

# **О проявлении вихревых структур на радиолокационных изображениях**

**С.С. Каримова**

*Институт космических исследований РАН*  
*E-mail: feba@list.ru*

В статье освещается вопрос проявления на радиолокационных изображениях морской поверхности гидродинамических (преимущественно вихревых) структур с помощью сдвигово-волнового механизма. В качестве экспериментальной базы задействованы радиолокационные изображения Envisat ASAR, полученные в 2009-2010 гг. над различными участками акваторий Черного и Балтийского морей. При использовании мульти- и моносенсорного подходов анализа спутниковых изображений были получены разнообразные убедительные свидетельства, по которым исследуемые вихревые структуры должны рассматриваться как океанические, а не атмосферные.

**Ключевые слова:** океанические вихри, спиральные вихри, радиолокационные изображения, Envisat ASAR, Черное море, Балтийское море.

## **Введение**

Благодаря высокому пространственному разрешению спутниковые радиолокационные изображения (РЛИ) морской поверхности представляют собой важнейший источник информации о приповерхностных гидродинамических процессах морей и океанов. В частности, известно, что различные (по масштабам и происхождению) вихревые структуры могут проявляться на РЛИ посредством четырех механизмов: сликового (пленочного), сдвигово-волнового, термического и ледового [1-2].

Первый и наиболее часто встречающийся механизм обусловлен подавлением гравитационно-капиллярных волн поверхностными пленками естественного происхождения, которые в результате конвергенции образуют на поверхности воды нитевидные слики, закручивающиеся в спирали [3-4]. Этот механизм проявляется при скоростях ветра около 3-5 м/с, при которых короткие гравитационно-капиллярные волны, вызывающие брэгговское рассеяние радиолокационного сигнала, уже появляются, а ветер еще не оказывает разрушительного воздействия на поверхностные пленки [1]. Этот механизм если не наиболее изучен, то, по крайней мере, наиболее известен.

Второй механизм обусловлен определенным взаимодействием гравитационно-капиллярных волн и сдвиговых течений («сдвигово-волновой механизм») и проявляется в виде закрученных в спирали или дуги областей повышенного рассеяния сигнала [5]. В различных случаях этот механизм проявляется по-разному в зависимости от геометрии съемки, интенсивности сдвигового течения, скорости ветра и пр. В [1] указано, что благодаря сдвигово-волновому механизму вихревые структуры могут проявляться на РЛИ при скоростях ветра до 12 м/с.

Третий механизм связан с изменением характеристик атмосферного пограничного слоя в области гидрологического термического фронта, а следовательно, и скорости ветра в этой области [1-2].

Наряду с механизмами, присущими исключительно радиолокационным методам зондирования, на РЛИ вихревые структуры могут визуализироваться и подобно тому, как

это происходит на радиометрических изображениях видимого диапазона, если на поверхности воды или в ее близи находятся какие-либо трассеры, например, лед («ледовый механизм»).

Подробные иллюстрации проявления указанных механизмов на РЛИ Черного и Балтийского морей можно найти в работах [6-7].

В процессе проведения оперативного спутникового мониторинга Черного, Балтийского и Каспийского морей, осуществляемого в ИКИ РАН в 2009-2010 гг., был проанализирован значительный массив радиолокационных данных для этих акваторий. В частности, для акватории Черного моря за указанный период было получено более 600 изображений Envisat ASAR и ERS-2 SAR, для Балтийского – более 800. Подробную информацию о технологии мониторинга и его основных результатах можно найти в [7].

В результате анализа указанных изображений было установлено, что около 90% вихревых структур, детектируемых на РЛИ Черного и Балтийского морей, визуализируются с помощью сливового механизма, а оставшиеся 10% – с помощью сдвигово-волнового [6]. При этом относительно вихрей, проявленных с помощью поверхностных пленок, как правило, не возникает сомнений в том, что они отражают динамику именного поверхностного слоя морских вод, а не какие-либо атмосферные явления.

Относительно вихрей, визуализированных с помощью сдвигово-волнового механизма, этого сказать нельзя. Во-первых, внешний характер их проявления на РЛИ (с помощью областей повышенного рассеяния сигнала) очень схож с проявлениями некоторых явлений в атмосфере (в частности, сдвигов в поле скорости приповерхностного ветра). Во-вторых, как правило, такие вихри встречаются на РЛИ посреди достаточно бурной картины проявления атмосферных явлений.

