

Динамика вихрей в Арктике по данным квазисинхронных спутниковых РСА-измерений Sentinel-1

И. Е. Козлов, Е. В. Плотников

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, 299011, Россия
E-mails: igor.eko@gmail.com, ev.plotnikov@yandex.ru

В настоящей работе продемонстрированы новые возможности по использованию квазисинхронных спутниковых измерений радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) Sentinel-1A/B для определения горизонтальной скорости течений и орбитальной скорости вращения вихрей на акватории Северного Ледовитого океана. Новизна работы обусловлена запуском в 2014–2016 гг. полярно-орбитальных спутников Sentinel-1A и Sentinel-1B, частота измерений которых в Арктике достигает 2–4 раз в сутки с разницей по времени между ближайшими съёмками в 40–50 мин. На основе использования метода максимальной кросс-корреляции для пары изображений Sentinel-1 в прикромочной ледовой зоне пролива Фрама рассчитано поле горизонтальной скорости течений, в котором отчётливо идентифицируются вихревые образования различного размера и знака вращения. Общая геометрия полученного поля течений хорошо соответствует наблюдаемым в радиолокационных изображениях структурам. Средние значения орбитальной скорости вихрей составили 0,4–0,5 м/с, что соответствует результатам натурных измерений, выполненных в этом районе ранее. Представленная в работе методология анализа спутниковых РСА-данных может служить основой для исследования динамических процессов верхнего слоя Северного Ледовитого океана как в субмезомасштабном интервале пространственно-временной изменчивости, так и на больших масштабах.

Ключевые слова: океанские вихри, орбитальная скорость вихрей, спутниковые радиолокационные изображения, пролив Фрама, прикромочная ледовая зона, Северный Ледовитый океан, Арктика

Одобрена к печати: 04.03.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-178-186

Введение

В последние десятилетия наблюдается активное изменение гидрологических условий Северного Ледовитого океана. Основное внимание специалистов в настоящее время уделяется исследованию физических механизмов, ответственных за существенное сокращение площади ледяного покрова в Арктике, а также процессам теплообмена и поступления тепла подповерхностных атлантических вод к поверхности Северного Ледовитого океана (СЛО). Среди процессов, способных оказывать влияние на поступление тепла в приповерхностный слой СЛО, мало изучена роль мезо- и субмезомасштабных вихрей. Это объясняется двумя основными причинами: сложностью выполнения прямых и дистанционных измерений на акватории СЛО из-за удалённости региона и наличия ледяного покрова, а также малыми пространственно-временными масштабами этих процессов, что существенно ограничивает возможности их численного моделирования (Iakovlev, 2018).

Обширное очищение арктического региона ото льда в летне-осенний и зимний периоды (Ivanov et al., 2012) позволяет в настоящее время эффективно использовать методы дистанционного зондирования океана из космоса для исследования различных динамических процессов в поверхностном слое СЛО. В силу всепогодности и высокого пространственного разрешения измерения спутниковых радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) продемонстрировали свою эффективность для изучения динамических процессов различных масштабов во внутренних морях России (Karimova, 2012; Kozlov et al., 2012; Lavrova, Mityagina, 2017; Mityagina et al., 2010), а также в отдельных морях евразийского сектора Арктики (Atadzhanova et al., 2017; Kozlov et al., 2015, 2017; Mensa et al., 2018; Morozov et al., 2017; Zimin et al., 2016). Однако относительно редкое (1–2 дня) покрытие спутниковой

РСА-съёмкой одной и той же территории не позволяло до недавнего времени проследить динамику этих процессов на небольших интервалах по времени.

С запуском спутника Sentinel-1В в апреле 2016 г. на орбите появились две функционирующие РСА-системы нового поколения Sentinel-1А/В (далее — S-1А/В), ежедневно выполняющие съёмку в арктическом регионе (к северу от 70° с. ш.) с небольшой задержкой по времени между последовательными изображениями. Этот факт открывает принципиально новую возможность определения горизонтальной скорости поверхностных течений в Арктике с пространственным разрешением $O(100\text{ м})$, что на 1–2 порядка лучше существующих спутниковых продуктов и большинства современных региональных моделей циркуляции СЛО.

Поскольку до настоящего времени сведения о возможности использования квазисинхронных спутниковых РСА-измерений для определения горизонтальной скорости течений на акватории СЛО отсутствуют, целью данной работы становится демонстрация такой возможности на основе анализа парных радиолокационных изображений (РЛИ) Sentinel-1А/В в районе пролива Фрама. Предлагаемая в работе методология анализа спутниковых РСА-измерений позволит исследовать динамику вихрей и других процессов в Арктике на масштабах, недоступных для большинства современных моделей общей циркуляции СЛО, и сможет служить экспериментальной базой для их верификации.

Данные и методы

Новизна задачи, поставленной в настоящей работе, обусловлена запуском в 2014–2016 гг. двух новых полярно-орбитальных спутников Sentinel-1А и Sentinel-1В с РСА-системами высокого разрешения на борту. Благодаря полярной орбите частота измерений S-1А/В в полярных областях Земли, в частности в полосе широт 70° – 85° с. ш., достигает 2–4 раз в сутки с разницей по времени между ближайшими съёмками в 40–50 мин. Такая небольшая задержка по времени между последовательными и ежедневными РСА-измерениями открытого доступа имеет место впервые и является оптимальной для наблюдения быстротекущих процессов в морской среде. На *рис. 1* показана карта западного сектора евразийской Арктики с положением 43 снимков S-1А/В за случайно выбранную дату.

