

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

НАБЛЮДЕНИЕ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР БАЛТИЙСКОГО МОРЯ С ПОМОЩЬЮ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ И РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ

© 2011 г. С. С. Каримова^{1*}, О. Ю. Лаврова¹, Д. М. Соловьев²

¹Учреждение Российской академии наук Институт космических исследований РАН, Москва

²Морской гидрофизический институт Национальной академии наук Украины, Севастополь

*E-mail: feba@list.ru

Поступила в редакцию 03.09.2010 г.

В данной работе рассматриваются вопросы проявления мезомасштабных и субмезомасштабных вихревых элементов поверхностных течений Балтийского моря на спутниковых изображениях, различных по физической природе и пространственному разрешению. Исследование основано на радиолокационных изображениях (РЛИ) высокого разрешения Envisat ASAR и ERS-2 SAR, полученных в 2008–2009 гг. для различных участков акватории Балтийского моря, при использовании радиометрических изображений видимого спектра Envisat MERIS и Landsat ETM+. Рассмотрены возможные механизмы проявления вихревых структур на РЛИ акватории Балтийского моря. В результате совместного анализа указанных данных выявлены особенности проявления на спутниковых изображениях вихревых структур с учетом изменчивости оптических характеристик поверхностных вод Балтийского моря во время летнего цветения цианобактерий и весеннего цветения диатомовых водорослей.

Ключевые слова: радиолокация, Envisat ASAR, ERS-2 SAR, радиометрические данные, Envisat MERIS, Landsat ETM+, вихревые элементы, поверхностные течения, цианобактерии, диатомовые водоросли, Балтийское море

ВВЕДЕНИЕ

Спутниковые данные в настоящее время представляют собой весьма важный источник информации о динамике и циркуляции поверхностных вод океанов и морей.

Благодаря наличию в воде различных трассеров, на изображениях, получаемых в видимом и ИК-диапазонах спутниковыми спектрорадиометрами, находит отражение мезомасштабная изменчивость поверхностных течений, которая составляет для Балтийского моря самую энергетическую часть динамики его вод. Исследование мезомасштабных элементов поверхностных течений необходимо для понимания механизмов перемешивания и циркуляции вод бассейна, которые в значительной степени определяют метеорологические, гидродинамические и экологические условия как в открытых районах моря, так и в прибрежной зоне, что особенно актуально в условиях значительного антропогенного стресса.

Радиолокационные изображения (РЛИ), получаемые с помощью спутниковых радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны, благодаря их высокому пространственному разрешению, способны визуализировать как мезомасштабные, так и мелкомасштабные гидродинамические структуры с

характерным размером вплоть до 1 км. Механизмы генерации последних, их характеристики и вклад в перенос и перемешивание вод до сих пор остаются до конца невыясненными.

Данная работа продолжает исследования особенностей отображения вихревых гидродинамических структур на спутниковых изображениях и оценку на их основе вихревой активности бассейнов Черного и Балтийского морей, результаты которых изложены в работах (Лаврова, 2005; Митягина, Лаврова, 2009; Lavrova et al., 2008; Shcherbak et al., 2008).

В работе рассматриваются вопросы проявления мезомасштабных и субмезомасштабных вихревых элементов поверхностных течений Балтийского моря на спутниковых изображениях различной физической природы и с различным пространственным разрешением. В качестве таковых используются следующие данные: 1) РЛИ, полученные со спутников Envisat ASAR и ERS-2 SAR для различных районов Балтийского моря за 2009 г. и частично за 2008 г.; 2) цветосинтезированные изображения Envisat MERIS, Terra/Aqua MODIS и Landsat ETM+. Особенности визуализации гидродинамических структур на изображениях анализируются в связи с гидрометеорологи-



Рис. 1. Область субмезомасштабной завихренности поля поверхностных течений в Балтийском море. Envisat ASAR WSM, 25.04.2009 г. 09:09 GMT. Пространственное разрешение 150 м.

ческими и гидробиологическими условиями во время проведения космической съемки.

В разделах статьи последовательно рассматриваются следующие вопросы: возможные механизмы проявления вихревых структур на РЛИ акватории Балтийского моря; механизмы визуализации гидродинамических структур на радиометрических изображениях видимого диапазона; проявление вихревых структур на спутниковых изображениях во время летнего цветения цианобактерий и весеннего цветения диатомовых.

МЕХАНИЗМЫ ПРОЯВЛЕНИЯ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР НА РЛИ

С целью изучения особенностей проявления вихревых структур на РЛИ был проанализирован массив данных, полученных радиолокаторами с синтезированной апертурой антенны, функционирующих на спутниках ENVISAT и ERS-2. Всего было получено и проанализировано около 320 изображений среднего пространственного разрешения (150 м) для различных участков акватории Балтийского моря за период 2008–2009 гг.

В результате проведенного анализа было установлено, что вихревые структуры проявляются на РЛИ этой акватории благодаря трем различным механизмам. Рассмотрим более подробно каждый из них.

Пленочный механизм

Первый и наиболее распространенный механизм обусловлен подавлением гравитационно-капиллярных волн поверхностными пленками естественного происхождения, которые в результате конвергенции образуют на поверхности воды нитевидные слики, закручивающиеся в спирали (Alpers, Huhnerfuss, 1989; Dokken, Wahl, 1996; Espedal et al., 1998; Johannessen et al., 1994; Johannessen et al., 2005). Этот механизм наиболее хорошо известен и изучен. На рис. 1 представлен пример проявления субмезомасштабной завихренности поля поверхностных течений в юго-восточной части Балтийского моря (к северу от Куршского залива) с помощью спирально закручивающихся сликов.

