

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ СТРУКТУР В ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ ПО ДАННЫМ СПЕКТРОРАДИОМЕТРОВ MODIS И КОСМИЧЕСКОЙ РАДИОЛОКАЦИИ

© 2011 г. Е. С. Гурова¹, А. Ю. Иванов^{2*}

¹Учреждение Российской академии наук Атлантическое отделение Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Калининград

²Учреждение Российской академии наук Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва
E-mail: ivanoff@ocean.ru

Поступила в редакцию 20.08.2010 г.

На основе совместного анализа квазисинхронных данных спектрорадиометра MODIS на ИСЗ Terra и Aqua и космических радиолокационных изображений (РЛИ), полученных летом 2006 г., исследуются особенности проявления гидродинамических структур в юго-восточной части Балтийского моря, в том числе в условиях летнего цветения сине-зеленых водорослей. Наблюдается хорошая корреляция сигнатур, видимых на РЛИ, температурных и оптических снимках моря в зонах вихрей, грибовидных структур, прибрежного апвеллинга и выносов рек. Показано, что температурные аномалии часто являются одним из важных механизмов формирования светлых/темных сигнатур на РЛИ. Интенсивные цветения сине-зеленых водорослей, формируя на поверхности моря неветровую шероховатость, помимо всего прочего, создают дополнительные интерпретационные трудности.

Ключевые слова: морские течения, мезомасштабные гидродинамические структуры, дистанционное зондирование, MODIS, космическая радиолокация, радиолокационные изображения, мультидатчиковый подход, Балтийское море

ВВЕДЕНИЕ

Пространственно-временные масштабы процессов, происходящих в Балтийском море, определяют разнообразие гидродинамических явлений, среди которых вихри, грибовидные течения, фронты, апвеллинги, выносы рек. В настоящее время их исследования проводят путем сбора и анализа контактных и дистанционных измерений. Последние включают главным образом данные космических съемок. Современные спутниковые спектрорадиометры осуществляют съемку в видимой и инфракрасной (ИК) частях электромагнитного спектра. Это позволяет восстанавливать значения физических параметров поверхностного слоя вод, таких как температура, содержание хлорофилла, взвешенных и растворенных веществ, а также ряд других гидрооптических характеристик. Например, данные MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer) на ИСЗ Terra и Aqua, имея среднее пространственное и высокое спектральное разрешение, большую площадь покрытия, хорошую повторяемость во времени, оптические и ИК-каналы, хорошо зарекомендовали себя для получения оперативной информации, в том числе при проведении биологических, гидродинамических и экологических исследований (Гурова, 2009).

Среди микроволновых методов дистанционного зондирования (ДЗ) Земли космическая радиолокация является одним из активно развивающихся направлений. Причем, радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА) позволяют независимо от освещения и облачности получать информацию о ключевых параметрах морской среды: ветре, волнении, ледовой и навигационной обстановках, а также о нефтяных загрязнениях (Иванов, 2010). Однако одна из главных проблем радиолокационного зондирования морей и океанов состоит в том, чтобы понять, что отображается на радиолокационных изображениях (РЛИ) моря при тех или иных гидрометеорологических условиях. Тем не менее, в рамках мультидатчикового подхода космическая радиолокация определенно предоставляет новые возможности для исследования динамики прибрежных вод (Rud, Gade, 1999; Stapleton et al., 2000).

