

УДК 551.465

## ВИХРЕВАЯ ДИНАМИКА В ЮГО-ВОСТОЧНОЙ БАЛТИКЕ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ РАДИОЛОКАЦИИ

© 2015 г. А. И. Гинзбург<sup>1</sup>, Е. В. Бульчева<sup>2</sup>, А. Г. Костяной<sup>1</sup>, Д. М. Соловьев<sup>1,3</sup><sup>1</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва  
e-mail: ginzburg@ocean.ru, kostianoy@gmail.com<sup>2</sup>Атлантическое отделение Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Калининград<sup>3</sup>Морской гидрофизический институт, Севастополь

Поступила в редакцию 03.06.2015 г., после доработки 05.06.2015 г.

Анализ радиолокационных спутниковых изображений показал, что характерный элемент циркуляции вод юго-восточной части Балтийского моря – вихревые диполи. Широкий диапазон пространственных размеров наблюдаемых вихрей (от примерно 2 до 25 км) соответствует мезомасштабным и субмезомасштабным вихревым образованиям (диаметр соответственно больше или меньше бароклинного радиуса деформации Россби, равного 5–6 км). Рассмотрены типичные для разных районов (коса Хель, м. Таран, центральная часть Гданьского залива и район севернее залива) вихревые диполи и их пространственные масштабы. Показано, что мезомасштабные вихревые диполи и связанные с ними струи могут обуславливать горизонтальный водообмен на площади, соизмеримой с размером рассматриваемой акватории. Обсуждаются различия в проявлении циклонической и антициклонической составляющих вихревого диполя на спутниковых изображениях.

DOI: 10.7868/S0030157415060064

### ВВЕДЕНИЕ

Юго-Восточная Балтика – акватория внутреннего Балтийского моря, наиболее подверженная антропогенным загрязнениям различной природы [21, 11, 12, 1, 15, 19, 20, 23, 18]. Задачи контроля экологического состояния данного бассейна и оперативной оценки наиболее вероятных путей распространения разного рода загрязнений от локальных источников определяют важность исследования механизмов горизонтального водообмена. В этом регионе (и в Балтийском море в целом) отсутствуют интенсивные постоянные течения. Вызываемые ветром дрейфовые течения непостоянны по направлению и скорости, которая обычно не превышает 10–15 см/с [3], что делает особенно актуальным выявление роли вихрей в горизонтальной циркуляции, переносе загрязнений и перемешивании вод. В частности, опыт численного моделирования распространения цепочки нефтяных пятен в центре Гданьского залива [20] и выноса богатых взвесью вод через Калининградский морской канал из Вислинского залива [12] с учетом оперативной информации о скорости ветра, определявшего течения в районе наблюдения, но без учета локальной вихревой циркуляции вод показал, что результаты моделирования могут существенно отличаться от наблюдаемой по спутниковым изображениям картины распространения загрязнений.

Мощным инструментом исследования вихревой динамики вод Балтики, как и всего Мирового океана, является дистанционное зондирование со спутников. Использование спутниковых данных видимого и инфракрасного (ИК) диапазонов спектра наблюдений циркуляции вод поверхностного слоя (включая вихри) Балтийского моря, началось в конце 1970-х–начале 1980-х годов (см. [16, 2]). Существенно более широкие возможности для изучения вихревой активности в Балтике дают современные сенсоры с хорошим пространственным и временным (от нескольких часов до нескольких суток) разрешением на спутниковых носителях; используется как зондирование в оптическом и ИК диапазонах спектра с пространственным разрешением от 30 м до 1 км, так и спутниковая радиолокация с пространственным разрешением от 25 до 100 м. Преимуществом последней является всепогодность съемки (независимость от времени суток и облачности) и высокое пространственное разрешение в полосе обзора от 100 до 500 км (см. [11]). Независимость съемки от облачности особенно важна для юго-восточной части Балтийского моря: по нашим оценкам, основанным на данных он-лайн системы Джованни (Giovanni), разработанной и поддерживаемой Годдардовским центром данных НАСА (<http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni>), эта акватория частично или полностью закрыта облаками примерно 60% времени в году.

Ряд информативных с точки зрения проявлений вихрей радиолокационных изображений (РЛИ) юго-восточной части Балтийского моря, иногда вместе с квазисинхронными спутниковыми изображениями оптического диапазона (мультисенсорный подход), представлен в работах [10, 22, 6, 8, 11, 5] и др. Однако большая часть известных работ посвящена вопросам проявления вихрей на морской поверхности. Показано, что естественным ограничением проявления вихрей на РЛИ, формирующихся в результате берегового рассеяния РЛ-сигнала гравитационно-капиллярными волнами, является диапазон скоростей ветра. Наилучшие условия визуализации вихрей на РЛИ – скорости ветра в диапазоне 2–5 м/с и наличие на поверхности пленок поверхностно-активных веществ (нефтяных пленок, пленок биогенного происхождения при цветении фитопланктона), гасящих рябь; такие пленки постоянно присутствуют на поверхности моря, особенно в теплое время года. Проявление при этом вихрей на поверхности происходит за счет вовлечения в вихревое движение сликовых полос. При больших скоростях ветра на РЛИ за счет сдвигово-волнового механизма (при взаимодействии волн и течений) в лучшем случае прорисовываются лишь контуры вихря или его центр, что часто не позволяет определить его размеры и направление вращения (см., например, [17, 10, 7, 8, 11]).

В данной статье рассмотрены роль вихревых образований в локальном горизонтальном водообмене, характерные для разных регионов Юго-Восточной Балтики вихри и их пространственные размеры, различия в проявлении на РЛИ и изображениях оптического диапазона вихрей разного направления вращения.

## ДАнные

В работе использовались спутниковые радиолокационные изображения, полученные в период 2004–2014 гг. в рамках производственного экологического мониторинга нефтяного месторождения “Кравцовское” (морская ледостойкая стационарная платформа D-6 ООО “ЛУКОЙЛ-КМН”), расположенного в Юго-Восточной Балтике [22, 11, 1, 16, 20, 19]. РЛИ были получены со спутников Envisat Европейского космического агентства (ESA) (до выхода из строя спутника в апреле 2012 г.), Radarsat-1 Канадского космического агентства (CSA) (до выхода из строя спутника 29 марта 2013 г.) и Radarsat-2 компании МакДональд, Деттвилер и Партнеры (MDA, Канада). С апреля 2013 г. используются РЛИ со спутников COSMO-SkyMed-1, -2, -3, -4 Итальянского космического агентства (ASI). Время между двумя последовательными съемками менялось от 12 часов до 3 суток. За период с 12 июня 2004 г. по 31 декабря 2014 г. было

получено и проанализировано на предмет выявления вихревых динамических структур различной природы 1845 РЛИ поверхности Юго-Восточной Балтики. Также использовано одно оптическое изображение радиометра со спутника Landsat-7 за 17 июля 2009 г., синхронное с РЛИ.