Таким образом, возникает необходимость более детального рассмотрения случаев проявления на РЛИ вихревых структур, обусловленных сдвигово-волновым взаимодействием, с целью привести максимально убедительные свидетельства того, что рассматриваемые структуры относятся к классу океанических, а не атмосферных. Этому вопросу и посвящена данная работа. В последующих разделах статьи сначала рассматриваются доказательства, полученные на основе мультисенсорного подхода при анализе спутниковых изображений, а затем – с помощью моносенсорного подхода, т.е. на основе исключительно радиолокационных данных.

## 1. Способы применения мультисенсорного подхода

Каким же образом возможно провести доказательство того, что обнаруженная на РЛИ структура является вихрем именно в морской среде? Наиболее закономерный ход – это привлечение каких-либо дополнительных квазисинхронных спутниковых или контактных данных для рассматриваемой акватории, которые так же продемонстрировали бы наличие этой вихревой структуры.

В рамках этого направления для ряда случаев было проведено сопоставление вихревой картины, обнаруженной на РЛИ, с соответствующей гидродинамической ситуацией, выявленной по спутниковым радиометрическим изображениям. К сожалению, возможности этой методики доказательства достаточно ограничены. Во-первых, восстановленные по спутниковым данным карты температуры поверхности моря (ТПМ), которые представ-

ляют собой один из самых информативных продуктов в плане выделения гидродинамических структур, обладают достаточно низким пространственным разрешением (~1 км). Во вторых, очень часто спутниковым радиометрическим наблюдениям изучаемых акваторий препятствует облачный покров. Тем не менее, некоторые примеры такого сопоставления заслуживают рассмотрения.

На РЛИ, полученном 21.12.2009 г. в 19:48 GMT для юго-западной оконечности акватории Черного моря (рис. 1а), можно заметить многочисленные дугообразные области повышенного рассеяния; некоторые из этих светлых дугообразных линий обнаруживают тенденцию к завихрению. Характер расположения этих линий позволил сделать предположение, что данные вихревые структуры образовались в результате сдвиговой неустойчивости течений на некоторых фронтах в пределах Основного черноморского течения.

При рассмотрении карты ТПМ для данной акватории, полученной по данным AVHRR NOAA 21.12.2009 г., было установлено, что в этой акватории действительно наблюдается значительное количество неустойчивых термических фронтов (рис. 1б). Черными «булавками» на рисунке отмечено положение вихревых структур, детектированных на РЛИ.

Тем не менее, установить полное соответствие фронтовых структур, детектированных на РЛИ и проявившихся в поле температуры, не представляется возможным из-за различия в пространственном разрешении анализируемых изображений.

