

Особенности проявления на спутниковых радиолокационных изображениях корабельных следов в областях интенсивного цветения фитопланктона

М.И. Митягина, О.Ю. Лаврова

*Институт космических исследований РАН
Москва 117997, Россия
E-mail: mityag@iki.rssi.ru*

Рассматриваются вопросы, связанные с проявлением на спутниковых радиолокационных изображениях морской поверхности следов за движущимися надводными судами. Экспериментальную основу исследования составляют данные спутниковых радиолокаторов с синтезированной апертурой ASAR Envisat и SAR ERS-2. Помимо радиолокационных данных использовались данные видимого и ИК-диапазонов сенсоров MODIS Terra/Aqua, MERIS Envisat, TM Landsat-5 и ETM+ Landsat-7. На спутниковых радиолокационных изображениях, полученных нами при проведении регулярных спутниковых наблюдений акватории Балтийского моря, выявлены многочисленные случаи проявления следов за движущимися судами в виде узкой протяженной светлой полосы усиления обратно рассеянного сигнала. Проведены оценки пространственных и временных характеристик выявленных структур. Большой объем данных позволил провести обобщения и получить статистически достоверные результаты о пространственной и временной изменчивости проявлений корабельных следов этого типа. Установлено, что они являются относительно долгоживущими и обладают длинами в десятки, а иногда и в сотни километров. Отмечено наличие сезонной и межгодовой изменчивости их проявлений. На основе совместного анализа данных спутниковых радиолокаторов и спутниковых сенсоров видимого и ИК-диапазонов определены возможные факторы, приводящие к формированию подобных радиолокационных образов корабельных следов, и сформулированы гипотезы для объяснения этого феномена. Выявлена связь между встречаемостью корабельных следов этого типа в радиолокационных изображениях и присутствием зон активного цветения фитопланктона.

Ключевые слова: спутниковые радиолокационные изображения, спутниковый мониторинг, морская поверхность, корабельные следы, фитопланктон, Балтийское море, цветение водорослей

Введение

Возможность дистанционного распознавания надводных судов и следов за ними на основе спутниковых данных чрезвычайно важна для обеспечения информационных потребностей морского транспорта, рыбного промысла, мониторинга загрязнений и пр. Для решения этой задачи наиболее информативными средствами дистанционного зондирования морской поверхности являются радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА) спутникового базирования, предоставляющие возможность быстрого обзора больших акваторий с высоким пространственным разрешением и независимо от освещенности и облачного покрытия. Радиолокационные (РЛ) образы надводных судов и следов за ними были обнаружены уже на первых радиолокационных изображениях, полученных со спутника SeaSat в 1978 г. (Fu and Holt, 1982). С развитием технологий спутниковой радиолокации возрастает интерес к радиолокационным образам следов, оставленных движущимися надводными судами, так называемым кильватерным следам (Zilman et al., 2004; Soloviev et al., 2010; Ермаков, Капустин, 2010). Радиолокационные образы «традиционных» кильватерных следов за движущимися наземными судами отличаются хорошо узнаваемой струк-

турой, которая подчиняется закону расширения и включает в себя центральную темную часть и V-образные «усы» (Pichel et al., 2004).

Турбулентность, возникающая вследствие обрушения волн, работа винтов корабля и перемещение корпуса, все это приводит к возмущению, а затем к гашению коротких гравитационно–капиллярных волн за движущимся судном. Непосредственно за движущимся судном в воде с присутствием пены возникает область турбулентности, а далее распространяется протяженная полоса выглаженной воды (Peltzer et al., 1992). Область выглаживания образуется в результате гашения коротковолновой составляющей спектра поверхностных волн в турбулентном следе вследствие повышения вязкости, понижения температуры и изменения эластичности и поверхностного натяжения в поверхностном слое. На радиолокационных изображениях (РЛИ) следы этого типа проявляются как темная полоса, длиной несколько километров, начинающаяся в непосредственной близости от судна. Такого рода следы наиболее часто встречаются на РЛИ и обычно проявляются при умеренных ветрах, в диапазоне скоростей 2,5 -7,5 м/с. Фрагмент РЛИ, на котором отчетливо видны проявления турбулентных следов длиной 8-10 км, представлен на *рис. 1а*.

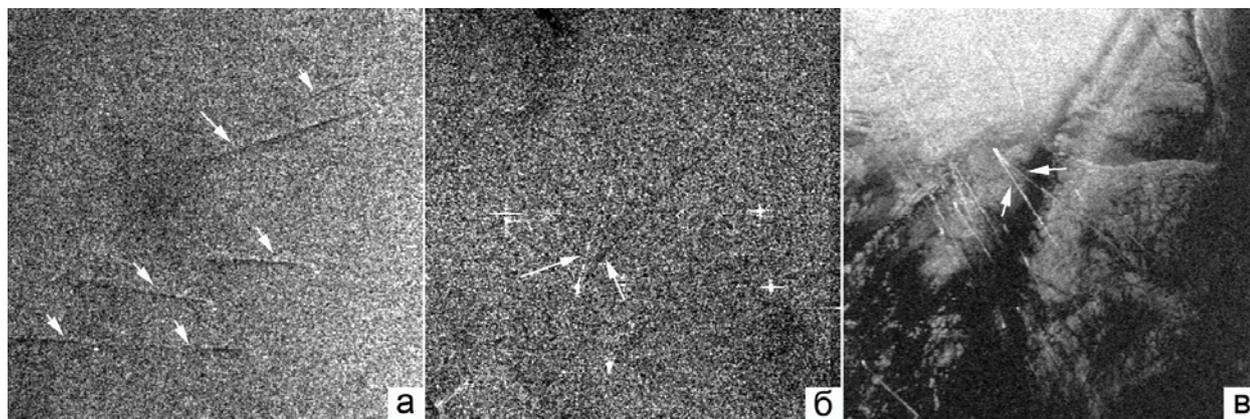


Рис. 1. Проявления корабельных следов различного типа на РЛИ (фрагменты 30 км x 30 км): а) турбулентные следы за кораблями, длина следов 8-15 км; ASAR Envisat, 22.08.2009, 19:57 UTC; б) «усы» за кораблем, длина 8 км, раствор угла 40°, ASAR Envisat, 10.09.2009, 19:59 UTC; в) «усы» за кораблем, длина 9 км, раствор угла 40°, ASAR Envisat, 14.04.2011, 20:39 UTC

