

Применение радиолокаторов *RADARSAT-2* и *TerraSAR-X* для исследования гидродинамических процессов в океане

О.Ю. Лаврова, М.И. Митягина, С.С. Каримова, Т.Ю. Бочарова

*Институт космических исследований РАН,
117997 Москва, Профсоюзная 84/32
E-mail: olavrova@iki.rssi.ru*

Приводятся технические характеристики радиолокаторов с синтезированной апертурой нового поколения, установленных на спутниках *TerraSAR-X*, *TanDEM-X* и *RADARSAT-2*. Обсуждается опыт использования получаемых в различных режимах изображений для исследования океанических процессов.

Ключевые слова: радиолокаторы с синтезированной апертурой, вертикальная и горизонтальная поляризации, *TerraSAR-X*, *TanDEM-X* и *RADARSAT-2*, морская поверхность, процессы в океане.

Современное изучение процессов, происходящих на поверхности и в верхнем слое океана, невозможно без использования данных, получаемых с помощью приборов, установленных на различных космических аппаратах. Особое место в ряду сенсоров дистанционной диагностики занимают радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА) спутникового базирования, предоставляющие оперативную и регулярную информацию о поверхности океана независимо от погодных условий, освещенности и времени суток с высоким пространственным разрешением. Подробное описание современных космических систем радиолокационного наблюдения, перспектив их развития, принципов обработки и использования получаемой информации можно найти в вышедшей в 2010 году монографии В.С. Верба, Л.Б. Неронский, И.Г. Осипов, В.Э. Турук «Радиолокационные системы землеобзора космического базирования» (Верба и др., 2010).

В отсутствие на орбите в настоящее время российских спутниковых радиолокаторов, предоставляющих открытую информацию с высоким пространственным разрешением, российские ученые вынуждены для своих исследований использовать данные, получаемые зарубежными приборами. После окончания срока работы хорошо себя зарекомендовавших РСА космических аппаратов SAR *ERS-1,2*; ASAR *Envisat* и PALSAR *ALOS* основными инструментами становятся радиолокаторы группировки спутников *Terra-SAR-X*, *TanDEM-X* и *RADARSAT*.

В данной статье на основе технической документации, представленной на официальных сайтах *RADARSAT-2* (<http://www.asc-csa.gc.ca/eng/satellites/radarsat2/>) и *TerraSAR-X* (<http://www.infoterra.de/terrasar-x-satellite>), проведен анализ технических характеристик РСА нового поколения, установленных на спутниках *TerraSAR-X*, *TanDEM-X* и *RADARSAT-2*. Нами протестированы РСА-изображения вышеописанных спутников, полученные в различных режимах, и выявлены параметры радиолокационной съемки, необходимые для решения задач, направленных на исследование океанических процессов.

1. Группировка спутников *TerraSAR-X* и *TanDEM-X*

Спутник *TerraSAR-X*, совместно разработанный немецким аэрокосмическим центром (DLR) и компанией *EADS Astrium GmbH*, Германия, был запущен 15 июня 2007 г. с космодрома Байконур ракетой-носителем «Днепр» и выведен на околополярную орбиту со средней высотой 514 км и наклоном 97,44°. Период обращения составляет 95 минут, а период точной повторяемости орбит - 11 суток. Общий вид искусственного спутника Земли (ИСЗ) *TerraSAR-X* представлен на рис. 1.

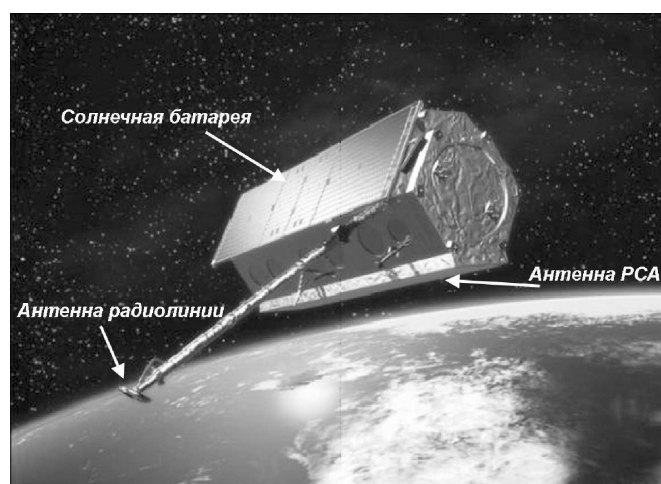


Рис. 1. Общий вид ИСЗ TerraSAR-X

ИСЗ *TanDEM-X*, являющийся точной копией спутника *TerraSAR-X*, был выведен на орбиту 21 июня 2010 г. года также ракетой носителем «Днепр» с космодрома Байконур. Оба спутника находятся на расстоянии 150 метров друг от друга и образуют радарный интерферометр. Предполагается, что таким образом можно получить трехмерные снимки объектов на земной поверхности. Общий вид группировки ИСЗ *TerraSAR-X* и *TanDEM-X* представлен на рис. 2.