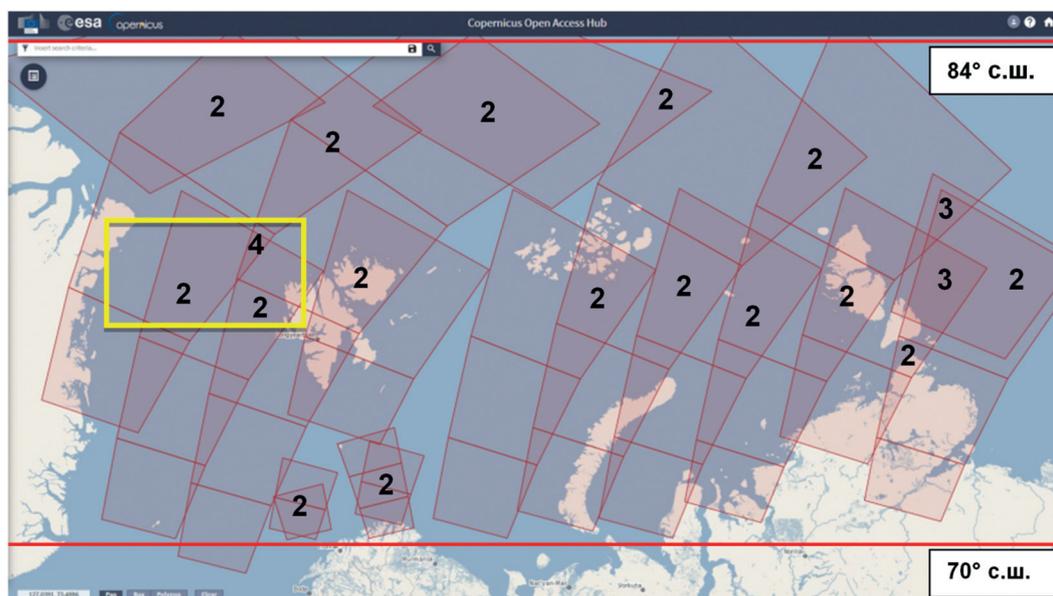


Рис. 1. Карта западной части евразийского сектора Арктики с положением РСА-изображений спутников Sentinel-1А/В за 14 марта 2018 г. Красными рамками отмечены границы отдельных РСА-изображений, розовым цветом — пересечение соседних РЛИ с разницей по времени около 50 мин. Красные линии — границы широт 70° с. ш. и 84° с. ш. Цифрами отмечено количество последовательных РЛИ в районах перекрытия треков. Жёлтой рамкой выделен район пролива Фрама

Как видно на рисунке, в данной полосе широт значительные участки акватории имеют от 2 до 4 пересекающихся фрагментов РЛИ с разницей по времени съёмки не более 50 мин. Короткий временной интервал между съёмками и высокое пространственное разрешение РСА-данных $O(100\text{ м})$ открывают принципиально новую возможность для детального исследования динамики поверхностного слоя СЛО и протекающих в нём динамических процессов.

Для демонстрации возможности восстановления горизонтальной скорости поверхностных течений в работе использовались изображения S-1A/B SAR-C на тестовом участке СЛО, расположенном в проливе Фрама (отмечен жёлтой рамкой на *рис. 1*). Всего было проанализировано 104 РСА-изображения за сентябрь 2017 г., из которых для дальнейшего анализа выбирались парные квазисинхронные РЛИ. Все отобранные изображения были получены в режиме съёмки Extra-Wide swath mode (тип продукта GRD — Ground Range Detected) с пространственным разрешением 90 м. В настоящей работе в качестве иллюстрации представлен анализ пары РЛИ Sentinel-1 за 17 сентября 2017 г., полученных в 07:12 UTC (S-1A) и 08:00 UTC (S-1B) с разницей по времени в 48 мин.

Общая последовательность анализа квазисинхронных изображений S-1 сводится к выполнению следующих действий:

- 1) калибровка и фильтрация изображений для каждой пары;
- 2) выделение пересекающихся фрагментов для пары РЛИ и их нормализация;
- 3) расчёт полей горизонтальной скорости для подготовленных фрагментов парных РЛИ с использованием современных методик оценки скорости по квазисинхронным последовательностям изображений (например, работы (Afanasyev et al., 2002; Chen, 2011; Korotaev et al., 2008; Qazi et al., 2014)).

Калибровка изображений S-1 и расчёт удельной эффективной площади рассеяния радиолокационного (РЛ) сигнала проводились согласно работе (Miranda, Meadows, 2015) в среде Mathworks © Matlab. Далее из изображений удалялся тренд в направлении дальности РСА, после чего проводилось сглаживание фильтром Винера (Lim, 1990) с размером скользящего окна 5×5 пикселей. Общее положение двух РЛИ S-1 за 17 сентября 2017 г. и область их пересечения в районе пролива Фрама показаны на *рис. 2а*.

