О восстановлении поля поверхностных морских течений с использованием последовательных спутниковых радиолокационных изображений сликовых структур

О.А. Даниличева, С.А. Ермаков, И.А. Капустин

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, 603950, Россия E-mail: olgadan@ipfran.ru

Проблема определения характеристик морских течений с использованием данных дистанционного зондирования океана достаточно сложна и пока не может считаться полностью решённой. Радар с синтезированной апертурой как всепогодный и круглосуточный прибор с высоким пространственным разрешением весьма перспективен для диагностики процессов в верхнем слое океана, в том числе для оценки скорости поверхностного слоя воды. Участки морской поверхности, покрытые биогенными плёнками, часто наблюдаются в условиях слабого/умеренного ветра как системы «нитевидных» структур. Эти структуры зачастую априорно рассматриваются в качестве маркеров морских поверхностных течений. Однако на данный момент проведено довольно мало исследований, которые соотносили бы движение сликовых структур на радиолокационных изображениях, полученных за сравнительно короткий промежуток времени, с полем поверхностных течений. В данной работе для оценки поверхностных морских течений были проанализированы два последовательных радиолокационных изображения, полученных с помощью Envisat ASAR и ERS-2. Временной интервал между последовательными кадрами составлял около 30 мин. Изображения характеризовались большим количеством сликовых структур, которые слабо изменились за 30-минутный интервал. Для восстановления поля скоростей течений были использованы стандартный кросс-корреляционный алгоритм (метод Maximum Cross Correlation) и метод «отслеживания» отдельных сликов, с помощью которых определялось пространственное смещение последних. Получено, что для некоторых «нитевидных» структур или их частей компоненты полученных скоростей направлены почти вдоль плёночных полос, и поэтому их можно рассматривать как индикаторы линий тока течений. Однако для значительной части структур скорости течений были направлены под довольно большим углом к касательным нитевидных сликов. Предполагается, что несоответствие между линиями тока течений и геометрией сликовых структур может быть обусловлено малой точностью определения компоненты скорости течений вдоль сликов, а также различным временем перестройки структуры сликов и поля течений при быстрых изменениях условий окружающей среды, в частности скорости и направления ветра.

Ключевые слова: сликовые структуры, морские течения, спутниковые радиолокационные изображения

Одобрена к печати: 26.03.2020 DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-2-206-214

Введение

В литературе широко обсуждается возможность измерения океанических течений с помощью методов дистанционного зондирования, в особенности спутниковых. Оценка скоростей течений может быть сделана, например, из анализа последовательных спутниковых оптических или инфракрасных изображений, как показано в работах (Bowen et al., 2002; Yang et al., 2015). Оценка течений производится при анализе взаимной корреляции последовательных изображений с помощью стандартного кросс-корреляционного алгоритма (метод Maximum Cross Correlation — MCC). Однако одним из недостатков оптического/инфракрасного зондирования является то, что невозможно наблюдать водную поверхность при наличии облачности и в тёмное время суток. Микроволновый радар, в частности радар с синтезированной апертурой (PCA), является более перспективным инструментом и в отношении пространственного разрешения, и в плане отсутствия у него ограничений на погодные условия и условия освещения.

Известно, что при слабом и умеренном ветре на радиолокационных изображениях часто наблюдаются «нитевидные» сликовые структуры, нередко имеющие спиралевидную форму (DiGiacomo, Holt, 2001; McWilliams et al., 2009). Такие структуры связаны с наличием поверхностных морских плёнок биогенного или антропогенного происхождения. Представляется естественным использовать их как маркеры течений в поверхностном слое воды, если предположить, что слики переносятся поверхностными течениями как пассивная примесь. Информация о течениях в поверхностном микрослое очень важна при прогнозировании распространения загрязнений на поверхности воды. Так же как и в случае использования оптических или температурных неоднородностей на спутниковых изображениях океана для оценки скоростей течений, можно пытаться оценивать скорости морских течений на основе сравнения картин сликовых полос на последовательных радиолокационных изображениях (РЛИ) с использованием метода МСС (Gade et al., 2013; Lyzenga, Marmorino, 1998; Marmorino et al., 2010; Qazi et al., 2014).