В видимом диапазоне спектра элементы поля течений идентифицируются благодаря наличию в водной толще пассивных трассеров (окрашенного растворенного органического вещества (ОРОВ), минеральной и биогенной взвеси) в разных концентрациях (Карабашев и др., 2000). Особенно ярко это выражено в прибрежной зоне, где из-за речного стока, размыва берегов и взмучивания донных осад-

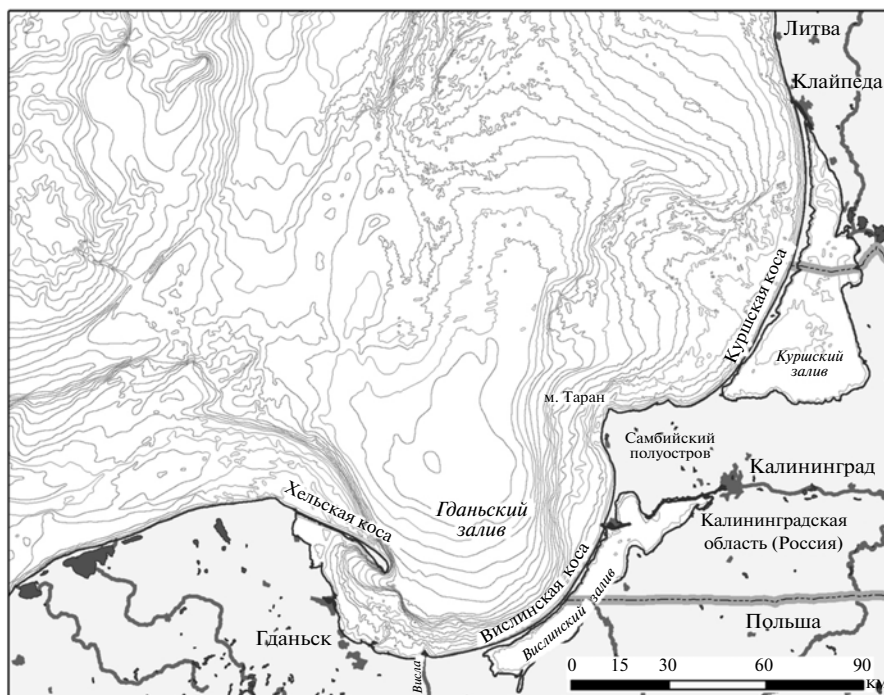


Рис. 1. Район исследований.

ков резко изменяются оптические характеристики вод. Заметным фактором воздействия на среду Балтийского моря является цветение сине-зеленых водорослей (цианобактерий) в летний период (Mazur-Marzec et al., 2006).

Неоднородности поля волнения и пленки поверхностно-активных веществ (ПАВ) рассматриваются в качестве основных факторов, формирующих поверхностные проявления на РЛИ (Johannesen et al., 1994). Первые формируют контрасты, связанные с границами основных течений, струйных ответвлений и вихревых образований, апвеллингов, тогда как ПАВ скапливаются в локальных зонах конвергенций и подавляют развитие мелких гравитационно-капиллярных волн (ГКВ), таким образом визуализируя структуру течений (Johannesen et al., 1994; Ivanov, Ginzburg, 2002).

Водоросли, плавающие во время массовых цветений на поверхности моря, также могут достаточно детально визуализировать поле и структуру поверхностных течений на снимках видимого диапазона (Rud, Gade, 1999; Stapleton et al., 2000; Kutser, 2004), однако анализ квази-синхронных РЛИ чрезвычайно сложен, так как водоросли могут создавать шероховатость, аналогичную ветровой (Naumenko et al., 1994), а разрывы в них — плохо интерпретируемые сликоподобные образования.

Ситуация на РЛИ, в отличие от снимков видимого диапазона, существенно зависит от скорости ветра — так, в диапазоне 2–5 м/с преобладают

структуры, визуализируемые пленочными сликами, в то время как при большей скорости ветра работает механизм отображения, связанный с кинематической модуляцией ГКВ на границах течения (Johannesen et al., 1994; Ivanov, Ginzburg, 2002).

Цель данной статьи — исследование особенностей проявления гидродинамических структур в юго-восточной части Балтийского моря по данным спектрорадиометров MODIS (Terra и Aqua) и РЛИ со спутников Envisat и Radarsat-1, полученных над юго-восточной (ЮВ) частью Балтийского моря в июне–августе 2006 г. Среди них — выносы рек, вихри, грибовидные структуры, прибрежный апвеллинг и линеаменты течений. Очевидно, данная проблема сложна и далека еще от окончательного решения, ибо в условиях наличия пленок ПАВ и/или плавающих водорослей на морской поверхности, взвеси и ОРОВ в верхнем слое моря, температурных аномалий и изменчивого поля ветра эти структуры могут изменять знак своих поверхностных проявлений.