Радиолокаторы с синтезированной апертурой антенны, установленные на ИСЗ *TerraSAR-X* и *TanDEM-X*, позволяют изменять направление радиолокационного луча в диапазоне от 20° до 60° градусов, причем это достигается не механическим движением антенны, а сложением множества отдельных лучей.



Рис. 2. Общий вид группировки ИСЗ TerraSAR-X и TanDEM-X
(<http://www.astrium-geo.com/en/903-technical-information>)

Радиолокаторы выполняют съемку в X -диапазоне длин волн. Радиосигналы, излучаемые в этой части спектра, имеют частоту 9,65 ГГц и длину волны 3 см. Установленные на ИСЗ *TerraSAR-X* и *TanDEM-X* радиолокаторы имеют конструктивную возможность одновременной передачи и приема зондирующего сигнала на разных поляризациях – вертикальной и горизонтальной. Двухполяризационный радиолокатор может посылать вертикально- или горизонтально- поляризованный сигнал, и принимать обратно-рассеянный сигнал либо на любой из этих поляризаций, либо на двух поляризациях одновременно. Это позволяет получать радиолокационные изображения (РЛИ) для четырех комбинаций – ВВ, ГГ, ВГ, ГВ (первая буква соответствует поляризации испускаемого сигнала, а вторая – принятого).

Радиолокационные изображения могут быть получены радиолокаторами ИСЗ *TerraSAR-X* и *TanDEM-X* при трех различных режимах съемки:

- маршрутный (*StripMap mode SM*);
- прожекторный (*Spotlight mode SL, High Resolution Spotlight mode HS*);
- сканирующий (*ScanSAR mode SC*).
- Ниже возможные режимы съемок будут рассмотрены более подробно.

Режимы работы РСА ИСЗ TerraSAR-X и TanDEM-X

Маршрутный режим. Съемка в маршрутном режиме является основным режимом получения радиолокационных изображений, так же, как и для более ранних радиолокаторов с синтезированной апертурой спутников *ERS-1/2* и *Envisat*. Основные параметры съемки в этом режиме приведены в таб. 1.

Таблица 1. Основные параметры радиолокационной съемки в маршрутном режиме

Параметр	Значение
Ширина полосы обзора по наземной дальности	30 км для одиночной поляризации 15 км для двойной поляризации
Номинальная длина изображения для продукта первого уровня (L1)	50 км
Доступный интервал углов	15° - 60°
Разрешение по азимуту	3,3 м для одиночной поляризации 6,6 м для двойной поляризации
Разрешение по наземной дальности	1,70 м – 3,49 м
Поляризации	ГГ или ВВ (одиночные) ГГ/ВВ, ГГ/ГВ, ВВ/ВГ (двойные)

Геометрия радиолокационной съемки в маршрутном режиме представлена на рис. 3.

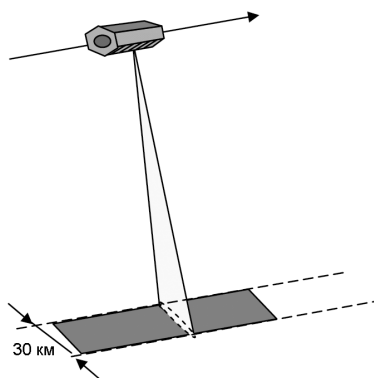


Рис. 3. Получение изображения при съемке в маршрутном режиме (<http://www.astrium-geo.com>)

На рис. 4 приведен пример РСА-изображения, полученного 12.10.2011 с ИСЗ *TerraSAR-X* при съемке в маршрутном режиме на одиночной ВВ поляризации с пространственным разрешением 3 метра. На РЛИ отчетливо выделяется нефтяной slick у берегов Новой Зеландии, образовавшийся в результате крушения контейнеровоза «Рена». Увеличенный фрагмент показывает положение судна. На РЛИ также видны вихревые структуры, которые визуализируются благодаря сликовым полосам, образованным нефтяной пленкой, попавшей на поверхность в результате аварии. Благодаря высокому пространственному разрешению на РЛИ хорошо просматривается развитое поверхностное волнение.

