного потока с неоднородностями донной топографии, что представляет для нас особый интерес. В работах [2, 3, 7, 8] в качестве базовой модели РЛ рассеяния используется брэгговская модель. Соответственно, трансформация короткой ветровой ряби (на брэгговском волновом числе) на течениях должна приводить к формированию контрастов РСА-изображений донной топографии. Применение этого подхода к решению обратной задачи показало, что брэгговская модель существенно занижает контрасты РСА-изображений, а для ее использования требуется вводить ряд искусственных предположений, сильно ограничивающих практическое применение разработанных алгоритмов.

Существенное занижение модельных контрастов проявления течений различной природы на РСА-изображениях X - и C -диапазона, по сравнению с наблюдениями, отмечено в предшествующих работах [5, 12]. Как показано в [13] (см. также [14, 15]), основной причиной этого расхождения является несовершенство брэгговской теории для описания удельной эффективной площади рассеяния (УЭПР) морской поверхности, в то время как РЛ отражения от обрушающихся волн дают значительный вклад в обратное рассеяние и являются определяющим механизмом в формировании проявления течений в РСА-изображениях. При этом аномалии обрушений и соответствующие контрасты РСА-сигнала привязаны к зонам дивергенции течений.

Основная цель данной работы – установить количественные характеристики связи контрастов РСА-изображения с особенностями донной топографии и параметрами течения на основе данных наблюдений и моделирования.

В главе 2 дается описание района наблюдений и исходных данных, использованных в работе. В главе 3 описывается обработка РСА-изображений, а также проводится совместный анализ РСА-контрастов, дивергенции течения и рельефа дна. Моделирование контрастов РСА с оценкой вклада различных механизмов формирования обратного рассеяния приведены в главе 4. В главе 5 демонстрируется реконструкция рельефа дна по данным РСА.

2. Район исследования и исходные данные

В данной работе рассматриваются РСА-проявления донной топографии в северной части Белого моря – в так называемой Воронке Белого моря

(рис. 1). Стационарные структуры в поле УЭПР РСА-изображения, приуроченные, предположительно, к проявлениям неоднородностей дна, можно наблюдать фактически на всех РСА-изображениях по данному району.

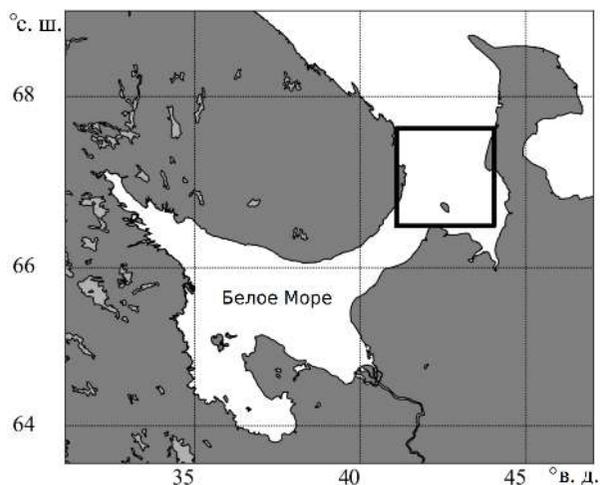
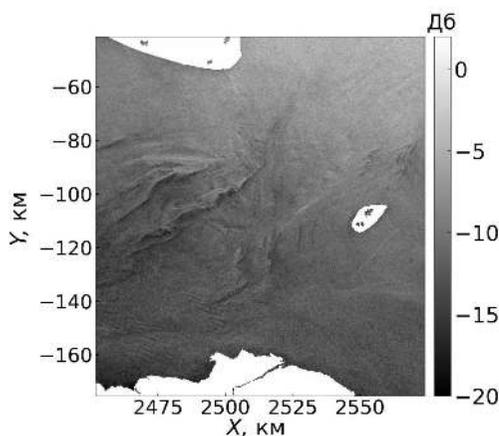


Рис. 1. Карта Белого моря (прямоугольником выделена область Воронки, которая далее анализируется по РСА-изображениям)

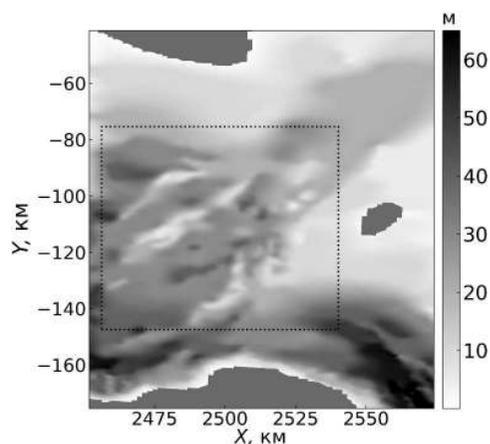
Fig. 1. Map of the White Sea. The region (called Voronka) investigated using the SAR images is marked out by a rectangle

В данной работе приводится анализ 14 РСА-изображений, полученных со спутников *Sentinel-1A*, *Sentinel-1B* Европейского космического агентства (*European Space Agency*, сокращенно *ESA*) в режиме *Extra Wide Swath (EW)* с *HH*-поляризацией в летне-осенний период с 2016 по 2018 г. На отобранных изображениях пространственные вариации поля скорости ветра были минимальны, на них также отсутствовали известные искажения сигнала, вызванные другими явлениями (например, внутренними волнами и поверхностными пленками), что позволило анализировать проявления донной топографии в чистом виде. Используемые РСА-изображения являются данными 1-го уровня обработки типа *GRD (Ground Range Detected)*. На первом этапе обработки из этих данных был исключен термальный шум, далее изображения были трансформированы в Стереографическую проекцию Северного полюса (*EPSG:3413: NSIDC Sea Ice Polar Stereographic North / WGS84*) с разрешением 40×40 м. Пример фрагмента РСА-изображения в указанном ранее районе исследования приведен на рис. 2.