Одним из характеристических признаков проявляющихся спиральных вихрей является сравнительно небольшая толщина проявляющих их на РЛИ нитевидных сликов (Yamaguchi, Kawamura, 2009). В (Eldevik, Dysthe, 2002) указывается, что эта толщина ~100 м, а расстояние между сликами составляет, как правило, величину ~1 км. Однако в некоторых из рассмотренных нами случаев наблюдалось значительное увеличение толщины сликов. В частности, на рис. 1 можно заметить, что на отдельных участках толщина сликов сопоставима с расстоянием между сликами и достигает значений 1 км и более. Учитывая прибрежное положение акваторий, в которых наблюдалось такое расширение сликов, можно предпо-

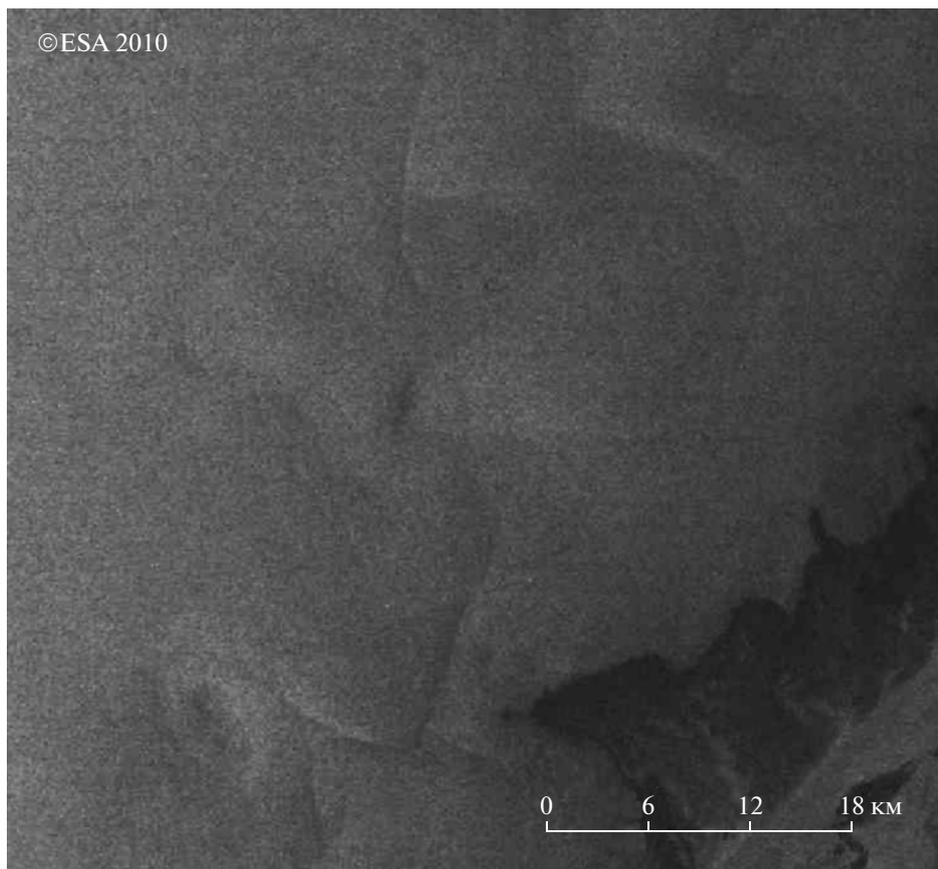


Рис. 2. Фрагмент РЛИ Envisat ASAR, полученного 09.01.2010, 19:57 GMT в юго-восточной части Ботнического залива, визуализирующий цепочку вихревых структур.

ложить, что оно обусловлено повышенными количествами пленок биогенного происхождения в связи с цветением фитопланктона. Что касается расстояния между снимками, то с уменьшением диаметра вихрей оно так же уменьшается и может составлять несколько сотен метров.

Указанный механизм проявляется при скоростях ветра около 3–5 м/с, при которых короткие гравитационно-капиллярные волны, вызывающие брэгговское рассеяние РЛ-сигнала, уже появляются, а ветер еще не оказывает разрушительного воздействия на поверхностные пленки (Dokken, Wahl, 1996).

Проведенный анализ показал, что с помощью этого механизма проявляется около 70% вихревых структур, обнаруживаемых на РЛИ в акватории Балтийского моря. Диаметр обнаруженных вихрей варьировал в пределах от 1 до 34 км с максимальной повторяемостью 3–5 км.

Сдвигово-волновой механизм

Второй механизм связан с взаимодействием волн и течений в области циклонического сдвига течения (в дальнейшем для краткости сдвигово-

волновой механизм) и проявляется в виде закрученных в спирали или дуги областей повышенного рассеяния сигнала (Johannessen et al., 1994). В различных случаях этот механизм проявляется по-разному в зависимости от геометрии съемки, интенсивности сдвигового течения, скорости ветра и пр.

Благодаря сдвигово-волновому механизму вихревые структуры могут проявляться на РЛИ при скоростях ветра до 12 м/с (Dokken, Wahl, 1996). В работе (Lavrova et al., 2010) рассмотрены некоторые случаи проявления на РЛИ вихрей в различных частях Балтийского моря посредством этого механизма; практически все рассмотренные случаи соответствовали скорости ветра 5–9 м/с.

На рис. 2 показан фрагмент РЛИ Envisat ASAR, полученного 09.01.2010 г. в 19:57 GMT (разрешение 150 м). На этом фрагменте, отражающем акваторию в юго-восточной части Ботнического залива, благодаря сдвигово-волновому механизму проявилась цепочка вихрей, протянувшаяся вдоль кромки льда. Область пониженного рассеяния сигнала в юго-восточной части рисунка соответствует морской поверхности, покрытой молодым льдом. Вихревые структуры на этом изобража-