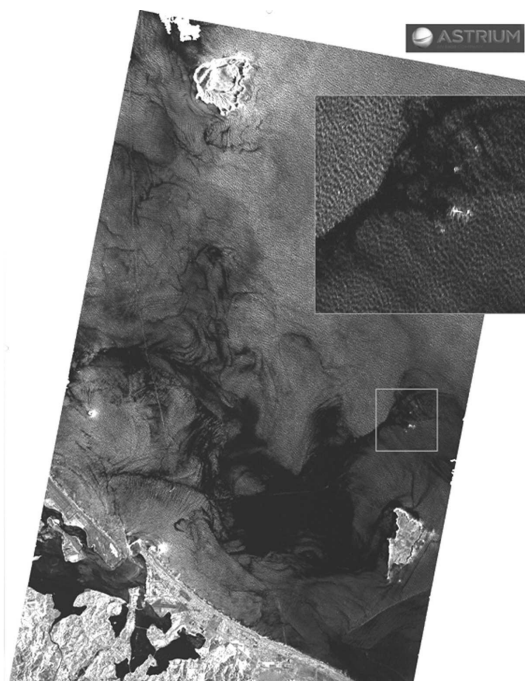


Рис. 4. Радиолокационное изображение TerraSAR-X, полученное 12.10.2011 при съемке в маршрутном режиме. Пространственное разрешение 3 м. Во врезке – увеличенный фрагмент, показывающий нефтяной слик и положение судна. (© Astrum Services / Infoterra GmbH)

Еще один пример РСА-изображения, полученного 30.09.2011 с ИСЗ *TerraSAR-X* при съемке в маршрутном режиме на одиночной ГГ поляризации в северо-восточной части Черного моря, приведен на рис. 5. Хорошо видна рефракция поверхностного волнения на входе в Геленджикскую бухту. Детектируются также два слика, обусловленные антропогенными пленочными загрязнениями морской поверхности.

Прожекторный режим. Как видно на рис. 6, прожекторный режим съемки основан на отклонении фазированной антенной решетки в азимутальном направлении, с целью увеличения времени наблюдения, т.е. увеличения размера синтезированной апертуры антенны. Увеличение размера синтезированной апертуры ведет к увеличению разрешения в азимутальном направлении, однако при этом уменьшается ширина полосы обзора в азимутальном направлении.



Рис. 5. Фрагмент изображения TerraSAR-X, полученного 30.09.2011 в 15:16 UTC при съемке в маршрутном режиме на одиночной ГГ поляризации. Разрешение 3 м. (© Astrum Services / Infoterra GmbH)

Конструктивно предусмотрена возможность проведения съемки в прожекторном режиме при двух различных значениях разрешения в азимутальном направлении и, соответственно, с различной шириной полосы обзора в азимутальном направлении. Для обозначения этих двух режимов используют термины прожекторный режим (*Spotlight, SL*) и прожекторный режим высокого разрешения (*High Resolution Spotlight, HS*). Основные параметры съемки в прожекторных режимах приведены в таб. 2.

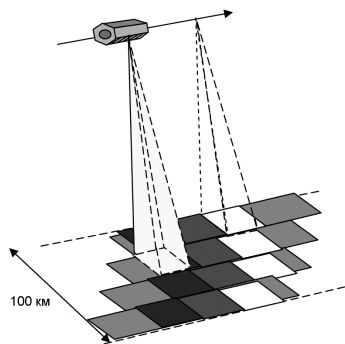


Рис. 6. Геометрия радиолокационной съемки в прожекторных режимах режиме
(<http://www.astrium-geo.com>)

Таблица 2. Основные параметры радиолокационной съемки в прожекторных режимах

Параметр	Значение	
	Прожекторный режим высокого разрешения	Прожекторный режим
Размер кадра	5 км (азимут) x 10 км (наземная дальность)	10 км (азимут) x 10 км (наземная дальность)
Доступный интервал углов	15° - 60°	15° - 60°
Разрешение по азимуту	1,1 м для одиночной поляризации 2,2 м для двойной поляризации	1,7 м для одиночной поляризации 3,4 м для двойной поляризации
Разрешение по наземной дальности	1,48 – 3,49 м	1,48 – 3,49 м
Поляризации	ГГ или ВВ (одиночные); ГГ/ВВ (двойная)	ГГ или ВВ (одиночные); ГГ/ВВ (двойная)

Сканирующий режим. Съемка в сканирующем режиме позволяет получать изображение в полосе обзора 100 км, комбинируя 4 различных изображения, полученных в прожекторном режиме. Геометрия радиолокационной съемки в сканирующем режиме представлена на рис. 7.

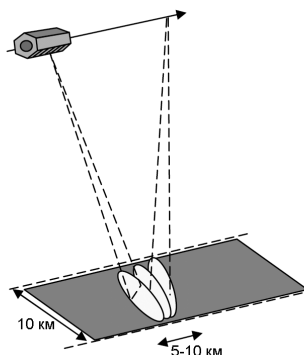


Рис. 7. Четырехлучевая геометрия радиолокационной съемки в сканирующем режиме
(<http://www.astrium-geo.com>)

Основные параметры съемки в сканирующем режиме приведены в таб. 3.