В работе (Gade et al., 2013) были выполнены оценки скоростей морских течений по паре последовательных радиолокационных изображений ASAR Envisat, на которых наблюдалась «грибовидная» (дипольная) сликовая структура. Линии тока поля скоростей, полученные при анализе этих изображений, довольно грубо согласуются с геометрией сликов. Одной из вероятных причин этого несоответствия является слишком большой временной интервал между последовательными изображениями (12 ч), в течение которого плёночные структуры могут измениться достаточно сильно. На основе анализа серии РЛИ сликов, выполненных с небольшим временным сдвигом (около 30 мин), в работе (Lyzenga, Marmorino, 1998) предпринята попытка оценки скоростей поверхностных морских течений по смещению сликовых полос и получено удовлетворительное соответствие последних и данных квазисинхронных измерений течений с помощью ADCP, несмотря на некоторое различие в направлении восстановленных и измеренных скоростей (порядка 15°). Учитывая, однако, единичный характер наблюдений, о степени универсальности выводов работы (Lyzenga, Marmorino, 1998) судить сложно. Позднее в публикации (Marmorino et al., 2010) было упомянуто, что слики не только маркируют поверхностные морские течения, но и характеризуют их области конвергенции. Последние работы, посвящённые исследованию возможностей использования искусственных плёночных сликов в качестве маркеров приповерхностных течений и вихревых структур в контролируемых натурных экспериментах (Капустин и др., 2019; Шомина и др., 2019; Kapustin et al., 2019; Shomina et al., 2019), подтвердили потенциальную возможность изучения течений по эволюции сликовых структур. Однако в целом количество работ, в которых изучается динамика сликов в поле поверхностных течений, в настоящее время недостаточно. Соответственно, и вопрос о том, насколько адекватно геометрия сликов отражает структуру поля поверхностных течений и насколько обоснованно использование сликов как маркеров этих течений для количественного восстановления их скоростей, остаётся в целом открытым и требует дальнейших исследований.

В настоящей работе представлены новые результаты анализа пары последовательных изображений PCA с достаточно малым временным интервалом между кадрами (около 30 мин) для определения поверхностных морских течений в исследуемой области и лучшего понимания взаимосвязи между геометрией плёночных сликов и полем поверхностных течений. Для восстановления течений использованы стандартный метод MCC и метод «отслеживания» динамики отдельных сликовых структур.

Наблюдения и анализ данных

Исходные данные

Проанализирована пара спутниковых радиолокационных изображений морской поверхности, полученных с помощью спутников Envisat и ERS-2. Спутник Envisat был оснащён усовершенствованным радиолокатором с синтезированной апертурой (ASAR), а ERS-2 —

микроволновой системой, которая сочетает в себе возможности радара с синтезированной апертурой и ветрового скаттерометра (AMI-SAR). Оба датчика работали в С-диапазоне (рабочая длина волны 5,66 см). Спутники летали по одной околополярной солнечно-синхронной орбите.

Анализируемые последовательные изображения получены 25 апреля 2009 г. для юго-восточной части Балтийского моря. Район наблюдений представлен на *puc. 1a.* Спутниковое радиолокационное изображение Envisat ASAR получено в 09:09:08 UTC в режиме WSM (Wide Swath Mode). Второе изображение получено в 09:40:49 UTC с помощью ERS-2 SAR IMM (Image Mode medium resolution). Пространственное пиксельное разрешение обоих изображений — 75 м. На РЛИ хорошо видна сложная структура биогенных сликов. Фрагмент исследуемого изображения, полученного с помощью SAR ERS-2, представлен на *puc. 16*.