Для интерпретации РСА-данных необходима информация о полях глубины, скорости течений и приводного ветра. Поля донной топографии были любезно предоставлены А. В. Зиминим (Санкт-Петербургский филиал ИО им. П. П. Ширшова РАН). Глубина в районе исследования не превышает 70 м (рис. 3). Мелководные участки в основном проходят вдоль берегов суши и о. Моржовец, они также представлены чередующимися и продолговатыми банками, глубина над которыми не превышает 15–20 м.



Р и с. 2. Пример полученного спутником Sentinel-1B РСА-изображения Воронки Белого моря в Стереографической проекции Северного полюса, 03:58 UTC 25.07.2017 г.
Fig. 2. Example of the SAR image of the White Sea Voronka (in the Arctic projection) obtained by Sentinel-1B on 25.07.2017 at 03:58 UTC



Р и с. 3. Карта рельефа дна Воронки Белого моря (прямоугольником обозначена область расположения основных подводных банок)
Fig. 3. Bottom topography map of the White Sea Voronka (location of the main banks under study is marked by a rectangle)

Поля скорости приливных течений были взяты из Атласа течений Белого моря Управления Гидрографической службы ВМФ (1962 г.) ([URL: http://parusanarod.ru/bib/map/ws/tide/index.htm](http://parusanarod.ru/bib/map/ws/tide/index.htm)). В Атласе приведены скорость и направление течений в разных точках Белого моря за определенное количество часов до наступления полной воды на о. Сосновец, находящемся в Горле Белого моря. Чтобы получить поля течений на момент съемки РСА-изображения, были использованы результаты предвычислений приливов в пункте о. Сосновец, доступные на сайте Единой государственной системы информации об обстановке в Мировом океане ([URL: http://esimo.oceanography.ru/tides/](http://esimo.oceanography.ru/tides/)). Согласно Атласу, приливные течения в данном районе могут быть достаточно интенсивными (скорость достигает 1,5–2 м/с) и, ввиду своей природы, знакопеременными. Учитывая такую специфику течений, можно предположить, что РЛ изображения были получены в условиях разных фаз локального прилива. Исходные данные о полях глубины моря и течений далее были интерполированы на сетку Стереографической проекции Северного полюса с разрешением 40 × 40 м.

В качестве данных о скорости приводного ветра использовались результаты реанализа *ERA-Interim* из архива *ECMWF* ([URL: https://www.ecmwf.int/](https://www.ecmwf.int/)), осредненные по области, охваченной РСА-изображением.

3. Связь контрастов РСА-изображений с характеристиками донной топографии

Как отмечено выше, вначале из исходных РСА-изображений был удален термальный шум. Далее с целью подавления спекл-шума РСА-изображения были сглажены при помощи аддитивного фильтра Ли [16] с размером окна 10 × 10 пикселей. Для удаления зависимости УЭПР от угла падения, а также

от «крупномасштабных» вариаций сигнала, связанных с неоднородностью поля ветра, к РСА-изображениям был применен фильтр скользящего среднего с размером окна 400×400 пикселей. Полученные таким образом изображения представлялись далее в виде полей контрастов РСА-изображения:

$$\sigma' = \sigma / \langle \sigma \rangle - 1,$$

где σ' – поле контрастов РСА; σ – исходное РСА-изображение; $\langle \sigma \rangle$ – изображение после применения фильтрации средним.

На рис. 4 показаны осредненные положительные и отрицательные контрасты на каждом из изображений как функция скорости ветра. При построении учитывались только значения контрастов, превышающие два стандартных отклонения. Как следует из этого рисунка, с увеличением скорости ветра контрасты РСА-сигнала уменьшаются, однако имеют достаточно большие значения, чтобы быть идентифицированными на РСА-изображениях при скоростях ветра до 11 м/с.

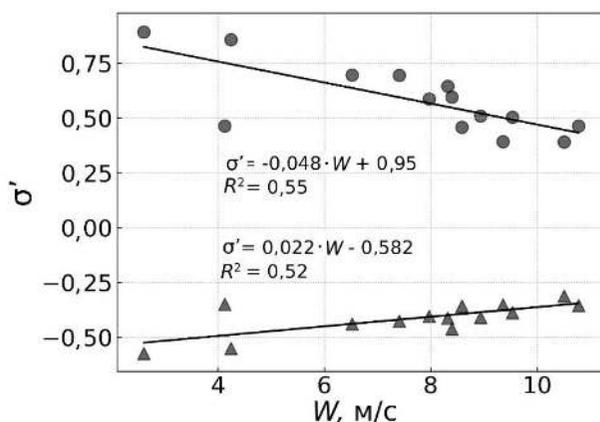


Рис. 4. Зависимость средней величины положительных (●) и отрицательных (▲) контрастов, превышающих два стандартных отклонения всего поля, от скорости ветра

Fig. 4. Average values of positive (●) and negative (▲) contrasts, exceeding two standard deviations of all the SAR images, as the function of wind speed

