

Оперативный спутниковый мониторинг акваторий Черного, Балтийского и Каспийского морей в 2009-2010 годах

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

Институт космических исследований РАН

Email: olavrova@iki.rssi.ru

Представлены результаты ежедневного спутникового мониторинга Черного, Балтийского и Каспийского морей, проводимого Лабораторией аэрокосмической радиолокации ИКИ РАН с начала 2009 г. Мониторинг основан на анализе радиолокационных данных со спутников Envisat и ERS-2 среднего (75 м) и высокого (12,5 м) пространственного разрешения, предоставляемых нам Европейским космическим агентством в рамках ряда научных проектов. В статье приведена краткая характеристика используемых данных, приведены примеры наиболее интересных проявлений динамических, гидрометеорологических и техногенных процессов и явлений на спутниковых изображениях. Обобщены результаты наблюдений по ключевым направлениям: мониторинг нефтяного загрязнения морских акваторий, исследование мелкомасштабных вихревых структур, изучение внутренних волн в неприливных морях, наблюдения за ледовой обстановкой и динамикой морских льдов.

Ключевые слова: спутниковый мониторинг, радиолокация морской поверхности, Черное море, Балтийское море, Каспийское море, нефтяные загрязнения, мелкомасштабные вихри, внутренние волны, ледовая обстановка.

Введение

На современном этапе исследование океана нельзя представить без использования информации, полученной с помощью приборов дистанционной диагностики, установленных на различных спутниках, специализированных на дистанционном зондировании Земли. В последнее время во всем мире запущено большое количество спутников с научной аппаратурой на борту, работающей в разных диапазонах электромагнитного спектра. Огромное количество поступающей со спутников информации используется не только в чисто научных целях, но и для решения многих хозяйственных и природоохранных задач. Наибольшую ценность представляют регулярные и оперативные наблюдения одних и тех же районов всеми доступными сенсорами, что предоставляет возможность всестороннего изучения характерных процессов и явлений, выявления взаимосвязей между ними, закономерностей и особенностей их возникновения и развития. В России примерами хорошо организованных ежедневных оперативных спутниковых мониторингов морских акваторий могут служить: оперативный спутниковый мониторинг юго-восточной части Балтийского моря, который проводился силами шести организаций с июня 2004 по ноябрь 2005 года [1,2,3] и оперативный мониторинг состояния и загрязнения морской среды российского сектора Черного и Азовского морей, который проводится с 2003 года ежегодно с апреля по октябрь коллективом НИЦ «Планета». [4,5,6] Авторы принимали активное участие в обоих проектах, накопленный опыт и основные наработки используются для проведения круглогодичного ежедневного оперативного мониторинга акваторий Черного, Каспийского и Балтийского морей.

Используемые данные

Оперативный спутниковый мониторинг базируется на данных спутниковой радиолокации, получаемых с помощью радиолокаторов с синтезированной апертурой ИСЗ Ен-

visat ASAR и ERS-2 SAR, принадлежащих Европейскому космическому агентству. Радиолокационные изображения (РЛИ) посредством Internet-технологий поступают с ftp трех европейских станций приема и первичной обработки данных ESRIN, MATERA и KIRUNA в режиме времени, близком к реальному. Для радиолокационных данных, охватывающих акватории Черного и Азовского морей, обеспечен автоматический режим приема. Выбор и скачивание данных по остальным районам интереса выполняются мануально, на основе информации о расположении кадра РЛИ, получаемой с помощью on-line каталога EOLISA. На ftp перечисленных выше станций, в так называемые «rolling archives», РЛИ попадают примерно через час после пролета спутника и хранятся там в течение двух недель. Разрешение таких РЛИ составляет 75 метров, как для широкой полосы обзора (WSM), ширина кадра 430 км, так и для узкой полосы (IMM), для которой ширина кадра варьируется от 56 до 105 км, в зависимости от угла съемки. Данные ERS-2 SAR, получаемые с «rolling archives», также имеют разрешение 75 м при ширине кадра 100 км. В отдельных случаях, для проведения подспутниковых измерений, или выявления мелкомасштабных деталей интересующих нас явлений, специально заказываются РЛИ высокого разрешения 12,5 м в точке и на разных поляризациях излучения и приема.

Помимо РЛИ для проведения оперативного спутникового мониторинга используются данные:

– спектрорадиометров MODIS ИСЗ *Terra/Aqua*, выставляемые в режиме реального времени на сайте <http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov>. Используются композиты 3, 2 и 1 каналов, с разрешением 250 м.

– Сканирующего спектрорадиометра MERIS ИСЗ *Envisat*. В основном используются композиты 7, 5 и 2 каналов, разрешение которых составляет 260 м. Данные MERIS ИСЗ *Envisat* скачиваются с сайта <http://miravi.eo.esa.int> или с «rolling archives».

– Сканирующего радиометра ETM+ ИСЗ *Landsat 7*. Эти данные были получены с открытого Интернет-ресурса <http://glovis.usgs.gov>. Сенсор ETM+ функционирует в восьми каналах: (1) 0,450 – 0,515 мкм; (2) 0,525 – 0,605 мкм; (3) 0,630 – 0,690 мкм; (4) 0,760 – 0,900 мкм, (5) 1,550 – 1,750 мкм; (6) 10,400 – 12,500 мкм; (7) 2,080 – 2,350 мкм; (8) 0,520 – 0,900 мкм. Разрешение данных 1-5 и 7 каналов 30 м, 6-ого – 60 м, монохроматические данные 8-ого канала имеют разрешение 15 м. Для решения разных задач строились композиты разных каналов. Например, для выявления поверхностных проявлений внутренних волн использовались композиты 3, 2 и 1 каналов.

– Гидрометеоданные прибрежных метеостанций.

– Для интерпретации РЛИ используются карты поверхностной температуры (SST), нормализованной яркости восходящего (WLR) и хлорофилла-А (CHR-а), получаемые с сайтов <http://dvs.net.ua/mp/index.shtml> и <http://smiswww.iki.rssi.ru/>; карты ледового покрова http://www.smhi.se/oceanografi/iceservice/is_prod_en.php.

Спутниковые данные подвергаются следующей обработке:

- координатная привязка радиолокационных изображений по навигационным данным, содержащимся в служебной информации к каждому кадру, в результате изображение представляется в координатах долгота-широта;
- подбор гистограммы с целью наилучшего визуального восприятия основных информативных сигнатур на морской поверхности;
- нанесение координатной сетки;
- географическая привязка и приведение данных различных приборов дистанционной ди-

агностики, полученных в разных диапазонах зондирования и обладающих различным пространственным разрешением, к виду, позволяющему проведение их совместного анализа;

- комплексная обработка и совместный анализ разнородных спутниковых изображений и интеграция результатов обработки спутниковых данных с информацией, полученной из других источников.
- тематическая обработка спутниковых данных, включающая в себя: интерактивное дешифрирование многозональных спутниковых изображений.

Вся информация об имеющихся данных и результаты тематической обработки заносятся в каталог. Все полученные радиолокационные данные сведены в альбомы, содержащие как сами изображения, так и результаты их дешифровки. В ближайшее время планируется создание полноценной базы данных всех результатов мониторинга.

Районы интереса

Основными районами проведения ежедневного оперативного спутникового мониторинга являются Черное, Каспийское и Балтийское моря. По возможности выявляются динамические процессы и явления в прилегающих к основным районам интереса акваториях: в Азовском море, в восточной части Средиземного моря, в датских проливах и в восточной части Северного моря.

В таблице 1 приведено общее количество РЛИ, полученных в различных районах.

Таблица 1. Сводная таблица радиолокационных изображений, полученных в 2009-2010 г.г.

Район	2009 год			2010 год (с января по август)		
	ERS-2 SAR IMM	Envisat ASAR WSM	Envisat ASAR IMM	ERS-2 SAR IMM	Envisat ASAR WSM	Envisat ASAR IMM
Черное море	88	101	161	55	88	107
Каспийское море	Съемка не осуществлялась	153	13	Съемка не осуществлялась	149	15
Балтийское море	71	292	7	68	339	10

Результаты мониторинга

Мониторинг, проведенный с февраля 2009 г. до конца августа 2010 г., позволил выявить и изучить следующие процессы и явления: внутренние волны (ВВ) в неприливных морях; внутренние волны в атмосфере; мезо- и мелкомасштабные вихри и вихревые диполи; процессы, связанные с выносами пресных вод реками; цветение водорослей; образование ледового покрова и динамика морских льдов. Особое внимание уделялось выявлению антропогенных, в частности нефтяных загрязнений. Остановимся кратко на некоторых наиболее интересных явлениях.