Несколько реже, чем турбулентные следы, на РЛИ проявляются V-образные «усы», являющиеся отображением волн Кельвина, т.е. системы волн, возникающей при движении корабля и состоящей из расходящихся и поперечных волн. Фронт расходящихся волн образует с направлением движения корабля некоторый угол, зависящий от отношения скорости судна к глубине моря, а фронт поперечных волн перпендикулярен направлению движения корабля. Согласно классической теории волновая область ограничена сектором,

симметричным относительно оси движения корабля, однако отображение волн Кельвина на РЛИ зависит от условий съемки, в частности, от взаимного расположения азимутального угла и направления движения корабля, его размера, формы и скорости (Hennings et al., 1999; Reed, Milgram, 2002). Из-за того, что расходящиеся волны распространяются под различными углами относительно направления съемки, они различным образом проявляются на РЛИ. Широко распространенной является ситуация, когда один «ус» отображается как светлая полоса усиленного рассеяния, а другой – как темная полоса ослабленного рассеяния. Пример подобной ситуации представлен на *рис. 1б*. Возможны такие сочетания взаимного расположения направления радиолокационной съемки и курса корабля, при которых рассеяние радиолокационного сигнала происходит примерно одинаковым образом на обоих «усах», но такие ситуации встречаются реже. Как правило, длины V-образных следов на РЛИ меньше, чем длины турбулентных следов, возможно, это объясняется их меньшим временем жизни. Фрагмент РЛИ, на котором отчетливо видны проявления двух ярких белых «усов» за движущимся судном, представлен на *рис. 1в*.

Наши исследования и опубликованные ранее результаты наблюдений, проведенных различными научными группами, показывают, что перечисленные выше проявления корабельных следов характеризуются длинами порядка первых десятков километров и временами жизни от десятков минут до часа.

На основе анализа спутниковых радиолокационных данных, полученных в ходе многолетнего мониторинга акваторий различных морей (Mityagina, Lavrova, 2012; Митягина, Лаврова, 2012; Lavrova et al., 2014), нами выявлены многочисленные случаи проявлений корабельных следов, значительно отличающихся от описанных выше. Этот тип корабельных следов отображается на спутниковых радиолокационных изображениях в виде длинных светлых полос усиления обратно-рассеянного сигнала. Из данных дистанционного зондирования нами были восстановлены их пространственные и временные характеристики. Выяснилось, что эти корабельные следы являются относительно долгоживущими структурами, а их длины могут достигать сотен километров. Совместный анализ спутниковых радиолокационных данных и совокупности данных спутникового зондирования морской поверхности в видимом и инфракрасном диапазонах позволил определить возможные факторы, приводящие к появлению наблюдаемых типов корабельных следов. В частности, удалось выявить связь между встречаемостью корабельных следов этого типа в радиолокационных данных и присутствием зон активного цветения фитопланктона в условиях слабого приповерхностного ветра.

Спутниковые данные и средства их обработки и анализа

Экспериментальную основу исследования составили РЛИ морской поверхности, полученные при помощи радиолокаторов с синтезированной апертурой, пространственное разрешение которых достигает 25 метров. В течение более трех лет, начиная с января 2009 и по 8 апреля 2012 г. (т.е. до прекращения функционирования спутника Envisat) нами проводился оперативный спутниковый мониторинг акваторий Балтийского, Черного, Азовского и Каспийского морей, базировавшийся в первую очередь на данных спутниковых радиолокаторов ASAR Envisat и SAR ERS-2, получаемых с трех европейских станций приема и первичной обработки данных (MATERA, KIRUNA и ESRIN) в близком к реальному режиму времени. Помимо радиолокационных данных использовались данные видимого и инфракрасного (ИК) диапазонов сенсоров MODIS Terra/Aqua, MERIS Envisat, TM Landsat-5 и ETM+ Landsat-7. (Лаврова и др., 2011). Всего за время наблюдений было получено, обработано и проанализировано более 1000 РЛИ морской поверхности. Практически ко всем из них была подобрана сопутствующая информация: данные спутниковых сенсоров видимого и ИК- диапазонов, данные метеостанций. Большой объем накопленного экспериментального материала обеспечил статистическую достоверность результатов.

Столь большой массив данных требовал тщательной совместной обработки и осмысления. Следует отметить, что благодаря фактически взрывному росту объемов информации, получаемой на основе данных дистанционного зондирования, эффективная работа с этой информацией, в том числе ее комплексный анализ, становятся возможными только посредством использования специально разработанных систем и технологий, позволяющих оперировать с большими, постоянно пополняющимися архивами данных. Эти технологии позволяют реализовать совершенно новые подходы к работе с данными дистанционного зондирования. В частности, в Институте космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) создан геопортал See The Sea (STS), ориентированный на описание и изучение различных процессов и явлений, происходящих в океане и атмосфере над ним, на основе разнородных данных спутниковых систем дистанционного зондирования (Лупян и др., 2012), состоящий из следующих подсистем.

- Подсистема сбора данных из различных источников и их обработки для получения различных информационных продуктов, необходимых для изучения явлений, наблюдаемых в Мировом океане.
- Подсистема ведения специализированных архивов спутниковых данных и результатов их обработки, обеспечивающая поиск и быстрый выбор необходимых наборов данных для проведения их анализа и обработки.

- Подсистема, обеспечивающая работу интерфейсов к данным, которая позволяет:
а) осуществлять удобный поиск и выбор наборов данных по заданным районам и периодам времени, в которых наблюдались исследуемые явления; б) проводить анализ данных и, в частности, обеспечивать возможность визуализации и совместного анализа различных типов данных, возможность их преобразования в удобный для анализа вид, а также возможность получения различных характеристик изучаемых объектов и т.д. Для удобной работы с разновременными данными в интерфейсе реализованы достаточно однотипные блоки, которые позволяют управлять различными по типам спутниковыми данными и результатами их обработки. Например, работать с данными высокого пространственного разрешения, представление которых осуществляется достаточно локализованными сценами; данными низкого и среднего разрешения, характерной единицей представления которых являются «сеансы», охватывающие значительные территории; сериями временных и пространственных композитов различных продуктов обработки спутниковых данных.

- Подсистема создания и ведения описаний различных типов изучаемых явлений (ведения баз данных явлений по различным регионам наблюдений).