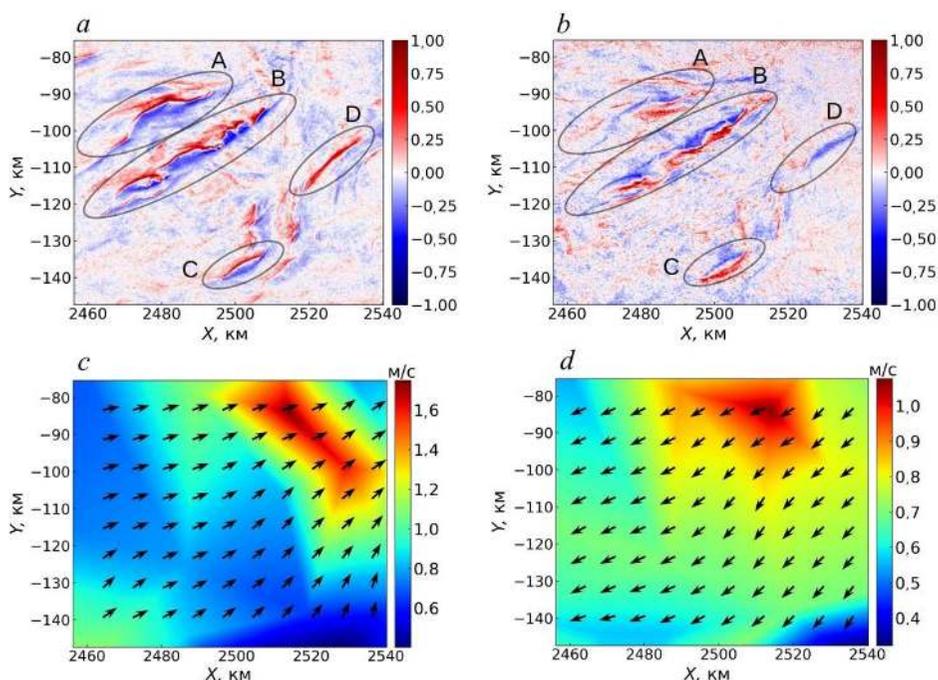
Наряду со стационарностью расположения (т. е. повторяемостью формы контрастов УЭПР от изображения к изображению), в полях РСА-контрастов была выявлена важная особенность, которая отмечалась еще в работах [17, 18], – на некоторых РСА-изображениях поля контрастов меняли знак, т. е. становились инверсными. Смена знака, как будет показано ниже, связана со сменой направления приливного потока (с направления в сторону Белого моря на противоположное).

По этой причине все РСА-данные были разделены на две группы: к первой группе были отнесены поля УЭПР и соответствующие им поля течений с одним взаимным расположением контрастов (11 сцен), а ко второй – с противоположным (3 сцены). Далее поля контрастов РСА-изображений и течений были осреднены в пределах каждой из групп. Осреднение полей контрастов происходило с учетом величины дисперсии:

$$\langle \sigma' \rangle = \frac{\sum_i \sigma'_i \text{std}(\sigma'_i)}{\sum_i \text{std}(\sigma'_i)},$$

где $\langle \sigma' \rangle$ – осредненное поле контрастов одной группы данных; σ'_i – i -е поле контрастов УЭПР в группе; $\text{std}(\bullet)$ – оператор стандартного отклонения.

Процедура взвешенного осреднения также позволяет выделить стационарный пространственно локализованный сигнал, связанный с проявлениями неоднородностей рельефа дна, и свести к минимуму вариации УЭПР, вызванные случайной изменчивостью скорости ветра и проявлениями нестационарных процессов в верхнем слое моря (например, прохождением внутренних волн).



Р и с. 5. Среднее поле контрастов PCA, полученное из первой группы данных по 11 изображениям (*a*) и из второй группы данных по 3 изображениям (*b*); среднее поле приливного течения, полученное из первой группы данных (*c*) и из второй группы данных (*d*)

F i g. 5. Average SAR contrasts fields resulted from the first data group using 11 images (*a*) and from the second data group using 3 images (*b*); tidal current fields for the first data group (*c*) and for the second data group (*d*)

Поля контрастов PCA-изображений и приливных течений для каждой из групп представлены на рис. 5. Как видно из приведенных на рис. 5, *c, d* средних полей течений, имеющих в целом противоположные направления, для обеих групп данных подтверждается предположение о смене знака PCA-контрастов вместе с изменением направления приливного течения. В полях контрастов УЭПР можно выделить четыре ярких проявления неоднородностей рельефа дна (обозначены на рис. 5, *a, b* эллипсами): особенности *B* и *C* проявляются почти с одинаковой интенсивностью в разные фазы прилива,

однако особенности A и D на рис. 5, b не имеют такого же выраженного проявления, как на рис. 5, a , что можно объяснить неустойчивыми вариациями сигнала в данном месте в соответствующей группе изображений.

Следуя работе [13], мы предполагаем, что аномалии РСА-сигнала, вызванные течениями, связаны с полем дивергенции последних: усиление РСА-сигнала происходит в зонах конвергенции течений, а ослабление – в зонах их дивергенции. Так как масштаб генерации брэгговских волн (порядка 10 м) намного меньше масштаба изменчивости течений в рассматриваемой области, наблюдаемая особенность проявления может быть обусловлена модуляцией обрушений волн. Обрушения, оказывая заметный (но не определяющий) вклад в обратное рассеяние, обладают сильной чувствительностью к градиентам течений и усиливаются в зонах конвергенции течений, а ослабляются в зонах их дивергенции. Исходя из этого, проявления донной топографии на РСА-изображениях можно интерпретировать как проявления зон конвергенции/дивергенции течений, вызванных взаимодействием основного приливного течения с неоднородностями рельефа дна.