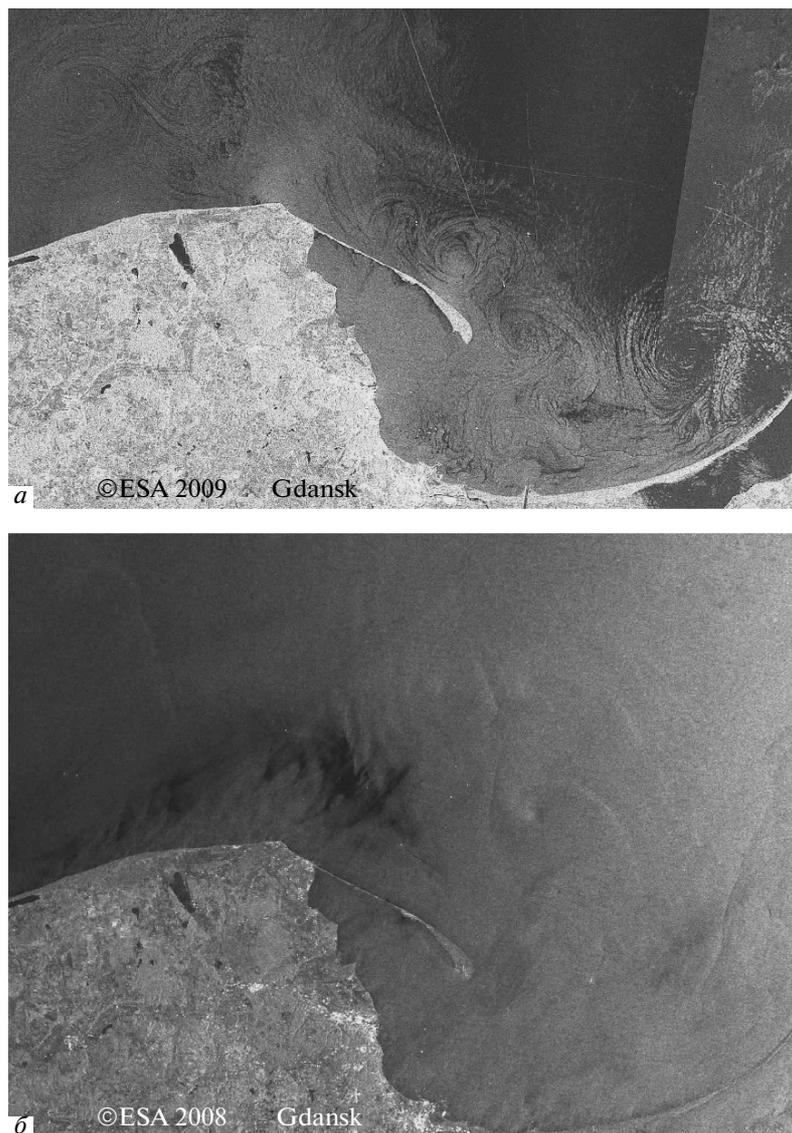


Рис. 3. Проявление вихревых структур в юго-восточной части Балтийского моря: *a* – с помощью пленочного механизма Envisat ASAR 24.08.2009, 09:08 GMT; *б* – с помощью сдвигово-волнового взаимодействия Envisat ASAR 05.04.2008, 09:12 GMT.

жени имеют более или менее четко выраженную λ -образную форму, характерную для данного механизма визуализации вихрей.

На рис. 3 представлен пример визуализации вихревых структур в одной и той же части Балтийского моря – в районе Гданьского залива, но с помощью различных механизмов. Как можно заметить, сдвигово-волновой механизм (рис. 3б) отличается значительно меньшей детальностью отображения линий тока по сравнению с пленочным механизмом (рис. 3а). В данном случае на рис. 3б вихри проявились с помощью дугообразных фронтальных структур, закручивающихся в центре вихрей; в некоторых случаях в центральных частях вихрей наблюдаются вариации рассе-

яния сигнала, и эти области приобретают эффект трехмерности изображения.

В некоторых случаях визуализирующие вихри фронтальные структуры обозначают не весь вихрь целиком, а только его часть, образуя, таким образом, некоторую огибающую цепочки вихрей. На рис. 4 представлен фрагмент изображения Envisat ASAR от 06.12.2009 г. 09:40 GMT, представляющий акваторию в юго-западной части моря в районе о. Мен. На изображении отчетливо проявилась волнообразная структура, вытянутая по направлению юго-восток–северо-запад, т.е. по направлению преобладающих в этом районе течений – в сторону пр. Зунд.

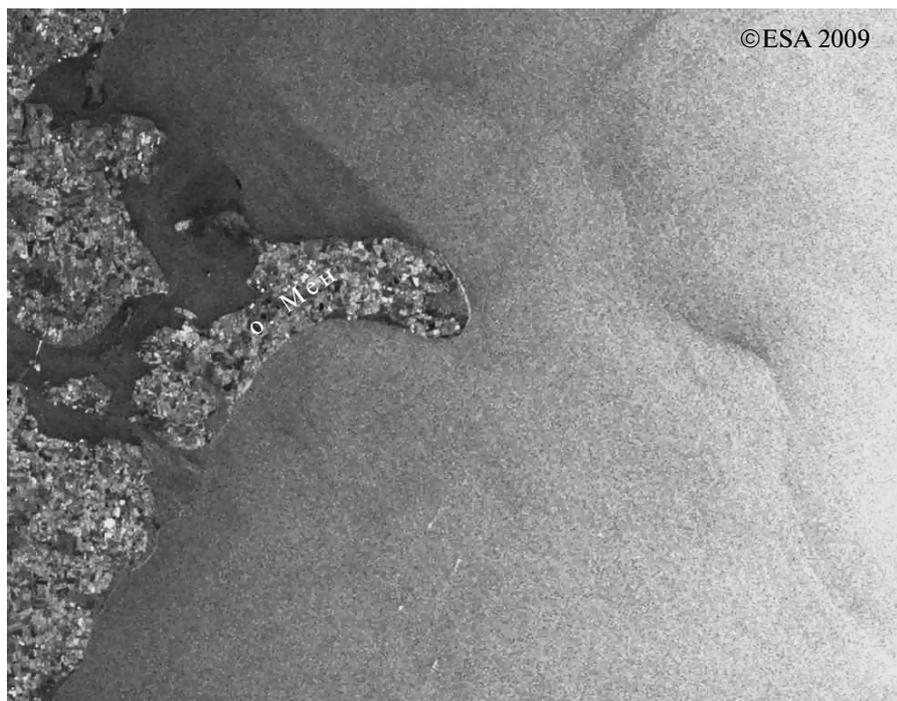


Рис. 4. Фрагмент РЛИ Envisat ASAR, полученного 06.12.2009, 09:40 GMT в юго-западной части Балтийского моря, визуализирующий огибающую цепочку вихревых структур.

Проведенный анализ показал, что с помощью сдвигово-волнового механизма проявляется около 30% вихревых структур, обнаруживаемых на РЛИ в акватории Балтийского моря. Диаметр обнаруженных вихрей, визуализированных таким образом, находится в пределах 2–27 км с максимальной повторяемостью 6 км.

Помимо юго-восточной части моря в районе Гданьского залива, частые проявления этого механизма были отмечены в юго-западной части моря, в Датских проливах, в Финском заливе и в проливе между двумя суббассейнами Ботнического залива. Таким образом, указанные ареалы распространения этого типа визуализации вихрей свидетельствуют о том, что проявлению этого механизма помимо значительной скорости приповерхностного ветра (5–9 м/с) способствуют также значительные скорости поверхностных течений.

В (Dokken, Wahl, 1996) указано, что проявления двух названных выше механизмов не встречаются на одном и том же РЛИ, и это выступало в качестве подтверждения того, что оба механизма суть проявления одного и того же явления при различной скорости ветра. Однако, следуя этой логике, можно заключить, что оба механизма могут проявляться на одном и том же изображении при условии, что скорость ветра в пределах этого изображения будет значительно варьировать. Наши наблюдения показывают, что на РЛИ, полученных над акваторией Балтийского моря, это происходит довольно часто, и потому “черные”

вихри (чье проявление обусловлено сликами) и “белые” (визуализированные сдвигово-волновым взаимодействием) могут непосредственно соседствовать на таких изображениях.