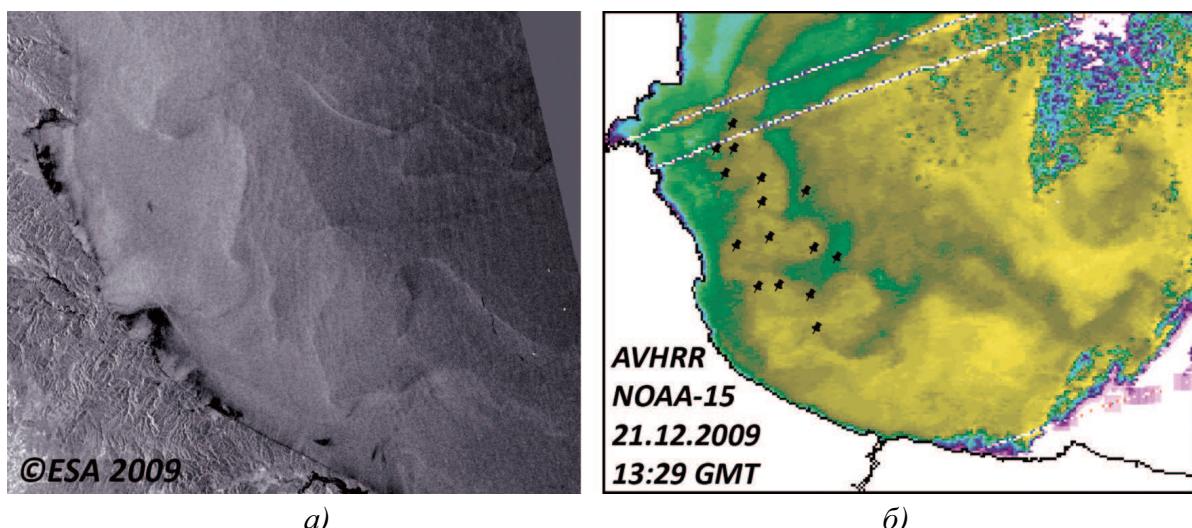


Рис. 1. Сопоставление полученных квазисинхронно РЛИ и карты ТПМ для юго-западной части Черного моря: а) РЛИ Envisat ASAR IMM, 21.12.2009, 19:48 GMT; б) ТПМ AVHRR NOAA-15 от 21.12.2009, 13:29 GMT. «Булавками» отмечено положение детектированных на РЛИ вихревых структур

Другим спутниковым радиометрическим продуктом, практически не уступающим по детальности представления гидродинамических структур радиолокационным данным, являются синтезированные в естественных цветах изображения, полученные во время бурного цветения водорослей или цианобактерий [8]. Результаты сопоставления РЛИ с этим типом изображений иллюстрирует следующий пример.

На РЛИ, полученном 01.08.2008 г. в 09:03 GMT и отображающем акваторию юго-восточной части Балтийского моря, помимо многочисленных вихревых структур, проявившихся с помощью сливкового механизма, была детектирована цепочка из трех вихрей,

протянувшаяся вдоль побережья к западу от Хельской косы. Фрагмент этого РЛИ представлен на рис. 2а; положение трех упомянутых вихрей указано стрелками. Как можно заметить из рисунка, самый восточный из трех вихрей (№3) проявился с помощью сликового механизма, в то время как вихри №1 и 2 заметны лишь благодаря некоторым вариациям яркости изображения.

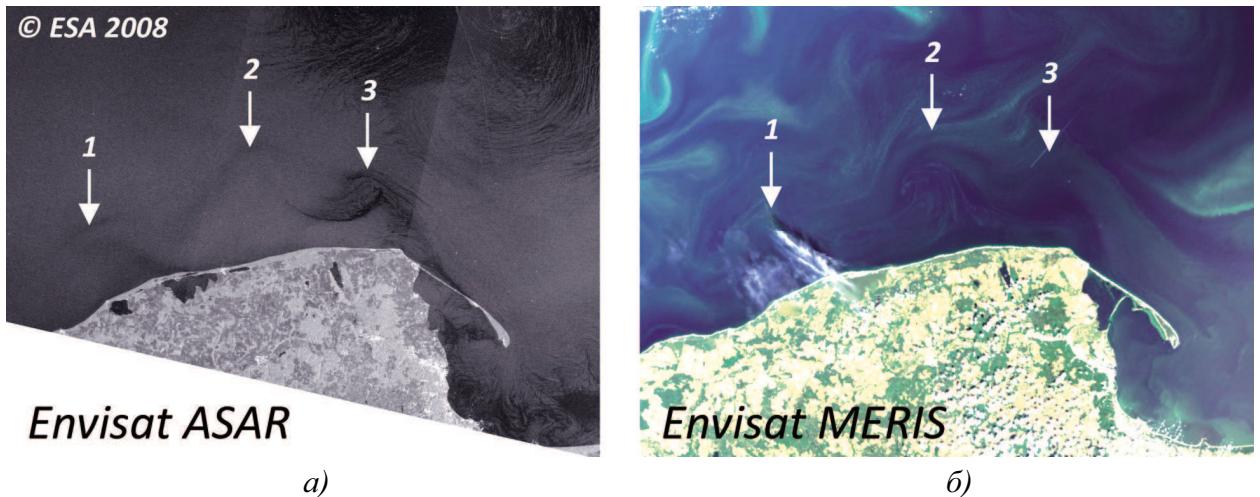


Рис. 2. Сопоставление полученных квазисинхронно РЛИ и оптического изображения для юго-восточной части Балтийского моря: а) Envisat ASAR 01.08.2008 г., 09:03 GMT; б) Envisat MERIS 31.07.2008 г., 09:34 GMT (каналы 7, 5, 2)

Это РЛИ было сопоставлено с изображением Envisat MERIS, синтезированным в естественных цветах (каналы 7, 5, 2) и полученным для этой же акватории за сутки до РЛИ – 31.07.2008 г. в 09:34 GMT. Фрагмент этого изображения представлен на рис. 2б. Благодаря наличию в поверхностном слое морских вод большого количества клеток цианобактерий на этом изображении очень хорошо проявились разнообразные вихревые структуры и в том числе цепочка из трех вихрей, детектированная на РЛИ. Особенно отчетливо и детально трассерами был «прорисован» вихрь №2.