- Подсистема анализа различных явлений, включая возможность анализа пространственных и временных распределений, анализа различных характеристик и поиск связей между ними для построения моделей динамики различных процессов на поверхности океана.

Интерфейсы системы STS предоставляют возможность проводить работы по решению широкого круга задач. Исследование проявления корабельных следов в РЛ-данных проводилось с использованием этого геопортала. Радиолокационные данные использовались для идентификации корабельных следов. Каждое радиолокационное изображение подвергалось визуальному анализу с целью обнаружения на нем структур, с определенностью принадлежащих к классу корабельных следов интересующего нас типа. Для каждой такой структуры определялись ее характерные размеры и географическое положение. Выявленные следы наносились на карту для дальнейшего проведения анализа совместно со спутниковыми данными видимого и ИК-диапазонов, на основе которых восстанавливалась информация об областях интенсивного цветения водорослей, строились карты концентрации хлорофилла-а и карты поверхностной температуры, что позволяло проводить оценки влияния изменчивости температурного режима на интенсивность цветения. Поскольку информативность радиолокационных изображений, а также способ проявления на них корабельных следов существенным образом зависят от скорости ветра в момент съемки, при проведении анализа спутни-

ковых данных использовались данные о поле приповерхностного ветра, доступные в метеорологическом интерфейсе системы STS.

Ниже будут рассмотрены радиолокационные образы долгоживущих корабельных следов, выявленных нами в период цветения фитопланктона в Балтийском море. Выбор района исследования определяется целым рядом факторов: интенсивным круглогодичным судоходством, ежегодным интенсивным цветением фитопланктона, включая цветение цианобактерий, большим объемом накопленных нами спутниковых данных, а также большим набором доступных данных наблюдений за цветением фитопланктона и концентрацией хлорофилла-а, которые круглогодично проводятся шведскими и финскими исследователями в различных акваториях моря (<http://www.helcom.fi/baltic-sea-trends/environment-fact-sheets>, <http://www.smhi.se/en/Weather/Sweden-weather/the-algae-situation-1.11631>).

Долгоживущие корабельные следы и их проявление на спутниковых РЛИ

Долгоживущие корабельные следы проявляются на радиолокационных изображениях в виде относительно узких полос повышенного радиолокационного сигнала, повторяющих маршрут движения корабля, длины которых могут достигать двухсот километров. В начале следа может выделяться яркая точка, соответствующая положению движущегося судна. Существенного расширения следа в направлении от судна, как правило, не наблюдается.

Пример проявления на РЛИ долгоживущего следа приведен на *рис. 2а*. На *рис. 2б* показаны вариации радиолокационного сигнала, вдоль линии разреза, идущей поперёк следа, и отмеченной на *рис. 2а*. Отчетливо проявляется усиление обратного рассеяния в следе за кораблем. Ширина следа составляет около 300 м при его видимой длине 86 км.

Карты-схемы пространственного распределения долгоживущих следов за кораблями в Балтийском море, выявленных на основе данных спутниковой радиолокации за 2009–2011 гг., приведены на *рис. 3*. На картах-схемах представлены данные за период с апреля по сентябрь, поскольку в остальные месяцы проявления долгоживущих следов практически не выявляются на радиолокационных изображениях.

Диаграмма, отражающая распределение длин РЛ-образов долгоживущих корабельных следов, выявленных в акватории Балтийского моря за 2009, 2010 и 2011 гг. представлена на *рис. 4*.

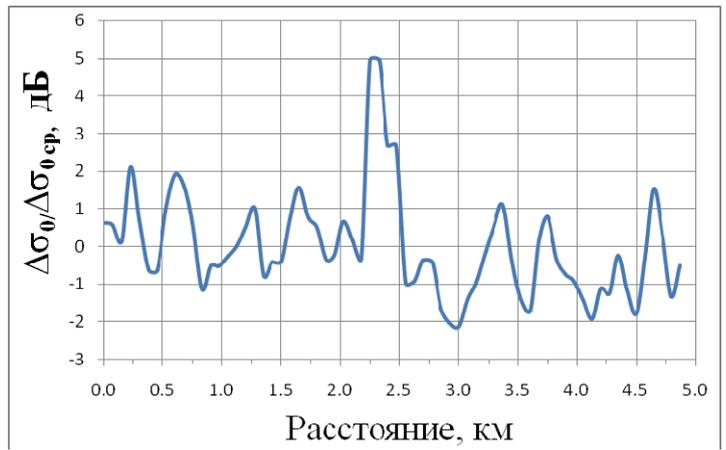
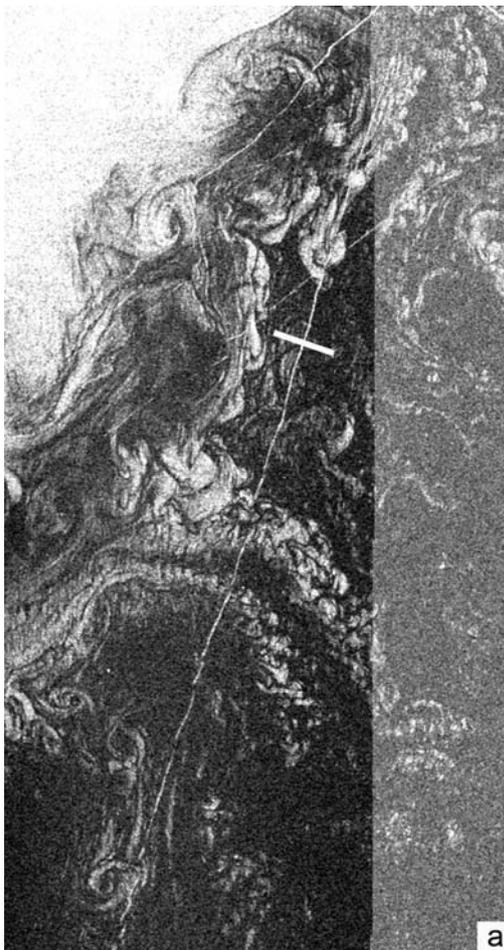


Рис. 2. а) Фрагмент ASAR Envisat изображения акватории Балтийского моря к востоку от о. Готланд, полученного 12.09.2009; б) Вариации радиолокационного сигнала, обусловленные поверхностными проявлениями долгоживущего следа за кораблем, вдоль линии разреза, отмеченной на рис. 2а