Таблица 3. Основные параметры съемки в сканирующем режиме

Параметр	Значение
Число полос	4
Ширина полосы обзора по наземной дальности	100 км
Номинальная длина изображения для продукта первого уровня (L1)	150 км
Доступный интервал углов	15 – 60°
Разрешение по азимуту	18,5 м
Разрешение по наземной дальности	1,70 – 3,49 м
Поляризации	ГГ или ВВ (одиночные)

2. Группировка спутников RADARSAT

Космический аппарат *RADARSAT-1*, созданный под управлением Канадского космического агентства CSA (Canadian Space Agency) во взаимодействии с несколькими коммерческими структурами и является коммерческим космическим аппаратом. *RADARSAT-1* был запущен 4 ноября 1995 года с авиабазы Ванденберг на солнечно-синхронную орбиту со средней высотой 798 км, и наклоном 98,6° с 24-дневным циклом точной повторяемости пролетов по своим трассам. При расчетном сроке эксплуатации 5 лет аппарат *RADARSAT-1* функционирует на орбите уже более 15 лет. Основные характеристики орбиты спутника *RADARSAT-1* представлены в таб. 4

Таблица 4. Характеристики орбиты спутника *RADARSAT-1*

Тип орбиты	Круговая, солнечно-синхронная
Высота орбиты	798 км
Наклонение	98,6°
Период обращения	100,7 мин
Периодичность повторения трассы полета	24 сут
Частота съемки	в полосе широт 49° – 70°: 3 суток в приполярных районах: ежедневно
Время пересечения экватора	Нисходящая орбита – 6 час. Восходящая орбита – 18 час.

Режимы работы PCA ИСЗ RADARSAT-1

Космический аппарат *RADARSAT-1* оснащен радиолокатором с синтезированной апертурой. PCA выполняет съемку поверхности в С-диапазоне длин волн (5,6 см), на горизонтальной поляризации излучения, в диапазоне углов падения от 10 до 59° справа от линии пути спутника. PCA может работать в одном из семи основных режимов, перечисленных в таб. 5.

Таблица 5. Основные режимы работы PCA ИСЗ *RADARSAT-1*

Режим	Ширина полосы обзора, км	Номинальное пространств. разрешение, м	Пределы смещения полосы обзора, км
Детальный (Fine)	50	8	500
Стандартный (Standard)	100	25	500
Широкополосный (Wide)	150	30	500
Расширенный дальний (Extended High) *	75	25	425
Расширенный ближний (Extended Low) *	170	25	250
Обзорный широкий (ScanSAR Wide)	500	100	500
Обзорный узкий (ScanSAR Narrow)	300	50	500

* съемка в «Расширенных» режимах ведется вне оптимальных углов наблюдения поверхности, вследствие чего изображения могут иметь несколько худшее качество по сравнению с прочими режимами

Схема получения изображений PCA ИСЗ *Radarsat-1* при разных режимах съемки представлена на рис. 8.

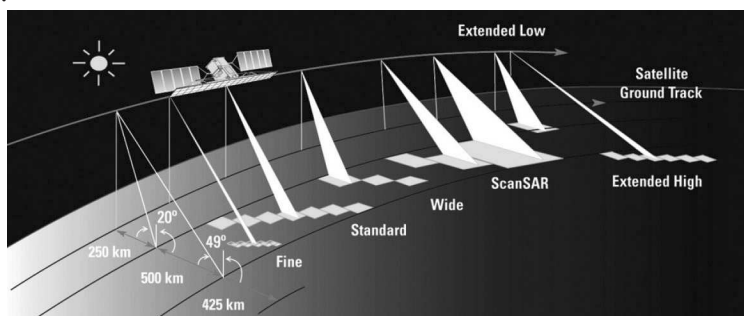


Рис. 8. Схема получения изображений PCA ИСЗ *Radarsat-1* при разных режимах съемки (<http://www.asc-csa.gc.ca/eng/satellites/radarsat/radarsat-tableau.asp#r1>)

Режимы работы PCA ИСЗ *RADARSAT-2*

В декабре 2007 г. с космодрома Байконур был запущен космический аппарат *RADARSAT-2*, разработанный Канадским космическим агентством и компанией *MDA (MacDonald, Dettwiler and Associates Ltd.)*. *RADARSAT-2* также функционирует на солнечно-синхронной орбите, идентичной орбите аппарата *RADARSAT-1* и оснащен PCA, обладающим возможностями изменения ширины полосы съемки и пространственного разрешения. Съемка земной поверхности проводится в С-диапазоне длин волн (5,6 см) с изменяемой поляризацией излучения (ГГ, ВГ, ГВ, ВВ) в диапазоне съемочных углов от 10° до 60°. Расчетный срок пребывания на орбите – не менее 7 лет. Максимальное пространственное разрешение в режиме *Ultra-Fine* составляет 3 м в полосе съемки 20 км. Основные характеристики орбиты ИСЗ *RADARSAT-2* приведены в таб. 6, а общий вид ИСЗ *RADARSAT-2* представлен на рис. 9.