Таким образом, на основе сопоставления квазисинхронных радиолокационных и радиометрических данных видимого диапазона было получено свидетельство «океаничности» вихревых структур, проявившихся на РЛИ лишь незначительными вариациями яркости.

## 2. Способы применения моносенсорного подхода

Значительно более обширные свидетельства «океаничности» исследуемых вихревых структур были получены на основе моносенсорного подхода – при анализе исключительно радиолокационных данных. При этом было рассмотрено несколько способов доказательства – как прямых, так и косвенных.

### 2.1. Сравнение квазисинхронных РЛИ для одной и той же акватории

В этом случае было проанализировано два РЛИ для северо-западной части Черного моря, полученные в один и тот же день (28.07.2009 г.) при утреннем и вечернем пролете спутника. Результаты сопоставления представлены на рис. 3.

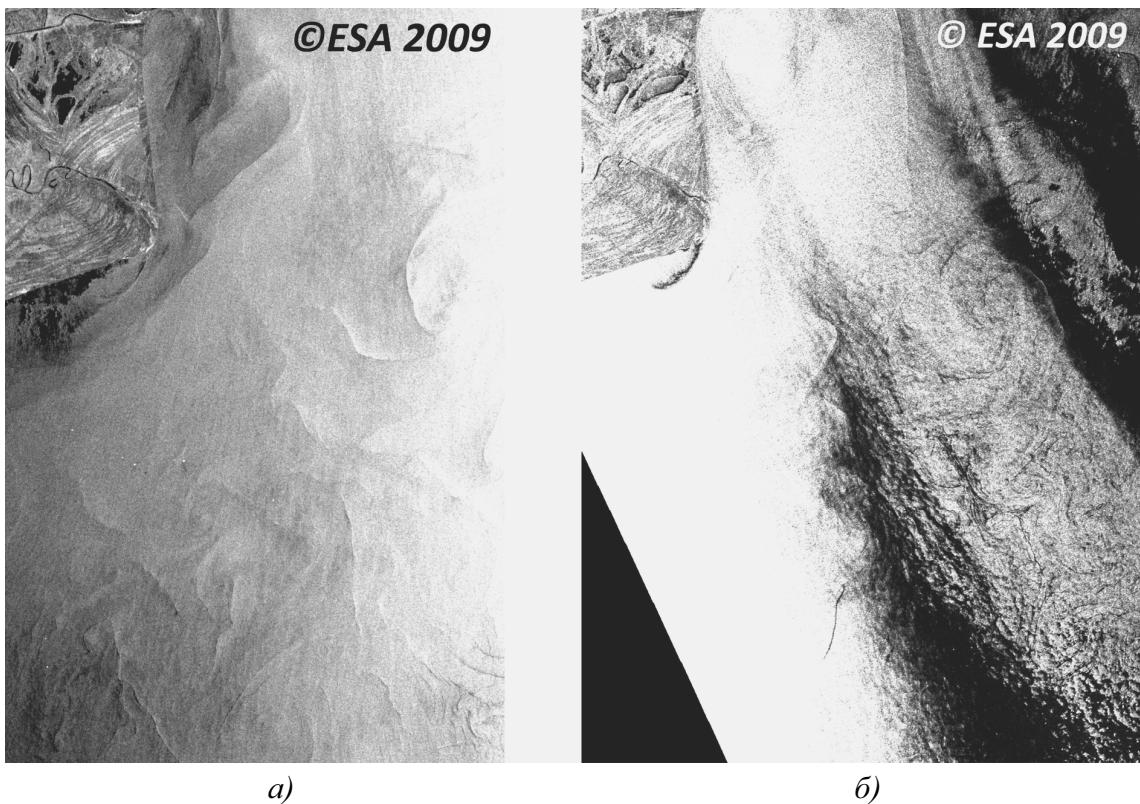


Рис. 3. Сопоставление РЛИ Envisat ASAR, полученных у западного побережья Черного моря 28.07.2009 г. в 08:17 GMT (а) и в 19:38 GMT (б)

При утренней съемке (рис. 3а) скорость ветра была достаточно высокой, поэтому вихревые структуры проявились исключительно с помощью сдвигово-волнового взаимодействия. При вечерней съемке с понижением скорости ветра (рис. 3б) стало возможным проявление на РЛИ поверхностных пленок.