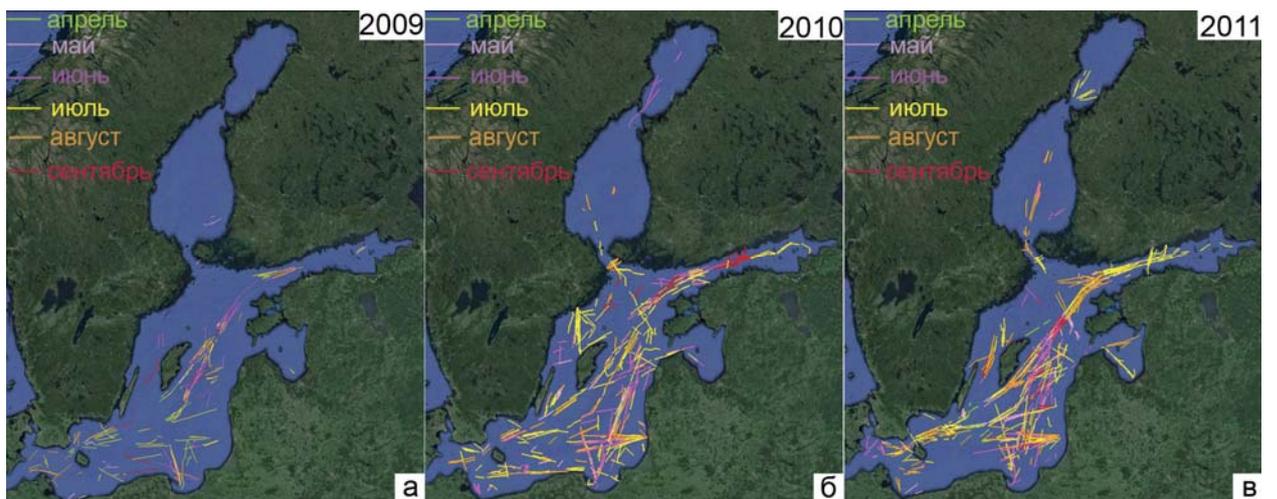


Рис. 3. Обобщенные карты-схемы распределения долгоживущих следов за кораблями, выявленных на РЛИ Балтийского моря за 2009 (а), 2010 (б) и 2011 (в) гг.

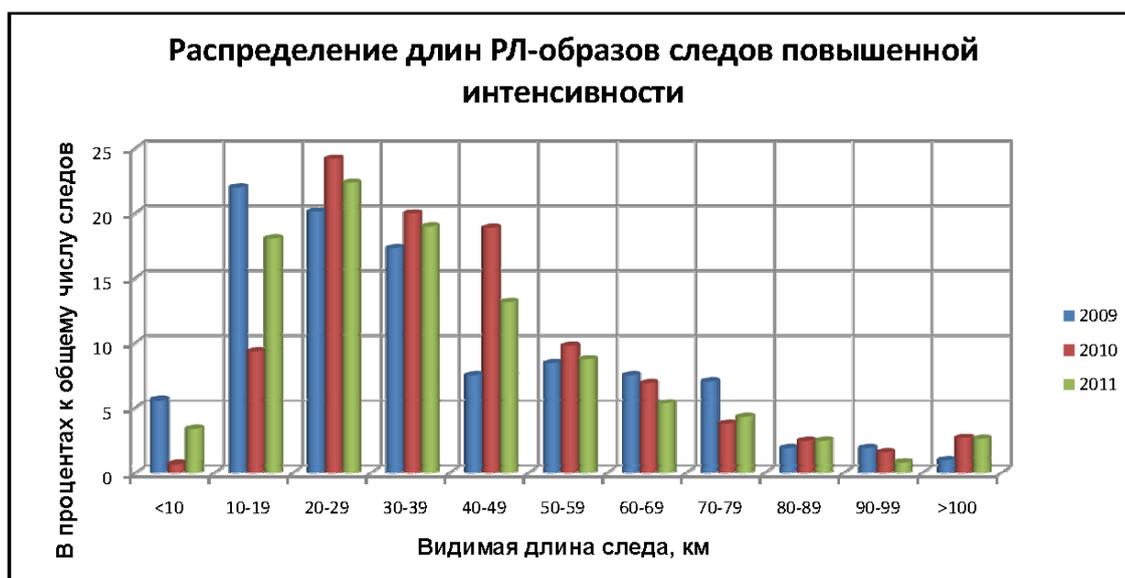


Рис. 4. Распределение длин РЛ-образов долгоживущих корабельных следов, выявленных в акватории Балтийского моря в 2009-2011 гг.

Из диаграммы следует, что характерные длины следов этого типа составляют 10–50 км, однако в отдельных случаях их протяженность может превышать 150 километров. Следует отметить также, что зачастую в связи с геометрией съемки на РЛИ может отображаться не весь след, а только его часть. С другой стороны, в зонах интенсивного судоходства корабли могут следовать непосредственно один за другим или навстречу друг другу, и существует опасность посчитать два следа за один. Наблюдается также существенная межгодовая изменчивость распределений длин РЛ-образов долгоживущих корабельных следов. Исходя из протяженности следов, выявленных по радиолокационным данным, и задавшись средней скоростью судна в 15 узлов (27 км/ч), что можно считать неким средним значением для крупных судов, оставляющих за собой долгоживущие следы, получаем приблизительную оценку за 2009-2010 гг. продолжительности жизни таких следов от одного до шести часов.

Совместный анализ спутниковых радиолокационных данных и данных спутниковых сенсоров оптического диапазона позволяет предположить, что чаще всего долгоживущие корабельные следы, проявляющиеся как полосы повышенного радиолокационного рассеяния, наблюдаются в тех районах, где в момент наблюдения происходит интенсивное цветение фитопланктона. Балтийское море характеризуется двумя основными пиками цветения фитопланктона: весенним цветением диатомовых и динофлагеллят и летним цветением цианобактерий (Wasmund and Uhlig, 2003; Kahru and Elmgren, 2014). Во время цветения диатомовых в приповерхностном слое присутствует относительно небольшое количество клеток, в то время как в период летнего цветения цианобактерии объединяются в агломерации, которые образуют поверхностные или подповерхностные скопления.

Продолжительную жизнь корабельных следов в период летнего цветения можно объяснить следующим образом: судно, продвигаясь в области интенсивного цветения водорослей, оставляет за собой след чистой воды, на которой под действием ветра образуется рябь, отвечающая за усиление обратного рассеяния радиолокационного сигнала. Наши наблюдения показывают, что при относительно слабом ветре такой след долго не затягивается и существенно не расширяется.