Таблица 6. Характеристики орбиты ИСЗ *RADARSAT-2*

Тип орбиты	Полярная солнечно-синхронная
Высота орбиты	798 км
Наклонение	98,6°
Период обращения	100,7 мин
Периодичность повторения трассы полета	24 сут
Местное время пересечения экватора	06:00 и 18:00

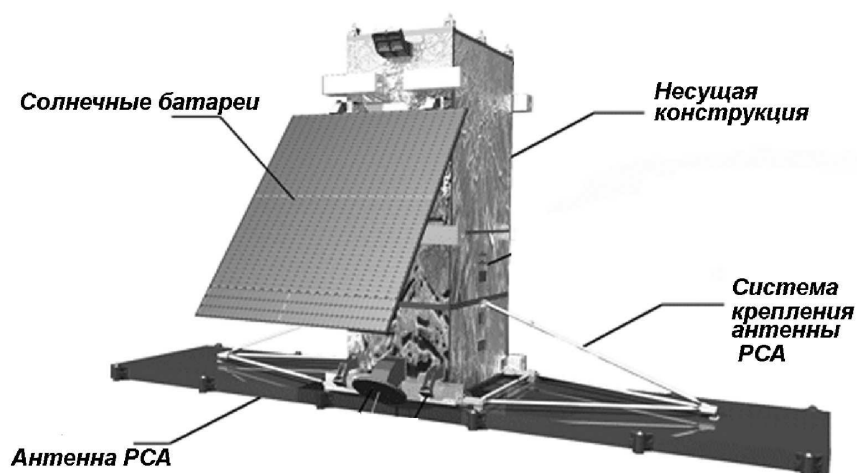


Рис. 9. Общий вид ИСЗ RADARSAT-2

По сравнению с предшествующим космическим аппаратом *RADARSAT-1*, спутник *RADARSAT-2* имеет ряд существенных технических усовершенствований:

- установлен новый радар с активной фазированной антенной решеткой, обеспечивающий съемку с пространственным разрешением до 1-3 м;
- реализован режим многополяризационной съемки с сигналами двух или четырех видов поляризации одновременно;
- обеспечена возможность съемки районов с левой и с правой стороны относительно трассы полета, что позволяет сократить время повторного просмотра;
- увеличена емкость бортового накопителя для выполнения глобальной съемки;
- увеличена точность определения орбитального положения и ориентации спутника и, как следствие, более точной геопривязки изображений.

В таб. 7 перечислены основные режимы работы РСА ИСЗ *RADARSAT-2*.

Таблица 7. Основные режимы работы РСА ИСЗ *RADARSAT-2*

Режимы	Ширина полосы съемки	Разрешение (наземная дальность) x (азимут)	Диапазон углов съемки	Поляризация
Высокого разрешения (<i>Fine</i>)	50 км	8 x 8 м	30° - 50°	ГГ и ГВ , либо ВГ и ВВ
Стандартный (<i>Standard</i>)	100 км	25 x 26 м	20° - 49°	
Широкозахватный (<i>Wide</i>)	150 км	30 x 26 м	20° - 45°	
Узкий низкого разрешения (<i>ScanSAR Narrow</i>)	300 км	50 x 50 м	20° - 46°	
Широкий низкого разрешения (<i>ScanSAR Wide</i>)	500 км	100 x 100 м	20° - 49°	
Расширенный низкого разрешения (<i>Extended Low</i>)	170 км	40 x 26 м	10° - 23°	ГГ
Расширенный высокого разрешения (<i>Extended High</i>)	75 км	18 x 26 м	49° - 60°	
Высокого разрешения с полной поляризацией (<i>Fine Quad-pol</i>)	25 км	12 x 8 м	20° - 41°	ГГ, ВВ, ГВ, ВГ
Стандартный с полной поляризацией (<i>Standard Quad-pol</i>)	25 км	25 x 8 м	20° - 41°	
Сверхвысокого разрешения (<i>Ultra-Fine</i>)	20 км	3 x 3 м	30° - 40°	Один тип из: ГГ / ГВ / ВГ / ВВ

3. Опыт работы с изображениями RADARSAT-2, TerraSAR-X, TanDEM-X

Возможность получения изображений PCA *RADARSAT-2*, *TerraSAR-X*, *TanDEM-X* была предоставлена нашему коллективу в рамках российско-германского проекта «Detecting and Tracking Small Scale Eddies in the Black Sea Using High-Resolution *RADARSAT-2* and *TerraSAR-X* Imagery (DTEddie)» (договор SOAR *RADARSAT-2*/*TerraSAR-X* Initiative LOAN AGREEMENT LI-16180). Договор предусматривает возможность заказа 20-ти сцен *RADARSAT-2* в режимах Ultra Fine SLC и Multi-Look Fine SGX и 80-ти сцен *TerraSAR-X* и *TanDEM-X* в любых режимах съемки. Участниками проекта являются научные группы Университета г. Гамбург и ИКИ РАН. Научная работа выполняется при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках Госконтракта №14.740.12.1342 «Исследование мелкомасштабных гидродинамических процессов в Балтийском, Северном, Черном и Каспийском морях по спутниковым радиолокационным изображениям высокого пространственного разрешения с участием научно-исследовательского коллектива Университета г. Гамбург, Германия». К моменту написания статьи нами было получено всего 16 изображений *RADARSAT-2*, *TerraSAR-X*, *TanDEM-X*. Их параметры представлены в таб. 8.