Рис. 1. Карта исследуемой области Балтийского моря (*a*); красный прямоугольник — расположение выбранных фрагментов радиолокационных изображений. Исследуемая часть изображения ERS-2 SAR, полученного 25.04.2009 в 09:40:49 UTC (*б*). Размер исследуемой области 100×130 км

По данным реанализа NCEP, скорость ветра была около 5 м/с, направление — север-северо-запад.

Стандартный кросс-корреляционный алгоритм

Для восстановления поля поверхностных течений использован МСС-метод. Сликовые структуры служили маркерами течений, по смещению которых на последовательных изображениях оценивались скорости верхнего слоя воды. Для использования МСС РЛИ были разделены на множество небольших подызображений, или областей опроса. Размер областей опроса определял пространственное разрешение найденного поля скорости течений. Чтобы определить смещение сликовой структуры в последующем кадре в пределах одного подызображения использовался стандартный кросс-корреляционный алгоритм (MCC). Чтобы получить наиболее вероятное смещение сликовой структуры в пределах области опроса для каждой пары подызображений рассчитывается функция взаимной корреляции. Расположение максимума в корреляционной матрице соответствует наиболее вероятному смещению участка слика, и таким образом определяется скорость и её направление в области опроса.

Размер подызображений выбирался равным 32 пикселям с шагом между центрами областей опроса в 16 пикселей для перекрытия смежных областей на 50 %. Такой шаг между подызображениями был выбран для получения информации о смещении на границах каждой области опроса, чтобы учесть дополнительные сдвиги и вращения плёночных структур в подызображении. Область опроса деформировалась согласно дополнительным смещениям на границах подызображения, и проводилась повторная взаимная корреляция уже деформированной области и подызображения первого по времени кадра. Полученные данные накапливались и сглаживались для повышения точности определения поля скорости.

Кроме того, для уточнения скоростей, восстановленных с помощью МСС, использовался метод «отслеживания» отдельных сликовых структур. Для реализации данного метода выбирались сликовые структуры, которые могли быть легко найдены и идентифицированы на обоих снимках и динамика которых могла отчётливо отслеживаться визуально благодаря наличию локальных особенностей формы. По смещению таких структур восстанавливались векторы скорости течений (и сравнивались со скоростями, полученными МСС-методом).

Результаты и обсуждение

Рассмотрим результаты восстановления скоростей течений для фрагментов изображений «а» и «б» на *puc. 16*, полученные с помощью стандартного кросс-корреляционного алгоритма (MCC). Восстановленные поля течений для указанных фрагментов представлены на *puc. 2* (см. с. 210), полученные величины скоростей изменяются в диапазоне от 0 до 35 см/с. Максимумы кросс-корреляционной матрицы находились в диапазоне от 0,4 до 0,9. Вариации структур сликов за время между кадрами приводят, очевидно, к уменьшению коэффициента кросс-корреляции и к снижению достоверности восстановленных скоростей.

Приведённые на *рис.* 2 поля скоростей показывают, что в целом линии тока поверхностного течения соответствуют геометрии сликовых структур на поверхности воды. Однако видны некоторые несоответствия между линиями тока течения, полученными методом МСС, и отдельными сликами, в частности в верхней правой части *рис.* 2*а.* Значительное несоответствие имеет место на *рис.* 26, где вихревая структура в восстановленном поле скоростей, которая наблюдается в центральной части рисунка, практически не отображается в геометрии плёночных структур. Как видно из *рис.* 2, некоторые сликовые полосы или их части ориентированы почти перпендикулярно скоростям восстановленных поверхностных течений и вряд ли могут рассматриваться как маркеры линий тока течений.