Внутренние волны в неприливных морях

В ходе проведения мониторинга выявлены случаи поверхностных проявлений цугов внутренних волн на спутниковых изображениях, полученных над акваториями северной части Черного моря, Среднего и Южного Каспия и Балтийского моря в летний период. Черное, Каспийское и Балтийское моря могут быть отнесены к классу бесприливных морей, т.к. в этих морях не возникают сколько-нибудь значительные внутренние приливы, и наиболее распространенный механизм генерации внутренних волн приливными течениями здесь исключен. Главной особенностью поля внутренних волн в бесприливном море является относительно невысокий уровень амплитуд внутренних волн по сравнению со своими аналогами в океане, они менее интенсивны, но более разнообразны с точки зрения механизмов своего происхождения. Нами выявлено, что поверхностные проявления ВВ в различных морях существенно различаются по своим пространственным характеристикам. Однако удалось установить общий для всех районов наблюдения факт: максимальная встречаемость поверхностных проявлений внутренних волн (ППВ) соответствует наличию резкого и неглубокого пикноклина [7, 8]. Такие условия благоприятствуют как зарождению внутренних солитонов, так и выраженному проявлению их на морской поверхности, поскольку способствуют развитию сильных орбитальных течений в приповерхностном слое, что приводит к модуляции спектра ветрового волнения и проявлению внутренних волн в РЛИ морской поверхности.

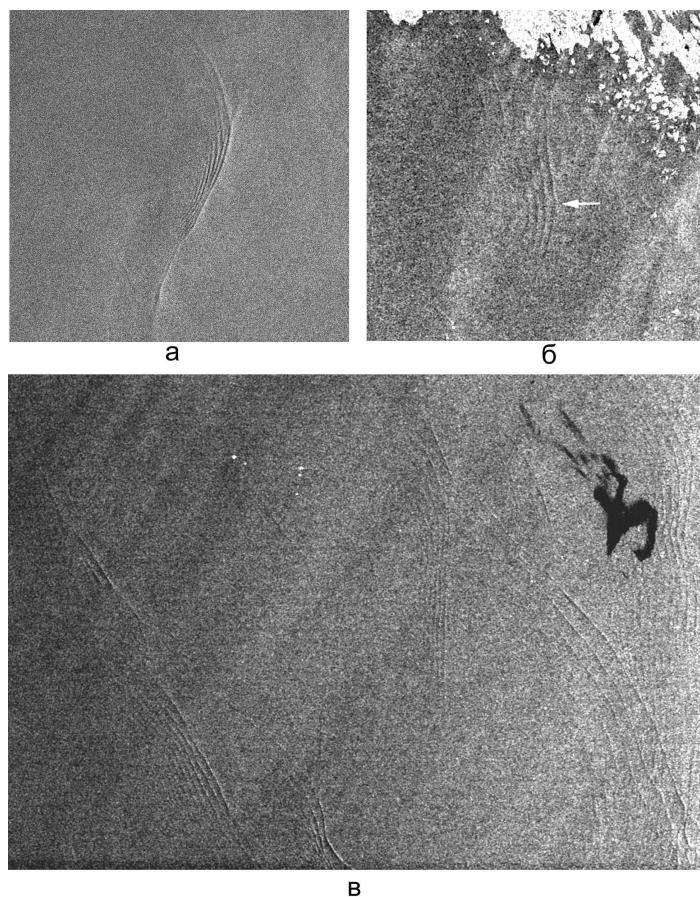


Рис. 1. Поверхностные проявления внутренних волн в морях без приливов.

- а) Цуг внутренних волн в районе Севастополя. Фрагмент РЛИ ASAR Envisat IMP VV, полученного 07.08.2009 в 08:05UTC с разрешением 12,5 м.
- б) Внутренние волны в южной части Ботнического залива. Фрагмент РЛИ ASAR Envisat WSM HH, полученного 24.07.2010 в 09:07 UTC с разрешением 75 м.
- в) многочисленные цуги внутренних волн в Среднем Каспии в районе Красноводского залива. Фрагмент РЛИ ASAR Envisat WSM HH, полученного 13.07.2010 в 06:39 UTC с разрешением 75 м (© ESA)

ППВВ в Черном море

Основные районы, в которых в 2009-2010 г.г. выявлены ППВВ на спутниковых изображениях, это акватории Черного моря, прилегающие к полуострову Крым и к дельте Дуная. Всего было зафиксировано 13 случаев. В северо-восточной части Черного моря, где в 2005-2007 г.г. впервые на радиолокационных изображениях были идентифицированы ППВВ [7, 9], в рассматриваемый период ППВВ не обнаружено. ВВ проявляются в виде изолированных цугов, содержащих до 15 волн, при этом максимальная длина волны в цуге не превышает 500 м. Фронт ведущей волны, как правило, существенно искривлен, длина его варьируется в пределах от 7 до 18 км. Ширина пакетов в зависимости от количества волн в цуге варьируется от 850 м до 3,5 км. Вероятные механизмы генерации: релаксация прибрежного апвеллинга, инерционные колебания, связанные с гидрологическими фронтами (в частности с фронтом, возникающим при выносе пресных вод Дунаем), сгонно-нагонные явления. ППВВ, связанных с прохождением вихрей, в 2009-2010 г.г. не наблюдалось, в отличие от 2006 года, когда все зафиксированные в северо-восточной части ППВВ наблюдались вблизи вихрей [7, 9]. На рис. 1 а приведен пример цуга внутренних волн вблизи Севастополя. Контактные измерения, которые проводились Серебряным А.Н. (АКИН, ИКИ РАН) на платформе Кацивели, показали, что в период, предшествующий моменту регистрации ППВВ, в этом районе наблюдался сильный прибрежный апвеллинг.

ППВВ в Каспийском море

В ходе проведения мониторинга впервые были выявлены поверхностные проявления внутренних волн (ППВВ) в Каспийском море [10], хотя контактных измерений внутренних волн в 70 годы прошлого века было достаточно много [11]. В отличие от ППВВ в Черном море, ППВВ на Каспии отличаются частой проявлений и большим разнообразием. На одном кадре РЛИ (430 км x 400 км) часто выявляется несколько цугов ВВ, что свидетельствует о наличии нескольких мест генерации, расположенных на относительно небольшом расстоянии. Общее число выявленных цугов ВВ оценить трудно, поскольку практически на всех РЛИ Среднего Каспия, полученных в период с середины мая по конец августа, присутствовали ППВВ. Как правило, они имеют вид классических цугов солитонов, для взаимодействующих цугов наблюдаются характерные для нелинейных взаимодействий искривления фронтов, фазовые сдвиги и пр. Цуги распространяются к берегу и встречаются над глубинами 50-200 м. Длина ведущей волны в цуге может достигать 1,5 км, а протяженность фронтов до 50 км. Ширина цуга зависит от количества волн, входящих в него, в среднем она составляет 2,5 км, но может достигать и 6 км. В 2010 году ВВ на Каспии менее интенсивны, но наблюдаются в большем количестве районов. Если в 2009 году все, кроме одного случая, ППВВ были выявлены у восточного берега Среднего Каспия, то в 2010 году они встречались и в западной и центральной части. Возможно, это связано с тем, что разные процессы явились причиной зарождения ВВ. Данный вопрос еще требует тщательного изучения. Делаются предположения, что основными источниками генерации выявленных ВВ являются сейши и прибрежный апвеллинг. Оба этих явления характерны именно для Среднего Каспия. [12,13] На рис. 1в представлен фрагмент РЛИ, отображающий ППВВ в Среднем Каспии, распространяющихся по направлению к Красноводскому заливу.

ППВВ в Балтийском море

Поверхностные проявления внутренних волн в Балтийском море достаточно редкое явление, и работы, посвященные их спутниковым наблюдениям, практически отсутствуют. В то же время контактные измерения ВВ в толще вод проводятся регулярно [14]. Сложность дистанционного выявления ВВ в Балтийском море заключается в том, что они «маскируются» проявлениями на морской поверхности процессов в приводном слое атмосферы [8].