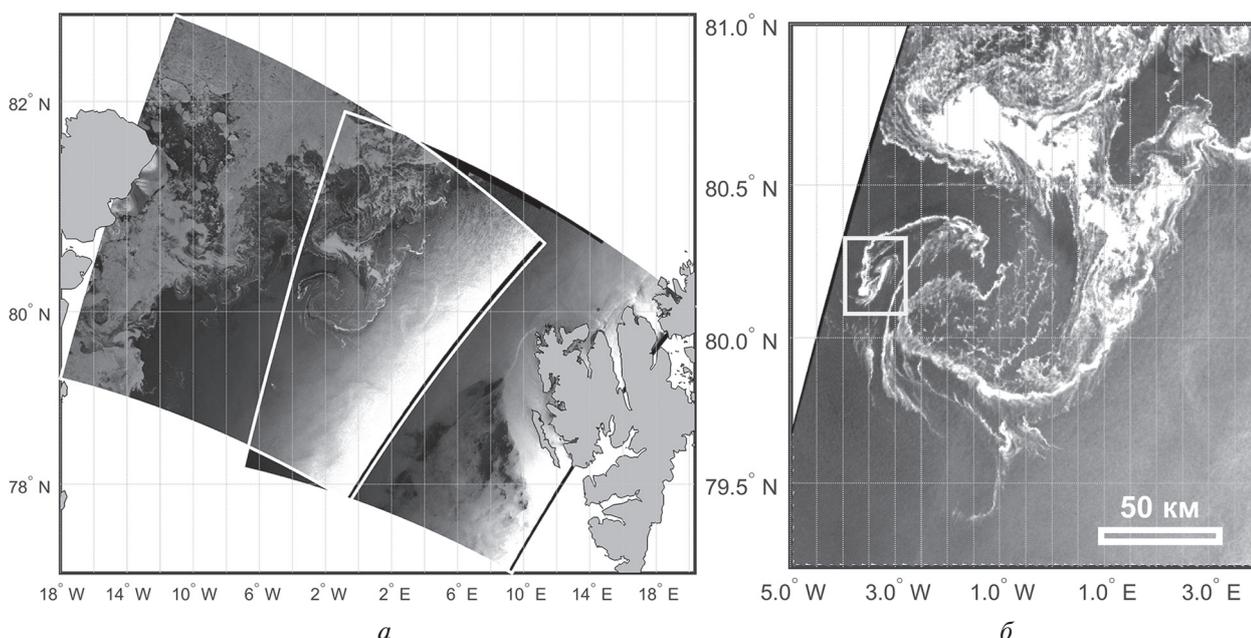


Рис. 2. Положение двух квазисинхронных РЛИ Sentinel-1A/B за 17 сентября 2017 г. в районе пролива Фрама (*а*). Фрагмент РЛИ Sentinel-1A за ту же дату (07:12 UTC) с отчётливым проявлением антициклонического вихря в прикромочной зоне льда (*б*)

На *рис. 2б* показан увеличенный фрагмент РЛИ S-1A (17.09.2017 в 07:12 UTC), на котором отчётливо отобразилось проявление крупного антициклонического вихря с диаметром около 80–90 км в прикромочной ледовой зоне (ПЛЗ) над глубинами около 2000–3000 м. На периферии этого вихря наблюдается формирование вихревого диполя с более выраженной за счёт скопления мелкобитого льда циклонической частью диаметром около 10 км (отмечена белой рамкой на *рис. 2б*). В общем случае генерация и распространение вихрей сопровождаются горизонтальными неоднородностями в поле поверхностных течений и формированием выраженных зон конвергенции и дивергенции течений (Johannessen et al., 2005; Kudryavtsev et al., 2014). В случае наблюдения вихрей ПЛЗ при малых и умеренных ветрах их поверхностные и РЛ-проявления формируются за счёт скопления дрейфующего льда в зонах конвергенции течений и, как следствие, более интенсивного обратного рассеяния от таких участков поверхности по сравнению с областями открытой воды (Johannessen et al., 1987; Kozlov et al., 2019).

Формирование вихрей в ПЛЗ и на ледовой кромке в проливе Фрама является частым явлением и весьма подробно описано в литературе (Bourke et al., 1987; Johannessen et al., 1987; Smith et al., 1984; Wadhams, Squire, 1983). В этих работах было показано, что основными механизмами генерации вихрей ПЛЗ являются: а) баротропная либо бароклинная неустойчивость струи прикромочного течения на периферии Восточно-Гренландского течения на фоне переменного ветра; б) топографическая генерация вихрей над глубоководными впадинами и возвышениями; в) взаимодействие ледовой кромки с вихрями, отрывающимися от струи тёплого Западно-Шпицбергенского течения и рециркулирующими на запад; г) генерация вихрей на распреснённом фронте под влиянием неоднородной экмановской накачки вдоль меандрирующей ледовой кромки. При этом генерация большинства вихрей происходила под влиянием сразу нескольких механизмов (Johannessen et al., 1987). Время жизни таких вихрей обычно составляет около 20–30 дней, а диаметр — 20–40 км (Johannessen et al., 1987), в редких случаях достигая 60 км (Wadhams, Squire, 1983). В этом смысле антициклон, показанный на *рис. 2б*, является аномально крупным. В РЛИ его границы отчётливо выделялись в течение 8–10 дней с 14 по 23 сентября 2017 г., после чего он был заполнен льдом и прижат к прикромочной зоне. Возможной причиной формирования такого крупного короткоживущего антициклона могло служить наблюдавшееся в начале сентября вторжение холодного воздуха с севера, которое привело к формированию узкой, вытянутой на юг полосы льда и её дальнейшей эволюции в антициклонический вихрь под влиянием юго-восточного ветра и одной из ветвей рециркуляции атлантической воды в этом районе.