Оценим точность полученных модулей и направлений векторов скорости. При использовании метода МСС максимальная ошибка скорости определяется смещением одного пикселя между последовательными изображениями. Если смещение меньше пикселя, то, очевидно, значение скорости не определяется. Так как разрешение в точке для обоих изображений равно 75 м, а временной интервал между последовательными кадрами — 32 мин, то значение погрешности в нашем случае составляло 4 см/с. Кроме того, существует ошибка геолокации между изображениями Envisat и ERS-2. Оценка этой ошибки определялась по смещению выбранного участка суши между кадрами (Qazi et al., 2014). Взаимная корреляция по суше должна показывать векторы с нулевой скоростью. Следовательно, векторы смещения на суше будут показывать ошибку геолокации между двумя изображениями. Ошибка была рассчитана как средняя величина модулей скорости по суше при сравнении полных изображений, полученных с помощью спутников Envisat и ERS-2. Ошибка геолокации также составила величину порядка 4 см/с.



б

Рис. 2. Фрагменты «а» и «б» *рис. 16* (а и б соответственно), на которых показана сложная сликовая структура (*слева*) и поле течений, полученное с помощью стандартного кросс-корреляционного алгоритма (*справа*)

Отметим, что ошибка при восстановлении модулей скоростей приводит и к неопределённости направления вектора скорости. Например, для модуля скорости течения около 30 см/с ошибка в направлении составляет около 15°.

Приведённые оценки ошибок восстановления поля течений, однако, не могут объяснить наиболее сильных различий в структуре линий тока и сликовых полос.

Одной из причин указанного несоответствия является наличие весьма важного источника ошибок восстановления поля течений по смещению плёночных структур, а именно определения той компоненты скорости течений, которая направлена вдоль сликовых полос.

Очевидно, что если смещение сликовой полосы вдоль неё самой за время между кадрами значительно меньше длины полосы и при этом полоса «гладкая» и не имеет характерных неровностей границ, то зарегистрировать такое смещение оказывается затруднительным.

В связи с этим в дополнение к методу МСС была использована процедура «ручной» обработки или методика «отслеживания» смещения отдельных сликов по неровностям их границ. Метод «отслеживания» достаточно трудоёмок при обработке большого количества структур на изображениях и практически применим лишь к единичным сликам, на которых удаётся выделить характерные неоднородности и отследить их смещение на последовательных кадрах. Пример использования ручной обработки приведён на *рис. 3* для одного небольшого фрагмента сликовых структур, где для сравнения показан результат, полученный методом МСС. Как видно из *рис. 3*, при общем удовлетворительном согласии с МСС-методом существуют векторы скорости, которые не согласуются с векторами, полученными МСС-методом, и которые действительно направлены вдоль сликовых полос, а не поперёк. В таких областях МСС-метод рассчитывает среднюю скорость сликов в подызображении, не учитывая перемещение мелкомасштабных локальных особенностей вдоль самих полос. Метод «отслеживания» отдельных сликовых структур, ориентированный на отслеживание смещения отдельных локальных особенностей, даёт дополнительную информацию о таких смещениях и позволяет улучшить достоверность восстановленных полей течений.



Рис. 3. Фрагмент рис. 2а, где приведены поле скоростей течений, восстановленное методом МСС (зелёные стрелки), и векторы, полученные методом «отслеживания» (красные стрелки)

Другой причиной расхождений линий тока восстановленных течений и геометрии сликовых полос может являться нестационарный характер течений. Перенос плёнок ПАВ можно приближённо описывать как движение пассивных маркеров в поле течений, если не учитывать влияние зон дивергенции и конвергенции течений на форму сликов. Поэтому геометрия сликовых полос должна соответствовать траекториям жидких частиц, которые в стационарном поле течений совпадают с линиями тока. Последние, однако, в нестационарном случае, вообще говоря, не соответствуют лагранжевым траекториям. Соответственно, и слики могут не отвечать линиям тока. Нестационарность течений, таким образом, приводит к различиям между формой сликов и линиями тока течений. Для инструментального обоснования данного предположения необходимо выполнить ряд измерений поверхностных течений и наблюдения сликовых структур на временах, меньших времени нестационарности течений, которые могут быть обусловлены достаточно быстрыми изменениями метеоусловий. Совместные измерения полей приповерхностных течений, скорости и направления ветра синхронно с наблюдениями сликов весьма сложны. Вероятно, это можно осуществить с помощью некоторых методов дистанционного зондирования, например на основе анализа доплеровского спектра рассеянного микроволнового сигнала X-, Кu- или Ка-диапазонов. Однако восстановление поверхностных течений из анализа доплеровских спектров радиолокационного сигнала — также нетривиальная задача, которая ещё полностью не решена, поскольку в настоящее время природа рассеивателей микроволн до конца не изучена и скорости рассеивателей, определяющие доплеровский сдвиг радиолокатора, с хорошей точностью пока не известны. Это связано с тем, что скорость рассеивателей микроволнового излучения определяется как фазовой скоростью квазилинейных брэгговских волн см-диапазона, так и скоростями рассеивателей, связанных с сильными и/или микрообрушениями более длинных поверхностных волн (Ermakov et al., 2018; Sergievskaya et al., 2019).