В 2009-2010 году выявлено 11 случаев проявления ВВ в собственно Балтийском море (включая Ботнический залив) и 12 в датских проливах. В датских проливах ВВ вызваны внутренними приливами. Число волн в цуге, как правило, не превышает 10, максимальная длина волны не превышает 1 км, а длина фронта ведущей волны, как правило, была не больше 25 км. В июле 2010 года ППВВ регулярно наблюдались в южной части Ботнического залива и севернее и северо-западнее о. Готланд. На рис. 1б представлен фрагмент РЛИ, содержащий ППВВ в южной части Ботнического залива.

Атмосферные гравитационные внутренние волны

Внутренние гравитационные волны, распространяющиеся в стратифицированной атмосфере, встречаются часто и повсеместно. Они могут иметь различное происхождение. Среди причин, порождающих волновые возмущения в атмосфере, следует отметить обтекание воздушным потоком препятствий, в результате чего возникают так называемые подветренные внутренние волны; взаимодействие континентальных и морских воздушных масс; движение холодного атмосферного фронта. Внутренние гравитационные волны, распространяющиеся в приводном слое атмосферы, далеко не всегда связаны с сопутствующей облачной системой и поэтому не всегда могут наблюдаться на оптических спутниковых изображениях. Радиолокационное зондирование океана открыло для наблюдения атмосферных гравитационных внутренних волн (АГВВ) новые возможности. На радиолокационных изображениях морской поверхности атмосферные волновые процессы проявляются в силу того, что связанные с ними вариации скорости и направления ветра модулируют шероховатость морской поверхности, а это, в свою очередь, проявляется в модуляции сечения обратного рассеяния [15].

Радиолокационные образы поверхностных проявлений атмосферных гравитационных внутренних волн и внутренних волн в океане очень похожи. И те и другие проявляются на РЛИ в виде квазипериодических полос повышенного и пониженного рассеяния, имеют практически одинаковую интенсивность модуляции обратно рассеянного сигнала. Для РЛИ тех районов Мирового океана, где океанические внутренние волны (ОВВ) генерируются внутренним приливом на краю шельфа, задача различия АГВВ и ОВВ упрощается. Как правило, в этом случае ОВВ имеют характерный вид в виде цугов солитонов, которые чаще всего распространяются к берегу. Известны районы и сезоны их генерации [16]. ОВВ имеют высокие радиолокационные контрасты, светлые полосы (области повышенного рассеяния) имеют небольшую ширину, не больше 2-3 пикселей. АГВВ, как правило, распространяются либо от берега (орографические волны), либо наблюдаются за островами, либо связаны с прохождением атмосферного фронта. Пространственные масштабы АГВВ существенно больше: фронты достигают 200 - 300 км и более, длина волны редко бывает меньше 1-2 км. Однако, в ходе проведения мониторинга было выявлено, что

во внутренних морях, таких как Черное, Балтийское и Каспийское, поверхностные проявления АГВВ могут иметь очень большое разнообразие: от гигантских одиночных узких цугов, длина фронтов которых простирается на 600 км (рис. 2), до мелкомасштабных цугов, с числом волн в цуге более 10 (рис. 4б). Последние иногда бывает достаточно трудно отличить от поверхностных проявлений внутренних волн в море. В Балтийском море, где много островов, наблюдается особенно интересная картина: не редки случаи одновременного распространения под углом друг к другу нескольких цугов АГВВ (рис.3), что больше характерно для ОВВ. Таким образом, для бесприливных морей, в частности для Черного, Балтийского и Каспийского морей, где проводится спутниковый мониторинг, задача различия АГВВ и ОВВ сильно усложняется. Один из таких случаев, представлен на рис. 4. Радиолокационные образы двух этих явлений очень похожи, хотя некоторые отличия, видны на глаз: ОВВ проявляются в виде ярких светлых полос (сулоев) фронты которых искривлены, а АГВВ – в виде параллельных темных линий (сликов). Учитывая, что разрешение обоих снимков одинаково (75 м), видно, что ширина каждой полосы сулова меньше, чем полосы слика. Поверхностные проявления АГВВ как бы несколько сглажены. Это видно и на графиках разрезов, выполненных вдоль черных линий, отмеченных на РЛИ (рис.4 в,г).

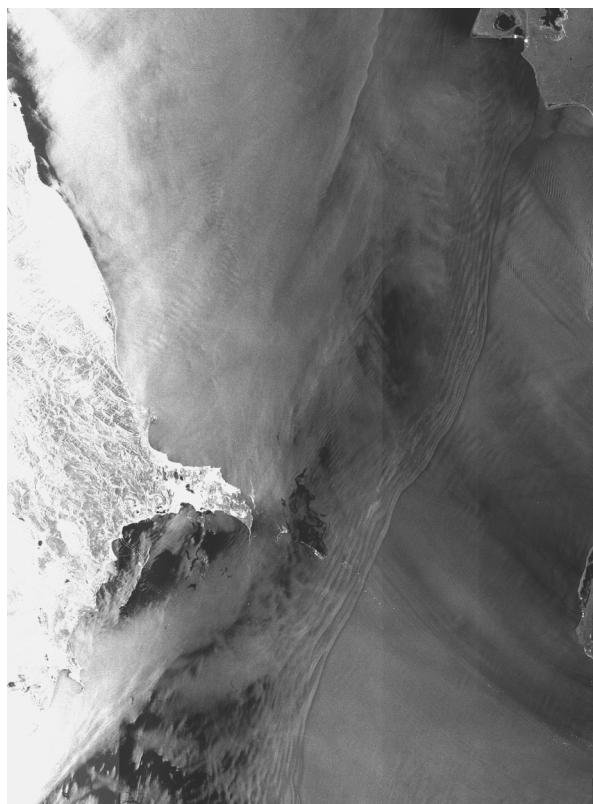


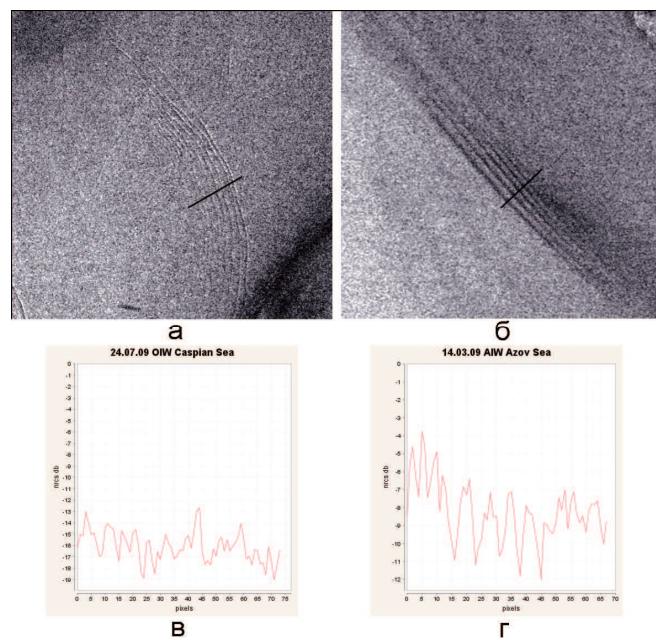
Рис. 2. Поверхностные проявления атмосферных гравитационных внутренних волн в Каспийском море, протяженность фронта лидирующей волны 600 км. Фрагмент РЛИ ASAR Envisat WSM HH, полученного 09.03.09 в 18:28 UTC с разрешением 75 м. (© ESA)

Естественно, помимо сравнения радиолокационных контрастов и пространственных характеристик, для обоснованного различия АГВВ и ОВВ в замкнутых морях без приливов необходим анализ всей совокупной гидрометеорологической информации и информации о состоянии морской поверхности, данных о рельефе дна и береговой орогра-

фии. Очень полезны данные радиозондов, но они обычно недоступны для большинства исследователей. В настоящее время, решающее значение имеет опыт эксперта, осуществляющего анализ РЛИ в комплексе со всеми доступными сопутствующими данными.