Термический механизм

Существует также третий возможный механизм проявления вихревых гидродинамических структур на РЛИ, связанный с изменением характеристик атмосферного пограничного слоя в области гидрологического термического фронта, а, следовательно, и скорости ветра в этой области (Dokken, Wahl, 1996; Johannessen et al., 1994). Проявление этого механизма в данной работе не рассматривалось.

Ледовый механизм

Мы указали механизмы, присущие практически исключительно РЛ-методам зондирования. Однако 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. На рис. 5 представлен пример визуализации льдом цепочек циклонических вихрей в проливе Каттегат. РЛИ Envisat ASAR получено 26.01.2010 г. в 09:36 GMT с разрешением 150 м.

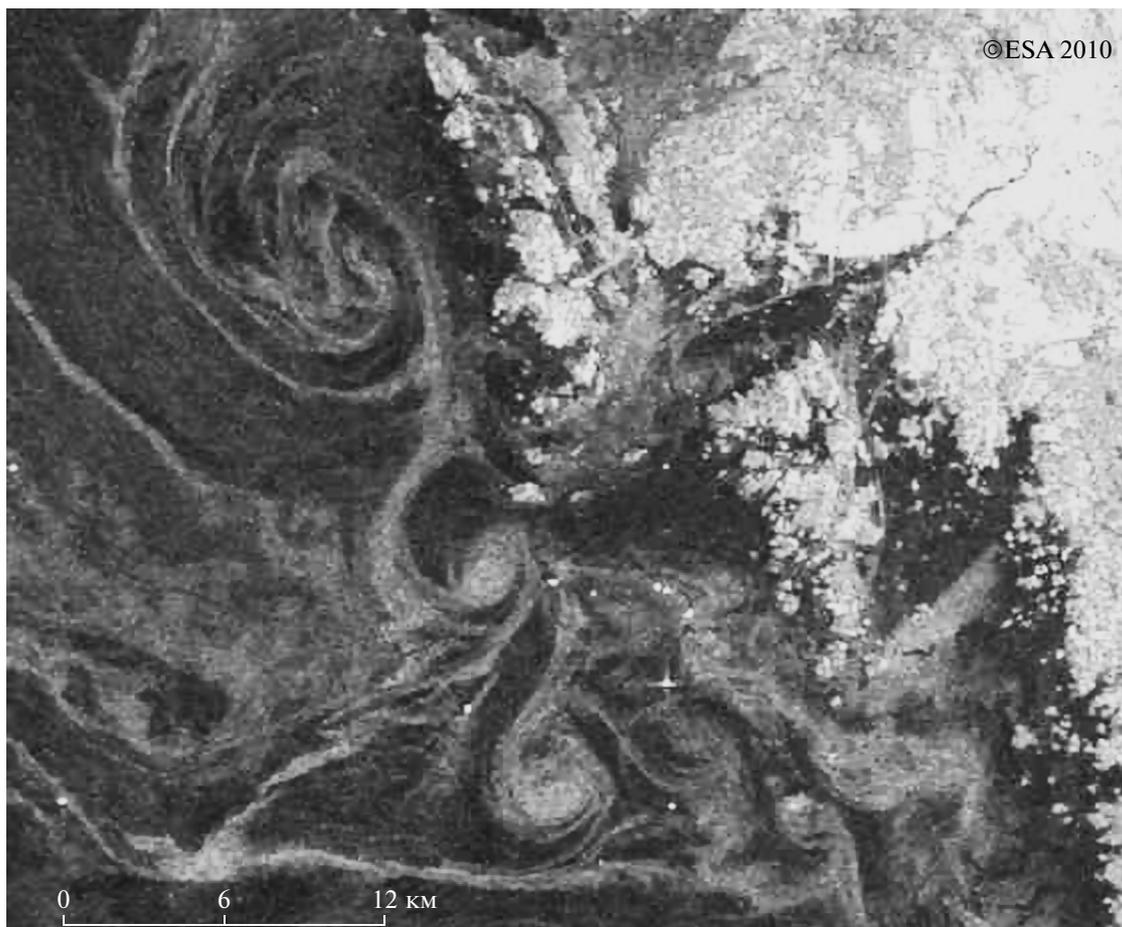


Рис. 5. Фрагмент РЛИ Envisat ASAR от 26.01.2010, 09:36 GMT, на котором с помощью ледовых трассеров отчетливо проявлены вихревые структуры в проливе Каттегат.

Ограничивающим фактором для действия данного механизма является требование к наличию трассеров – кусочков льда, поэтому отображаемые льдом вихри проявляются в тех частях моря, где либо возможно ледообразование, либо происходит вынос льда. Таким образом, наиболее часто “ледовые” вихри наблюдались в Ботническом, Финском и Рижском заливах, проливах Каттегат и Скагеррак.

ПРОЯВЛЕНИЕ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР НА РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ

Спутниковые данные в оптическом и ИК-диапазонах могут быть успешно использованы для идентификации течений, вихрей, струй и других мезомасштабных динамических структур.

Восстановленные по ИК-данным карты температуры поверхности моря (ТПМ) для различных сезонов показывают наличие в структуре ТПМ фронтальных зон, формируемых полем поверхностных течений. Типичные контрасты в та-

ких фронтальных зонах составляют 0.2° – 1° С, что способствует уверенному отображению мезомасштабных структур на картах ТПМ.

Сигнал, регистрируемый датчиками в оптическом диапазоне, определяется рассеянием на гидрозоле (фитопланктоне и взвешенных минеральных частицах), а также отражением солнечного излучения от морской поверхности, в наибольшей степени проявляющемся в зоне солнечного блика. Гидрозоли можно рассматривать как пассивные трассеры поверхностных течений, и формируемые ими фронтальные зоны, как правило, соответствуют линиям тока. Таким образом, анализ снимков позволяет выделить основные гидродинамические структуры, определяющие мезомасштабную изменчивость поля течений в изучаемом районе. Использование последовательных изображений для одной и той же акватории позволяет получить уникальную информацию о поле поверхностных течений с точностью, недостижимой для современных гидродинамических моделей.

На рис. 6 (на цветных вклейках) представлены результаты частичной реконструкции поля тече-

ний по последовательным изображениям, полученным спектрорадиометром Terra MODIS над одной и той же акваторией Балтийского моря с суточным интервалом. На более раннем изображении (рис. 6а, 28.07.2004 г.) были выбраны характерные элементы циркуляции (вихри, диполи, струи и пр.), которые могли быть распознаны также на последующем изображении (29.07.2004 г.). В пределах этих узнаваемых элементов были выбраны опорные точки; на рис. 6а они показаны синим цветом. С помощью второго изображения (от 29.07.2004 г.) были определены новые положения опорных точек (на рис. 6а отмечены красным). По расстоянию между положением синей точки и соответствующей красной можно оценить скорость перемещения частиц на рассматриваемом участке. Как можно заметить по рис. 6а, в период 28.07.2004–29.07.2004 отмечалась максимальная средняя скорость течений до 10 м/с.