На *рис. 5а* приведен фрагмент спутникового РЛИ, содержащего проявления долгоживущих следов за кораблями в районе основных судоходных трасс к юго-востоку от о-ва Готланд. На *рис. 5б* приведен соответствующий ему фрагмент цветосинтезированного изображения, полученного сенсором ТМ ИСЗ *Landsat-5* над тем же районом вскоре после проведения радиолокационной съемки. На основе анализа цветосинтезированного изображения можно утверждать, что в этом районе наблюдалось интенсивное цветение сине-зеленых водорослей, которое в летнее время выступает в качестве хорошо регистрируемого трассера, отображающего положение конвергентно-дивергентных зон и, соответственно, структуру течений. Хорошо видны вихри, филаменты, грибовидные течения, а также узкие протяженные светлые полосы, соответствующие следам за кораблями.

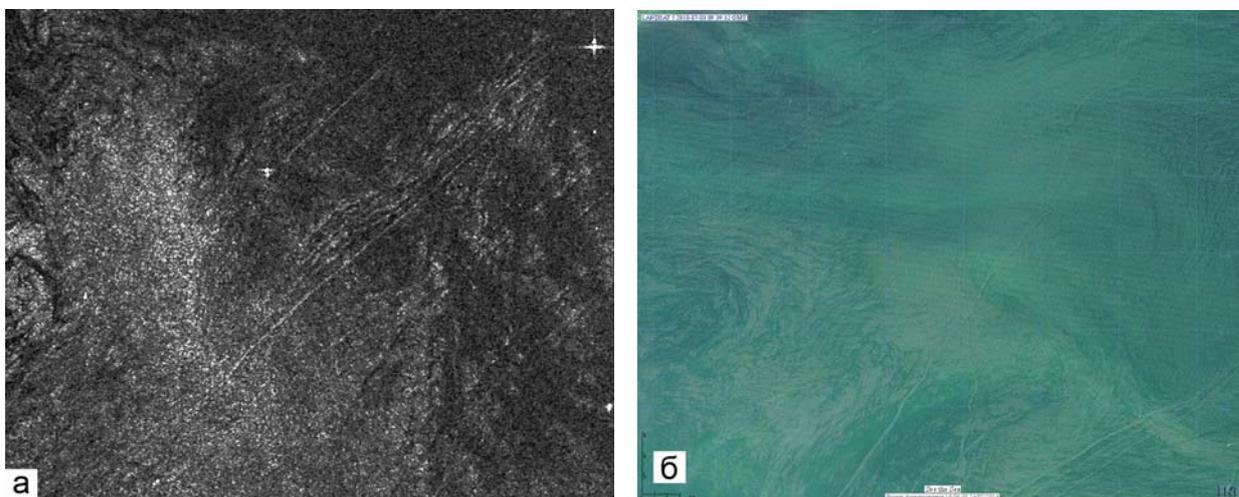


Рис. 5. а) Проявления долгоживущих корабельных следов на Envisat ASAR изображении от 02.07.2010, 20:27:59 UTC; б) Цветосинтезированное изображение ТМ Landsat -5 (3; 2; 1 каналы) от 03.07.2010

Для подтверждения гипотезы о том, что длинные яркие следы действительно наблюдаются в период интенсивного цветения фитопланктона, был проведен статистический анализ радиолокационных изображений ASAR Envisat, полученных над акваторией Балтийского моря в период с февраля 2009 г. по декабрь 2011 г. Для каждого месяца определялся процент, который составляют изображения, содержащие длинные следы повы-

шенной яркости, к общему числу радиолокационных изображений, полученных за этот месяц. Результаты статистического анализа представлены на *рис. 6*.

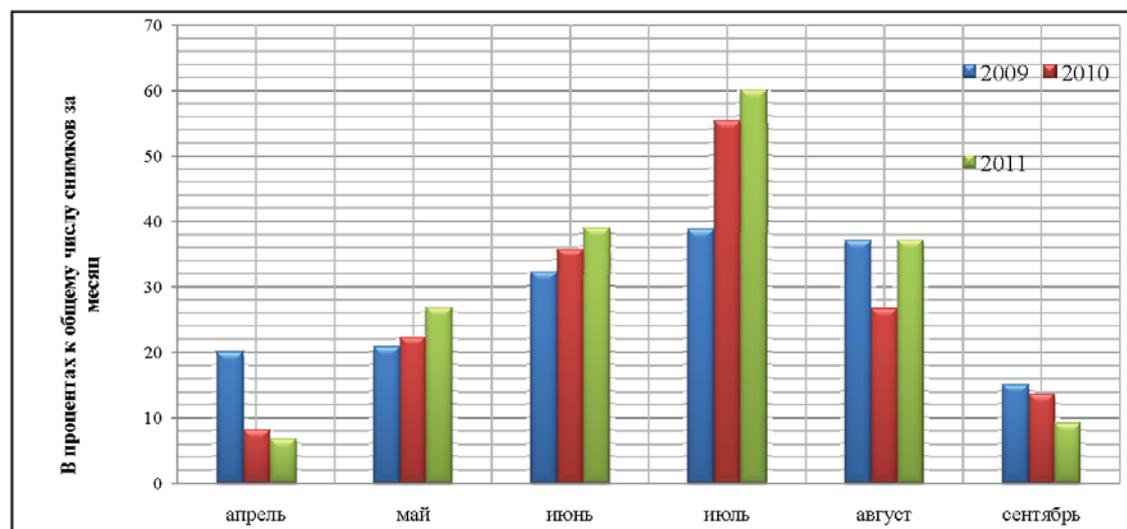


Рис. 6. Процентное соотношение радиолокационных изображений, содержащих проявления долгоживущих корабельных следов в различные месяцы 2009-2011 гг., к общему числу снимков за данный месяц

Приведенные на *рис. 6* результаты получены для всей акватории Балтийского моря, включая Ботнический и Финский заливы, что по большому счету является некорректным, поскольку цветение в разных районах происходит в разные периоды. Однако, эти характеристики представляются достаточно информативными для понимания межгодовой изменчивости интенсивности и продолжительности цветения фитопланктона и подтверждаются опубликованными данными о количественном содержании и видовой изменчивости фитопланктона в различных частях акватории Балтийского моря, полученными *in situ* специалистами шведского гидрометеорологического института в ходе ежегодных ежемесячных круизов на исследовательском судне «Аргос» (Johansen & Skjevik, 2009; Johansen, 2010; Skjevik, 2011), а также данными о распространении и продолжительности цветения цианобактерий, сопровождающегося образованием поверхностных агломераций, приведенными в отчетах HELCOM (Hansson and Öberg, 2009, 2010, 2011).