Результаты

Фрагмент РЛИ, представленный на *рис. 2б*, был использован для дальнейшего анализа и определения поля горизонтальной скорости поверхностных течений. На *рис. 3* (см. с. 182) представлено поле течений для фрагмента РЛИ с большим антициклоническим вихрем, где для лучшей наглядности векторы течений нанесены на исходное РЛИ (см. *рис. 3а*), а также показаны вместе с абсолютными значениями поля скорости (см. *рис. 3б*). Поле скорости было рассчитано на основе метода максимальной кросс-корреляции (Emery et al., 1986) с размером скользящего окна 30×30 пикселей. На *рис. 4* (см. с. 182) показано аналогичное поле для увеличенного фрагмента РЛИ с меньшим циклоническим вихрем. Как видно на *рис. 3* и *4*, общая геометрия полученного поля течений хорошо соответствует наблюдаемым в РЛИ структурам. В районе наблюдения крупного антициклона в поле течений отмечается выраженный антициклонический круговорот (см. *рис. 3*), подтверждая тем самым знак вращения вихря, установленный на основе визуального анализа РЛИ. Аналогичная ситуация наблюдается для меньшего по размеру циклонического вихря (см. *рис. 4*).

На *рис. 3б* представлено поле горизонтальной скорости течений для первого фрагмента. Как видно на рисунке, в поле течений отчётливо прослеживается усиление горизонтальной скорости в области антициклонического вихря со значениями скорости, достигающими 0,5–0,7 м/с. Среднее значение орбитальной скорости антициклонического вихря составляет

около 0,5 м/с. Согласно данным скаттерометра ASCAT, поле ветра на момент РСА-съёмки характеризовалось малыми ветрами до 5 м/с юго-восточного направления (<http://siows.soi-sobnet.ru/permalink/5cd6a1540741c600412455a2>). Принимая, что скорость ветрового дрейфа льдин не превышает 3 % от скорости ветра, можно сделать вывод, что дрейфовая компонента скорости составит не более 0,15 м/с. Учитывая, что максимальные скорости приливных течений в данном районе достигают 0,1–0,15 см/с, а спутниковая съёмка приходится на период квадратурного прилива, результирующая орбитальная скорость вращения вихря за вычетом ветровой и приливной компонент течений составит около 0,2–0,4 м/с. Близкие значения (0,3–0,4 м/с) наблюдались ранее в этом районе ПЛЗ по данным прямых измерений (см., например, работу (Johannessen et al., 1987)).

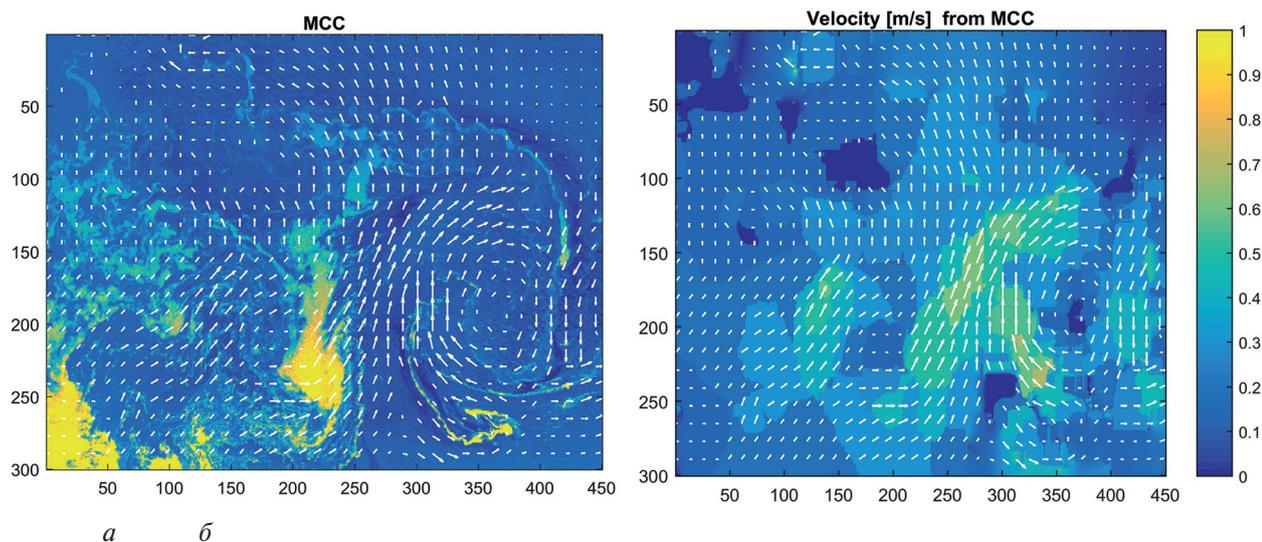


Рис. 3. Поле течений, рассчитанное на основе метода максимальной кросс-корреляции по двум квазисинхронным РЛИ Sentinel-1A/B за 17 сентября 2017 г. в районе пролива Фрама, наложенное на РЛИ (а). Соответствующее поле горизонтальной скорости и направления течений (б)