На рис. 6б (на цветн.вклейках) показаны результаты аналогичных исследований, но в отношении трех последовательных изображений MODIS: 04.08.2004 г. (зеленые точки), 05.08.2004 (розовые точки) и 06.08.2004 г. (красные точки).

При определенных обстоятельствах динамические структуры могут быть непосредственно зарегистрированы на снимках оптического диапазона в зоне солнечного блика. В этом случае сигнал формируется неоднородностями морской поверхности, например, поверхностными пленками, которые выступают в качестве трассеров подобно тому, как это происходит на РЛИ.

Таким образом, использование данных оптических и тепловых сканеров позволяет получать информацию о мезомасштабных процессах и связанных с ними полях скоростей поверхностных течений, а при необходимости и осуществлять инерционный прогноз динамики вод поверхностного слоя.

ПРОЯВЛЕНИЕ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР В ПЕРИОДЫ ЦВЕТЕНИЯ ФИТОПЛАНКТОНА И ЦИАНОБАКТЕРИЙ

Изображения оптического диапазона становятся особенно информативными в плане отображения ими динамических структур в периоды бурного развития фитопланктона или других фотосинтезирующих организмов. Как известно, функционирование экосистемы Балтийского моря характеризуется двумя основными пиками цветения фитопланктона: весенним цветением диатомовых водорослей и динофлагеллят и летним цветением цианобактерий. Рассмотрим подробнее особенности проявления вихревых структур на спутниковых изображениях различной природы во время этих периодов.

Цветение цианобактерий

Цианобактерии – группа прокариотных фототрофных организмов, за способность к фотосинтезу в прошлом ошибочно называемых также синезелеными водорослями. Массовое развитие цианобактерий случается в особенно теплые периоды, когда формируется устойчивая термическая стратификация вод и происходит обеднение поверхностных вод неорганическими соединениями азота. В периоды с длительной безветренной и солнечной погодой цианобактерии объединяются в агрегаты, которые всплывают к поверхности, образуя поверхностные или подповерхностные скопления. Под воздействием ветра и течений эти скопления переносятся как пассивные трассеры, прорисовывая, таким образом, поверхностные течения (Siegel, Gerth, 2008).

Принимая во внимание факт близкповерхностного расположения агрегатов цианобактерий, было сделано предположение, что визуализированные ими вихревые структуры должны совпадать с вихрями, проявленными на РЛИ. С целью проверки этой гипотезы было проведено сопоставление полученных квазисинхронно изображений Envisat ASAR и Envisat MERIS, а также Landsat ETM+ за июль 2008 г., т.е. в период максимального развития цианобактерий.

Сопоставление было проведено для четырех случаев. Результаты одного из них продемонстрированы на рис. 7 (на цветн.вклейках). На рис. 7а представлена часть РЛИ Envisat ASAR (разрешение 150 м), полученного 23.07.2008 г. На этом изображении отчетливо проявились спиральные вихревые структуры к северо-западу от о. Готланд. В акватории к востоку от Готланда наблюдались значительные скорости ветра, а к юго-западу от него, напротив, отмечались штилевые условия; и то, и другое воспрепятствовало проявлению вихрей в этих районах. На рис. 7б представлено синтезированное в естественных цветах (композит каналов 7, 5 и 2) изображение Envisat MERIS для той же акватории, полученное примерно через 13.5 часов после РЛИ. В отличие от РЛИ (рис. 7а) наличие трассеров (агрегатов цианобактерий) позволило проявиться вихреподобным структурам на всем рассматриваемом участке изображения. На рис. 7б показан тот же фрагмент РЛИ с наложением на него наиболее ярких пикселей изображения MERIS, которые соответствуют положению вихревых структур на этом изображении. Можно заметить, что положения вихревых структур и на том, и на другом снимках находятся в очень хорошем соответствии.

Рассмотрение аналогичного случая для изображений ASAR и MERIS Envisat, полученных с суточным интервалом 01.08.2008 г. и 31.07.2008 г. (рис. 8 на цветн.вклейках), дает те же результаты.

В период летнего цветения 2009 г. было произведено сопоставление изображений Envisat ASAR и Landsat ETM+, полученных 17.07.2009 г. для юго-восточной части Балтийского моря (рис. 9 на цветн.вклейках). В этом случае можно заметить некоторые отличия в проявлении вихревых структур на том и другом изображениях. Так, прежде всего следует отметить, что вихревые структуры в западной части Гданьского залива лучше проявились на РЛИ (рис. 9а), чем на радиометрическом изображении (рис. 9б), в то время как к северу от Гданьского залива ситуация противоположная (вследствие вариаций скорости приповерхностного ветра в момент РЛ-съемки). Примечательно, что на РЛИ отчетливо проявился спиралевидный вихрь к северо-востоку от м. Таран, а на изображении ETM+ выражена только огибающая этого вихря. Это может послужить косвенным свидетельством того, что агрегаты цианобактерий и поверхностные пленки, визуализирующие вихревые структуры на РЛИ, являются взаимонезависимыми трассерами.

Цветение диатомовых

В отличие от летнего цветения, весеннее цветение обусловлено нетоксичными холодолюбивыми диатомовыми водорослями и динофлагеллятами. Эти планктонные организмы распространяются по акватории Балтийского моря в период половодья, когда в море поступает большое количество холодных речных вод.

Чтобы выяснить особенности проявления гидродинамических структур на спутниковых изображениях во время цветения диатомовых, были проанализированы изображения Envisat ASAR и Envisat MERIS за апрель 2009 г.

На рис. 10а (на цветн.вклейках) представлен фрагмент РЛИ, полученного 25.04.2009 г. над юго-восточной частью Балтийского моря. Многочисленные мелкомасштабные закручивающиеся сликовые структуры с характерным диаметром около 5 км обнаруживаются в северо-восточной части изображения, и более крупные – в его центре. На изображении Envisat MERIS, полученном за сутки до того (рис. 10б), из всех гидродинамических структур проявились лишь две цепочки циклонических вихрей: одна из более крупных вихрей в центральной части изображения, которая частично нашла отражение и на РЛИ, и другая – из более мелких, протянувшаяся от устья р. Висла к Хельской косе (на РЛИ она выражена менее четко). В центральной части Гданьского залива на обоих изображениях также проявился антициклонический вихрь.