Как можно заметить из предложенных изображений, слики значительно более детально отражают расположение и внутреннюю структуру вихрей (рис. 3б), чем фронтальные линии, проявляющиеся при сдвигово-волновом механизме (рис. 3а). Другой вывод, который можно сделать из этого примера, касается главенства скорости ветра при переходе от сликового к сдвигово-волновому механизму, а не наличия трассеров – поверхностных пленок. Учитывая небольшую разницу во времени при получении сравниваемых изображений, можно заключить, что пленки присутствовали и при утренней съемке тоже, но не могли оказать влияние на формирование РЛИ.

## 2.2. Наблюдение перехода от одного механизма к другому в пределах одного изображения

Принимая во внимание указанное выше главенство скорости ветра при переходе между различными механизмами проявления вихрей на РЛИ, можно предположить, что при достаточно резком изменении скорости ветра в пределах акватории, охваченной одним РЛИ, возможно наблюдение перехода от одного механизма к другому не на последовательных во времени изображениях (как продемонстрировано в предыдущем разделе), а в пределах одного РЛИ. Такие случаи действительно были зафиксированы.

На рис. 4а представлен фрагмент РЛИ, на котором в непосредственной близости вихри проявились с помощью сликов (обозначены цифрой 1) и с помощью сдвигово-волнового взаимодействия (цифра 2).

Для РЛИ Балтийского моря также характерно непосредственное соседство проявления пары механизмов ледовый – сдвигово-волновой. На рис. 4б продемонстрирован один из таких примеров. Представленный фрагмент РЛИ отображает акваторию на выходе из Финского залива в собственно море. С помощью льда, который в данном случае представляет собой область пониженного рассеяния, на РЛИ прослеживается циклонически закручивающийся вихрь, центр которого обозначен цифрой 3. К югу от него благодаря сдвигово-волновому механизму можно заметить более крупную антициклоническую структуру (цифра 4).

В отличие от предыдущего случая (пара механизмов сливочный – сдвигово-волновой), непосредственная близость проявления ледового и сдвигово-волнового механизмов может быть неслучайной. Вопрос о возможном влиянии кромки льда как на вихреобразование, так и на особенности проявления вихрей в прикромочной области требует дополнительного исследования.

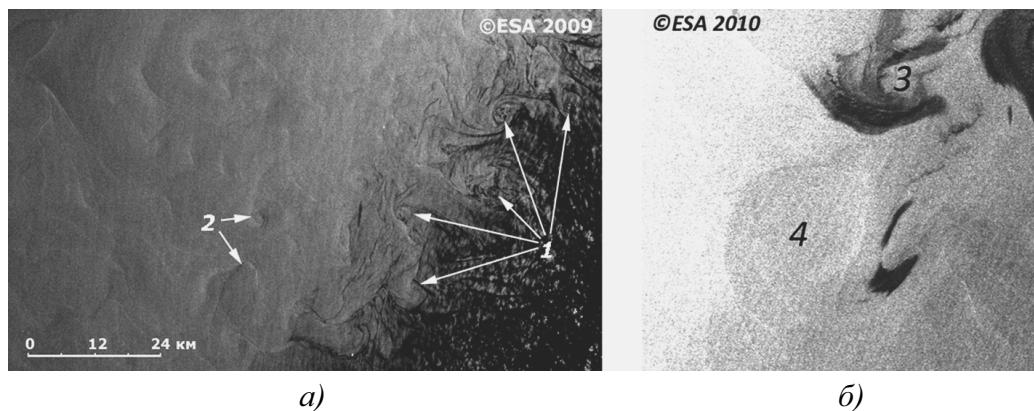


Рис. 4. Совместное проявление на РЛИ Envisat ASAR различных механизмов при визуализации вихревых структур: а) 13.08.2009 г., 08:15 GMT; западная часть Черного моря; 1 –сликовый, 2 –сдвигово-волновой механизмы; б) 25.01.2010 г., 19:54 GMT; Балтийское море; 3 –ледовый, 4 –сдвигово-волновой механизмы

### 2.3. Наблюдение перехода от одного механизма к другому в пределах одной вихревой структуры

В этом разделе рассматриваются примеры того, как происходит переход от одного механизма к другому не только в пределах одного РЛИ, но и в пределах одной вихревой структуры на этом РЛИ. Разумеется, такие случаи встречаются при анализе РЛИ достаточно редко.