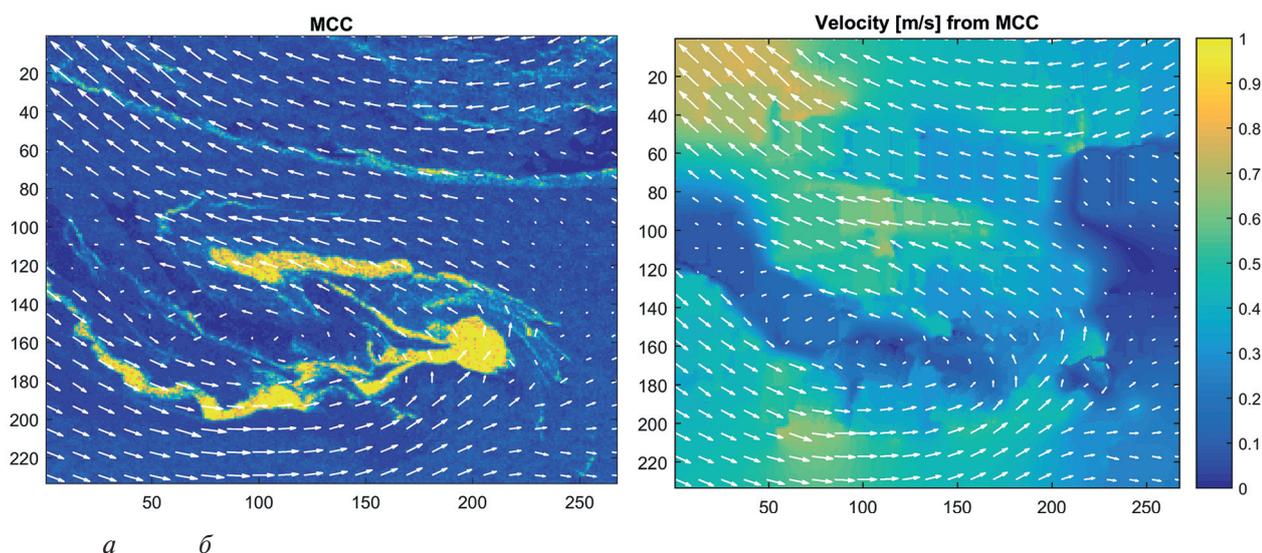


Рис. 4. То же, что на рис. 3, только для увеличенного фрагмента РЛИ с проявлением циклонического вихря

Согласно рис. 4б, скорости течений в районе меньшего циклонического вихря достигают 0,6–0,7 м/с (средняя скорость — 0,5 м/с), а в верхней левой части фрагмента, соответствующей

положению узкого филамента, они достигают 0,7–0,8 м/с. Важно отметить, что полученные значения скорости хорошо согласуются с результатами работы (Von Arnen et al., 2018), в которой авторами выполнен анализ динамической структуры циклонического филамента в прикромочной зоне пролива Фрама в июле 2017 г.

На основе значений максимальной скорости ($\sim 0,7$ м/с) и размера вихря (~ 10 км) можно оценить величину относительной завихренности, которая в данном случае равна $\zeta = \Delta v / \Delta x = 0,7 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1} / 10^4 \text{ м} \approx 0,5f$, где значение параметра Кориолиса $f = 2\omega \cdot \sin \theta = 1,433 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ для широты $\theta = 80,2^\circ$ с. ш. (соответствует центру вихря). В этом случае число Россби имеет значение $Ro = \zeta / f = 0,5$, а следовательно, наблюдаемый вихрь относится, согласно принятой зарубежной классификации, к промежуточному интервалу между субмезомасштабными и мезомасштабными движениями, где существенную роль начинает играть агеострофическая динамика. Формирование выраженных зон конвергенции течений, в которых происходит интенсивное скопление мелкобитого льда, хорошо видно на увеличенном фрагменте РЛИ (см. рис. 4а).

Заключение

В настоящей работе продемонстрированы новые возможности по использованию квазисинхронных спутниковых измерений РСА Sentinel-1А/В для определения горизонтальной скорости течений и орбитальной скорости вращения вихрей на акватории Северного Ледовитого океана. Новизна работы обусловлена запуском в 2014–2016 гг. двух новых полярно-орбитальных спутников Sentinel-1А и Sentinel-1В, частота измерений которых в полярных областях Земли достигает 2–4 раз в сутки с разницей по времени между ближайшими съёмками в 40–50 мин.

На основе использования метода максимальной кросс-корреляции для пары изображений Sentinel-1 сентября 2017 г. в районе пролива Фрама рассчитано поле горизонтальной скорости течений. В полученном поле течений отчётливо идентифицируются вихревые образования различного размера и знака вращения. Общая геометрия полученного поля течений хорошо соответствует наблюдаемым в РЛИ структурам, а средние значения орбитальной скорости вихрей согласуются с результатами натурных измерений.