Из теории мелкой воды следует, что дивергенция скорости течения u связана с локальным градиентом глубины H следующим отношением:

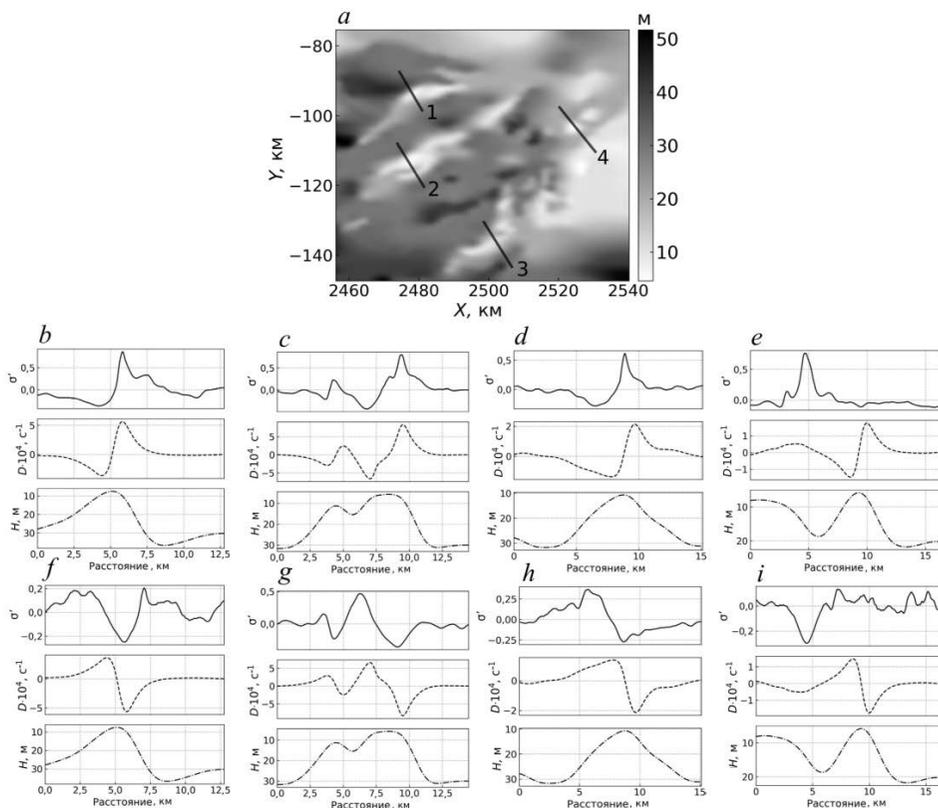
$$\nabla \cdot u = -(u \cdot \nabla H)/H. \quad (1)$$

Как следует из рис. 3 и 5, неоднородности дна вытянуты вдоль направления приливного потока. По этой причине для интерпретации РСА-данных наблюдений в качестве первого приближения в данной работе мы будем рассматривать одномерное выражение (1), где локально ось X направлена вдоль основной ориентации РСА-контрастов (перпендикулярно линии наибольшего ската дна), а ось Y – в перпендикулярном к оси X направлении. Если допустить малость градиента глубины по оси X и, таким образом, отсутствие дивергенции в этом направлении, выражение (1) принимает вид

$$\partial v / \partial y = -(v_0 H_0 / H^2) \partial H / \partial y, \quad (2)$$

где v – компонента скорости в направлении оси Y ; v_0 и H_0 – фоновые значения скорости и глубины (вне особенности дна). Из соотношения (2) следует, что чем больше глубина моря, тем меньше скорость и дивергенция индуцируемого течения. Так как РСА-контрасты определяются дивергенцией течений, то можно ожидать, что проявления донной топографии на РСА-изображениях в мелком море будут более выраженными, а на глубокой воде исчезнут.

Сопоставление контрастов РСА с дивергенцией течения, обтекающего заданный профиль глубины, проводилось вдоль четырех сечений, проведенных через выделенные особенности поля контрастов на рис. 5. Профили РСА-контрастов, глубины моря и дивергенции приведены на рис. 6, где для минимизации остаточных случайных колебаний УЭПР к сечениям контрастов применялся фильтр скользящего среднего с размером окна, равным 10 единицам дискретности. Для расчета дивергенции использовалась проекция v_0 среднего поля скорости течения на направление каждого из разрезов.



Р и с. 6. Донная топография в выделенной области РСА-изображений (*a*), линиями с цифрой обозначены сечения 1 (*b*), 2 (*c*), 3 (*d*) и 4 (*e*) полей контрастов УЭПР (сплошная линия), дивергенции течения, взятой с обратным знаком (штриховая), и рельефа дна (штрихпунктирная) при направлении приливного течения в море; те же сечения, но при противоположном направлении приливного течения (*f*, *g*, *h*, *i*)

Fig. 6. Bottom topography of the marked area of SAR images (*a*), the lines with numbers denote the transections 1 (*b*), 2 (*c*), 3 (*d*) and 4 (*e*) of the SAR contrasts (solid line), current divergence with the negative sign (dashed line) and bottom relief (dash-dotted line) when a tidal current is directed to the sea; the same sections but the tidal current direction is reverse (*f*, *g*, *h*, *i*)

Как следует из рис. 6, контрасты РСА-сигнала локализованы в местах относительно больших значений дивергенции/конвергенции, которые, в свою очередь, расположены на склонах банок. Положительные РСА-контрасты совпадают с зонами конвергенции, а отрицательные – с зонами дивергенции течения. Подобная согласованность, а также ее сохранение при смене фазы прилива хорошо видны на первых трех разрезах, рис. 6, *b – d* и *f – h*. Отметим, что в некоторых случаях наблюдается сдвиг между РСА-контрастами и зонами дивергенции/конвергенции, что может быть связано с различием между фактическим (реальным) положением склонов и следующим из карты глубин на рис. 3. Очевидное расхождение между контрастами РСА и дивергенцией наблюдается на разрезе 4 (рис. 6, *e*, *i*), что дает основание предположить, что фактический перепад глубин может быть гораздо больше того, который присутствует на карте имеющейся донной топографии (рис. 3).