На рис. 5а представлен фрагмент РЛИ, полученного 30.06.2010 г. над акваторией Балтийского моря. В частности, изображенный на рисунке вихрь эллипсовидной формы был обнаружен в Ботническом заливе. Как можно видеть на представленном фрагменте, восточная половина этой вихревой структуры проявлена с помощью сливков, а западная – с помощью сдвигово-волнового взаимодействия.

Еще более уникальный случай продемонстрирован на рис. 5б. Представленная на этом рисунке вихревая структура была обнаружена в Черном море близ Анатолийского побережья. Как следует из рисунка, почти вся структура обозначена областями с вариациями яркости изображения, характерными для сдвигово-волнового механизма, и только в центральной части вихря он частично проявлен с помощью достаточно широкого слика, который в момент съемки еще был в состоянии противостоять разрушающему действию ветра и волнения.

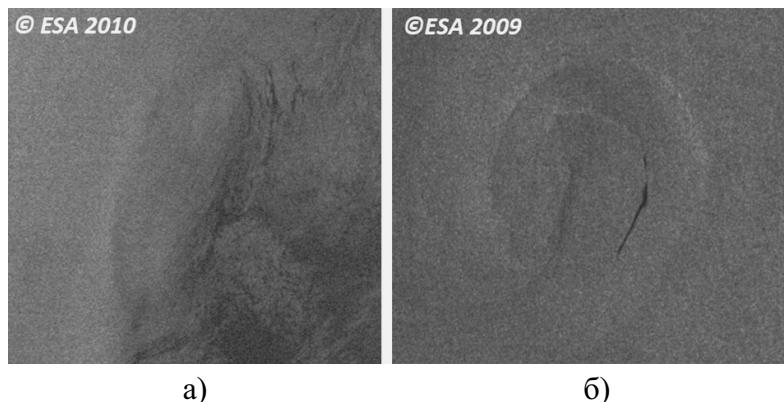


Рис. 5. Проявление на РЛИ Envisat ASAR различных механизмов в пределах одной вихревой структуры:  
а) 30.06.2010 г., 19:51 GMT, Ботнический залив; б) 22.10.2009 г., 08:17 GMT, Черное море

#### 2.4. Наблюдение вихрей, обусловленных береговой топографией

Как известно, при определенных особенностях береговой топографии (например, в заливах полукруглой формы) вихри могут образовываться особенно часто [9].

Обратимся к рис. 6а, на котором представлен участок акватории Балтийского моря к востоку от о. Рюген. Как можно заметить из рисунка, проявившиеся на РЛИ фронтальные линии как бы замыкают очертания заливов о. Рюген до окружности, что приводит нас к заключению, что в этих заливах образовались вихревые структуры.

На рис. 6б представлен аналогичный пример для акватории Черного моря у Анатолийского побережья, где практически постоянно происходит образование антициклонических и циклонических вихрей различного пространственного масштаба.