Рис. 3. Поверхностные проявления пересекающихся атмосферных внутренних волн в районе о. Борхольм. Фрагмент РЛИ ASAR Envisat WSM HH, полученного 26.04.10 в 20:33 UTC с разрешением 75 м. (© ESA)



*Рис. 4. Сравнение радиолокационных образов внутренних волн в море и в приводном слое атмосферы.
а) Цуг внутренних волн в Среднем Каспии. Фрагмент РЛИ Envisat ASAR WSM HH, полученного 24.07.09 в 18:23 UTC с разрешением 75 м.*

б) Поверхностные проявления мелкомасштабных атмосферных гравитационных внутренних волн в восточной части Азовского моря. Фрагмент РЛИ Envisat ASAR WSM VV, полученного 24.07.09 в 18:23 UTC с разрешением 75 м. (© ESA)

в) и г) Вариации радиолокационного сигнала вдоль обозначенных на РЛИ линий разреза

Вихри и вихревые диполи являются одним из наиболее важных элементов прибрежной циркуляции вод. Несмотря на то, что исследованием вихревых процессов в Черном море занимаются много и довольно успешно, некоторые вопросы остаются пока нерешенными [17-20]. В частности, это касается мелкомасштабных (с характерными размерами меньше внутреннего радиуса деформации Россби) или, как их еще называют, субмезомасштабных вихрей. Открытыми остаются вопросы, касающиеся механизмов их возникновения, районов проявления, продолжительности существования, их тонкой пространственной структуры, связи с мезомасштабными вихревыми структурами. Накопление регулярной спутниковой информации, получаемой с высоким разрешением, в разные периоды и в разных районах, на наш взгляд будет способствовать решению хотя бы части поставленных проблем.

Основными источниками данных для изучения вихревой активности в районах мониторинга являются радиолокационные изображения ASAR Envisat и SAR ERS-2. На РЛИ вихри и вихревые диполи визуализируются либо посредством пассивных трассеров, либо за счет изменения контрастов в конвергентно-дивергентных зонах. Пассивными трассерами являются в первую очередь пленки поверхностно-активных веществ, которые выглаживают морскую поверхность за счет подавления мелкомасштабной составляющей волнения (так называемый пленочный или сликовый механизм), и молодой подвижный лед. На долю вихрей, проявляющихся за счет пленочного механизма, приходится до 90 % всех выявленных вихрей. Пленки, вовлекаясь в орбитальные движения, достаточно детально «прорисовывают» вихри и вихревые диполи. Это дает возможность оценить их пространственные характеристики, определить знак их завихренности (циклические – антициклические). На РЛИ за счет сликового механизма хорошо проявляются вихревые структуры от нескольких сот метров до десятков километров. Наиболее часто вихри «прорисованные» сликами выявляются на РЛИ в период активного цветения водорослей. Для трех интересующих нас морей, Черное Балтийское и Каспийское, в разных частях этих морей, пик цветения приходится на разные периоды. Но чаще всего это происходит с апреля и до сентября. Следует отметить, что помимо необходимого условия – наличия большого количества ПАВ или скопления водорослей, для «проявляемости» вихрей на РЛИ существенна и скорость ветра. Лучше всего сликовый механизм работает при скоростях ветра 3-5 м/с, при которых уже существуют короткие гравитационно-капиллярные волны, вызывающие брэгговское рассеяние радиолокационного сигнала, а ветер еще не оказывает разрушительного воздействия на поверхностные пленки [21].

Проведенный мониторинг позволил выявить основные районы наиболее частых проявлений мелкомасштабных вихрей и вихревых диполей. Как правило, это прибрежная полоса и районы выноса рек, что связано с повышенной концентрацией поверхностно-активных веществ в воде. Во время активного цветения водорослей мелкомасштабные вихри и вихревые диполи за счет сликового механизма могут проявляться в самых разных частях. На рис. 5а,б представлены примеры проявлений мелкомасштабных вихрей за счет сликового механизма в Черном и Балтийском морях.

Возникает вопрос: что «прорисовывают» слики? Означает ли это, что за счет сликов мы видим тонкую пространственную структуру вихрей, которые состоят из множества струй. Слики, как и в случае поверхностных проявлений внутренних волн, формируют-

ся в областях схождения течений (конвергентных зонах). Толщина сливковых полос примерно всегда одинакова и составляет 100-300 м, а расстояние между ними варьируется в зависимости от диаметра вихря. Для мелкомасштабных вихрей оно, как правило, не превосходит 1 км.

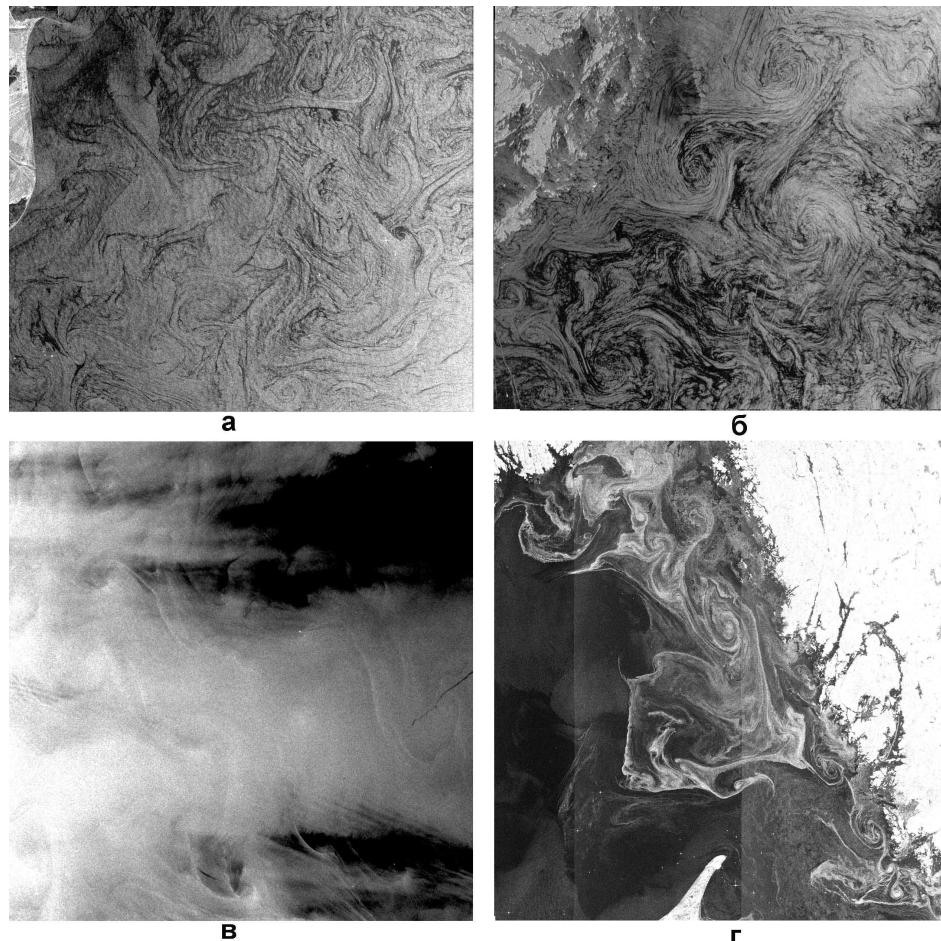


Рис. 5. Проявление мелкомасштабных вихрей на радиолокационных изображениях.

За счет «сликового» механизма в период активного цветения водорослей: а) у дельты Дуная (фрагмент ASAR Envisat WSM VV от 29.08.2009); б) севернее о. Готланд (фрагмент SAR ERS-2 IMM VV от 21.06.2009); в) за счет «сдвигово-волнового» механизма. Центральная часть Черного моря южнее о. Крым (фрагмент ASAR Envisat IMM VV от 24.03.2010); г) за счет «ледового» механизма. Пролив Каттегат (фрагмент ASAR Envisat WSM HH от 26.01.2010). Все представленные на рисунке РЛИ имеют разрешение 75 м. (© ESA)

Какие процессы являются возбудителями мелкомасштабных вихрей? В отличие прибрежных мезомасштабных антициклонических вихрей в Черном море, которые, как принято считать, возникают в результате меандрирования Основного черноморского течения [22], мелкомасштабные вихревые структуры представляют собой или вихревые диполи, или упаковки диполей, или реже одиночные циклонические вихри. Трудно себе представить сдвиговые течения, которые порождали бы столь хаотичные структуры. Учитывая, что достаточно часто обширные области, занятые скоплением мелкомасштабных вихрей, располагаются вблизи границ атмосферных фронтов, можно предположить, что одним из механизмов возбуждения является прошедший атмосферный фронт, содержащий сильные ветровые неоднородности.

Второй механизм, благодаря которому вихри проявляются на РЛИ, связан с взаимодействием волн и течений в области циклонического сдвига течения (в дальнейшем для

краткости сдвигово-волновой механизм) и проявляется в виде закрученных в спирали или дуги областей повышенного рассеяния сигнала [23]. Как правило, это единственная возможность наблюдать вихри при сильных ветрах, когда пленки ПАВ разрушаются, или зимой, когда концентрация ПАВ мала. Такой механизм проявлений мелкомасштабных вихрей не дает возможность изучать их тонкую пространственную структуру, области повышенной яркости, связанные с дивергентными зонами, «прорисовывают» обычно только внешний контур вихря или вихревого диполя. На рис. 5в представлен пример вихрей, проявляющихся на РЛИ за счет этого механизма.