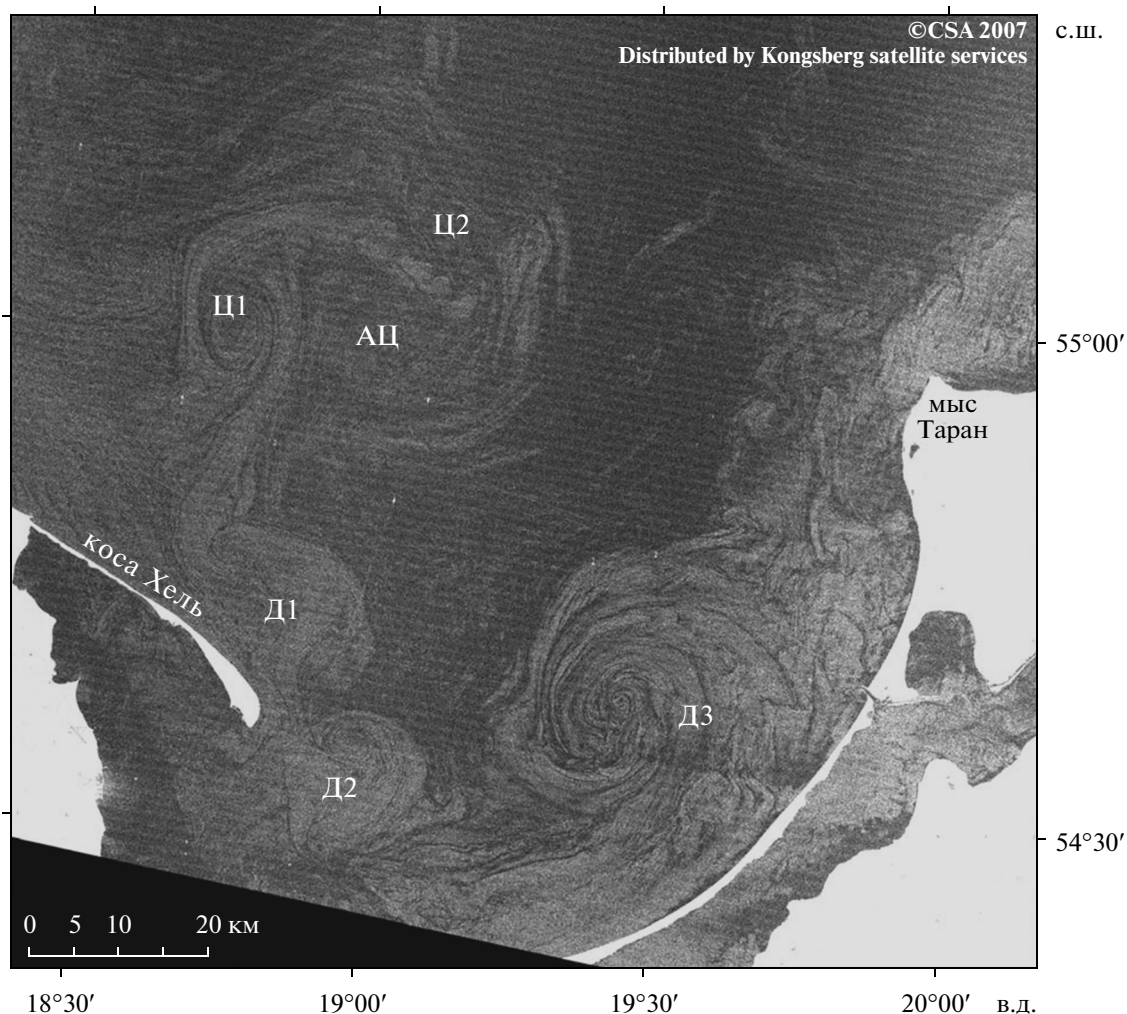
## АНАЛИЗ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Как следует из анализа РЛИ и сравнительно редких для рассматриваемой акватории изображений оптического диапазона высокого пространственного разрешения, вихревые движения – характерная черта циркуляции вод в юго-восточной части Балтийского моря, по крайней мере, в теплое время года (рис. 1–5). Диаметры проявляющихся на РЛИ вихревых структур меняются в широком диапазоне – от примерно 2 до 25 км, т.е. наблюдаются как мелкомасштабные, или субмезомасштабные вихри, так и мезомасштабные (диаметр меньше или больше бароклинного радиуса деформации Россби  $R_d$  соответственно;  $R_d$  равен 10 км в Балтике [16], 5–6 км в районе Гданьского залива с глубинами 60–80 м [25] и, по видимому, меньше этой величины в мелководных районах).

**Мезомасштабная динамика вод.** Наиболее часто наблюдаемые элементы мезомасштабной циркуляции – вихревые диполи (или грибовидные течения, т.е. комбинации вихревой пары циклон–антициклон и струи между ними), нередко образующие упаковки из двух–трех диполей с общим вихрем. При этом четко различимым на изображениях является чаще всего циклон, а о существовании антициклона пары свидетельствует наличие характерной для диполя “шляпки”, объединяющей оба вихря в одну структуру (см. [14]).

Триполь на рис. 1 в центральной части снимка образован на основе антициклона (АЦ) с координатами центра примерно  $55^\circ$  с.ш.,  $19^\circ$  в.д. и диаметром около 20 км; циклоны (Ц) на его периферии с диаметрами примерно 10 км расположены к западу (Ц1) и северо-востоку (Ц2) от АЦ.