Выводы

Проанализированы последовательные спутниковые радиолокационные изображения нитевидных сликовых структур в юго-восточной части Балтийского моря с интервалом между съёмками в 32 мин. С помощью стандартного кросс-корреляционного алгоритма и метода отслеживания отдельных сликовых структур восстановлены поля поверхностных течений в исследуемой области. Получено, что геометрия части сликовых структур хорошо согласуется с линиями тока восстановленных поверхностных течений. Однако в некоторых областях пространства скорости поверхностного слоя воды, полученные из оценки смещения плёночных структур, направлены под достаточно большими углами к сликовым полосам, вплоть до 90°. Соответственно, и геометрия сликов в таких случаях не согласуется с линиями тока течений.

Значительным недостатком метода МСС при его применении к сликовым полосам является низкая точность оценки компонентов скоростей, направленных вдоль этих полос. В частности, если на полосе нет мелких неоднородностей и/или ширина этой полосы слабо изменяется, то её смещение вдоль самой себя на последовательных радиолокационных изображениях практически нельзя зафиксировать. Для уточнения метода МСС использован метод отслеживания отдельных сликовых структур, который позволяет восстановить скорости отдельных локальных особенностей сликов, в частности при смещении плёночной полосы вдоль самой себя.

Предположительно, неполное соответствие между сликовыми структурами и линиями тока поверхностных течений объясняется тем, что течения не являются стационарными и могут изменяться достаточно быстро. При существенных различиях в характерных временах перестройки структуры сликов и поля течений при изменениях условий окружающей среды, в частности скорости и направления ветра, несоответствие геометрии сликов и поля течений может быть значительным.

Необходимы поэтому дальнейшие исследования по сопоставлению сликовых структур и полей поверхностных течений с использованием как данных дистанционного зондирования, так и данных натурных измерений скоростей поверхностного слоя воды.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 18-77-10066).

Литература

1. Капустин И.А., Ермошкин А.В., Богатов Н.А., Мольков А.А. 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.