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЙ

Район исследований охватывал ЮВ часть Балтийского моря, включая Гданьский залив, район косы Хель и прилегающую акваторию открытого моря (рис. 1). Данная акватория характеризуется сложным и крайне изменчивым гидродинамическим режимом (Добровольский, Залогин, 1982; Бабаков, 2003), который обусловлен сложной конфигураци-

Сведения о спутниковых данных, использованных для анализа

№	Дата	MODIS		Радиолокация	
		спутник	время, UTC	спутник/сенсор	время, UTC
1	07.06.2006	Terra	10:00	Envisat (ASAR)	09:06
2	03.07.2006	Aqua	10:45	Envisat (ASAR)	20:14
3	06.07.2006	Aqua	11:15	Envisat (ASAR)	20:19
4	11.07.2006	Terra	09:45	Radarsat-1	05:02

ей береговой линии, донным рельефом, ветровым режимом и особенностями циркуляции Балтики в целом, а также стоком крупных рек, таких как Висла, Преголя, Неман. Кроме того, в последние годы в июле–августе в Балтийском море ежегодно наблюдается цветение сине-зеленых водорослей (цианобактерий) (Mazur-Marzec et al., 2006), которые создают новые условия применения данных ДЗ. По данным Финского института морских исследований (Finnish Institute of Marine Research, <http://www.fimr.fi>) массовое цветение сине-зеленых водорослей в ЮВ Балтике в 2006 г. началось в конце июня.

ДАННЫЕ

В таблице приведены основные сведения о спутниковых данных, использованных для анализа. В настоящей статье мы остановимся на результатах сравнительного анализа снимков спектрорадиометров MODIS и РЛИ со спутников Envisat и Radarsat-1, полученных над ЮВ частью Балтийского моря 07.06, 03.07, 06.07 и 11.07.2006.

Оригинальные спутниковые данные MODIS уровня обработки L1A были получены из архива LAADS (Level 1 and Atmosphere Archive and Distribution System). Дальнейшая обработка производилась в программном обеспечении Seadas 6.1 и включала в себя атмосферную коррекцию по алгоритму MUMM (Ruddick et al., 2000) и расчет ряда геофизических продуктов, а именно: карт распределения температуры поверхности моря (ТПМ) (Brown, Minnett, 1999), нормализованных спектральных яркостей восходящего излучения (nLw) (Gordon, Wang, 1994) и спектральных коэффициентов диффузного ослабления нисходящего излучения (Kd_{Lee}) (Lee et al., 2005) для разных длин волн. Значения содержания хлорофилла по данным MODIS не рассчитывались, главным образом, из-за очень высокой погрешности существующих алгоритмов в условиях Балтийского моря (Darecki, Stramski, 2004).

Для данного исследования были выбраны две гидрооптические характеристики, косвенно отражающие содержание в водной толще взвешенных и растворенных веществ: нормализованная яркость восходящего излучения на длине волны 551 нм —

nLw_{551} , наиболее соответствующей “окну прозрачности” вод Балтийского моря (Jerlov, 1976; Kzatzet et al., 2003), и спектральный коэффициент диффузного ослабления нисходящего облучения для длины волны 488 нм — Kd_{488_Lee} , характеризующий прозрачность вод. Эти характеристики широко применяются для оценки гидрооптических свойств морской воды, особенно в прибрежной зоне (Chen et al., 2007; Lee et al., 2005; Kratzer et al., 2003).