В частности, высокий процент проявлений долгоживущих корабельных следов, выявленных на РЛИ за апрель 2009 г. (см. *рис. 3а, б*), объясняется ранним началом цветения фитопланктона в южной и восточной Балтике. На графиках интегрального содержания хлорофилла, измеренного на *in situ* станциях в бухте Ханё (Hanö Bight), южная Балтика, и восточнее острова Готланд (Gotland Deerp), восточная Балтика, отчетливо выделяются пики, соответствующие проведенным в апреле измерениям, когда было зарегистрировано цветение диатомовых и динофлагеллят (*рис. 7*). Летнее же цветение цианобактерий

не отличалось высокой интенсивностью и наблюдалось на протяжении лета в различных частях акватории Балтийского моря (рис. 8а) Соответственно и диаграмма проявлений следов повышенной интенсивности для 2009 г. (рис. 6) имеет пологую форму без резких максимумов.

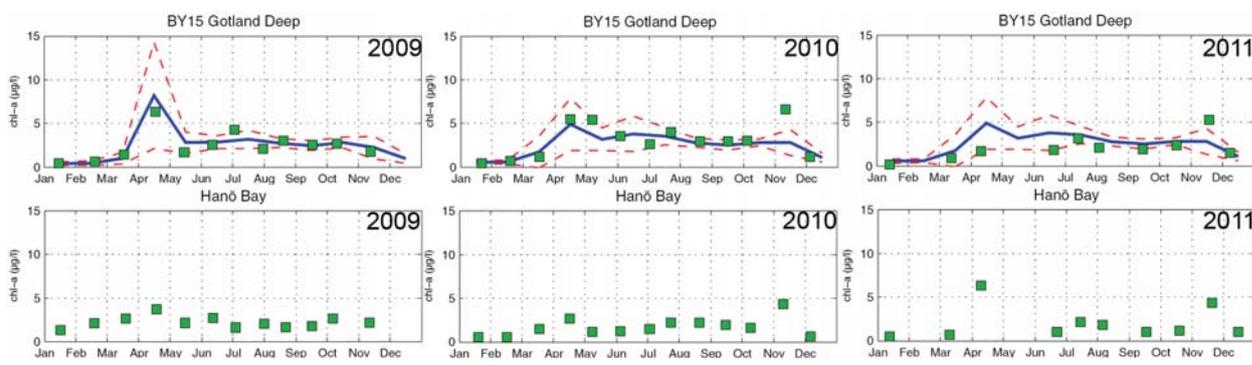


Рис. 7. Среднее содержание хлорофилла-а в слое от поверхности до глубины 20 м, измеренное *in situ* (согласно Johansen & Skjevik, 2009, 2010, 2011)

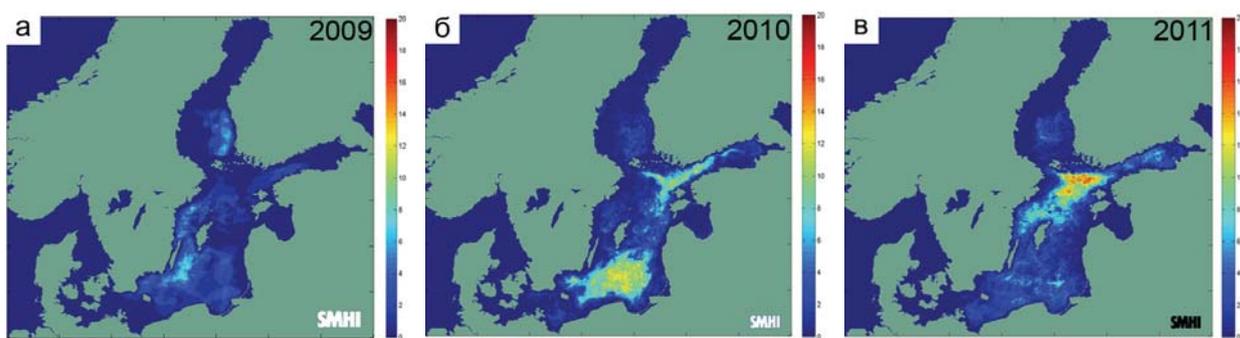


Рис. 8. Количество дней, когда наблюдалось цветение цианобактерий, сопровождающееся образованием поверхностных агрегаций: а) в 2009 г.; б) в 2010 г.; в) в 2011 г. (согласно Hansson and Öberg, 2009, 2010, 2011)

В 2010 г. весеннее цветение диатомовых и динофлагеллят средней интенсивности было зарегистрировано практически на всех измерительных станциях (рис. 7). Пик цветения цианобактерий приходился на июль месяц с последующим резким спадом в августе (рис. 8б). В апреле 2010 г. на РЛИ было выявлено достаточно много проявлений долгоживущих корабельных следов (рис. 3б, б), а пик диаграммы, приведенной на рис. 6, приходится на июль, тогда как в августе наблюдается резкий спад.

В 2011 г. интенсивное весеннее цветение по-прежнему наблюдалось в южной Балтике, но практически отсутствовало в восточной части моря (рис. 7). Однако летнее цветение цианобактерий отличалось продолжительностью и распространялось на значительную часть акватории моря, включая Ботнический залив (рис. 8в). Соответственно в апреле 2011 г. на РЛИ было выявлено минимальное за 3 года количество проявлений

долгоживущих корабельных следов (рис. 3в, б), а приведенная на рис. 6 диаграмма характеризуется широким плавно спадающим максимумом.

Приведенные выше данные о пространственной и временной изменчивости областей активного цветения фитопланктона в Балтийском море согласуются с представленными на рис. 3 картами-схемами долгоживущих следов, выявленных нами по данным спутниковой радиолокации, а также объясняют межгодовую изменчивость помесечных распределений проявления следов повышенной интенсивности в спутниковых данных, представленную на рис. 6.