- 2. Шомина О. В., Капустин И. А., Ермошкин А. В., Ермаков С. А. О динамике искусственной сликовой полосы в прибрежной зоне Чёрного моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 4. С. 222–232
- 3. Bowen M. M., Emery W. J., Wilkin J. L., Tildesley P. C., Barton I. J., Knewtson R. Extracting multiyear surface currents from sequential thermal imagery using the maximum cross-correlation technique // J. Atmospheric and Oceanic Technology. 2002. V. 19. P 1665–1676.
- 4. *DiGiacomo P. M., Holt B.* Satellite observations of small coastal ocean eddies in the Southern California Bight // J. Geophysical Research. 2001. V. 106. P. 22521–22544.
- 5. Ermakov S.A., Sergievskaya I.A., da Silva J.C., Kapustin I.A., Shomina O.V., Kupaev A.V., Molkov A.A., Remote Sensing of Organic Films on the Water Surface Using Dual Co-Polarized Ship-Based X-/C-/S-Band Radar and TerraSAR-X // Remote Sensing. 2018. V. 10(7). P. 1097.
- 6. *Gade M.*, *Byfield V.*, *Ermakov S.*, *Lavrova O.*, *Mitnik L.* Slicks as Indicators for Marine Processes // Oceanography. 2013. V. 26. No. 2. P. 138–149.
- Kapustin I.A., Shomina O.V., Ermoshkin A.V., Bogatov N.A., Kupaev A.V., Molkov A.A., Ermakov S.A. On Capabilities of Tracking Marine Surface Currents Using Artificial Film Slicks // Remote Sensing. 2019. V. 11. No. 7. P. 840.
- Lyzenga D. R., Marmorino G. O. Measurement of surface currents using sequential synthetic aperture radar images of slick patterns near the edge of the Gulf Stream // J. Geophysical Research. 1998. V. 103. P. 18769–18777.
- 9. *Marmorino G. O., Holt B., Molemaker M. J., DiGiacomo P. M., Sletten M. A.* Airborne synthetic aperture radar observations of "spiral eddy" slick patterns in the Southern California Bight // J. Geophysical Research. 2010. V. 115. No. C5. C05010.
- McWilliams J. C., Colas F., Molemaker M. J. Cold filamentary intensification and oceanic surface convergence lines // Geophysical Research Letters. 2009. V. 36. No. L18602. P. 1–5.
- Qazi W.A., Emery W.J., Fox-Kemper B. Computing ocean surface currents over the coastal California Current System using 30-minute lag sequential SAR images // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2014. V. 52(12). P. 7559–7580.
- Sergievskaya I.A., Ermakov S.A., Ermoshkin A.V., Kapustin I.A., Molkov A.A., Danilicheva O.A., Shomina O.V. Modulation of Dual-Polarized X-Band Radar Backscatter Due to Long Wind Waves // Remote Sensing. 2019. V. 11. No. 4. P. 423.
- Shomina O. V., Ermoshkin A. V., Danilicheva O.A., Tarasova T. V., Kapustin I.A., Ermakov S.A. Slick bands kinematics due to marine current and wind: study and simulation // Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions: Proc. SPIE. 2019. V. 11150. 111501J.
- 14. *Yang H., Arnone R., Jolliff J.* Estimating advective near-surface currents from ocean color satellite images // Remote Sensing of Environment. 2015. V. 158. P. 1–14.

On the retrieval of surface marine currents field using sequential satellite SAR images of slick structures

O.A. Danilicheva, S.A. Ermakov, I.A. Kapustin

Institute of Applied Physics RAS, Nizhniy Novgorod 603950, Russia E-mail: olgadan@ipfran.ru

The problem of characterization of marine currents using ocean remote sensing data is very difficult and has not been completely solved yet. Synthetic Aperture Radar (SAR) as an all-weather and all-day instrument with high spatial resolution is very promising for analysis of processes in the upper ocean, including current estimation of surface water layer. Areas of sea surface, covered with marine biogenic film slicks are often observed as systems of "filamentary" structures at low/moderate wind conditions. Usually these structures are considered as appropriate features for marine current tracking. However, at the moment very few studies have been carried out to relate the motion of slick structures in SAR images at a comparably short time interval with the surface current velocity field. In this paper two sequential satellite SAR images acquired with Envisat ASAR and ERS-2 SAR have been analyzed to estimate sea surface currents. The acquisition time difference between the images was nearly 30 min. The images were characterized by a number of slick features which were nearly identical within the 30 min time shift. A Maximum Cross-Correlation (MCC) method and a method of distinct slick structure "tracking" determined the spatial displacement of slick structures and were used for the current retrieval. It was obtained that for some slick filamentary structures or for their parts the retrieved current velocities were directed nearly along the filaments, so that the slicks could be considered as the current streamlines. However, for significant amount of slick structures the retrieved current velocity vectors were directed at rather large angles to the filament tangent lines. We assume that current streamlines and slick structure geometry may not be identical due to low accuracy of the estimation of current velocities along the filaments and due to different characteristic times of alteration of the slick structures and the current field according to fast changes of environmental conditions, in particular wind speed/direction.