В работе использовались РЛИ среднего разрешения, имеющиеся в Атлантическом отделении Института океанографии РАН (АО ИО РАН), представленные KSAT (Köingsberg Satellite Services, г. Тромсе, Норвегия) в формате HDF5. Они представляют собой изображения среднего разрешения оригинальных продуктов ASA_WSM (Envisat) и ScanSAR Narrow (Radarsat-1) с пространственным разрешением 300 и 200 м соответственно и были изначально получены в рамках проекта по мониторингу нефтяных загрязнений в районе платформы Д-6. Помимо этого в файле HDF5 содержится информация о нефтяных загрязнениях и судовой обстановке, извлеченная из РЛИ специалистами KSAT.

На рис. 2–5 представлены основные результаты, полученные в ходе исследований. Ниже приводятся результаты и обсуждается отображение сигнатур различных явлений на квазисинхронных снимках MODIS и РЛИ. Основной метод анализа — комбинирование данных и построение радиометрических разрезов, наглядно отражающих пространственную корреляцию параметров.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Аномалии поля температуры

Связь аномалий поля ТПМ с оптическими характеристиками неоднозначна. Воды выносов рек, резко отличающиеся по физическо-химическим свойствам и содержанию взвеси от морских вод, покажут согласованный ход температурных и гидрооптических характеристик и послужат хорошим трассером поверхностных течений. С другой стороны, как было показано в (Zalewski et al., 2003; Krężel et al., 2005), в рассматриваемой акватории не наблюдается тенденции роста концентрации хлоро-