Таблица 8. Сводная таблица полученных изображений высокого пространственного разрешения

Дата, время (UTC) съемки	ИСЗ	Режим съемки	Поляризация	Размер кадра (км)	Район съемки
28.08.2011 05:15:34	<i>TerraSAR-X</i>	ScanSAR SC	ВВ	100 x 160	Южная оконечность о.Готланд (Балтийское море)
29.08.2011 04:58:25	<i>TerraSAR-X</i>	ScanSAR SC	ВВ	100 x 160	Восточнее о. Готланд (Балтийское море)
30.09.2011 03:44:09	<i>TerraSAR-X</i>	Stripmap SM	ГГ	30 x 14	Голубая бухта – Геленджик (Черное море)
30.09.2011 15:17:39	<i>RADARSAT-2</i>	Ultra Fine SLC	ВВ	20 x 23	Новороссийск -Голубая бухта (Черное море)
04.10.2011 03:41:11	<i>RADARSAT-2</i>	Ultra Fine SLC	ВВ	20 x 23	Голубая бухта – Геленджик (Черное море)
08.10.2011 15:15:46	<i>TanDEM-X</i>	Stripmap SM	ГГ	30 x 20	Голубая бухта – Геленджик (Черное море)
11.10.2011 03:37:02	<i>RADARSAT-2</i>	Ultra Fine SLC	ВВ	20 x 23	Голубая бухта – Геленджик (Черное море)
11.10.2011 03:44:07	<i>TerraSAR-X</i>	Stripmap SM	ГГ	30 x 14	Голубая бухта – Геленджик (Черное море)
04.06.2012 03:44:07	<i>TerraSAR-X</i>	Stripmap SM	ВВ	30 x 63	Голубая бухта – Джанхот (Черное море)
06.06.2012 15:15:40	<i>TerraSAR-X</i>	Stripmap SM	ВВ	30 x 63	Голубая бухта – Джанхот (Черное море)
06.06.2012 15:25:54	<i>RADARSAT-2</i>	Multi-Look Fine SGX	ВВ	50 x 42	Голубая бухта – Джанхот (Черное море)

09.06.2012 03:44:15	<i>TerraSAR-X</i>	Stripmap SM	BB	30 x 63	Голубая бухта – Джанхот (Черное море)
13.06.2012 15:21:44	<i>RADARSAT-2</i>	Multi-Look Fine SGX	BB	50 x 42	Голубая бухта – Джанхот (Черное море)
14.06.2012 03:32:52	<i>RADARSAT-2</i>	Multi-Look Fine SGX	BB	50 x 42	Голубая бухта – Джанхот (Черное море)
15.06.2012 03:35:35	<i>TerraSAR-X</i>	Stripmap SM	BB	30 x 63	Голубая бухта – Джанхот (Черное море)
16.06.2012 15:34:14	<i>RADARSAT-2</i>	Multi-Look Fine SGX	BB	50 x 42	Голубая бухта – Джанхот (Черное море)

Время и район заказа изображений определялись сроками и местом проведения подспутниковых измерений. Результатам, полученным в ходе 2-х серий подспутниковых измерений (сентябрь-октябрь 2011 г. и июнь 2012 г.), планируется посвятить отдельную статью.

Как видно из таблицы, полученные нами данные ограничивались 2-мя режимами съемки для *RADARSAT-2*: Ultra Fine SLC и Multi-Look Fine SGX и BB поляризацией и 2-мя режимами съемки для *TerraSAR-X*: ScanSAR SC и Stripmap SM. Для режима съемки Stripmap SM изображения были получены как на BB, так и на ГГ поляризациях. Выбор режимов съемки определялся поставленными задачами. Одной из основных задач являлось изучение особенностей проявлений мелкомасштабных вихревых структур и внутренних волн на радиолокационных изображениях высокого разрешения. Проведенные ранее исследования (DiGiacomo and B. Holt, 2001; Лаврова, 2005; Митягина, 2008; Каримова, 2009) показали, что на РЛИ морской поверхности детектируется большое количество вихрей относительно малых размеров, с диаметрами от нескольких километров до десятков километров (причем на их периферии могут развиваться вихри меньших размеров). Вихри этого типа имеют, как правило, спиралеобразный вид, и в подавляющем большинстве случаев являются циклоническими по направлению вращения. На радиолокационных изображениях данные вихри визуализируются благодаря сликовым полосам, образованным пленками поверхностно-активных веществ естественного происхождения, постоянно присутствующим на морской поверхности, особенно в теплое время года. Эти пленки обладают способностью избирательного гашения гравитационно-капиллярной составляющей поверхностного волнения, в силу неравномерного распределения поверхностного натяжения в местах их скопления, и тем самым уменьшают величину обратно рассеянного сигнала (Ермаков, 2010). Вовлекаясь в орбитальные движения, пленки естественного происхождения как бы «прорисовывают» вихри на радиолокационных изображениях, преимущественно в условиях слабого и умеренного приповерхностного ветра (Alpers and Nühnerfuss, 1989; Лаврова, 2005). Благодаря присутствию на поверхности пленок поверхностно активных веществ, средства радиолокации позволяют регистрировать вихревые структуры малых размеров.