Keywords: filamentary slick structures, marine currents, sequential satellite SAR images

Accepted: 26.03.2020 DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-2-206-214

References

- Kapustin I.A., Ermoshkin A.V., Bogatov N.A., Molkov A.A., Ob otsenke vklada privodnogo vetra v kinematiku slikov na morskoi poverkhnosti v usloviyakh ogranichennykh razgonov volneniya (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 distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 2, pp. 163–172.
- 2. Shomina O.V., Kapustin I.A., Ermoshkin A.V., Ermakov S.A., O dinamike iskusstvennoi slikovoi polosy v pribrezhnoi zone Chernogo morya (On the dynamics of artificial slick band in the coastal zone of the Black Sea), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 4, pp. 222–232.
- 3. Bowen M. M., Emery W.J., Wilkin J. L., Tildesley P. C., Barton I. J., Knewtson R., Extracting multiyear surface currents from sequential thermal imagery using the maximum cross-correlation technique, *J. Atmospheric and Oceanic Technology*, 2002, Vol. 19, pp. 1665–1676.
- 4. DiGiacomo P. M., Holt B., Satellite observations of small coastal ocean eddies in the Southern California Bight, *J. Geophysial Research*, 2001, Vol. 106, pp. 22521–22544.
- 5. Ermakov S.A., Sergievskaya I.A., da Silva J.C., Kapustin I.A., Shomina O.V., Kupaev A.V., Molkov A.A., Remote Sensing of Organic Films on the Water Surface Using Dual Co-Polarized Ship-Based X-/C-/S-Band Radar and TerraSAR-X, *Remote Sensing*, 2018, Vol. 10(7), p. 1097.
- 6. Gade M., Byfield V., Ermakov S., Lavrova O., Mitnik L., Slicks as Indicators for Marine Processes, *Oceanography*, 2013, Vol. 26, No. 2, pp. 138–149.
- Kapustin I.A., Shomina O.V., Ermoshkin A.V., Bogatov N.A., Kupaev A.V., Molkov A.A., Ermakov S.A., On Capabilities of Tracking Marine Surface Currents Using Artificial Film Slicks, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11, No. 7, p. 840.
- 8. Lyzenga D. R., Marmorino G. O., Measurement of surface currents using sequential synthetic aperture radar images of slick patterns near the edge of the Gulf Stream, *J. Geophysical Research*, 1998, Vol. 103, pp. 18769–18777.
- 9. Marmorino G.O., Holt B., Molemaker M.J., DiGiacomo P.M., Sletten M.A., Airborne synthetic aperture radar observations of "spiral eddy" slick patterns in the Southern California Bight, *J. Geophysical Research*, 2010, Vol. 115, No. C5, C05010.
- 10. McWilliams J. C., Colas F., Molemaker M. J., Cold filamentary intensification and oceanic surface convergence lines, *Geophysical Research Letters*, 2009, Vol. 36, No. L18602, pp. 1–5.
- Qazi W.A., Emery W.J., Fox-Kemper B., Computing ocean surface currents over the coastal California Current System using 30-minute lag sequential SAR images, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2014, Vol. 52(12), pp. 7559–7580.
- 12. Sergievskaya I.A., Ermakov S.A., Ermoshkin A.V., Kapustin I.A., Molkov A.A., Danilicheva O.A., Shomina O.V., Modulation of Dual-Polarized X-Band Radar Backscatter Due to Long Wind Waves, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11(4), No. 4, p. 423.
- 13. Shomina O.V., Ermoshkin A.V., Danilicheva O.A., Tarasova T.V., Kapustin I.A., Ermakov S.A., Slick bands kinematics due to marine current and wind: study and simulation, *Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions, Proc. SPIE*, 2019, Vol. 11150, 111501J.
- 14. Yang H., Arnone R., Jolliff J., Estimating advective near-surface currents from ocean color satellite images, *Remote Sensing of Environment*, 2015, Vol. 158, pp. 1–14.