4. Моделирование РЛ сигнала

Проведем интерпретацию данных РСА-наблюдений на основе модели формирования РСА-изображений морской поверхности (здесь и далее – модель *RIM*), предложенной в работе [13]. В соответствии с этой моделью, УЭПР морской поверхности σ_0^{pp} (*pp* – обозначает поляризацию, например *vv* или *hh*) при умеренных и больших углах падения (больше 25°) представляется в виде суммы резонансного брэгговского рассеяния σ_{0B}^{pp} (описываемого в рамках двухмасштабной модели) и РЛ отражений от обрушающихся волн σ_{wb} :

$$\sigma_0^{pp} = \sigma_{0B}^{pp} + \sigma_{wb}. \quad (3)$$

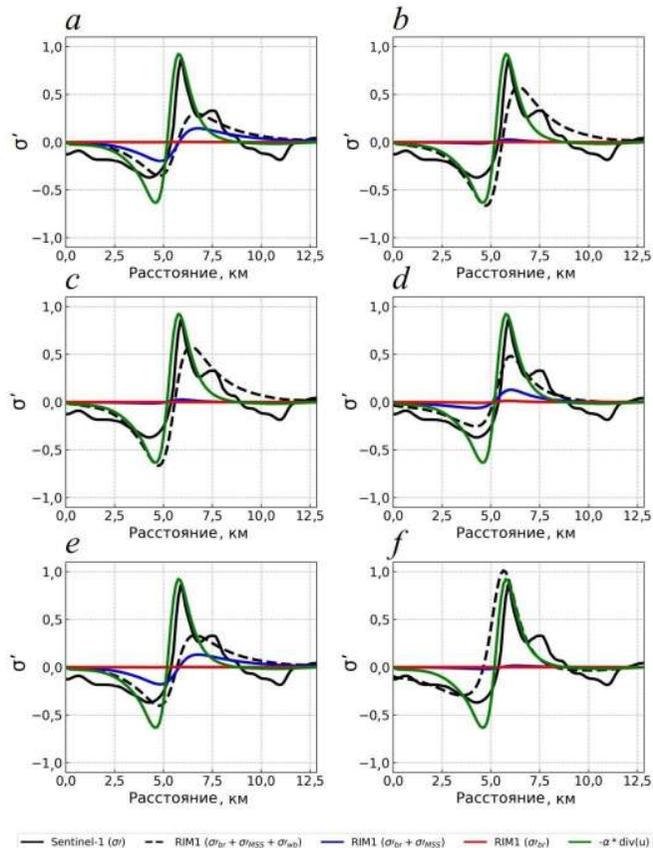
Относительный вклад обрушений волн в УЭПР, рассчитываемый по формуле $R_{wb}^{pp} = \sigma_{wb} / \sigma_0^{pp}$, значителен: на *VV*-поляризации он в среднем меняется в пределах 30–50 %, а на *HH*-поляризации составляет примерно от 50 до 65 % от полной УЭПР (см. рис. 2 в работе [14, с. 3]) при угле падения сигнала около $35,5^\circ$, характерном для центра фрагментов используемых РСА-изображений. Относительный вклад обрушений R_{wb}^{pp} также сильно зависит от направления между радиолокатором и ветром: принимает максимальные значения при направлении радиолокатора перпендикулярно ветру, минимальные – при направлении по ветру и промежуточные значения – при направлении против ветра.

Как показано в модели *RIM*, проявление течений на РСА-изображениях в первую очередь обусловлено модуляцией обрушений волн. Спектры брэгговских волн *C*-диапазона (длина волны 5,5 см) в силу малого масштаба релаксации (порядка 10 м) не модулируются на течениях с масштабом изменчивости порядка сотен метров и более, а их уровень определяется локальной скоростью ветра. Вклад обрушений волн в УЭПР пропорционален доле поверхности моря, покрытой обрушениями, которая формируется в широком спектральном диапазоне длин волн – от метра до длин волн спектрального пика. Соответственно, спектр волн в этом диапазоне чувствителен к воздействию течений, что приводит к значительной модуляции обрушений волн, интенсивность которых является сильно-нелинейной функцией уровня спектра.

На рис. 7 представлены иллюстрации особенностей формирования проявления донной топографии в РСА-изображениях. В качестве примера выбрано сечение 1 (см. рис. 6) для случая, когда течение направлено в Белое море.

Рис. 7, *a*, *c* и *e* показывают зависимость контрастов УЭПР морской поверхности от угла между направлением приводного ветра и направлением РЛ зондирования, а также вклад различных механизмов рассеяния – брэгговского рассеяния и РЛ отражений от обрушающихся волн – в формирование РСА-контрастов. Отметим, что модуляции спектра брэгговской ряби на рассматриваемых течениях незначительны, что обусловлено малым масштабом их релаксации (порядка 10 м) по сравнению с масштабом пространственной изменчивости рассматриваемых течений (порядка 1 км). Соответственно, модели РСА-проявлений, основанные на только брэгговском рассеянии, не способны объяснить наблюдаемые контрасты РСА-изображений. На первый взгляд, этот вывод находится в противоречии с результатами работ [2, 3, 7], однако

в них качественное соответствие брэгговской модели данным наблюдений было достигнуто путем корректировки или параметризации масштаба релаксации ряби для воспроизведения наблюдаемых РСА-контрастов. В отличие от указанных работ, масштаб релаксации в модели *RIM* не является свободным параметром, а имеет фиксированное определение, следующее из очевидного факта, что реакции спектра на возмущения, вызванные ветром и течением, физически эквивалентны (см. раздел 3.1–3.2 в работе [13, с. 9–11]).