Без детального обсуждения механизмов формирования наблюдаемых вихревых структур в работе показано, что последовательные РСА-изображения могут быть успешно использованы для восстановления полей горизонтальной скорости в прикромочной ледовой зоне. Описанная методология анализа квазисинхронных спутниковых РСА-данных может служить основой для исследования динамических процессов верхнего слоя Северного Ледовитого океана как в субмезомасштабном интервале пространственно-временной изменчивости (малые вихри и короткопериодные внутренние волны), так и на больших масштабах (мезомасштабные и синоптические вихри) на безлёдных участках акватории и в прикромочной ледовой зоне.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 18-77-00082. Спутниковые данные Sentinel-1А/В были получены из архивов системы Европейских центров морских прогнозов Copernicus Open Access Hub (<https://scihub.copernicus.eu>).

Литература

1. Afanasyev Y. D., Kostianoy A. G., Zatsepin A. G., Poulain P.-M. Analysis of velocity field in the eastern Black Sea from satellite data during the Black Sea'99 experiment // J. Geophysical Research: Oceans. 2002. V. 107. No. C8. P. 1–7.
2. Atadzhanova O. A., Zimin A. V., Romanenkov D. A., Kozlov I. E. Satellite radar observations of small eddies in the White, Barents and Kara Seas // Physical Oceanography. 2017. V. 2. P. 75–83.
3. Bourke R. H., Tunnicliffe M. D., Newton J. L., Paquette R. G., Manley T. O. Eddy near the Molloy Deep revisited // J. Geophysical Research: Oceans. 1987. V. 92. No. C7. P. 6773–6776.

4. *Chen W.* Nonlinear inverse model for velocity estimation from an image sequence // *J. Geophysical Research*. 2011. V. 116. No. C6.
5. *Emery W.J., Thomas A. C., Collins M.J., Crawford W.R., Mackas D. L.* An objective method for computing advective surface velocities from sequential infrared satellite images // *J. Geophysical Research: Oceans*. 1986. V. 91. No. C11. P. 12865–12878.
6. *Iakovlev N. G.* Arctic Ocean modeling: the consistent physics on the path to the high spatial resolution // *The Ocean in Motion*. Cham: Springer, 2018. P. 559–567.
7. *Ivanov V.V., Alexeev V.A., Repina I., Koldunov N.V., Smirnov A.* Tracing Atlantic water signature in the Arctic sea ice cover east of Svalbard // *Advances in Meteorology*. 2012. V. 2012(201818).
8. *Johannessen J. A., Johannessen O. M., Svendsen E., Shuchman R., Manley T., Campbell W.J., Josberger E. G., Sandven S., Gascard J. C., Olaussen T., Davidson K., Van Leer J.* Mesoscale eddies in the Fram Strait marginal ice zone during the 1983 and 1984 Marginal Ice Zone Experiments // *J. Geophysical Research: Oceans*. 1987. V. 92. No. C7. P. 6754–6772.
9. *Johannessen J. A., Kudryavtsev V., Akimov D., Eldevik T., Winther N., Chapron B.* On radar imaging of current features: 2. Mesoscale eddy and current front detection // *J. Geophysical Research: Oceans*. 2005. V. 110. No. C7.
10. *Karimova S. S.* Spiral eddies in the Baltic, Black and Caspian seas as seen by satellite radar data // *Advances in Space Research*. 2012. V. 50. No. 8. P. 1107–1124.
11. *Korotaev G. K., Huot E., Le Dimet F.X., Herlin I., Stanichny S.V., Solovyev D.M., Wu L.* Retrieving ocean surface current by 4-D variational assimilation of sea surface temperature images // *Remote Sensing of Environment*. 2008. V. 112. No. 4. P. 1464–1475.
12. *Kozlov I. E., Kudryavtsev V. N., Johannessen J. A., Chapron B., Dailidiene I., Myasoedov A. G.* ASAR imaging for coastal upwelling in the Baltic Sea // *Advances in Space Research*. 2012. V. 50. P. 1125–1137.
13. *Kozlov I., Kudryavtsev V., Zubkova E., Atadzhanova O., Zimin A., Romanenkov D., Myasoedov A., Chapron B.* SAR observations of internal waves in the Russian Arctic seas // *Proc. IGARSS*. Milan, 2015. P. 947–949.
14. *Kozlov I. E., Zubkova E. V., Kudryavtsev V.N.* Internal solitary waves in the Laptev Sea: first results of spaceborne SAR observations // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2017. V. 14. No. 11. P. 2047–2051.
15. *Kozlov I. E., Artamonova A. V., Manucharyan G. E., Kubryakov A. A.* Eddies in the Western Arctic Ocean from spaceborne SAR observations over open ocean and marginal ice zones // *J. Geophysical Research: Oceans*. 2019. V. 124. Iss. 9. P. 6601–6616.
16. *Kudryavtsev V. N., Kozlov I. E., Chapron B., Johannessen J. A.* Quad-polarization SAR features of ocean currents // *J. Geophysical Research: Oceans*. 2014. V. 119. No. 9. P. 6046–6065.
17. *Lavrova O., Mityagina M.* Satellite Survey of internal waves in the Black and Caspian Seas // *Remote Sensing*. 2017. V. 9. No. 9. 892 p.
18. *Lim J. S.* Two-dimensional Signal and Image Processing. New Jersey: Prentice Hall, 1990. 710 p.
19. *Mensa J. A., Timmermans M.-L., Kozlov I. E., Williams W.J., Özgökmen T.* Surface drifter observations from the Arctic Ocean's Beaufort Sea: Evidence for submesoscale dynamics // *J. Geophysical Research: Oceans*. 2018. V. 123. No. 4. P. 2635–2645.
20. *Miranda N., Meadows P.J.* Radiometric Calibration of S-1 Level-1 Products Generated by the S-1 IPF. Technical Note ESA-EOPG-CSCOP-TN-0002. European Space Agency, 2015. 13 p.
21. *Mityagina M. I., Lavrova O. Y., Karimova S. S.* Multi-sensor survey of seasonal variability in coastal eddy and internal wave signatures in the north-eastern Black Sea // *Intern. J. Remote Sensing*. 2010. V. 31. No. 17–18. P. 4779–4790.
22. *Morozov E. G., Kozlov I. E., Shchuka S.A., Frey D. I.* Internal tide in the Kara Gates Strait // *Oceanology*. 2017. V. 57. No. 1. P. 8–18.
23. *Qazi W.A., Emery W.J., Fox-Kemper B.* Computing ocean surface currents over the coastal California current system using 30-min-lag sequential SAR images // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2014. V. 52. P. 7559–7580.
24. *Smith D. C., Morison J. H., Johannessen J. A., Untersteiner N.* Topographic generation of an eddy at the edge of the East Greenland Current // *J. Geophysical Research: Oceans*. 1984. V. 89. No. C5. P. 8205–8208.
25. *Von Appen W.J., Wekerle C., Hehemann L., Schourup-Kristensen V., Konrad C., Iversen M. H.* Observations of a submesoscale cyclonic filament in the marginal ice zone // *Geophysical Research Letters*. 2018. V. 45. No. 12. P. 6141–6149.
26. *Wadhams P., Squire V.A.* An ice-water vortex at the edge of the East Greenland Current // *J. Geophysical Research*. 1983. V. 88. No. C5. P. 2770–2780.
27. *Zimin A. V., Kozlov I. E., Atadzhanova O. A., Chapron B.* Monitoring short-period internal waves in the White Sea // *Izvestia, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2016. V. 52. No. 9. P. 951–960.