Можно заметить, что Ц1 связан струей длиной примерно 30 км с циклоном диполя Д1 севернее оконечности косы Хель – часто наблюдаемое взаимодействие и у близкорасположенных антициклонов в Черном море (см., например, рис. 6.8а в [11]). Этот ориентированный на северо-восток диполь с диаметрами вихрей примерно 7 км образует общую вихревую структуру с диполем Д2 такого же масштаба восточнее оконечности косы Хель, струйная часть которого направлена на восток. При этом создается вихревая структура из трех диполей (упаковка), два из которых Д1 и Д2



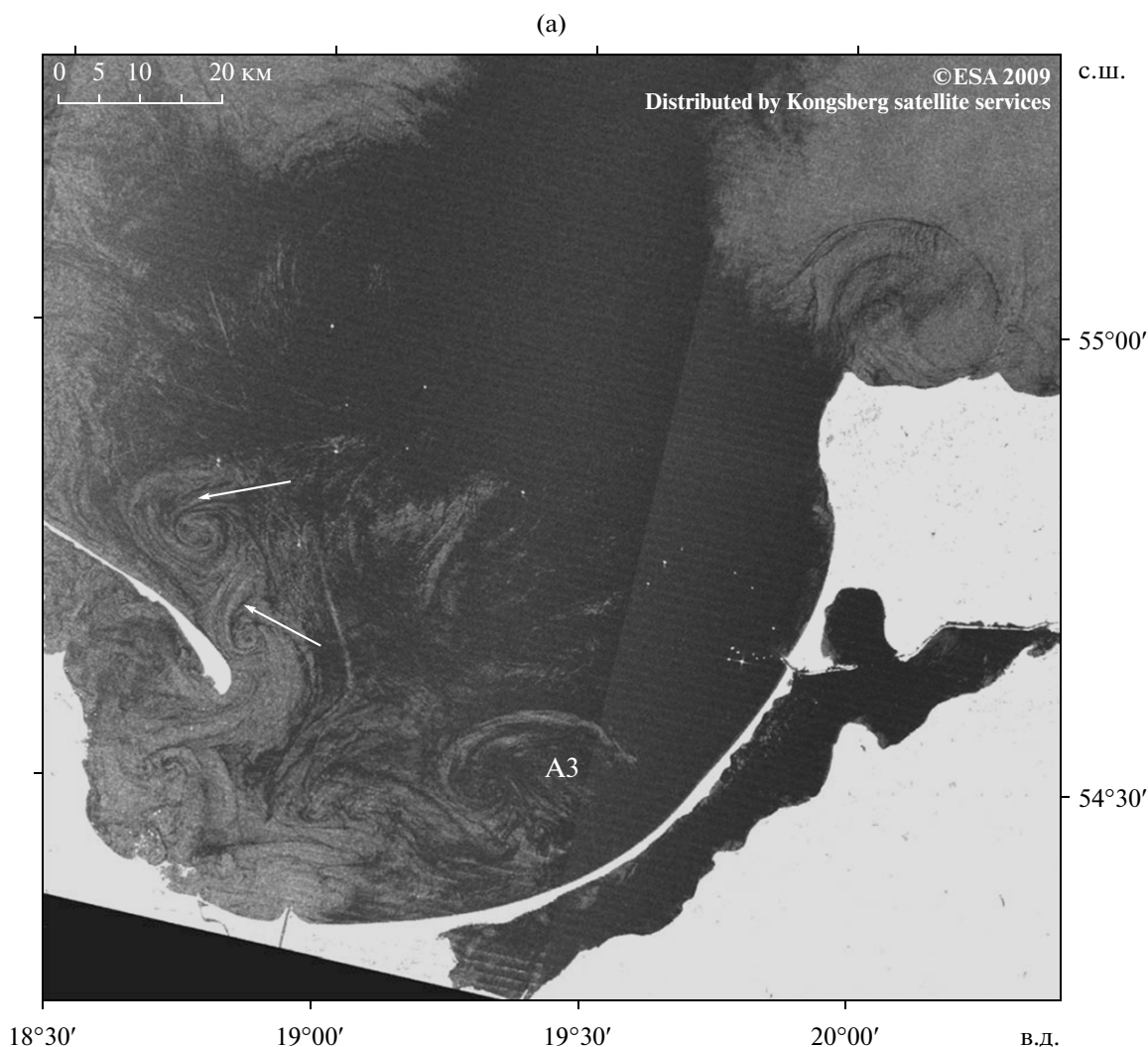
**Рис. 1.** Вихревые диполи в юго-восточной части Балтики. РЛИ SAR Radarsat-1, полученное 06.08.2007 г. (04:57 UTC). Здесь и далее: АЦ – антициклон, Ц – циклон, Д – диполь (пояснения в тексте).

обеспечивают отток воды из района косы Хель в более глубокую часть акватории, а третий, образованный из антициклона диполя Д1 и циклона диполя Д2 – поток вод в обратном направлении. Вместе с триподем на основе АЦ в общей “связке” оказывается, таким образом, система вихрей общей протяженностью в меридиональном направлении около 80 км, обуславливающая локальные разнонаправленные течения на акватории, превышающей по площади саму вихревую систему. При ориентации диполя южнее косы Хель на север вовлечение составляющими его вихрями трансформированных вод стока р. Висла приводит к их распространению в северном направлении на расстояние порядка 20 км (см. рис. 3а в работе [8]).

Диполь мористее Вислинской косы Д3 (в данном случае с Ц-асимметрией, размер циклона – примерно 20 км) – также характерный элемент циркуляции вод Гданьского залива. Поток вод

между этим циклоном и антициклоном диполя Д2 обеспечивает приток вод из открытой части залива к району Вислинской косы, а движение по периферии АЦ-части диполя Д3 напротив Калининградского морского канала способствует распространению загрязненных вод Вислинского залива вдоль косы на юго-запад.

Ориентация струйной части диполей севернее косы Хель может быть обратной по сравнению с показанной на рис. 1. Два таких диполя с диаметрами вихрей примерно 6 км у большего, струйные части которых направлены не от косы Хель, а к косе, видны на рис. 2а. Просматривается также упаковка двух мелкомасштабных диполей между косой Хель и материком. Эти мелкомасштабные вихри вблизи косы Хель не видны на радиометрическом изображении (рис. 2б). А на РЛИ не видны крупные вихревые структуры в центре Гданьского залива и севернее, хорошо различимые на рис. 2б: диполь Ц1–А2 с примерно одинаковыми



**Рис. 2.** Фрагменты РЛИ ASAR Envisat (a) и оптического изображения радиометра ETM+ Landsat-7 (б), полученные 17.07.2009 г. в 09:03 и 09:33 UTC соответственно. Стрелки на рис. 2а показывают направления струйных частей диполей.