Р и с. 7. Модельные контрасты УЭПР для сечения 1 (см. рис. 6) при приливном течении, направленном в море (проекция течения, индуцированного неоднородностью рельефа, на направление сечения положительна), при скорости ветра 7,5 м/с: ветер направлен по течению (*a, c, e*), а радиолокатор по ветру (*a*), перпендикулярно ветру (*c*), против ветра (*e*); радиолокатор направлен перпендикулярно ветру (*b, d, f*), а ветер по течению (*b*), перпендикулярно течению (*d*), против течения (*f*). Черная сплошная линия – наблюдаемые контрасты, полученные *Sentinel-1*, черная штриховая – контрасты по модели *RIM*, синяя линия – контрасты в рамках двухмасштабной брэгговской модели, красная линия – контрасты УЭПР, связанные с модуляцией брэгговской ряби

Fig. 7. Simulated normalized radar cross section contrasts for transection 1 (see Fig. 6) at the tidal current directed to the sea (projection of the current induced by the bottom inhomogeneity is positive in the transection direction) at the 7.5 m/s wind speed: the wind vector is parallel to the current (*a, c, e*) and the radar look is directed downwind (*a*), crosswind (*c*) and up-wind (*e*); the radar look is crosswind (*b, d, f*) and the wind vector is directed down-current (*b*), crosscurrent (*d*) and up-current (*f*). Black solid line denotes the *Sentinel-1* observed contrasts, black dashed line – the *RIM* contrasts, blue line – the two-scale Bragg scattering model contrasts and red line – the pure Bragg scattering contrasts

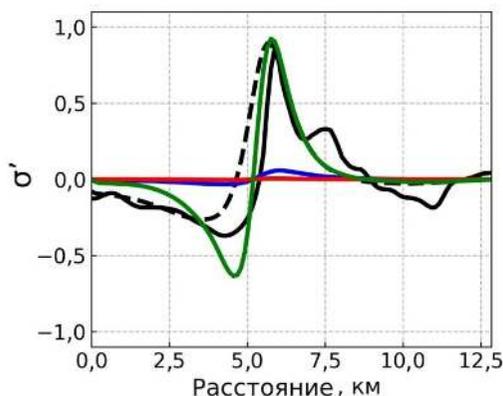
В отличие от брэгговской модели, контрасты УЭПР в рамках двухмасштабной брэгговской модели становятся заметными. В этом случае вариации УЭПР обусловлены изменчивостью среднеквадратичного наклона (СКН) длинных волн (с длинами, в несколько раз превышающими длину радиоволны), несущих брэгговскую рябь. Масштабы релаксации низкочастотной части спектра волн, формирующих СКН, сопоставимы с масштабами течений. Поэтому в рамках двухмасштабной брэгговской модели вариации СКН на течении вызывают вариации УЭПР (первый член в выражении (3)). Вклад резонансного рассеяния в вариации полной УЭПР определяется относительным вкладом σ_{0B}^{hh} в полную УЭПР σ_0^{hh} , который минимален при направлении радиолокатора перпендикулярно ветру. Как следует из рис. 7, *c*, при таких условиях вклад резонансного рассеяния в формирование контрастов РСА незначителен. Учет вклада обрушений волн в УЭПР (2-й член в выражении (3)) приводит к существенным вариациям сигнала, сопоставимым с наблюдающимися.

В целом профиль вариаций УЭПР соответствует профилю дивергенции течений: увеличение аномалий УЭПР происходит в зонах конвергенции и ослабление – в зонах дивергенции. Как показано в работе [13], среди всевозможных комбинаций компонент тензора градиента вектора течения определяющее влияние на модуляцию интегральных параметров поверхностных волн (таких, например, как доля поверхности, покрытая обрушениями, или СКН) оказывает дивергенция. Этим объясняется подобие профилей вариаций УЭПР (как полной, так и двухмасштабной брэгговской УЭПР) профилям дивергенции течений, индуцируемых донной топографией. Из рис. 7, *c* также следует, что наибольшие контрасты УЭПР следует ожидать при направлении радиолокатора перпендикулярно ветру, когда вклад обрушений в УЭПР поверхности моря максимален, а сильно нелинейная зависимость интенсивности обрушений от уровня спектра приводит к значительным РЛ контрастам.

Рис. 7, *b*, *d* и *f* иллюстрируют зависимость РСА-контрастов от направления между вектором ветра и вектором течения при фиксированном угле между направлением радиолокатора и ветром (в данном случае 90°). Аномалии УЭПР максимальны при направлении ветра, то есть при направлении распространения волн навстречу течению. При всех направлениях ветра относительно течения пространственные вариации УЭПР примерно соответствуют профилю дивергенции течения с уже отмеченным усилением сигнала в зонах конвергенции и ослаблением в зонах дивергенции. Отметим некоторое смещение максимумов УЭПР относительно максимумов конвергенции и ее минимумов относительно максимумов дивергенции при изменениях направления ветра.

Однако можно ожидать, что при осреднении РСА-контрастов, полученных при разных направлениях ветра, общее положение аномалий РСА-изображений будет привязано к зонам дивергенции течений, что видно из экспериментальных данных на рис. 8, где вектор ветра и направление радиолокатора заданы как средние значения в пределах соответствующей группы данных. Отметим также, что, как и в предыдущих расчетах, здесь доминирующий вклад в формирование РСА-контрастов оказывают модуляции обрушений; роль модуляций спектра брэгговской ряби пренебрежимо мала, в то

время как вклад резонансного рассеяния в рамках двухмасштабной модели (за счет модуляций СКН) может быть значимым.