Dynamics of eddies in the Arctic Ocean from quasi-synchronous Sentinel-1 SAR observations

I. E. Kozlov, E. V. Plotnikov

Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol 299011, Russia
E-mails: igor.eko@gmail.com, ev.plotnikov@yandex.ru

In this work, we demonstrate new possibilities for retrieval of horizontal surface current and eddy orbital velocities from quasi-synchronous spaceborne Sentinel-1A/B images over the Arctic Ocean. The novelty of the presented work is based on the availability of close-in-time SAR overpasses (up to 2–4 per day) at time intervals not exceeding 40–50 minutes, that became available after the launch of new polar-orbit Sentinel-1A/B satellites in 2014–2016. Based on the maximum cross-correlation method, a pair of Sentinel-1 SAR images over the Fram Strait marginal ice zone is used to calculate horizontal surface current velocity field that possess distinct signatures of eddies of different size and vorticity sign. An overall structure of surface current field agrees well with dynamic features seen in satellite data. Mean orbital velocities of observed eddies are found to be around 0.4–0.5 m/s, in good agreement with earlier field observations over this region. Presented methodology for the analysis of spaceborne SAR data may serve as a basis for investigation of both small- and large-scale dynamic processes in the upper Arctic Ocean over ice-free regions and in marginal ice zone.

Keywords: ocean eddies, orbital eddy velocities, spaceborne radar observations, Fram Strait, marginal ice zone, the Arctic Ocean