Только с появлением возможности использования данных радиолокаторов высокого пространственного разрешения *RADARSAT-2* и *TerraSAR-X*, которые позволяют изучать субмезомасштабные гидродинамические процессы с характерными пространственными масштабами менее 1 км независимо от погодных условий, освещенности и времени суток, открылись перспективы получения новых важных и интересных результатов в этом направлении.

Проведенный нами сравнительный анализ имеющихся данных, полученных с помощью различных спутниковых радиолокаторов при различных режимах съемки и на различных поляризациях, позволил сделать следующие выводы.

Режим съемки сверхвысокого разрешения Ultra Fine PCA *RADARSAT-2* является наиболее пригодными для изучения поверхностного волнения, решения задач, связанных с обна-

ружением судов, выявления небольших по площади загрязнений морской поверхности, для проведения синхронных подспутниковых измерений с маломерного судна. Знание относительного положения судов на якорных стоянках, т.е. идентификацию у конкретного судна носа и кормы, позволяет выявлять вихревые структуры. Как отмечено в докладе Запечина А.Г. (http://d33.infospace.ru/d33_conf/2011_conf_pdf/ocean/zasepin.pdf) разворот кораблей на якоре показывает направление вращения воды в вихре. Основной недостаток изображений, полученных при данном режиме съемки – это небольшой размер кадра, т.к. ширина полосы обзора составляет всего 20 км. При такой полосе обзора вероятность попадания в кадр поверхностных проявлений интересующих нас гидродинамических процессов слишком мала.

Режим съемки высокого разрешения Multi-Look Fine PCA *RADARSAT-2* представляется нам оптимальным для изучения субмезомасштабных вихрей. Пространственное разрешение изображений, составляющее 8 м, достаточно для определения параметров вихрей, а ширина полосы обзора 50 км повышает вероятность их обнаружения. Недостаток данного режима съемки состоит в том, что он мало пригоден для изучения ветрового волнения.

Поскольку все имеющиеся к настоящему моменту в нашем распоряжении РЛИ *RADARSAT-2* получены на ВВ поляризации, никакого заключения о поляризационных различиях мы сделать не можем.

На рис. 10 представлены изображения *RADARSAT-2*, полученные в режимах съемки Ultra Fine (рис. 10а) и Multi-Look Fine (рис. 10б). Естественно, из журнальной иллюстрации можно получить только приблизительное представление о качестве и возможностях каждого режима.

Режим съемки ScanSAR PCA *TerraSAR-X* наиболее подходит для наблюдения относительно больших участков акваторий, поскольку ширина полосы обзора составляет 100 км (такая же ширина полосы обзора была у SAR *ERS-1/2* и полос I1 и I2 *ASAR Envisat*). Однако, пространственное разрешение 16 м может быть недостаточным для изучения тонкой структуры течений в субмезомасштабных вихрях.

Stripmap (маршрутный) режим съемки РЛИ ИСЗ *TerraSAR-X* и *TanDEM-X* (ширина полосы обзора 30 км, разрешение 3,3 м) сравним со сверхвысоким разрешением *RADARSAT-2*, но превосходит его по ширине полосы обзора, что делает его более удобным для использования. Пример изображения *TerraSAR-X*, полученного в маршрутном режиме съемки приведен на рис. 5.

Делать статистически обоснованные выводы о поляризационных различиях РЛИ *TerraSAR-X*, пока не представляется нам возможным, поскольку РЛИ разных поляризаций получены при существенно разных метеоусловиях. РЛИ на ГГ поляризации были получены в сентябре-октябре 2011 г. при относительно слабом ветре, на них хорошо идентифицируется поверхностное волнение и многочисленные слики, а на РЛИ от июня 2012 г. проявились в первую очередь атмосферные процессы. Использование для анализа большего количества РЛИ, полученных в близких метеоусловиях, позволит, мы надеемся, выявить поляризационные различия и сделать обоснованные выводы о преимуществах и недостатках каждой из поляризаций.