Таким образом, в отличие от летнего цветения цианобактерий, во время весеннего цветения диатомовых в приповерхностном слое морских вод

присутствует недостаточное количество клеток, которые могли бы быть хорошими трассерами для того, чтобы отобразить все многообразие гидродинамических структур.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа РЛИ Envisat ASAR и ERS-2 SAR, полученных в различных районах Балтийского моря в 2008–2009 г., рассмотрены механизмы, благодаря которым на них могут проявляться вихревые структуры. Установлено, что основным механизмом, благодаря которому визуализируются около 70% всех вихрей, детектируемых на РЛИ этой акватории, является сликовый механизм. При определенных условиях (значительная скорость приводного ветра – в диапазоне 5–9 м/с – и высокие скорости поверхностных течений) вступает в действие сдвигово-волновой механизм, визуализирующий на РЛИ около 30% вихревых структур. Во время холодного сезона в Ботническом, Финском и Рижском заливах, а также в проливах Каттегат и Скагеррак вихри могут проявляться на РЛИ с помощью ледовых трассеров.

Проведен совместный анализ изображений Envisat ASAR и Envisat MERIS, полученных квазисинхронно в периоды летнего цветения цианобактерий и весеннего цветения фитопланктона. В результате этого анализа для случая цветения цианобактерий было установлено, что, несмотря на различия в механизмах формирования исследуемых изображений и в их пространственном разрешении, вихревые структуры, отображаемые на этих изображениях, находятся в поразительно хорошем соответствии и, следовательно, могут быть признаны объективной реальностью.

Другой важный вопрос касается источников поверхностных пленок, благодаря которым происходит проявление гидродинамических структур на РЛИ. Отмеченные в результате проведенных наблюдений случаи несоответствия в проявлении одних и тех же структур на РЛИ и на радиометрических изображениях позволили заключить, что поверхностные агрегации цианобактерий не могут служить непосредственным источником таких пленок. Таким образом, можно сделать вывод, что агрегаты цианобактерий и поверхностные пленки, визуализирующие вихревые структуры на РЛИ, являются взаимонезависимыми трассерами.

В случае с цветением диатомовых водорослей было установлено, что на радиометрических изображениях видимого диапазона в это время проявляются только наиболее крупные вихревые структуры из тех, что могут быть обнаружены на квазисинхронных РЛИ.

Работа была частично поддержана грантами РФФИ №10-05-00428 и № 11-07-12025-офи-М.

Данные Envisat ASAR и MERIS были получены в рамках проектов ЕКА АО Bear 2775 и С1Р6342.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Лаврова О.Ю. Стики как индикаторы вихревой активности в прибрежной зоне // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов / Под. ред. Лупяна Е.А., Лавровой О.Ю. Вып. 2. Т. 2. М.: GRANP polygraph, 2005 С. 118–123.

Митягина М.И., Лаврова О.Ю. Спутниковые наблюдения вихревых и волновых процессов в прибрежной зоне северо-восточной части Черного моря // Исслед. Земли из космоса. 2009. № 5. С. 72–79.

Alpers W., Huhnerfuss H. The damping of ocean waves by surface films: A new look at an old problem // J. Geophys. Res. 1989. V. 94. № C5. P. 6251–6265.

Dokken S.T., Wahl T. Observations of spiral eddies along the Norwegian Coast in ERS SAR images // FFI Report 96/01463. 1996.

Eldevik T., Dysthe K.B. Spiral eddies // J. Phys. Oceanogr. 2002. V. 32. № 3. P. 851–869.

Espedal H.A., Johannessen O.M., Johannessen J.A., Dano E., Lyzenga D., Knulst J.C. COASTWATCH'95: A tandem ERS-1/2 SAR detection experiment of natural film

on the ocean surface // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. P. 24969–24982.

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, Netherlands, 1994. 106 p.

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. Geophys. Res. 2005. V. 110. № C07017. doi:10.1029/2004JC002802.

Lavrova O., Karimova S., Mityagina M. Eddy activity in the Baltic Sea retrieved from satellite SAR and optical data // Proc. Third Int. Workshop SeaSAR 2010. 25-29 January 2010. ESRIN, Frascati, Italy.

Lavrova O., Mityagina M., Bocharova T., Gade M. Multi-channel observation of eddies and mesoscale features in coastal zones // Remote sensing of the European Seas / Eds. Barale V., Gade M. Springer Verlag, 2008. P. 463–474.

Shcherbak S.S., Lavrova O.Yu., Mityagina M.I. et al. Multi-sensor satellite monitoring of seawater state and oil pollution in the northeastern coastal zone of the Black Sea // Int. J. Rem. Sens. 2008. V. 29. № 21. P. 6331–6345.

Siegel, H., Gerth, M. Optical remote sensing applications in the Baltic Sea // Remote sensing of the European Seas / Eds. Barale V., Gade M. Springer Verlag, 2008. P. 91–102.

Yamaguchi S., Kawamura H. SAR-imaged spiral eddies in Mutsu Bay and their dynamic and kinematic models // J. Oceanogr. 2009. V. 65. № 4. P. 525–539.

Observations of Eddy Structures in the Baltic Sea by Satellite Radar and Radiometer Data

S. S. Karimova¹, O. Yu. Lavrova¹, D. M. Soloviev²

¹Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow

²Marine Hydrophysical Institute, National Academy of Sciences of Ukraine, Sevastopol

The Baltic Sea meso- and submesoscale eddies manifestations in satellite images different in physical nature and spatial resolution are considered. For this purpose Envisat ASAR, ERS-2 SAR, Envisat MERIS, Aqua/Terra MODIS and Landsat ETM+ images obtained in 2008–2009 in different parts of the Baltic Sea were used. Possible mechanisms of eddy manifestation in the Baltic Sea SAR images are scrutinized. As a result of combined analysis of the satellite data mentioned above some eddy manifestation peculiarities were revealed in dependence on different hydrometeorological, hydrobiological and optical characteristics of the surface layer. Special attention was paid to the phytoplankton and cyanobacteria blooms occasions.