Заключение

Проанализированы многочисленные радиолокационные образы долгоживущих корабельных следов, выявленных на спутниковых радиолокационных изображениях, полученных над акваторией Балтийского моря. Выявлено, что эти следы проявляются в виде относительно узких полос повышенного радиолокационного сигнала, их характерные длины составляют 10-50 км, но в отдельных случаях наблюдаются следы длиной до 200 км. Выдвинута и подтверждена гипотеза о том, что долгоживущие следы наблюдаются в период интенсивного цветения фитопланктона. Установлено, что наблюдается значительная сезонная и межгодовая изменчивость проявлений долгоживущих следов на РЛИ, обусловленная интенсивностью и продолжительностью цветения фитопланктона в районах наблюдения. Следует подчеркнуть, что долгоживущие корабельные следы интересны не только как малоизученный объект. Использование результатов радиолокационных наблюдений следов этого типа может принести существенную пользу для решения задачи выявления районов и определения сроков интенсивного цветения фитопланктона. При этом видимая длина следов может служить опосредованным параметром, выявляющим площадь акватории, занятую цветением. Следует отметить, что существуют естественные ограничения на использование спутниковых данных оптического диапазона для выявления районов интенсивного цветения, так как акватория Балтийского моря достаточно часто полностью или частично покрыта облачностью. Однако радиолокационные наблюдения могут проводиться вне зависимости от наличия облачности и солнечной освещенности.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского Научного Фонда в рамках гранта № 14-17-00555. Работы по усовершенствованию геопортала «See The Sea» осуществляются при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках гранта 13-07-12017-офи_м. Спутниковые радиолокационные данные предоставлены Европейским космическим агентством в рамках проектов С1Р.6342, С1Р.5004, АОВЕ 2775 и С1Р.1027.

Литература

1. *Ермаков С.А., Капустин И.А.* Экспериментальное исследование расширения турбулентного следа надводного судна // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2010. Т. 46. № 4. С. 565-570.
2. *Лаврова О. Ю., Костяной А. Г., Лебедев С. А., Митягина М. И., Гинзбург А. И., Шеремет Н. А.* Комплексный спутниковый мониторинг морей России. М.: ИКИ РАН, 2011. 472 стр.
3. *Луян Е.А., Матвеев А.М., Уваров И.А., Бочарова Т.Ю., Лаврова О.Ю., Митягина М.И.* Спутниковый сервис See the Sea - инструмент для изучения процессов и явлений на поверхности океана // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 251-262.
4. *Митягина М.И., Лаврова О.Ю.* Многолетний комплексный спутниковый мониторинг нефтяных загрязнений поверхности Балтийского и Каспийского морей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 5. С. 269-288.
5. *Fu, L.-L. and B. Holt.* Seasat views oceans and sea ice with synthetic-aperture radar. JPL Publication 81-120. NASA and JET Propulsion Lab. C.I.T. 1982. 200 p.
6. *Hansson M. and J. Öberg.* Cyanobacterial blooms in the Baltic Sea. HELCOM Baltic Sea Environment Fact Sheets. 2009. – URL: <http://www.helcom.fi/baltic-sea-trends/environment-fact-sheets/>.
7. *Hansson M. and J. Öberg.* Cyanobacterial blooms in the Baltic Sea. HELCOM Baltic Sea Environment Fact Sheets. 2010. – URL: <http://www.helcom.fi/baltic-sea-trends/environment-fact-sheets/>.
8. *Hansson M. and J. Öberg.* Cyanobacterial blooms in the Baltic Sea. HELCOM Baltic Sea Environment Fact Sheets. 2011. – URL: <http://www.helcom.fi/baltic-sea-trends/environment-fact-sheets/>.
9. *Hennings, I., Romeiser, R., Alpers, W., Viola, A.* Radar imaging of Kelvin arms of ship wakes // International Journal of Remote Sensing. 1999. Vol. 20. No. 13. P. 2519–254.
10. *Johansen M.* Algae report number 13. 2010. – URL: <http://www.smhi.se/en/Publications/algae-report-number-13-2010-1.14326>.
11. *Johansen M. and A.-T. Skjevik.* Algae report number 11. 2009. – URL: <http://www.smhi.se/en/Publications/algae-report-number-13-2010-1.14326>.
12. *Kahru, M. and Elmgren, R.* Multidecadal time series of satellite-detected accumulations of cyanobacteria in the Baltic Sea // Biogeosciences. 2014. Vol. 11. P. 3619-3633.
13. *Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Bocharova T. Yu.* Manifestation of ship wakes in satellite images in periods of intense algae bloom // Proc. of IEEE/OES Baltic Symposium 2014: Measuring and Modeling of Multi-Scale Interactions in the Marine Environment. Tallinn. 2014. 6 p.
14. *Mityagina, Marina I., Lavrova Olga Yu.,* Satellite survey in the Black Sea coastal zone // International Water Technology Journal. 2012. Vol. 2. Issue 1. P.67 – 79.
15. *Peltzer RD, Griffin OM, Barger WR, Kaiser JAC.* High-resolution measurements of surface-active film redistribution in ship wakes // Journal of Geophysical Research. 1992. Vol. 97. No. C4. P. 5231–5252.
16. *Pichel, W. G., Clemente-Colón, P., Wackerman, C.C., Friedman K.S.* Ship and wake detection // Synthetic Aperture Radar Marine User's Manual (Ed. C. R. Jackson J. R. Apel). 2004. P. 277-304.
17. *Reed, A. M., Milgram, J. H.* Ship wakes and their radar images // Annual Review of Fluid Mechanics. 2002. Vol. 34. P. 469-502.
18. *Skjevik A.-T.* Algae report number 13. 2010. – URL: <http://www.smhi.se/en/Publications/algae-report-number-13-2010-1.14326>.
19. *Soloviev A., Gilman, M., Young, K., Brusch, S., and Lehner, S.* Sonar measurements in ship wakes simultaneous with TerraSAR-X overpasses // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2010. Vol. 48. P. 841–851.
20. *Wasmund, N., and Uhlig, S.* Phytoplankton trends in the Baltic Sea. // ICES Journal of Marine Science. 2003. Vol. 60. P. 177–186.
21. *Zilman, G., A. Zapolski, and M. Marom.* The speed and beam of a ship from its wake's SAR images // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2004. Vol. 42. P. 2335–2343.