Третий механизм визуализации вихревых структур на РЛИ за счет льда подобен проявлению вихрей на оптических изображениях. Он аналогичен пленочному механизму, только пассивными трассерами выступает молодой, еще не сплоченный, подвижный лед. На 5г представлен пример «ледяных» вихрей в проливе Каттегат.

С целью более детального изучения мелкомасштабных вихревых структур, данные спутниковой радиолокации анализировались совместно с данными в оптическом и ИК диапазонах. Проводилось сравнение температурных контрастов в вихрях с радиолокационными, проявление вихревых структур в оптике в период бурного цветения со сливковыми полосами. Комплексному изучению мелкомасштабных вихрей планируется посвятить отдельную статью.

Мониторинг антропогенных загрязнений

Мониторинг антропогенного загрязнения прибрежной зоны – традиционная задача нашего коллектива. Как уже отмечалось во вступлении, мы принимали активное участие в части обработки и интерпретации спутниковых радиолокационных изображений во время проведения оперативного спутникового мониторинга в период с июня 2004 по ноябрь 2005 года в районе нефтедобывающей платформы Д-6 на шельфе Калининградской области (месторождение Кравцовское) и во всей юго-восточной части Балтийского моря. Мониторинг был инициирован ООО «ЛУКОЙЛ-Калининградморнефть» и заключался в ежедневном приеме и анализе разнообразной спутниковой информации с целью идентификации источников загрязнения, прогноза дрейфа обнаруженных нефтяных пятен, систематизации и архивация данных [1,2]. Начиная с 2006 года в течение трех лет наш коллектив участвовал в проведении оперативного мониторинга состояния и загрязнения морской среды российского сектора Черного и Азовского морей, который с 2003 года осуществляется сотрудниками ГУ НИЦ «Планета». Задачей данного мониторинга является: оперативное картирование параметров состояния и загрязнений (береговых, судовых и биогенных) водной среды, обобщение полученных результатов ежедекадно и за месяц; анализ метеорологической обстановки и ее влияния на распространение загрязнений; изучение закономерностей прибрежной циркуляции и их влияния на распространение загрязнений; выявление различных ситуаций распределения загрязнений в прибрежных водах [4,6].

В

2009 - 2010 году мониторинг антропогенных загрязнений проводился уже на значительно больших площадях: в сферу наших интересов были включены полностью акватории Черного, Балтийского морей, и добавилась еще акватория Каспийского моря. Особый интерес представляет сравнение ранее полученных результатов с современной ситуацией.

Результаты мониторинга показывают, что в Черном море наиболее часто несанкционированный сброс с судов вод, содержащих нефтепродукты, происходит в северо-западной части моря. В российской акватории по-прежнему наибольшему загрязнению подвергается акватория в районе порта Новороссийск. В то же время, заметно меньше незаконных сбросов с судов выявлено в Керченском проливе, к которому после аварии танкера в ноябре 2007 г. было приковано пристальное внимание общественности и контролирующих организаций. На рис. 6 представлена обобщенная карта-схема значительных нефтяных загрязнений российского сектора Черного моря, составленная на основе дешифрирования данных спутниковой радиолокации высокого разрешения, полученных в 2006 – август 2010 гг. За пять лет спутниковых наблюдений в российском секторе Черноморского бассейна выявлено более 300 случаев загрязнений морской поверхности нефтепродуктами в результате судовых сбросов (из них около 70 в 2009 – август 2010 г.г.). Индивидуальная площадь пятен варьировалась в пределах от 0,1 до 30 км². Совокупная площадь загрязнений, содержащих нефтепродукты, составила более 800 км². Систематизация спутниковых данных по загрязнению северо-восточной части Черного моря нефтепродуктами,брошенными с проходящих судов, позволила выявить районы наиболее частого сброса вдоль судоходных трасс в п. Новороссийск и п. Туапсе, а также на подходе к нефтяному терминалу мыс Железный Рог и в районе Керченского пролива.

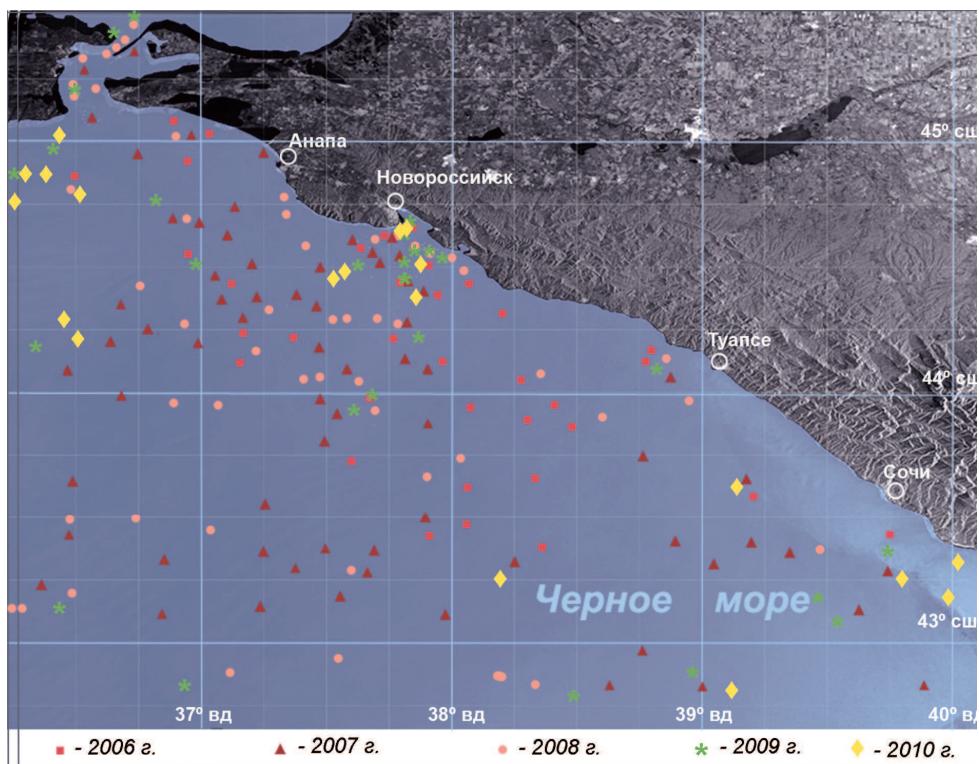


Рис. 6. Обобщенная карта-схема значительных нефтяных загрязнений российского сектора Черного моря, составленная на основе дешифрирования данных спутниковой радиолокации высокого разрешения, полученных в 2006 – 2010 гг.

В Каспийском море основным источником загрязнений являются нефтедобывающие платформы в районе Нефтяных Камней, что связано как с техническим старением оборудования, так и с естественным просачиванием со дна и выносом на поверхность нефти. На всех без исключения РЛИ идентифицируются нефтяные пятна. В отличие от ситуации

в Черном и, особенно в Балтийском море, несанкционированный сброс нефтепродуктов с судов на Каспии с каждым годом увеличивается. Ежедневно в воду попадает несколько сот тонн нефти. Данные, полученные во время мониторинга в 2009-2010 г.г, сравнивались с архивными данными за 2003, 2006 и 2007 г.г. На примере загрязнений в районе Нефтяных Камней рассматривалось влияние ветра и течений на распространение нефтяного пятна, а также влияние ветра на формирование радиолокационных образов нефтяных загрязнений. На рис. 7 представлены фрагменты спутниковых изображений, полученные в районе Нефтяных Камней при разных метеорологических условиях. При сильных ветрах нефтяные загрязнения на РЛИ не проявляются (рис.7г). На оптических изображениях нефтяная пленка лучше всего идентифицируется в зоне солнечного блика (рис.7а).