диаметрами вихрей (около 20 км, центр циклона Ц1 – на  $55^{\circ}04'$  с.ш.,  $19^{\circ}03'$  в.д.) и связанные с ними антициклон А1 с размером примерно 11 км в диаметре и направленная на юго-запад грибовидная структура на основе А2 диполя (их невидимость на РЛИ была связана, возможно, с локальными изменениями ветра в момент съемки [8]). Очевидно, что разнонаправленные движения вод, вовлекаемых в эту сложную вихревую структуру, определяют горизонтальное перемешивание на акватории, соизмеримой с размером Гданьского залива. Кроме того, близкое расположение Ц2 грибовидного течения и антициклона А3 диполя с АЦ-асимметрией вблизи Вислинской косы (проявляется на рис. 2а и 2б) способствует притоку вод открытой части Гданьского залива к косе.

Еще одна вихревая структура, хорошо различимая на РЛИ и радиометрическом изображении

(рис. 2) – антициклон с диаметром примерно 20 км и характерными сдвиговыми вихрями/мелкомасштабными диполями на периферии у северного побережья Самбийского п-ова восточнее м. Таран. Как показано в работе [5], подобный антициклон может существовать несколько (до восьми) дней, его размеры могут достигать 25 км, а скорость на периферии – примерно 20 см/с. Благоприятные условия для его формирования – западные ветры; при ветрах северо-восточного и восточного направлений он разрушается в течение одного–двух дней. Этот антициклонический вихрь способствует распространению трансформированных вод Вислы и стока из Калининградского морского канала, достигающих мыса Таран [5, 12], далее на восток вдоль северного побережья Самбийского п-ова.

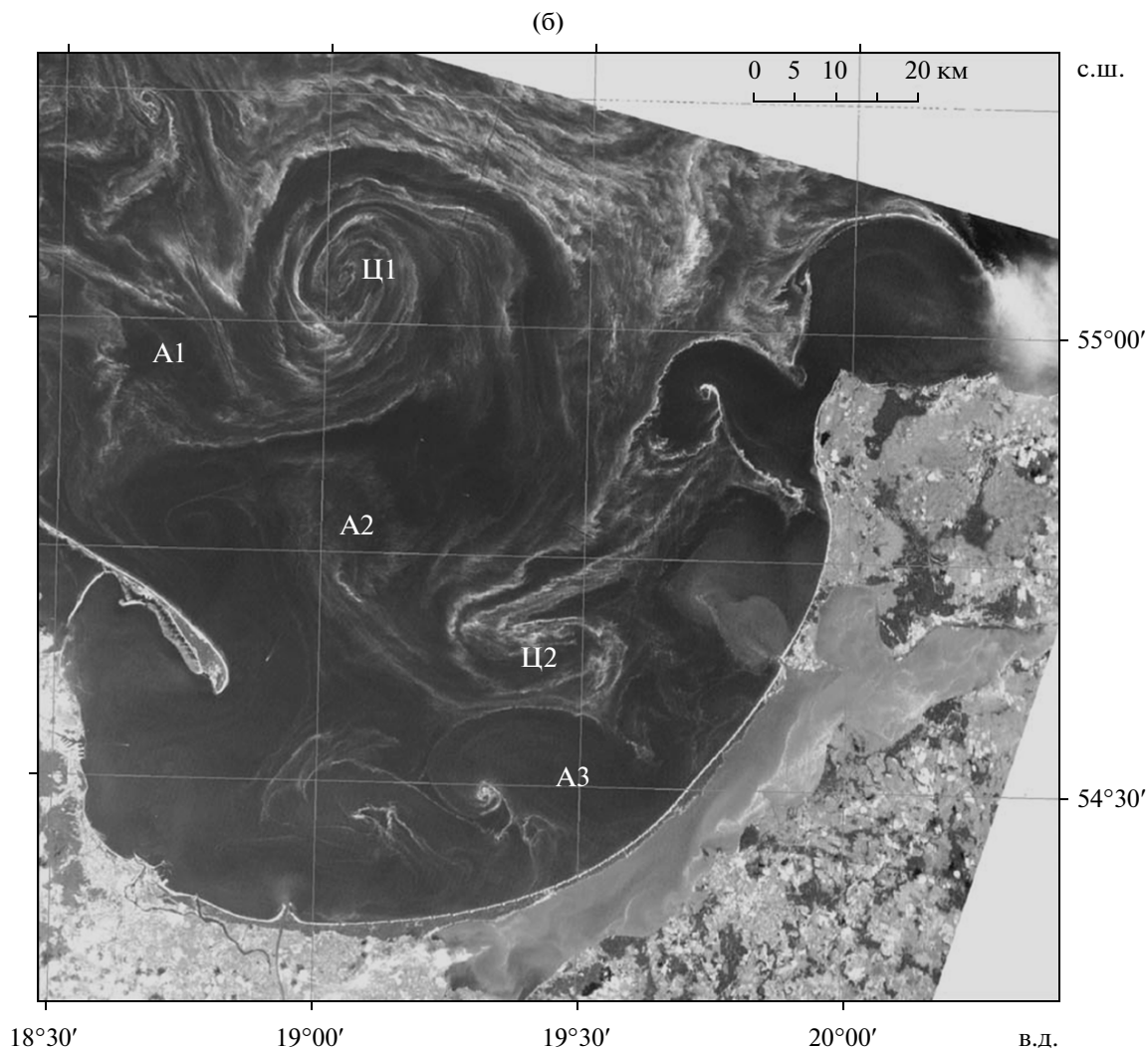
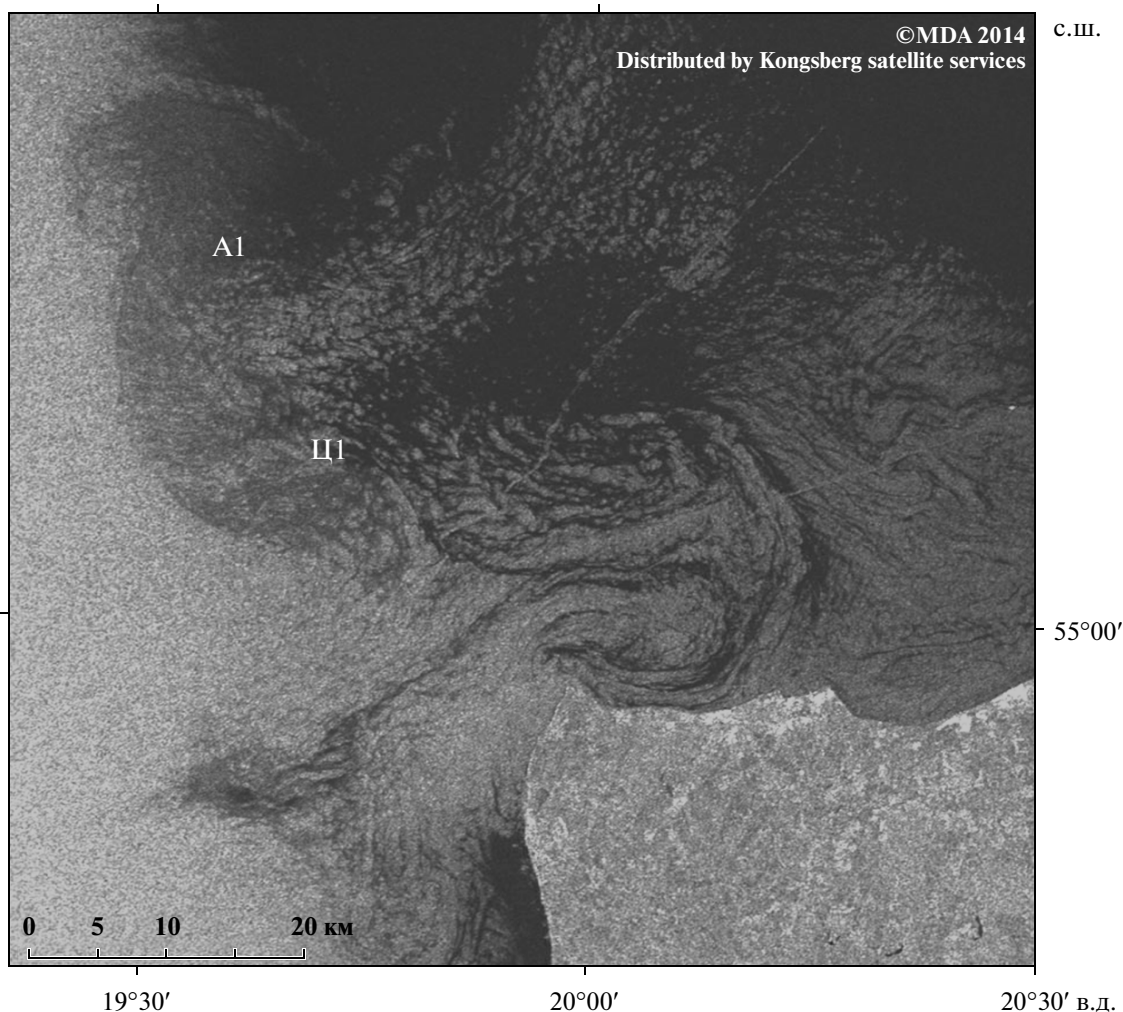