Radar manifestations of ship wakes in areas of intense phytoplankton bloom

M.I. Mityagina, O.Yu. Lavrova

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia

E-mail: mityag@mx.iki.rssi.ru

Some aspects of the visibility of wakes behind moving ships in satellite radar imagery are discussed. The basic data are satellite radar images obtained by advanced synthetic aperture radar (ASAR) on board Envisat satellite of the European Space Agency. Remotely sensed data in visible and IR bands taken by sensors Envisat MERIS, Terra/Aqua MODIS. Landsat-5 TM and Landsat-7 ETM+ are involved into consideration as well. Instances of radar signatures of the ship wakes were detected in radar images obtained in the course of a satellite monitoring campaign of the central and southeastern Baltic. These ship wakes are manifested in radar images as relatively narrow strips of enhanced backscattered signal following the ship path. The large amount of the data available allowed us to make some generalizations and obtain statistically reliable results concerning main spatial and temporal characteristics of this type of ship wake manifestations in SAR images of the sea surface. It was found that these wakes are considerably long - lasting structures and their lengths can reach hundreds of kilometers. A significant seasonal and year-to-year variability of these ship wake manifestations in radar images is revealed. Possible factors facilitating formation of this type of ship wake radar manifestations are found out. The hypothesis is put forward of the coherence of this type of ship wakes detected in sea surface radar imagery and areas of intense phytoplankton bloom.

Keywords: satellite radar imagery, satellite monitoring, sea surface, ship wakes, phytoplankton, the Baltic Sea, algae bloom

References

1. Ermakov S.A., Kapustin I.A., Eksperimental'noe issledovanie rasshireniya turbulentnogo sleda nadvodnogo sudna (Experimental study of turbulent-wake expansion from a surface), *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Fizika atmosfery i okeana*, 2010, Vol. 46, No. 4, pp. 565-570.
2. Lavrova O. Yu., Kostyanoi A. G., Lebedev S. A., Mityagina M. I., Ginzburg A. I., Sheremet N. A., *Kompleksnyi sputnikovyi monitoring morei Rossii* (Complex satellite monitoring of the Russian seas), Moscow: IKI RAN, 2011, 472 p.
3. Loupian E.A., Matveev A.M., Uvarov I.A., Bocharova T.Yu., Lavrova O.Yu., Mityagina M.I., *Sputnikovyi servis See the Sea - instrument dlya izucheniya protsessov i yavlenii na poverkhnosti okeana* (The Satellite Service See the Sea - a tool for the study of oceanic phenomena and processes), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 2, pp. 251-262.
4. Mityagina M.I., Lavrova O.Yu., *Mnogoletnii kompleksnyi sputnikovyi monitoring neftyanykh zagryaznenii poverkhnosti Baltiiskogo i Kaspiiskogo morei* (Long-term complex satellite monitoring of the surface oil pollution of the Baltic and Caspian seas), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 5, pp. 269-288.
5. Fu, L.-L. and B. Holt, *Seasat views oceans and sea ice with synthetic-aperture radar*, JPL Publication 81-120. NASA and JET Propulsion Lab, C.I.T., 1982, 200 p.
6. Hansson M. and J. Öberg, Cyanobacterial blooms in the Baltic Sea. *HELCOM Baltic Sea Environment Fact Sheets*, 2009, available at: <http://www.helcom.fi/baltic-sea-trends/environment-fact-sheets/>.
7. Hansson M. and J. Öberg, Cyanobacterial blooms in the Baltic Sea. *HELCOM Baltic Sea Environment Fact Sheets*, 2010, available at: <http://www.helcom.fi/baltic-sea-trends/environment-fact-sheets/>.
8. Hansson M. and J. Öberg, Cyanobacterial blooms in the Baltic Sea. *HELCOM Baltic Sea Environment Fact Sheets*, 2011, available at: <http://www.helcom.fi/baltic-sea-trends/environment-fact-sheets/>.
9. Hennings, I., Romeiser, R., Alpers, W., Viola, A., Radar imaging of Kelvin arms of ship wakes, *International Journal of Remote Sensing*, 1999, Vol. 20, No. 13, pp. 2519-254.
10. Johansen M. and A.-T. Skjevik, *Algae report number 11, 2009*, available at: <http://www.smhi.se/en/Publications/algae-report-number-13-2010-1.14326>.
11. Johansen M., *Algae report number 13, 2010*, available at: <http://www.smhi.se/en/Publications/algae-report-number-13-2010-1.14326>.
12. Kahru, M. and Elmgren, R., Multidecadal time series of satellite-detected accumulations of cyanobacteria in the Baltic Sea, *Biogeosciences*, 2014, Vol. 11, pp. 3619-3633.

13. Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Bocharova T. Yu., Manifestation of ship wakes in satellite images in periods of intense algae bloom, Proc. of *IEEE/OES Baltic Symposium 2014: Measuring and Modeling of Multi-Scale Interactions in the Marine Environment*, Tallinn, 2014, 6 p.
14. Mityagina, Marina I., Lavrova Olga Yu., Satellite survey in the Black Sea coastal zone, *International Water Technology Journal*, 2012, Vol. 2, Issue 1, pp.67 – 79.
15. Peltzer RD, Griffin OM, Barger WR, Kaiser JAC, High-resolution measurements of surface-active film redistribution in ship wakes, *Journal of Geophysical Research*, 1992, Vol. 97, No. C4, pp. 5231–5252.
16. Pichel, W. G., Clemente-Colón, P., Wackerman, C.C., Friedman K.S., Ship and wake detection, In: *Synthetic Aperture Radar Marine User's Manual* (Ed. C. R. Jackson J. R. Apel), 2004, pp. 277-304, available at: <http://www.sarusersmanual.com/>.
17. Reed, A. M., Milgram, J. H., Ship wakes and their radar images, *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2002, Vol. 34, pp. 469-502.
18. Skjevik A.-T. Algae report number 13, 2010, available at: <http://www.smhi.se/en/Publications/algae-report-number-13-2010-1.14326> .
19. Soloviev A., Gilman, M., Young, K., Bruschi, S., and Lehner, S., Sonar measurements in ship wakes simultaneous with TerraSAR-X overpasses, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, Vol. 48, pp. 841–851.
20. Wasmund, N., and Uhlig, S., Phytoplankton trends in the Baltic Sea, *ICES Journal of Marine Science*, 2003, Vol. 60, pp. 177–186.
21. Zilman, G., A. Zapolski, and M. Marom, The speed and beam of a ship from its wake's SAR images, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, Vol. 42, pp. 2335–2343.