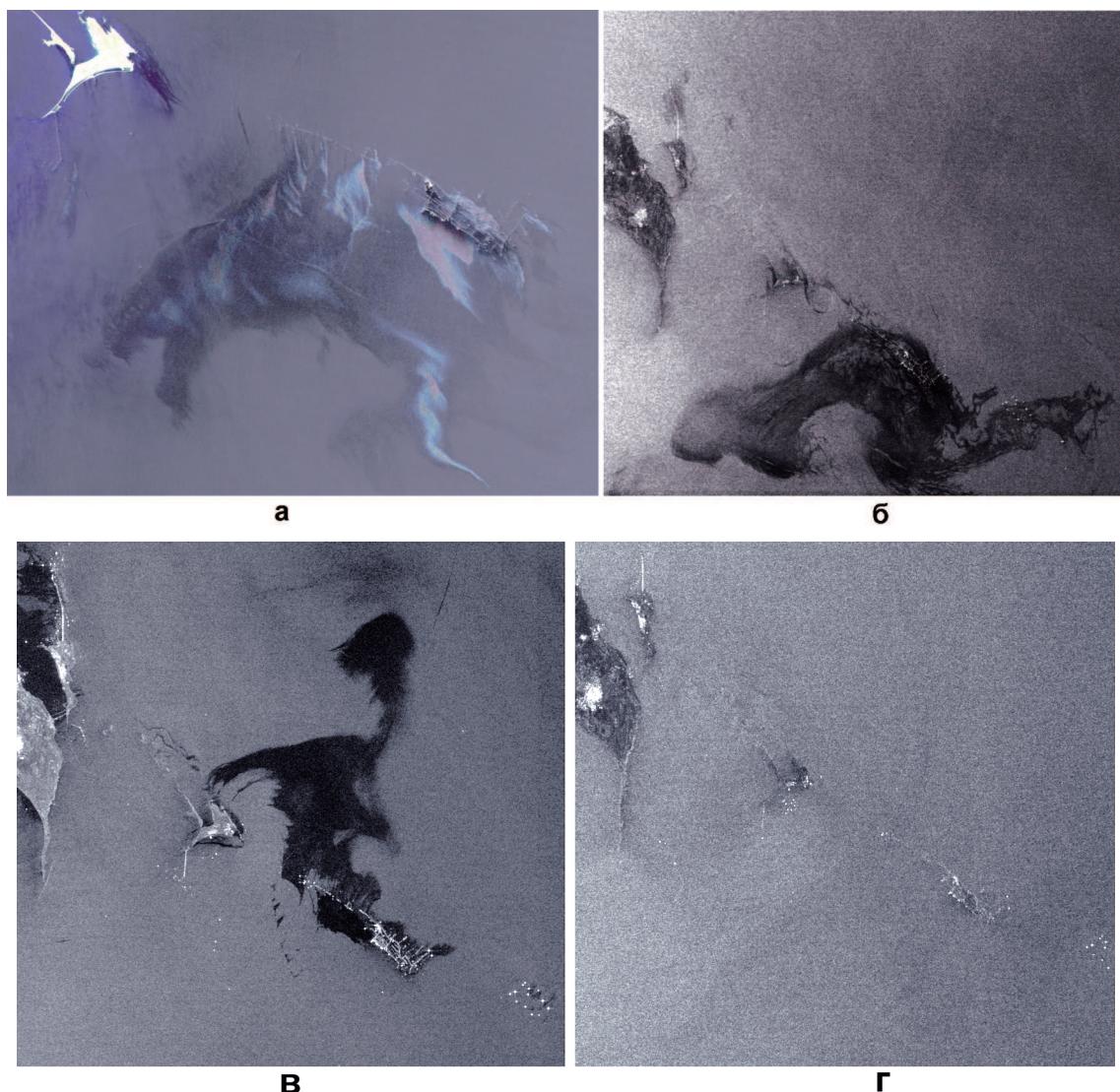


Рис. 7. Загрязнения акватории нефтяных платформ в районе Нефтяных камней, проявляющиеся на РЛИ при различных метеорологических условиях:

- а) Ветер северный 8 м/с. Фрагмент Landsat 5 TM изображения, полученного в зоне солнечного блика 30.05.2009 в 07:07 UTC. Композит 7, 4 и 2 каналов. Разрешение 30 м. (<http://glovis.usgs.gov/>)*
- б) Ветер северный 5м/с с переходом на южный. Фрагмент РЛИ Envisat ASAR WSM HH, полученного 31.05.09 в 18:20 UTC с разрешением 75 м. (© ESA)*
- в) Умеренный юго-восточный ветер 4 м/с. Фрагмент РЛИ Envisat ASAR WSM HH, полученного 28.07.10 в 18:26 UTC с разрешением 75 м. (© ESA)*
- г) Сильный северный ветер 12 м/с. Фрагмент РЛИ Envisat ASAR WSM HH, полученного 19.06.09 в 18:23 UTC с разрешением 75 м. (© ESA)*

В Балтийском море ситуация в последние годы значительно улучшилась. Это является следствием усиленного контроля различных организаций стран региона за экологическим состоянием вод. Основные источники загрязнений остаются прежними: несанкционированный сброс с судов нефтепродуктов и вынос загрязненных вод реками и из Калининградского обводного канала. Сброс с судов традиционно осуществляется на якорной стоянке в районе Балтийска, на основных судоходных трассах вдоль о. Готланда, севернее Гданьского залива и на подходах к крупным портам Клайпеда, Лиепая, Вентспилс и Гданьск. Всего за период проведения мониторинга в 2009 – август 2010 г.г. выявлено 79 пятен нефтяных загрязнений, из них 47 в течение 2009 г. и 32 – в период январь-август 2010 г. На рис. 8 представлены 2 карты схемы: на левой – загрязнения, выявленные за 18 месяцев в 2004-2005 годах, на правой – с января 2009 по август 2010 года.

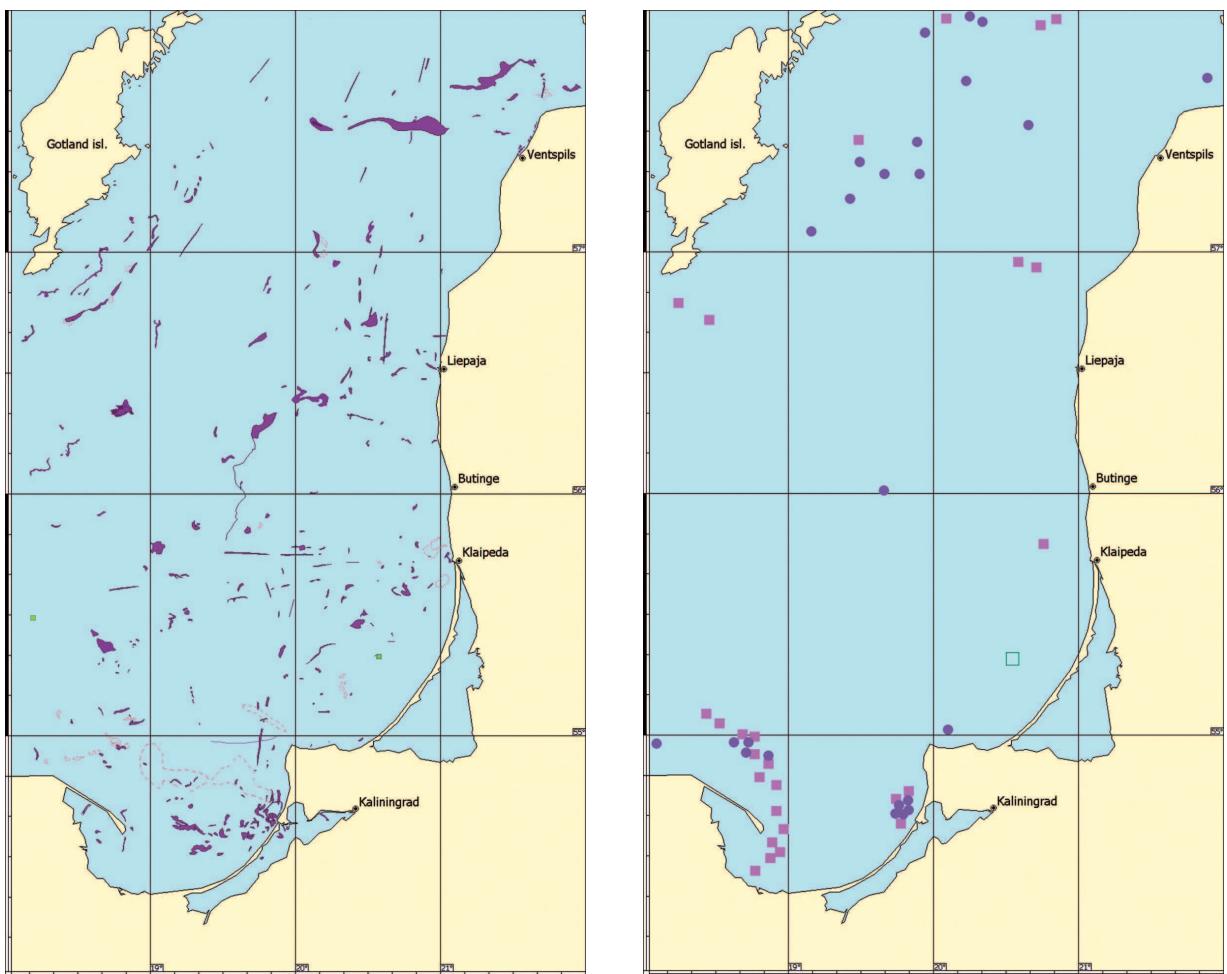


Рис. 8. Обобщенные карты-схемы всех нефтяных пятен, обнаруженных в результате анализа РЛИ: а) с июня 2004 г. по ноябрь 2005 г. [1]; б) с января 2009 по август 2010. Кружочки – 2009 г., квадратики – 2010 г. Зеленый квадратик – нефтедобывающая платформа Д-6