Рис. 2. Продолжение.

Наш анализ РЛИ показал, что восточнее м. Таран часто формируются и вихревые диполи с разной пространственной ориентацией. На рис. 3 показан почти симметричный вихревой диполь (диаметр вихрей – примерно 10 км) со струей восточного направления, примерно параллельной побережью. Наблюдались также диполи с АЦ- и Ц-асимметрией и ориентацией струй между вихрями диполя как с севера на юг, к побережью, так и в обратном направлении; струя между составляющими примерно симметричного диполя у м. Таран на рис. 4 направлена с северо-востока на юго-запад. По-видимому, многообразие ситуаций определяется предшествовавшими ветровыми условиями. Сдвиги следа судна в пределах циклонической части диполя у м. Таран и в месте ее сближения с циклоном Ц1 грибовидной структуры А1–Ц1 на рис. 3 согласуются с локальными

направлениями течений в этих мезомасштабных структурах.

**Субмезомасштабные вихри.** Пример плотно упакованного вихревого поля из субмезомасштабных и мезомасштабных вихрей показан на рис. 4. Мезомасштабный диполь А1–Ц1 с диаметрами вихрей примерно 10–12 км – в левом нижнем углу снимка. Антициклонический вихрь А2 в центре снимка (диаметр около 10 км) образует упаковку из трех диполей с циклонами меньшего размера (3–5 км). Диаметры вихрей многочисленных мелкомасштабных диполей на этом РЛИ – 2–5 км. Их характерные черты – те же, что и у мезомасштабных диполей: образование упаковок диполей с общим вихрем, соединение циклонов узкой струей, разветвление части диполя в грибовидную структуру меньшего масштаба. Наиболее вероятной причиной их образования



**Рис. 3.** Фрагмент РЛИ SAR Radarsat-2, полученного 09.08.2014 г. (16:10 UTC). Светлые тонкие полосы – следы за движущимися судами.