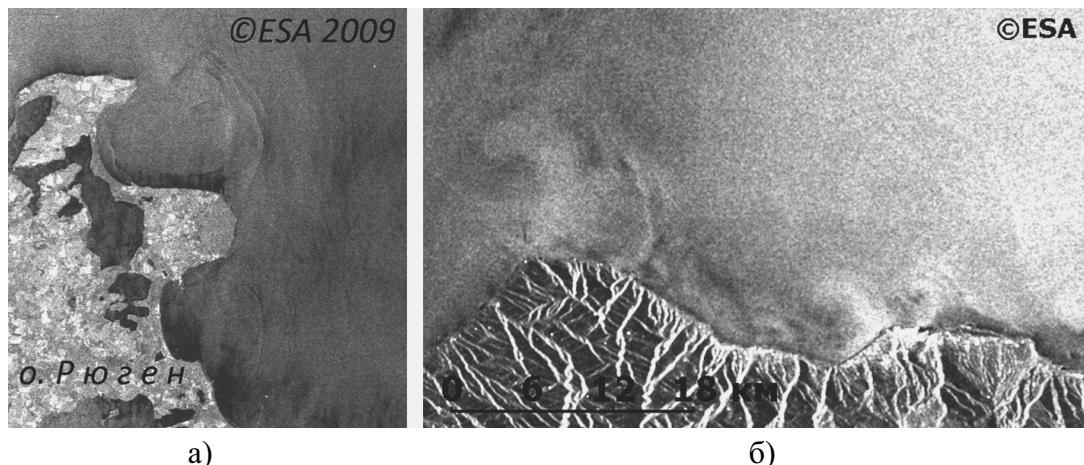


Рис. 6. Проявление с помощью сдвигово-волнового механизма на РЛИ Envisat ASAR вихрей топографического происхождения: а) 07.12.2009 г., 20:33 GMT, Балтийское море; б) 05.11.2009 г., 07:37 GMT, Черное море

#### 2.5. Наблюдение цепочек вихрей, ориентированных вдоль течений

Еще одним косвенным доказательством того, что вихревые структуры, проявления которых обсуждаются в данной статье, относятся к водной среде, а не к воздушной, является тот факт, что обнаруживаемые на РЛИ цепочки таких вихрей ориентированы, как правило, по наиболее вероятному направлению течений. В случае с атмосферными вихревыми структурами они могли бы быть ориентированы более хаотично.

Так, для Балтийского моря это прежде всего ориентация вдоль вытянутых участков акватории – Датских проливов, Финского и Ботнического заливов. В этих районах доста-

точно часто обнаружаются аналогичные цепочки вихрей, проявленные с помощью сливкового и ледового механизмов.

На рис. 7а представлен фрагмент РЛИ для акватории пролива Скагеррак, на котором очень отчетливо проявилась цепочка из трех циклонических вихрей.

Проведенные наблюдения показали, что особенно часто с помощью сдвигово-волнового механизма проявляются цепочки вихрей или, по крайней мере, огибающие этих цепочек в юго-западной части Балтийского моря перед входом в пр. Зунд.

Для акватории Черного моря такими прогнозируемыми направлениями течений являются прежде всего те, которые ориентированы вдоль береговой черты или бровки шельфа, что соответствует направлению Основного черноморского течения. На рис. 7б представлен пример проявления на РЛИ достаточно крупных вихревых структур и в том числе цепочки вихрей, ориентированной вдоль Кавказского побережья. Структуры, аналогичные представленным на данном рисунке, очень часто проявляются на радиометрических изображениях AVHRR NOAA и MODIS Aqua акватории Черного моря [10].