Мониторинг ледяного покрова

Спутниковый мониторинг ледового покрова проводился зимой 2009 – 2010 г. в Балтийском, Азовском морях и в северной части Каспийского моря. Зима была необычайно холодной и ранней, лед встал очень рано. Уже в конце декабря 2009 г. замерзли практически все заливы Балтийского моря, в феврале возникли серьезные проблемы с судоходством

в этих районах. Паромное сообщение между Швецией, Финляндией и Эстонией было нарушено. Лед держался в заливах (Рижском, Куршском, Калининградском) до конца апреля 2010 г., а северной части Ботнического залива сохранялся до двадцатых чисел мая.

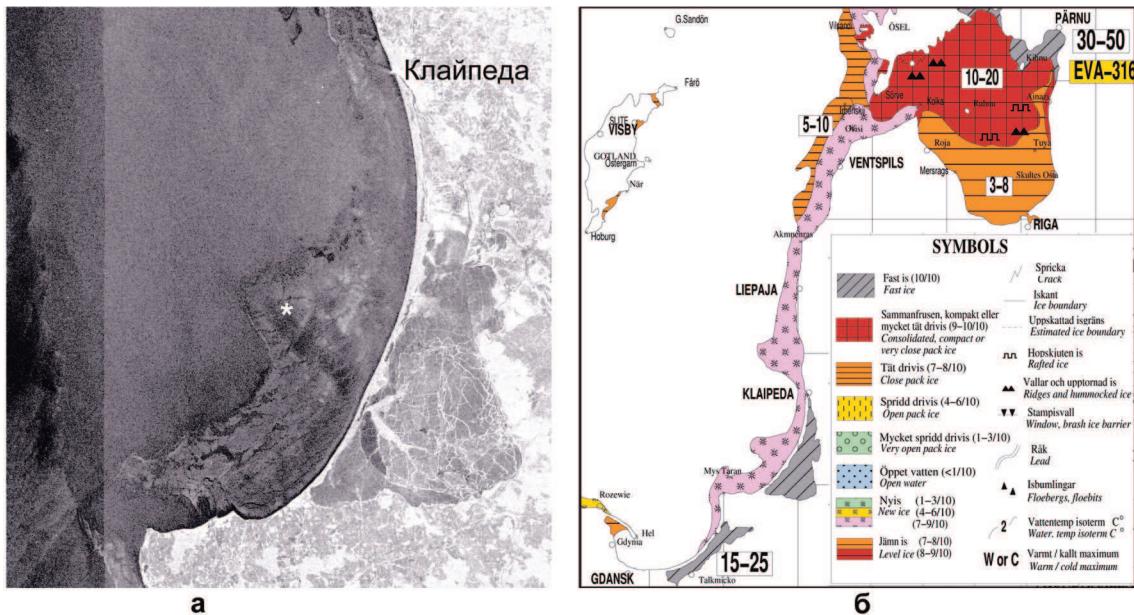


Рис. 9. Ледовая обстановка в районе ледостойкой нефтедобывающей платформы Д-6 09.02.2010.
а) Фрагмент РЛИ ASAR Envisat WSM HH, полученного 09.02.2010 в 08:54 UTC с разрешением 75 м (© ESA).
Звездочкой отмечена платформа Д-6.
б) Карта ледового покрова юго-восточной части Балтийского моря за данное число (<http://www.smhi.se>)

Впервые ледостойкая нефтедобывающая платформа Д-6, расположенная в юго-восточной части Балтийского моря, оказалась во льдах, что ни разу не наблюдалось во время проведения нами описанного выше мониторинга в 2004-2005 году. Определенные по РЛИ границы льдов и его классификация сравнивались с ледовыми картами, выставляемыми Шведским метеорологическим и гидрологическим институтом (SMHI) на сайте http://www.smhi.se/oceanografi/iceservice/is_prod_en.php. Это дало нам возможность продвинуться в вопросе классификации льдов на РЛИ. На рис. 9 приведены РЛИ (а) и карта ледового покрова (б) за 9 февраля 2010 г. Хорошо виден лед вокруг платформы Д-6.



Рис. 10. Вынос льда Вислой. Фрагмент ASAR Envisat WSM HH, полученного 27.01.2010 в 09:05 UTC с разрешением 75 м. (© ESA)

Благодаря наличию ледового покрова удалось проанаблюдать три интересных явления: вихревые структуры, проявляющиеся за счет льда (рис. 5г), вынос льда с пресными водами из Вислы и Даугавы (рис. 10), а также ярко белые корабельные следы, которые четко прочерчивают поверх ледяного покрова судовые трассы даже между небольшими населенными пунктами (рис. 11).

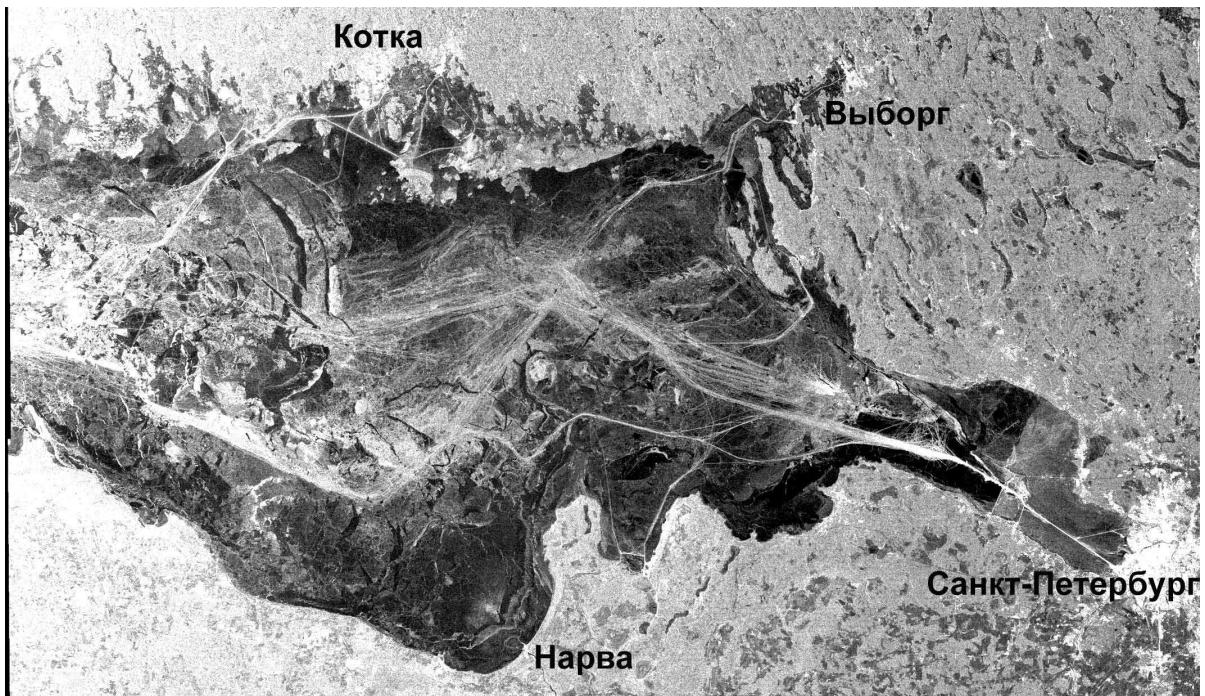


Рис. 11. Корабельные следы во льдах в Финском заливе. Фрагмент РЛИ ASAR Envisat WSM HH, полученного 17.02.2010 в 19:31 UTC с разрешением 75 м. (© ESA)