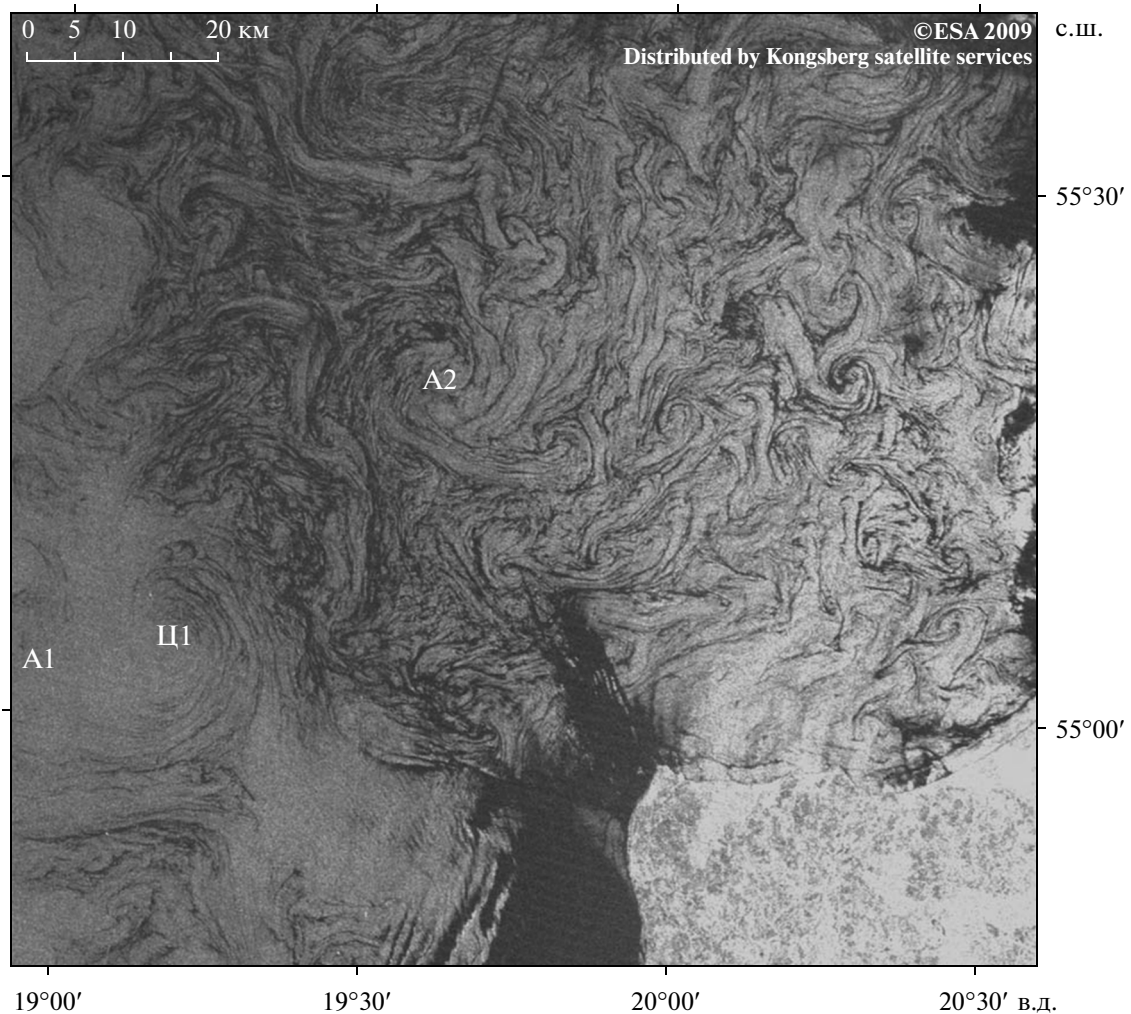
(подобные вихревые поля наблюдаются здесь нечасто) являются неоднородности атмосферного воздействия (например, упорядочение турбулентности в воде после интенсивного ветра).

Еще один вид субмезомасштабных вихрей/ди-полей в Юго-Восточной Балтике – вытянутые в линию вихревые дорожки (см., например, рис. 5). В связи с обсуждением широкого распространения в океанах и морях циклонических вихрей спиралевидной формы Стивенсон [27] отметил отсутствие наблюдений в океане пар циклон–антициклон типа дорожек Кармана, часто образующихся в атмосфере при обтекании воздушным потоком островов (пример такой дорожки в атмосфере дан на рис. 1в и 1г в работе [4]). Подобная вихревая дорожка была зарегистрирована в Беринговом проливе в следе за скалой на РЛИ спутника ERS-1 (см. [17]). Однако в случае вихревой дорожки на рис. 5 какие-либо скалы или острова,

которые могли бы объяснить ее формирование, отсутствуют. Различная ориентация наблюдавшихся нами дорожек в данном регионе (всегда севернее Гданьского залива, вблизи 55°30' с.ш.) позволяет предположить, что их появление связано с разным в разных ситуациях направлением ветра.

**Асимметрия в проявлении циклонических и антициклонических вихрей на поверхности моря/океана.** Вихревые поля из субмезомасштабных вихрей, подобные показанному на рис. 4, многократно наблюдались в разных морях и океанах (см. [26, 27, 24, 17, 13, 9, 8, 11]), причем в большинстве работ отмечалось, что это закручивающиеся в спираль вихри циклонического направления вращения. Именно поэтому такие субмезомасштабные циклоны стали называть “спиральными вихрями”, “спиралями” (см. [26, 27, 24]). Однако наш анализ приведенных в цитируемых выше ра-





**Рис. 4.** Вихревое поле к северу и западу от Самбийского п-ова по данным ASAR Envisat от 25.04.2009 г. (09:11 UTC). Слабые контрасты на изображении слева связаны с локальным увеличением скорости ветра.