Благодарности. Авторы выражают благодарность немецким коллегам из Университета г. Гамбург: Prof. Leonie Dreschler-Fischer, Dr. Martin Gade, Benjamin Seppke, благодаря которым в рамках совместного проекта «Detecting and Tracking Small Scale Eddies in the Black Sea Using High-Resolution *RADARSAT-2* and *TerraSAR-X* Imagery (DTEddie)» (договор SOAR *RADARSAT-2*/*TerraSAR-X* Initiative LOAN AGREEMENT LI-16180) получены данные *RADARSAT-2* и *TerraSAR-X*. Работа проводится при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках Госконтракта №14.740.12.1342 и проектов РФФИ №10-05-00428 и 11-05-12047-офи-м-2011.

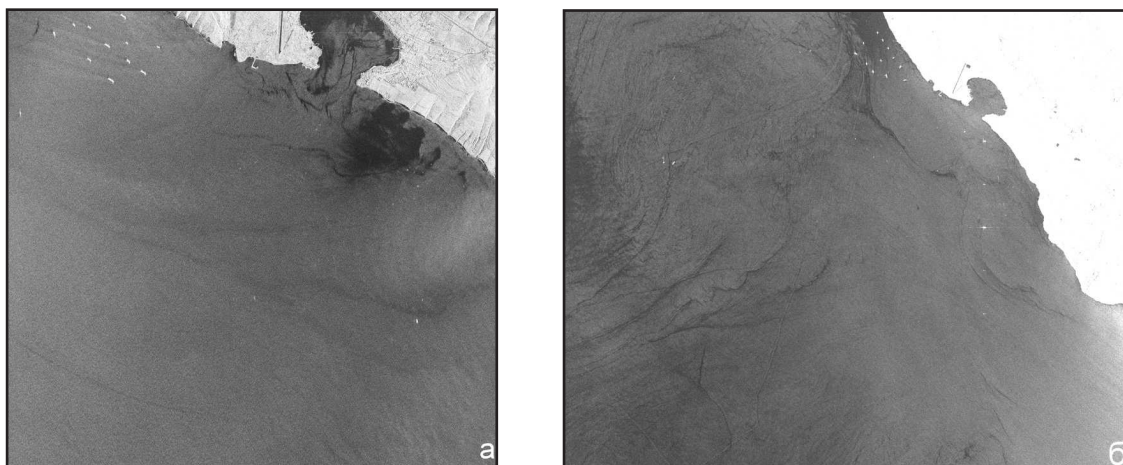


Рис. 10. РЛИ RADARSAT-2, полученные при разных режимах съемки.
 а - Ultra Fine, размер кадра 24 x 23 км. РЛИ от 11 октября 2011 г.;
 б - Multi-Look Fine, размер кадра 53 x 42 км. РЛИ от 06 июня 2012 г.
 (© MacDONALD, DETTWILER AND ASSOCIATES LTD)

Литература

1. Вербa В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. М.: Радиотехника, 2010. 675 с.
2. Ермаков С.А. Влияние пленок на динамику гравитационно-капиллярных волн. Н. Новгород: ИПФ РАН, 2010. 163 с.
3. Каримова С.С. О проявлении вихревых структур на радиолокационных изображениях // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Том 7. №3. С. 152-160.
4. Лаврова О.Ю. Снимки как индикаторы вихревой активности в прибрежной зоне // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. 2005. Т.2. № 2. С. 118-123.
5. Митягина М. И., Лаврова О. Ю. Спутниковые наблюдения вихревых и волновых процессов в прибрежной зоне северо-восточной части Черного моря // Исследование Земли из космоса. 2009. № 5. С. 72-79.
6. Alpers W, Hühnerfuss H. The damping of ocean waves by surface films: A new look at an old problem // Journal of Geophysical Research. 1989. Vol. 94. No C5. P. 6251-6265.
7. DiGiacomo P. M. and B. Holt. Satellite observations of small coastal ocean eddies in the Southern California Bight // Journal of Geophysical Research. 2001. V. 106. P. 22,521-22,543.

Application of RADARSAT-2 and TerraSAR-X radars to study hydrodynamic processes in the ocean

O.Yu. Lavrova, M.I. Mityagina, S.S. Karimova, T.Yu. Bocharova

Space Research Institute of RAS
 117997 Moscow, Profsoyuznaya str.84/32
 E-mail: olavrova@iki.rssi.ru

In the paper the technical details of new-age synthetic aperture radars TerraSAR-X, TanDEM-X and RADARSAT-2 are provided. Experience of application of different mode SAR imagery for oceanographic purposes is being discussed.

Keywords: synthetic aperture radars, HH- and VV-polarization, TerraSAR-X, TanDEM-X, RADARSAT-2, sea surface, oceanic processes.