Р и с. 8. Модельные контрасты УЭПР для того же сечения и при том же течении, что на рис. 7. Обозначения те же, что на рис. 7

F i g. 8. Simulated normalized radar cross section contrasts for the same transection and at the same current as in Fig. 7. The notations are the same as in Fig. 7

5. Оценка глубины по РСА-контрастам

Качественное соответствие РСА-контрастов дивергенции течений над неоднородностями дна, заданными априори (см. рис. 8), дает основание рассмотреть обратную задачу – определение глубины бассейна по регистрируемым аномалиям РСА-сигнала. Для этого мы предположим, что контрасты РСА K пропорциональны дивергенции поверхностных течений: $K \propto \text{div}(u)$, где коэффициентом пропорциональности является некоторая передаточная функция. Как следует из результатов моделирования (см. рис. 7), эта функция может зависеть от направления вектора ветра относительно вектора течения и направления радиолокатора, от скорости ветра (см. рис. 4), а также, вероятно, от ряда других факторов.

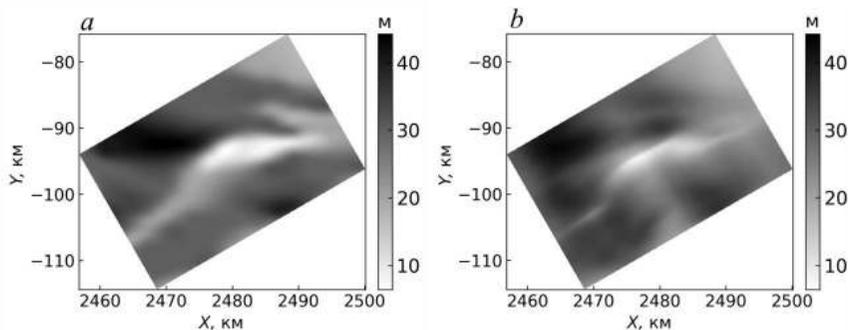
Для простоты считаем, что особенности батиметрии квазиодномерны. Тогда, используя линеаризованное уравнение (2), можем записать связь РСА-контрастов и изменений глубины в направлении наибольшего ската в следующем виде:

$$K = T \partial H / \partial y, \quad (4)$$

где T – передаточная функция, которая определяет точность восстановления глубины. В данной работе мы полагаем, что передаточная функция нам неизвестна, однако известен перепад глубин в рассматриваемой области, который может быть использован для определения неизвестной константы T (калибровка РСА-контрастов). В этом случае задача сводится к определению не абсолютных значений глубины, а изменения формы рельефа дна под действием, например, интенсивных течений и штормов или иных природных или антропогенных факторов.

Для определения фактической формы рельефа дна мы будем использовать уравнение (4) с заданными глубинами на двух границах области инте-

рирования. В этом случае задача переопределена, а лишнее граничное условие используется для определения передаточной функции.



Р и с. 9. Особенность A (см. рис. 5) поля донной топографии (a); восстановленная интегрированием (4) глубина в том же районе (b)

F i g. 9. Feature A (see Fig. 5) of the bottom topography field (a); depth in the same region reconstructed by integration (4) (b)

На рис. 9, b приведена реконструкция особенности рельефа дна A (рис. 9, a), проявляющейся в поле контрастов РСА-изображения. В качестве граничных условий для решения уравнения (4) использовались глубины на границе выделенной области. Передаточная функция задавалась постоянной величиной для всей области, а ее значение определялось из условия минимального среднеквадратичного отклонения восстановленного поля глубины от заданного априори. В целом восстановленная форма банки соответствует априорно заданной, что ожидаемо. Наиболее важными являются различия в форме и положении топографических элементов реконструированного поля глубин и представленного на рис. 3. В частности, углубление чуть левее основного центрального возвышения оказывается смещенным кверху и более вытянутым; в нижней части области появились дополнительные вариации глубины; вверху справа рельеф стал более однородным, да и сама банка оказывается более узкой по сравнению с полем глубин на рис. 9, a . Подобные различия можно интерпретировать как измененную конфигурацию донной топографии, задокументированной по данным РСА-измерений.

6. Заключение

Особенности донной топографии северной части Белого моря отчетливо проявляются на РСА-изображениях, полученных со спутников *Sentinel-1A*, *Sentinel-1B*. Проявления донной топографии обусловлены взаимодействием ветровых волн с пространственно-неоднородными поверхностными течениями, индуцируемыми при взаимодействии приливного течения с рельефом дна.

Показано, что аномалии УЭПР изображений связаны с дивергенцией индуцированных течений, при этом усиление и ослабление сигнала РСА происходит в зонах конвергенции и дивергенции течений соответственно.

Основным механизмом формирования контрастов УЭПР является рассеяние радиолокационного сигнала на обрушениях ветровых волн. Чувствительность этих волн к неоднородностям поверхностных течений проявляется

в виде усиления и ослаблений интенсивности обрушений, что происходит в зонах конвергенции и дивергенции соответственно. Роль резонансного брэгговского рассеяния в формировании РСА-проявления донной топографии незначительна.