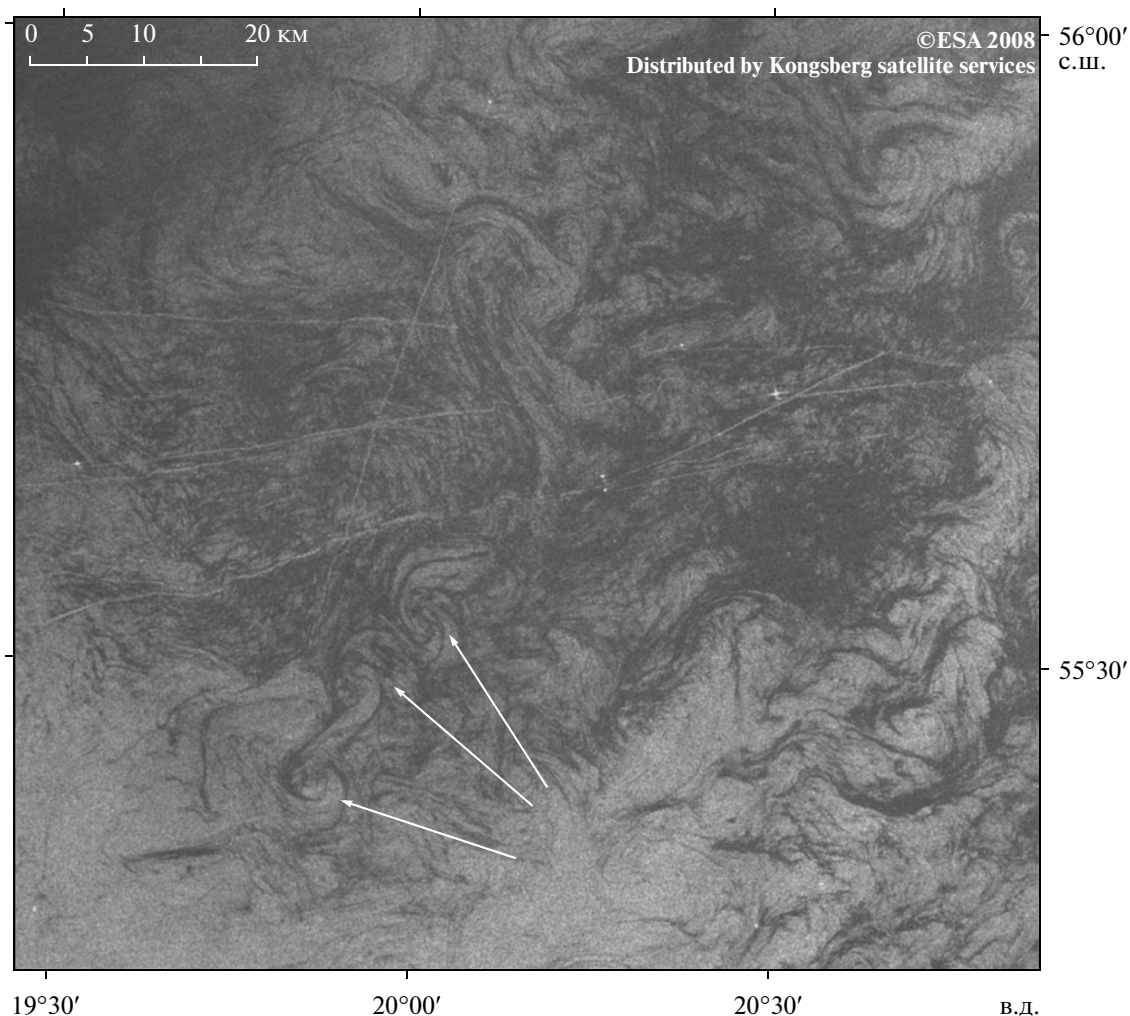
ботах фотографий американских астронавтов и радиолокационных изображений показывает, что в районах, где отсутствуют сдвиги течений, наблюдаются в основном не циклонические вихри спиралевидной формы, а вихревые диполи, циклоническая часть которых имеет четко выраженную спираль, а у антициклонической “прорисован” лишь внешний контур.

То же относится и к проявлению мезомасштабных вихревых диполей на поверхности Балтийского моря (см. рис. 1–4), даже диполей с АЦ-асимметрией (рис. 2, диполь с координатами центра А3 примерно  $54^{\circ}30'$  с.ш.,  $19^{\circ}30'$  в.д.), причем циклоны лучше проявляются не только на РЛИ, но и на радиометрических снимках (рис. 2) и ИК-изображениях. По-видимому, более четкое проявление структуры вихря у циклонов на изображениях сканера CZCS привело У. Хорстманна к

выводу, что “почти все вихри в Балтике показывают циклоническую циркуляцию” [16].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Самый распространенный элемент мезомасштабной и субмезомасштабной вихревой динамики в юго-восточной части Балтийского моря — вихревые диполи. Время жизни мезомасштабных вихрей неизвестно, однако, судя по последовательности изображений радиометра с 28 июля по 11 августа 2004 г. в работе [22], антициклонический вихрь с диаметром около 20 км может сохранять свой размер и положение по крайней мере в течение 14 дней, несмотря на кратковременные усиления ветра в период наблюдения до 10 м/с. Упаковки мезомасштабных вихревых диполей и связанные с вихрями струи могут определять водообмен на площади, соизмеримой с размером



**Рис. 5.** Фрагмент РЛИ ASAR Envisat, полученного 17.05.2008 г. (20:16 UTC). Стрелки указывают на вихри в вихревой дорожке.

самой рассматриваемой акватории. Кроме того, вихревые диполи осуществляют перенос различных загрязнений, в том числе и нефтяных, что чрезвычайно важно с точки зрения прогноза дрейфа нефтяных пятен, обнаруженных на РЛИ (см. рис. 9 в [20]).

Механизмы формирования мезомасштабных вихрей в Юго-Восточной Балтике, за исключением вихрей/диполей у м. Таран с явным влиянием особенностей орографии и донной топографии, неизвестны. Обсуждавшиеся в литературе гипотетические механизмы образования вихрей в Балтийском море (обрушение длинных внутренних волн инерционного интервала, меандрирование фронта, внутренние волны Кельвина, топографические волны Россби, бароклинная и баротропная неустойчивость потока, см. [16, 3]) не объясняют многообразия вихревых структур в рассматриваемом регионе с отсутствующими по-

стоянными течениями и фронтами. Наблюдения различной ориентации струйной части вихревых диполей в разное время предполагает влияние на их формирование локальных ветровых импульсных воздействий.

Мы не располагаем последовательностью радиолокационных изображений полей субмезомасштабных вихревых диполей и вихрей, подобных представленному на рис. 4. Однако, судя по наблюдениям в различных морях и океанах (см. [27]), время существования поля спиралевидных вихрей в одном и том же месте не превышает, по-видимому, трех дней, а время жизни отдельного вихря/диполя в пределах этого поля — еще меньше.

Возможно, асимметрия в проявлении спиралевидной структуры циклонов и антициклонов на поверхности Балтийского моря связана с вертикальными движениями в этих вихрях: подъем вод в циклоне и их опускание в антициклоне обу-



славливают большую концентрацию биогенных элементов на поверхности в первом и меньшую во втором. Заметим, что в Черном море в мезомасштабных антициклонических вихрях, вовлекающих в свое орбитальное движение богатые взвесью прибрежные воды, спиралевидная структура на поверхности иногда “прорисовывается” лучше, чем в присоединенном циклоне примерно такого же диаметра (см., например, рис. 6.10 в [11]). Этот вопрос требует дальнейшего исследования. Выяснения требуют и вопрос о природе вихревых дорожек, нередко наблюдаемых на РЛИ в районе севернее Гданьского залива (на широте примерно 55°30' с.ш.).

Авторы благодарят ООО “ЛУКОЙЛ-КМН” за предоставленные радиолокационные данные.