Keywords: Envisat ASAR, ERS-2 SAR, Envisat MERIS, Aqua/Terra MODIS, Landsat ETM+ images, eddy/manifestations, cyanobacteria blooms, Baltic Sea

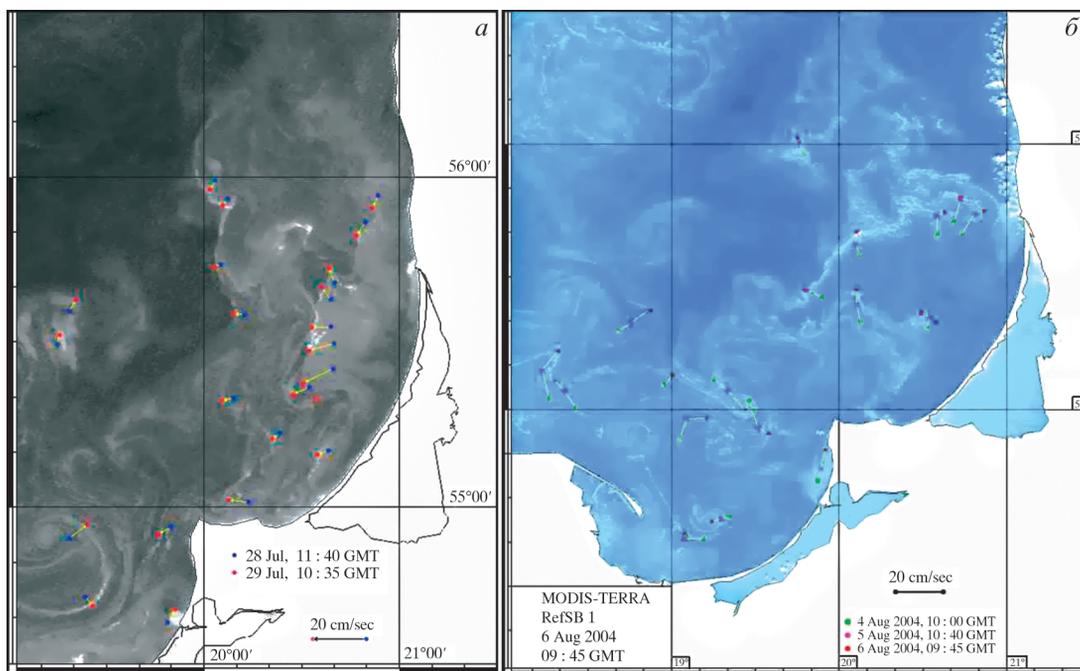


Рис. 6. Реконструкции поля течений в юго-восточной части Балтийского моря, выполненные: *а* – по паре снимков Terra MODIS за 28.07.2004 и 29.07.2004; *б* – по трем снимкам Terra MODIS за 04.08.2004, 05.08.2004 и 06.08.2004 (http://www.lukoilkmn.com/ecology/luk_kosmos.pdf).

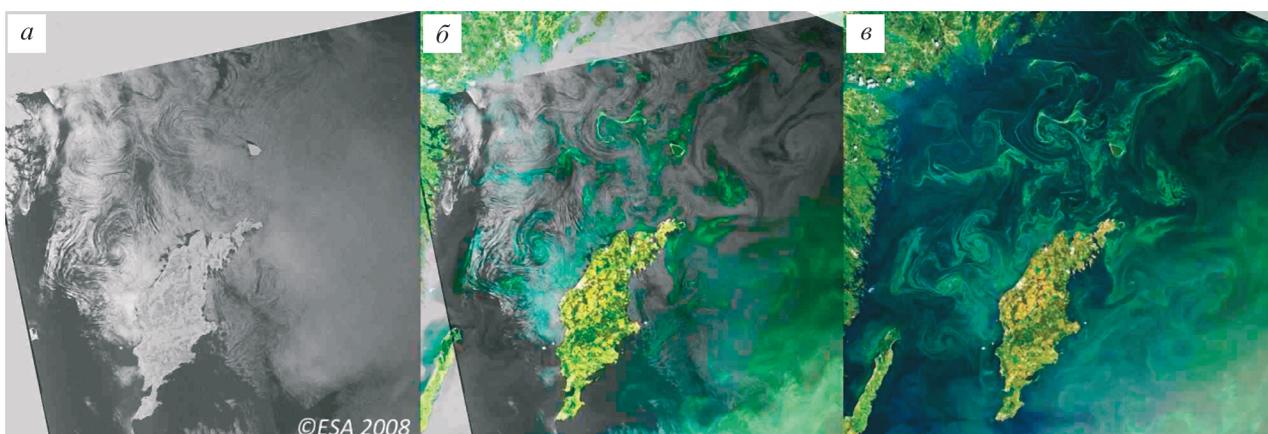


Рис. 7. Проявление вихревых структур в районе о. Готланд: *а* – Envisat ASAR от 23.07.2008, 20:11 GMT; *б* – РЛИ, совмещенное с наиболее яркими пикселями изображения MERIS, соответствующим положению вихревых структур; *в* – Envisat MERIS от 24.07.2008, 09:53 GMT.

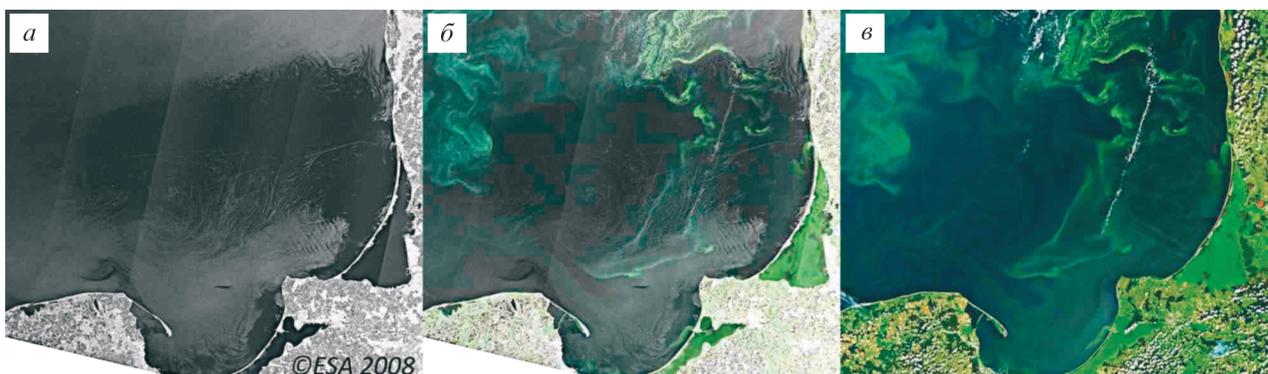


Рис. 8. Проявление вихревых структур в юго-восточной части Балтийского моря: *а* – Envisat ASAR от 01.08.2008, 09:03 GMT; *б* – РЛИ, совмещенное с наиболее яркими пикселями изображения MERIS, соответствующим положению вихревых структур; *в* – Envisat MERIS от 31.07.2008, 09:34 GMT.