Заключение

При проведении ежедневного оперативного спутникового мониторинга, который проводится над акваториями Черного, Балтийского и Каспийского морей начиная с 2009 года, получено огромное количество спутниковой информации. Только радиолокационных данных высокого разрешения ASAR Envisat и SAR ERS-2 до августа 2010 года получено 1717 изображений (!). Практически ко всем из них была подобрана комплементарная информация: данные оптических и ИК сенсоров и данные метеостанций. Огромный массив данных требует тщательной совместной обработки и осмысливания. Предварительный анализ позволил уже на настоящем этапе выявить и детально изучить внутренние волны в бесприливных морях, определить районы их наиболее частых поверхностных проявлений, высказать предположения об источниках их генерации. Вторая важная задача, которая решалась на основе данных спутникового мониторинга, это исследование мелкомасштабных вихревых структур и их тонкой пространственной структуры за счет сливкового механизма проявления на РЛИ. Третья, традиционная задача, это выявление антропогенных загрязнений морской поверхности и сравнение современного состояния с предыдущими годами. Впервые, нашим коллективом начата работа по мониторингу ледового покрова в Балтийском, Азовском морях и в северной части Каспийского моря.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 08-05-00831-а и 10-05-00428-а). Спутниковые радиолокационные данные предоставлены Европейским космическим агентством в рамках проектов C1P.6342, AOBE 2775 and C1P.1027.

Литература

1. Костяной А.Г., Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Бочарова Т.Ю., Литовченко К.Ц., Станичный С.В., Соловьев Д.М., Лебедев С.А., Сирота А.М. Оперативный спутниковый мониторинг нефтяных загрязнений юго-восточной части Балтийского моря // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. Сб. научных статей. Выпуск 3. Том 1. 2006. С. 22-31.
2. Kostianoy Andrey, Konstantin Litovchenko, Olga Lavrova, Marina Mityagina, Tatyana Bocharova, Sergey Lebedev, Sergey Stanichny, Dmitry Soloviev, Aleksander Sirota, Olga Pichuzhkina. Operational Satellite Monitoring of Oil Spill Pollution in the Southeastern Baltic Sea: 18 Months Experience // Environmental research, engineering and management. 2006. No.4(38). P.70-77.
3. Костяной А.Г., О.Ю. Лаврова, М.И. Митягина. Комплексный спутниковый мониторинг нефтяного загрязнения морей России // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Т.ХХII, МОСКВА ИГКЭ 2009. С. 235-266.
4. Бедрицкий А.И., В.В. Асмус, В.А. Кровотынцев, О.Ю. Лаврова, А.Г. Островский. Спутниковый мониторинг загрязнения российского сектора Черного и Азовского морей в 2003-2007 г.г. // Метеорология и гидрология. 2007. №11. С.5-13.
5. Shcherbak S. S., O. Y. Lavrova, M. I. Mityagina, T. Y. Bocharova, V. A. Krovotyntsev, A. G. Ostrovskii. Multisensor satellite monitoring of seawater state and oil pollution in the northeastern coastal zone of the Black Sea // International Journal of Remote Sensing. V. 29. Issue 21. 2008. P. 6331 – 6345.
6. Бедрицкий А.И., В.В. Асмус, В.А. Кровотынцев, О.Ю. Лаврова, А.Г. Островский. Космический мониторинг загрязнения российского сектора Азово-Черноморского бассейна в 2008 г. // Метеорология и гидрология. 2009. №3. С.5-19.
7. Лаврова О.Ю., М.И. Митягина, К.Д. Сабинин. Проявление внутренних волн на морской поверхности в северо-восточной части Черного моря // Исследование Земли из космоса. 2009. №6. С. 49-55.
8. Митягина М.И., О.Ю. Лаврова. Спутниковые наблюдения поверхностных проявлений внутренних волн в морях без приливов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Сборник научных статей. Т. 7. № 1. 2010. С. 260-272.
9. Митягина М.И., О.Ю. Лаврова. Спутниковые наблюдения вихревых и волновых процессов в прибрежной зоне северо-восточной части Черного моря // Исследование Земли из космоса. 2009. №5. С. 72-79.
10. Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Сабинин К.Д., Серебряный А.Н. Спутниковые наблюдения поверхностных проявлений внутренних волн в Каспийском море // Исследование Земли из космоса. 2011. №1. (в печати)
11. Коняев К. В. Экспериментальное исследование короткопериодных внутренних волн в море // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1975. Т. 11. №3. С. 285-296.
12. Архипкин В.С. Особенности структуры и динамики прибрежного апвеллинга в Каспийском море // Каспийское море. Структура и динамика вод. М.: Наука, 1990. С. 61–74.
13. Блатов А.С., Д.Л. Ведев, А.Н. Косарев. О сейшах в Каспийском море // Метеорология и гидрология. 1990. №8. С. 109-114.
14. Морозов Е. Г., С. А. Щука, В. С. Запотылько. Буксируемые спектры внутренних волн на пик-ноклине в Балтике // Доклады Академии наук. 2007. Т. 412. № 4. С. 552-554.
15. Булатов М.Г., Ю.А. Кравцов, О.Ю. Лаврова, К.Ц. Литовченко, М.И. Митягина, М.Д. Раев, К.Д. Сабинин, Ю.Г. Трохимовский, А.Н. Чурюмов, И.В. Шуган. Физические механизмы формирования аэрокосмических радиолокационных изображений океана // Успехи Физических Наук. 2003. 173 (1). С. 69-87.
16. Jackson C.R., Apel J.R. An atlas of internal solitary-like waves and their properties. Global Ocean Associates. http://www.internalwaveatlas.com/Atlas_index.html (2002).

17. Зацепин А.Г., Гинзбург А.И., Евдошенко М.А и др. Вихревые структуры и горизонтальный обмен в Черном море // Комплексные исследования северо-восточной части Черного моря. М.: Наука, 2002. С.55–81.
18. Ginzburg A.I., Kostianoy A.G., Krivosheya V.G., Nezlin N.P., Soloviev D.M., Stanichny S.V., Yakubenko V.G. Meso-scale eddies and related processes in the northeastern Black Sea // Journal of Marine System, 2002. Vol. 32. P. 71– 90.
19. Гинзбург А.И., Зацепин А.Г., Кременецкий В.В., Пиотух В.Б. Мезомасштабная динамика вод Черного моря // Океанология на старте 21 века. М.: Наука, 2008. С. 10–30.
20. Костяной А.Г., Гинзбург А.И., Шеремет Н.А., Лаврова О.Ю., Митягина М.И. Мелкомасштабные вихри Черного моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Сборник научных статей. 2010. Том 7. № 1. С. 248-259.
21. Dokken S.T., Wahl T. Observations of spiral eddies along the Norwegian Coast in ERS SAR images // FFI Rapport 96/01463, 1996.
22. Титов В.Б. Характеристики Основного черноморского течения и прибрежных антициклонических вихрей в Российском секторе Черного моря // Океанология, 2002. Т. 42. №5. С.668–676.
23. Johannessen J.A., Digranes G., Espedal H., Johannessen O.M., Samuel P., Browne D., Vachon P. SAR ocean feature catalogue // ESA Publication Division, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands;1994. 106 p.

Operational satellite monitoring of the Black, Baltic and Caspian Seas in 2009-2010

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

Space Research Institute of RAS (IKI RAS)
Email: olavrova@iki.rssi.ru

The results of daily satellite monitoring of the Black, Baltic and Caspian Seas being conducted by the Space Radar Laboratory of IKI RAS since beginning of 2009 are presented. Monitoring is based on analysis of medium (75 m) and high (12.5 m) spatial resolution synthetic aperture radar (SAR) images obtained from Envisat and ERS-2 satellites within the framework of several scientific ESA projects. The paper contains a short description of the data obtained and some examples of the most interesting manifestations in SAR images of dynamical, hydrometeorological and anthropogenic processes and phenomena. Generalized results of satellite observations in the key monitoring areas are provided. Among them there are monitoring of sea surface oil pollution; investigation of small-scale vortical structures; study of internal waves in the non-tidal seas; observations of ice conditions and sea ice dynamics.

Keywords: satellite monitoring, radar probing of the sea surface, the Black Sea, the Baltic Sea, the Caspian Sea, oil pollution, small-scale eddies, internal waves, ice conditions.