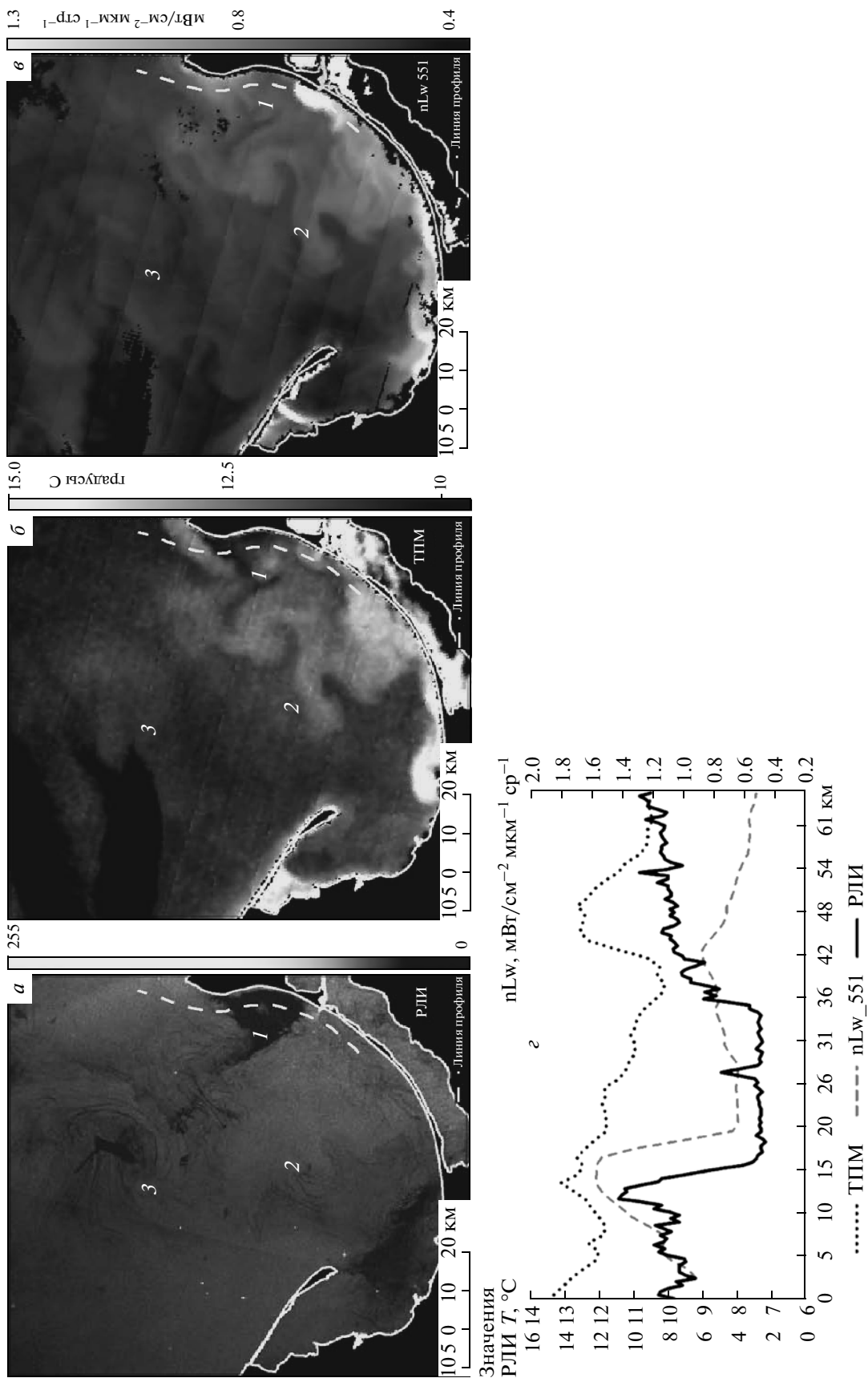


Рис. 2. а-е – Температурные аномалии и вихревые структуры (1 – апвеллинг, 2 – вынос реки, 3 – грибовидная структура и пленочное образование) на серии квазисинхронных снимков от 07.06.2006 (слева направо: фрагмент РЛИ, температура поверхности моря, распределение ТПМ, pLw_551 и интенсивности РЛИ вдоль линии на рис. 2а-е).