Accepted: 04.03.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-178-186

References

1. Afanasyev Y. D., Kostianoy A. G., Zatsepin A. G., Poulain P.-M., Analysis of velocity field in the eastern Black Sea from satellite data during the Black Sea'99 experiment, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2002, Vol. 107, No. C8, pp. 1–7.
2. Atadzhanova O. A., Zimin A. V., Romanenkov D. A., Kozlov I. E., Satellite radar observations of small eddies in the White, Barents and Kara Sea, *Physical Oceanography*, 2017, Vol. 2, pp. 75–83.
3. Bourke R. H., Tunnicliffe M. D., Newton J. L., Paquette R. G., Manley T. O., Eddy near the Molloy Deep revisited, *J. Geophysical Research: Oceans*, 1987, Vol. 92, No. C7, pp. 6773–6776.
4. Chen W., Nonlinear inverse model for velocity estimation from an image sequence, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2011, Vol. 116, No. C6.
5. Emery W. J., Thomas A. C., Collins M. J., Crawford W. R., Mackas D. L., An objective method for computing advective surface velocities from sequential infrared satellite images, *J. Geophysical Research: Oceans*, 1986, Vol. 91, No. C11, pp. 12865–12878.
6. Iakovlev N. G., Arctic Ocean Modeling: The Consistent Physics on the Path to the High Spatial Resolution, *The Ocean in Motion*, Cham: Springer, 2018, pp. 559–567.
7. Ivanov V. V., Alexeev V. A., Repina I., Koldunov N. V., Smirnov A., Tracing Atlantic Water signature in the Arctic sea ice cover east of Svalbard, *Advances in Meteorology*, 2012, Vol. 2012(201818).
8. Johannessen J. A., Johannessen O. M., Svendsen E., Shuchman R., Manley T., Campbell W. J., Josberger E. G., Sandven S., Gascard J. C., Olaussen T., Davidson K., Van Leer J., Mesoscale eddies in the Fram Strait marginal ice zone during the 1983 and 1984 Marginal Ice Zone Experiments, *J. Geophysical Research: Oceans*, 1987, Vol. 92, No. C7, pp. 6754–6772.
9. Johannessen J. A., Kudryavtsev V., Akimov D., Eldevik T., Winther N., Chapron B., On radar imaging of current features: 2. Mesoscale eddy and current front detection, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2005, Vol. 110, No. C7.
10. Karimova S. S., Spiral eddies in the Baltic, Black and Caspian seas as seen by satellite radar data, *Advances in Space Research*, 2012, Vol. 50, No. 8, pp. 1107–1124.
11. Korotaev G. K., Huot E., Le Dimet F. X., Herlin I., Stanichny S. V., Solovyev D. M., Wu L., Retrieving ocean surface current by 4-D variational assimilation of sea surface temperature images, *Remote Sensing of Environment*, 2008, Vol. 112, No. 4, pp. 1464–1475.
12. Kozlov I. E., Kudryavtsev V. N., Johannessen J. A., Chapron B., Dailidiene I., Myasoedov A. G., ASAR imaging for coastal upwelling in the Baltic Sea, *Advances in Space Research*, 2012, Vol. 50, pp. 1125–1137.

13. Kozlov I., Kudryavtsev V., Zubkova E., Atadzhanova O., Zimin A., Romanenkov D., Myasoedov A., Chapron B., SAR observations of internal waves in the Russian Arctic seas, *Proc. IGARSS*, Milan, 2015, pp. 947–949.
14. Kozlov I. E., Zubkova E. V., Kudryavtsev V. N., Internal solitary waves in the Laptev Sea: first results of spaceborne SAR observations, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2017, Vol. 14, No. 11, pp. 2047–2051.
15. Kozlov I. E., Artamonova A. V., Manucharyan G. E., Kubryakov A. A., Eddies in the Western Arctic Ocean from spaceborne SAR observations over open ocean and marginal ice zones, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2019, Issue 124, No. 9, pp. 6601–6616.
16. Kudryavtsev V. N., Kozlov I. E., Chapron B., Johannessen J. A., Quad-polarization SAR features of ocean currents, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2014, Vol. 119, No. 9, pp. 6046–6065.
17. Lavrova O., Mityagina M., Satellite Survey of internal waves in the Black and Caspian Seas, *Remote Sensing*, 2017, Vol. 9, 892 p.
18. Lim J. S., *Two-dimensional Signal and Image Processing*, New Jersey: Prentice Hall, 1990, 710 p.
19. Mensa J. A., Timmermans M.-L., Kozlov I. E., Williams W. J., Özgökmen T., Surface drifter observations from the Arctic Ocean's Beaufort Sea: evidence for submesoscale dynamics, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2018, Vol. 123, No. 4, pp. 2635–2645.
20. Miranda N., Meadows P. J., *Radiometric Calibration of S-1 Level-1 Products Generated by the S-1 IPF*, Technical Note ESA-EOPG-CSCOP-TN-0002, European Space Agency, 2015, 13 p.
21. Mityagina M. I., Lavrova O. Y., Karimova S. S., Multi-sensor survey of seasonal variability in coastal eddy and internal wave signatures in the north-eastern Black Sea, *Intern. J. Remote Sensing*, 2010, Vol. 31, No. 17–18, pp. 4779–4790.
22. Morozov E. G., Kozlov I. E., Shchuka S. A., Frey D. I., Internal tide in the Kara Gates Strait, *Oceanology*, 2017, Vol. 57, No. 1, pp. 8–18.
23. Qazi W. A., Emery W. J., Fox-Kemper B., Computing ocean surface currents over the coastal California current system using 30-min-lag sequential SAR images, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2014, Vol. 52, pp. 7559–7580.
24. Smith D. C., Morison J. H., Johannessen J. A., Untersteiner N., Topographic generation of an eddy at the edge of the East Greenland Current, *J. Geophysical Research: Oceans*, 1984, Vol. 89, No. C5, pp. 8205–8208.
25. Von Appen W. J., Wekerle C., Hehemann L., Schourup-Kristensen V., Konrad C., Iversen M. H., Observations of a submesoscale cyclonic filament in the marginal ice zone, *Geophysical Research Letters*, 2018, Vol. 45, No. 12, pp. 6141–6149.
26. Wadhams P., Squire V. A., An ice–water vortex at the edge of the East Greenland Current, *J. Geophysical Research*, 1983, Vol. 88, No. C5, pp. 2770–2780.
27. Zimin A. V., Kozlov I. E., Atadzhanova O. A., Chapron B., Monitoring short-period internal waves in the White Sea, *Izvestia, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2016, Vol. 52, No. 9, pp. 951–960.