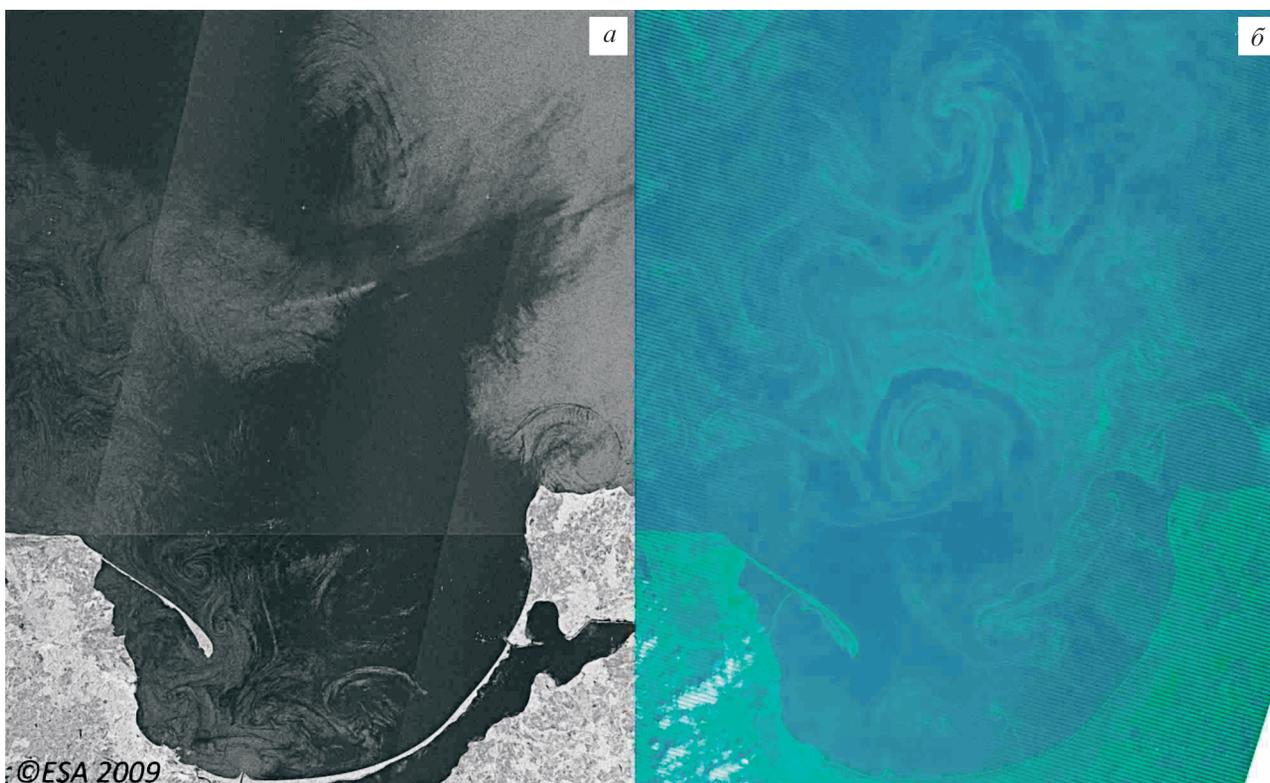


Рис. 9. Проявление вихревых структур в юго-восточной части Балтийского моря на полученных квазисинхронно спутниковых изображениях различной природы: *a* – Envisat ASAR от 17.07.2009, 09:01 GMT; *б* – цветосинтезированное изображение Landsat ETM+ от 17.07.2009, 09:33 GMT (каналы 3, 2, 1).

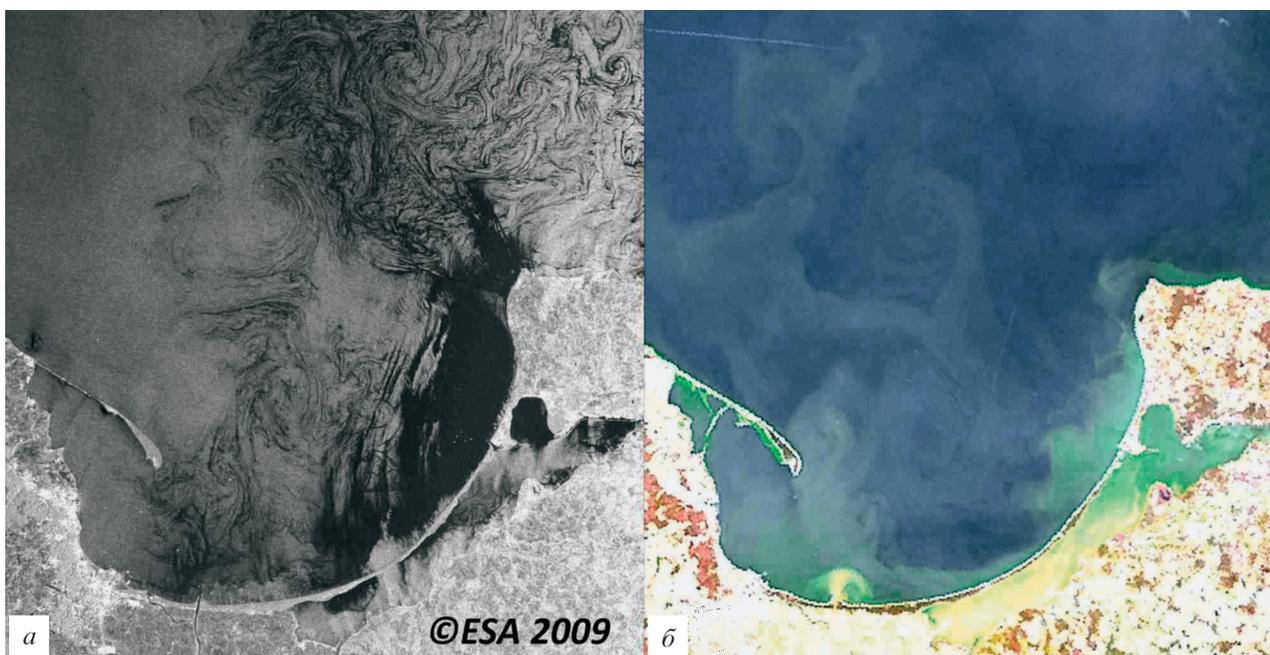


Рис. 10. Проявление вихревых структур в юго-восточной части Балтийского моря: *a* – Envisat ASAR от 25.04.2009, 09:09 GMT; *б* – синтезированное в естественных цветах изображение Envisat MERIS от 24.04.2009, 09:42 GMT.