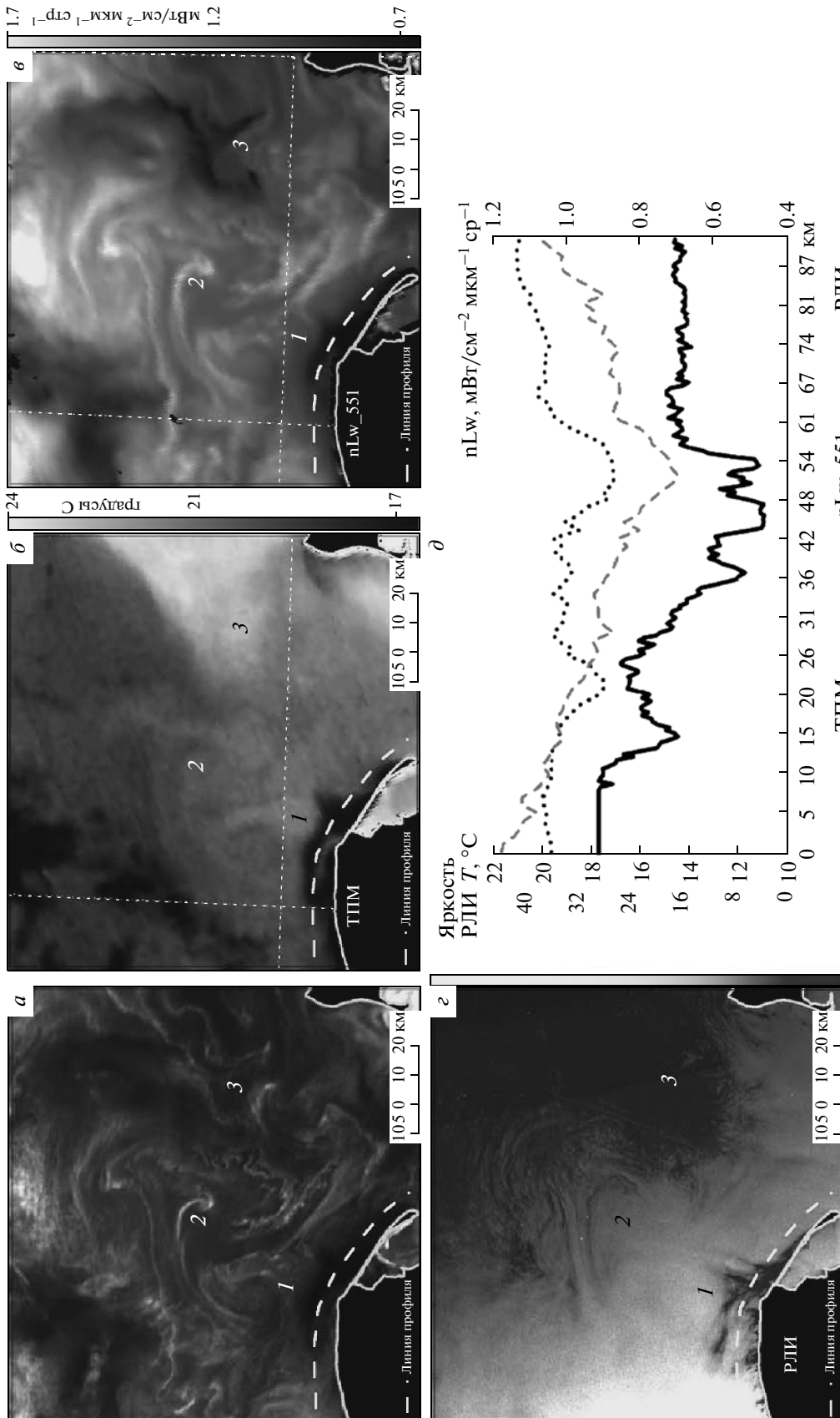


Рис. 3. а-в – Аппеллинг у косы Хель (1) и вихри (2, 3 – грибовидные структуры) в открытом море на серии квазисинхронных снимков от 03.07.2006 (слева направо; снимок в реальных цветах, температура поверхности моря, распределение ТПМ, пLw_551, фрагмент РЛИ); д – распределение ТПМ, пLw_551 и интенсивности РЛИ вдоль линии на рис. 3а-в.