Продемонстрирована возможность реконструкции донной топографии по осредненному полю контрастов РСА. Основные элементы батиметрии достаточно хорошо восстанавливаются, имеющиеся расхождения в расположении и форме дна, а также локальные поднятия и возвышения могут быть интерпретированы как фактические изменения рельефа дна, произошедшие с момента последних *in situ* измерений до времени проведения рассматриваемых здесь РСА-наблюдений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Synthetic Aperture Radar Marine User's Manual / C. R. Jackson, J. R. Apel (eds.). Washington, DC : U.S. Department of Commerce, 2004. 464 p.
2. *Alpers W., Hennings I.* A theory of the imaging mechanism of underwater bottom topography by real and synthetic aperture radar // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1984. Vol. 89, iss. C6. P. 10529–10546. <https://doi.org/10.1029/JC089iC06p10529>
3. *Shuchman R. A., Lyzenga D. R., Meadows G. A.* Synthetic aperture radar imaging of ocean-bottom topography via tidal-current interactions: theory and observations // *International Journal of Remote Sensing*. 1985. Vol. 6, iss. 7. P. 1179–1200. doi:10.1080/01431168508948271
4. *Lodge D. W. S.* Surface expressions of bathymetry on Seasat synthetic aperture radar images // *International Journal of Remote Sensing*. 1983. Vol. 4, iss. 3. P. 639–653. <https://doi.org/10.1080/01431168308948580>
5. *Romeiser R., Alpers W.* An improved composite surface model for the radar backscattering cross section of the ocean surface: 2. Model response to surface roughness variations and the radar imaging of underwater bottom topography // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1997. Vol. 102, iss. C11. P. 25251–25267. <https://doi.org/10.1029/97JC00191>
6. SAR imaging and hydrodynamic analysis of ocean bottom topographic waves / Q. Zheng [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2006. Vol. 111, iss. C9. C09028. doi:10.1029/2006JC003586
7. The Bathymetry Assessment System: Efficient depth mapping in shallow seas using radar images / C. J. Calkoen [et al.] // *International Journal of Remote Sensing*. 2001. Vol. 22, iss. 15. P. 2973–2998. <https://doi.org/10.1080/01431160116928>
8. Sentinel-1 bathymetry for North Sea palaeolandscapes analysis / C. Stewart [et al.] // *International Journal of Remote Sensing*. 2016. Vol. 37, iss. 3. P. 471–491. doi:10.1080/01431161.2015.1129563
9. Underwater bottom topography in coastal areas from TerraSAR-X data / S. Brusch [et al.] // *International Journal of Remote Sensing*. 2011. Vol. 32, iss. 16. P. 4527–4543. doi:10.1080/01431161.2010.489063
10. Estimating near-shore bathymetry using SAR / C. Wackerman [et al.] // *IGARSS '98. Sensing and Managing the Environment*. 1998 IEEE International Geoscience and Remote Sensing : Symposium Proceedings. Seattle, WA, USA, 1998. Vol. 3. P. 1668–1670. doi:10.1109/IGARSS.1998.692407
11. On rewriting the imaging mechanism of underwater bottom topography by synthetic aperture radar as a Volterra series expansion / J. Inglada [et al.] // *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 2002. Vol. 27, iss. 3. P. 665–674. doi:10.1109/JOE.2002.1040949
12. Modulation of radar backscatter from the ocean by a variable surface current / E. A. Caponi [et al.] // *Journal of Geophysical Research*. 1988. Vol. 93, iss. C10. P. 12249–12263. doi:10.1029/JC093iC10p12249

13. On radar imaging of current features: 1. Model and comparison with observations / V. Kudryavtsev [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2005. Vol. 110, iss. C7. C07016. doi:10.1029/2004JC002505
14. On Quad-Polarized SAR Measurements of the Ocean Surface / V. N. Kudryavtsev [et al.] // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2019. Vol. 57, no. 11. P. 8362–8370. doi:10.1109/TGRS.2019.2920750
15. On C-Band Quad-Polarized Synthetic Aperture Radar Properties of Ocean Surface Currents / S. Fan [et al.] // *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11, iss. 19. 2321. <https://doi.org/10.3390/rs11192321>
16. Speckle reduction in multipolarization, multifrequency SAR imagery / J. S. Lee [et al.] // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1991. Vol. 29, iss. 4. P. 535–544. doi:10.1109/36.135815
17. *De Loor G. P.* Remote sensing of the sea by radar. Analysis of available data and results of Noordwijk '77. Hague, Netherlands : Physics LAB RVO-TNO, 1978. 59 p. (Rep. PHL-1978-53).
18. *De Loor G. P.* The observation of tidal patterns, currents and bathymetry with SLAR imagery of the sea // *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 1981. Vol. 6, no. 4. P. 124–129. doi:10.1109/JOE.1981.1145501

Об авторах:

Пиваев Павел Дмитриевич, техник Лаборатории спутниковой океанографии, Российский государственный гидрометеорологический университет (192007, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Воронежская, д. 79), pivaev.pavel@gmail.com

Кудрявцев Владимир Николаевич, заведующий Лабораторией спутниковой океанографии, Российский государственный гидрометеорологический университет (192007, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Воронежская, д. 79), доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2); **Scopus Author ID: 7102703183**, kudr@rshu.ru

Балашова Екатерина Александровна, руководитель группы программистов Лаборатории спутниковой океанографии, Российский государственный гидрометеорологический университет (192007, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Воронежская, д. 79), balashova@rshu.ru

Шапрон Бертран, научный руководитель Лаборатории спутниковой океанографии, Российский государственный гидрометеорологический университет, старший научный сотрудник Лаборатории спутниковой океанографии, Ифремер (Centre Bretagne, ZI de la Pointe du Diable, CS 10070, 29280 Plouzané), **Scopus Author ID: 56209544000**, bertrand.chapron@ifremer.fr