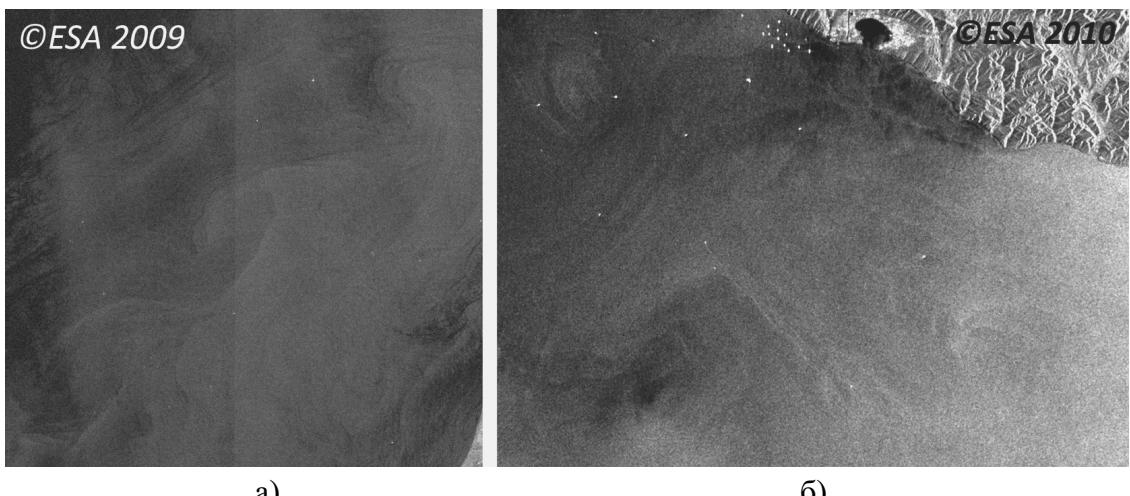


Рис. 7. Проявление с помощью сдвигово-волнового механизма на РЛИ вихревых структур, ориентированных по направлению течения: а) Envisat ASAR 11.09.2009 г. 09:43 GMT, пр. Скагеррак; б) ERS-2 SAR 12.03.2010 г. 08:14 GMT, Черное море

## Заключение

На основе мульти- и моносенсорного подходов анализа спутниковых изображений в работе было показано, что, несмотря на большое сходство в проявлении с атмосферными явлениями, вихри, визуализированные на РЛИ с помощью сдвигово-волнового механизма, являются океаническими, а не атмосферными.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ №08-05-00831 и №10-05-00428, а также гранта Президента РФ МК-927.2009.2. Радиолокационные данные предоставлены Европейским космическим агентством в рамках проекта AO Bear 2775. Радиометрические данные по Черному морю получены на Морском портале Морского гидрофизического института НАНУ, Севастополь.

## Литература

1. *Dokken S.T., Wahl T.* Observations of spiral eddies along the Norwegian Coast in ERS SAR images. FFI Rapport 96/01463, 1996.
2. *Johannessen J.A., Kudryavtsev V., Akimov D., Eldevik T., Winther N., and Chapron B.* On radar imaging of current features: 2. Mesoscale eddy and current front detection // *J. Geophys. Res.*, 2005, 110, C07017, doi:10.1029/2004JC002802.
3. *Espedal H.A., Johannessen O.M., Johannessen J.A., Dano E., Lyzenga D., and Knulst J.C.* COASTWATCH '95: A tandem ERS-1/2 SAR detection experiment of natural film on the ocean surface // *J. Geophys. Res.*, 1998, 103, 24969-24982.
4. *Alpers W., Huhnerfuss H.* The damping of ocean waves by surface films: A new look at an old problem // *J. Geophys. Res.*, 1989, 94, C5, 6251–6265.
5. *Johannessen J.A., Digranes G., Espedal H., Johannessen O.M., Samuel P., Browne D., Vachon P.* SAR ocean feature catalogue // ESA Publication Division, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands:1994. 106 p.
6. *Каримова С.С.* Исследование субмезомасштабных вихрей Черного и Балтийского морей по радиолокационным и радиометрическим спутниковым данным // «Журнал радиоэлектроники», 2010. №10 (в печати).
7. *Лаврова О.Ю., Каримова С.С., Митягина М.И., Бочарова Т.Ю.* Оперативный спутниковый мониторинг акваторий Черного, Балтийского и Каспийского морей в 2009-2010 годах // Настоящий выпуск.
8. *Lavrova O., Karimova S., Mityagina M.* Eddy activity in the Baltic Sea retrieved from satellite SAR and optical data // Proceedings of the Third International Workshop SeaSAR 2010. 25-29 January 2010. ESRIN, Frascati, Italy.
9. *Гинзбург А.И.* Нестационарные вихревые движения в океане // *Океанология*, 1992. Т. 32. Вып. 6. С. 997-1004.
10. *Каримова С.С.* Вихревые течения в Черном море // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов. Сборник научных статей. Выпуск 5. Т. II. М.: ООО «Азбука-2000», 2008. С. 95-101.

## About vortical structures manifestation in satellite radar images

S. Karimova

Space Research Institute of RAS  
E-mail: [feba@list.ru](mailto:feba@list.ru)

The paper scrutinizes the peculiarities of hydrodynamic (predominantly vortical) structures manifestation in satellite radar images due to wave-current interaction. The study is based on Envisat ASAR and ERS-2 SAR images obtained in 2009-2010 in different parts of the Black and Baltic Seas. Thanks to multisensor and monosensor approaches some evidences of oceanic origination (instead of atmospheric) of detected vortical structures were obtained.

**Keywords:** oceanic eddies, spiral eddies, radar images, Envisat ASAR, the Black Sea, the Baltic Sea.