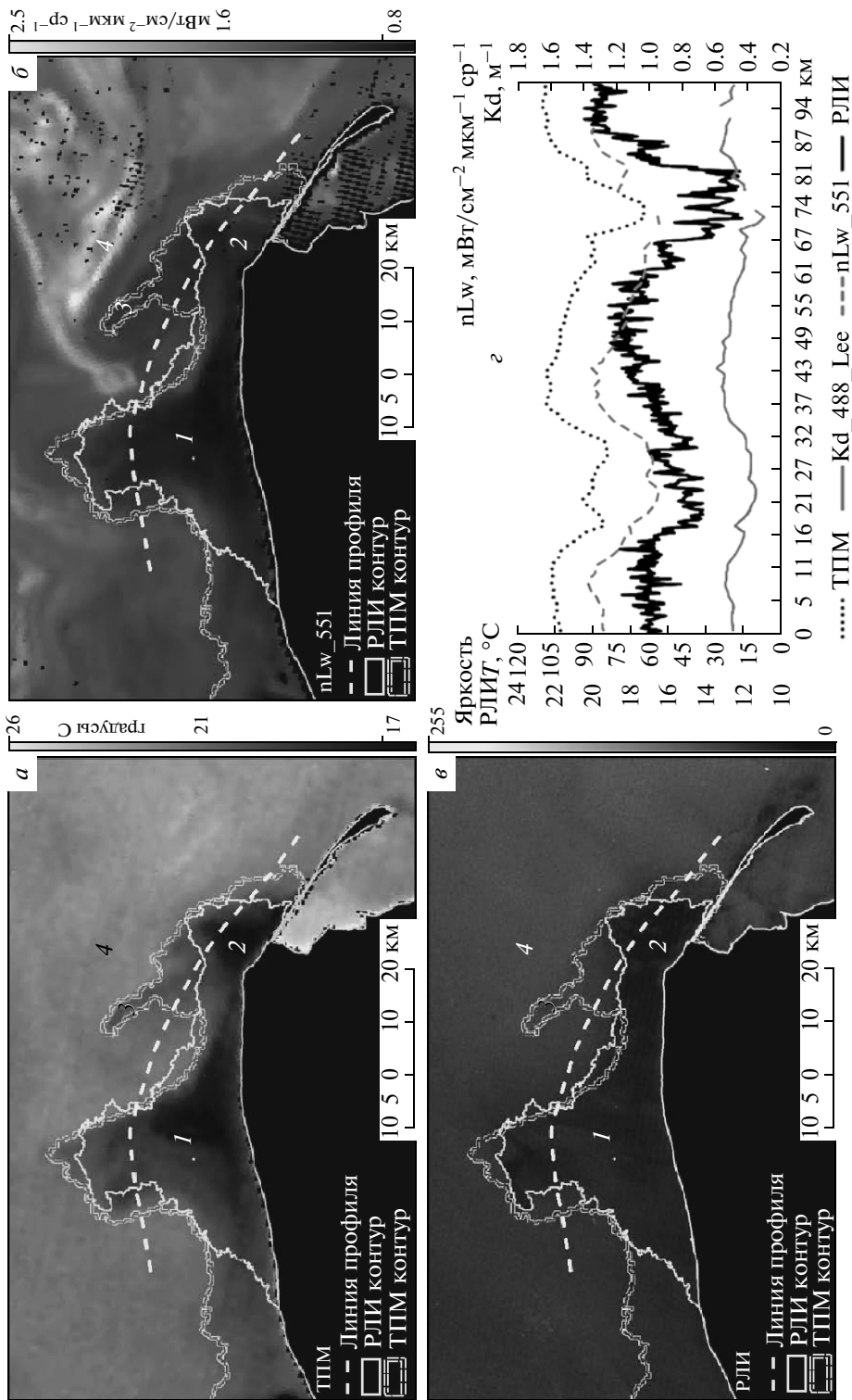


Рис. 5. а-в – Аппеллинг у косы Хель (1, 2, 3) и зона цветения (4) на серии квазисинхронных снимков от 11.07.2006 (слева направо: температура поверхности моря, распределение nLw_551, фрагмент РЛИ); г – распределение ТПМ, nLw_551, Кд_488_Lee и интенсивности РЛИ вдоль линии на рис. 5а-в.

филла в зонах прибрежного апвеллинга, как это принято считать в литературе на примере других акваторий, скорее наоборот, она уменьшается в зоне апвеллинга. Особенно это касается района косы Хель (Zalewski et al., 2003). Корреляция поля ТПМ и рассеянного радиосигнала (на РЛИ) может наблюдаться там, где на поверхности создаются большие градиенты ТПМ, которые способны привести к трансформации поля приводного ветра над зонами повышенной/пониженной температуры, причем это происходит при скорости ветра не более 5 м/с (см. Lin et al. (2002) и цитированную в ней литературу).