Исследование выполнено за счет гранта РФФИ (проект № 14-50-00095).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булычева Е.В., Костяной А.Г. Итоги спутникового мониторинга нефтяного загрязнения морской поверхности Юго-Восточной Балтики за 2004–2013 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 4. С. 111–126.
2. Викторов С.В. Региональная спутниковая океанография моря // Тр. ГОИН. Исследования океанов и морей. СПб.: Гидрометеоздат, 2005. Вып. 209. С. 286–314.
3. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Проект “Моря СССР”. Т. III. Балтийское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / Под ред. Ф.С. Терзиева, В.А. Рожкова, А.И. Смирновой. СПб.: Гидрометеоздат, 1992. 450 с.
4. Гинзбург А.И., Федоров К.Н. Некоторые закономерности развития гребовидных течений в океане, выявленные путем анализа спутниковых изображений // Исслед. Земли из космоса. 1984. № 6. С. 3–13.
5. Гурова Е.С. О формировании и динамике вихря у побережья юго-восточной Балтики по данным дистанционного зондирования // Вестн. Балтийского федерального университета им. И. Канта. 2012. Вып. 1. С. 16–21.
6. Гурова Е.С., Иванов Ю.А. Особенности проявления гидродинамических структур в юго-восточной части Балтийского моря по данным спектрорадиометров MODIS и космической радиолокации // Исслед. Земли из космоса. 2011. № 4. С. 41–54.
7. Каримова С.С. О проявлении вихревых структур на радиолокационных изображениях // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 3. С. 152–160.
8. Каримова С.С., Лаврова О.Ю., Соловьев Д.М. Наблюдения вихревых структур Балтийского моря с помощью радиолокационных и радиометрических спутниковых данных // Исслед. Земли из космоса. 2011. № 5. С. 1–9.
9. Костяной А.Г., Гинзбург А.И., Шеремет Н.А. и др. Мелкомасштабные вихри Черного моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 1. С. 248–259.
10. 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 объектов и явлений. М.: GRANPolygraph, 2005. Т. II. С. 118–123.
11. Лаврова О.Ю., Костяной А.Г., Лебедев С.А. и др. Комплексный спутниковый мониторинг морей России. М.: ИКИ РАН, 2011. 470 с.
12. Лаврова О.Ю., Краюшкин Е.В., Соловьев Д.М. и др. Влияние ветрового воздействия и гидродинамических процессов на распространение вод Калининградского залива в акватории Балтийского моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 4. С. 76–99.
13. 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. 1–9.
14. Федоров К.Н., Гинзбург А.И. Приповерхностный слой океана. Л.: Гидрометеоздат, 1988. 303 с.
15. Bulycheva E., Kuzmenko I., Sivkov V. Annual sea surface oil pollution of the south-eastern part of the Baltic Sea by satellite data for 2006–2013 // Baltica. 2014. V. 27. P. 9–14.
16. Horstmann U. Distribution Patterns of Temperature and Water Colour in the Baltic Sea as recorded in Satellite Images: Indicators for Phytoplankton Growth. Berichte Institute fur Meereskunde, Kiel. 1983. V. 1. № 106. 147 p.
17. Ivanov A. Yu., Ginzburg A.I. Oceanic eddies in synthetic aperture radar images // Earth and Planetary Sciences. 2002. V. 111. № 3. P. 281–295.
18. Kostianoy A.G., Bulycheva E.V., Semenov A.V., Krainyukov A.V. Satellite monitoring systems for shipping, and offshore oil and gas industry in the Baltic Sea // Transport and Telecommunication. 2015. V. 16. № 2. P. 117–126.
19. Kostianoy A.G., Lavrova O.Yu. (Eds.) Oil pollution in the Baltic Sea. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2014. V. 27. 268 p.
20. Kostianoy A.G., Lavrova O.Yu., Mityagina M.I. et al. Satellite monitoring of oil pollution in the Southeastern Baltic Sea // Oil Pollution in the Baltic Sea / Eds. Kostianoy A.G., Lavrova O.Yu. Springer-Verlag. 2014. V. 27. P. 125–154.
21. Kostianoy A.G., Litovchenko K.Ts., Lavrova O.Yu. et al. Operational satellite monitoring of oil spill pollution in the southeastern Baltic Sea: 18 months experience // Environmental Research, Engineering and Management. 2006. № 4 (38). P. 70–77.
22. Lavrova O., Mityagina M., Bocharova T., Gade M. Multisensor 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.
23. *Lavrova O.Yu., Mityagina M.I., Kostianoy A.G., Semenov A.V.* Oil pollution in the southeastern Baltic Sea in 2009–2011 // Transport and Telecommunication. 2014. V. 15. № 4. P. 322–331.
24. *Munk W., Armi L., Fischer K., Zachariassen F.* Spirals on the sea // Proc. Royal Soc. Lond. A. 2000. V. 456. P. 1217–1280.
25. *Osinski R., Pak D., Walczowski W., Piechura J.* Baroclinic radius of deformation in the southern Baltic Sea // Oceanology. 2010. V. 52. № 3. P. 417–429.
26. *Stevenson R.E.* Oceanography from the Space Shuttle. Office of Naval Research. The Univ. Corporation for Atmospheric Research. 1989. 200 p.
27. *Stevenson R.E.* Spiral eddies: the discovery that changed the face of the oceans // 21<sup>st</sup> Century Science and Technology. 1998. V. 11. № 3. P. 58–71.

## Vortex Dynamics in the Southeastern Baltic Sea from Satellite Radar Data

A. I. Ginzburg, E. V. Bulycheva, A. G. Kostianoy, D. M. Solovyov

The analysis of radar satellite images showed that the characteristic element of water circulation in the southeastern part of the Baltic Sea are vortex dipoles. A wide range of spatial dimensions of the observed vortices (from about 2 to 25 km) corresponds to mesoscale and sub-mesoscale eddies (diameter is larger or less than the baroclinic Rossby radius of deformation of 5–6 km, respectively). Vortex dipoles and their spatial characteristics are discussed for different areas: Hel Spit, Cape Taran, the central part of the Gulf of Gdansk and the area north of the Gulf). It is shown that the mesoscale vortex dipoles and the associated jets may condition the horizontal water exchange in the area comparable with the size of the considered area. The differences in the manifestation of cyclonic and anticyclonic vortices in dipoles revealed on satellite radar images are discussed.