Так, на серии снимков, приведенных на рис. 2а–в, четко виден ряд температурных аномалий, примыкающих к Вислинской косе. Снимки получены при ветре северных румбов 3–4 м/с. Главной особенностью этих снимков является наличие прибрежных областей холодной (1), теплой (2) воды и пятна (3). Хорошее совпадение контуров пятен (1) и (2) на РЛИ, оптических и ИК-изображениях, а также профилей вдоль прибрежного разреза (рис. 2г) говорит о том, что главный визуализирующий механизм здесь – контрасты поля температур как между пятнами, так и между водами открытого моря. С океанографической точки зрения, серия пятен (2) представляет собой трансформированные воды р. Висла, имеющие повышенные значения ТПМ и мутности и распространяющиеся вдоль косы под действием вдольбереговых течений, сформированных ветрами, имевшими место в предшествующие дни. Обширное темное пятно (1), очевидно, представляет собой воды, поднявшиеся на поверхность в результате локального апвеллинга у побережья Самбийского п-ова (рис. 2б, в). Характерный и согласованный ход профилей ТПМ, мутности и интенсивности РЛИ (рис. 2г) подтверждает данное предположение. Обращает на себя внимание характер проявления областей теплой и холодной воды в поле радиолокационного сигнала: воды теплее окружающей акватории выглядят светлее, а холодные – темнее фона. Единственное объяснение этому – трансформация атмосферного погранслоя, в частности, приводящая к небольшому ослаблению фонового ветра над холодной, и его небольшому усилению над теплой водой (Beal et al., 1997). Анализ происхождения локального компактного пятна (3), хорошо различимого на РЛИ и на оптическом снимке, но едва – в ИК-диапазоне, показал, что оно, скорее всего, образовано пленками ПАВ, так как известно, что толстые нефтяные пленки формируют значимые температурные контрасты (Fingas, Brown, 1997) и должны более контрастно проявляться на снимке ИК-диапазона.

Вихри и вихревые структуры

Вихри и вихревые структуры на оптических снимках видны благодаря наличию пассивных при-

месей в воде (главным образом, ОРОВ, биогенной или минеральной взвеси), вовлекаемых в его орбиту (Монин, Красицкий, 1985). Причем их вид в различных диапазонах электромагнитного спектра будет несколько различаться в зависимости от природы примесей и от того, с какого горизонта они вовлекаются и на какие глубины проникают солнечные лучи. В поле ТПМ вихри могут быть видны, когда они вовлекают воды, различающиеся по температуре. На РЛИ картины (сигнатуры) спиральных вихрей могут разительно отличаться (Ivanov, Ginzburg, 2002). Так, если на поверхности моря имеются пленки ПАВ (состоящие из высокомолекулярных жирных спиртов и кислот природного происхождения (Гусева и др., 2000), то, скапливаясь вдоль линий конвергенций, они будут отображаться темным тоном, а полосы дивергенций, где они отсутствуют, – светлым (Johannesen et al., 1994). Однако при наличии плавающих водорослей, например, во время цветения цианобактерий, в зонах конвергенции будут скапливаться именно водоросли (рис. 7), создавая, таким образом, неветровую (или неволновую) шероховатость – она на РЛИ будет иметь светлый тон; зоны дивергенции, в свою очередь, будут представлять собой полосы чистой воды, свободные от водорослей, и иметь соответственно более темный тон на РЛИ. В такой ситуации аналогично проявляют себя вихри в видимом диапазоне спектра, где детальное отображение пространственной структуры вихря происходит за счет контрастов между линиями скопления водорослей и чистой воды.

Снимки на рис. 3а–д получены при ветре северных румбов скоростью 2–3 м/с. На данной серии снимков отобразились грибовидная структура (2) и ее филаменты, а также прибрежный апвеллинг у косы Хель. На первый взгляд может показаться, что структура (2) визуализируется пленками ПАВ, однако основным фактором в данном случае являются скопления плавающих на поверхности водорослей, которые, очевидно, могут скапливаться в зонах конвергенций вихревых структур, так же как и пленки ПАВ. Однако в случае интенсивного цветения сине-зеленых водорослей концентрация в конвергентных зонах должна быть максимальной, из-за чего она будет иметь большую шероховатость и отображаться на РЛИ более светлым тоном. На рис. 2, напротив, отмечена грибовидная структура (3), видимая за счет темных сигнатур, образованных скоплениями пленок ПАВ в зонах конвергенции. Снимок на рис. 2 сделан до начала массового цветения цианобактерий.

При ветре, превышающем 4–5 м/с, плавающие субстанции сильнее перемешиваются в толще воды – соответственно сигнатуры вихрей более не наблюдаются на РЛИ (область 3 на рис. 3а), но продолжают наблюдаться на оптических снимках и снимках ИК-диапазона (рис. 3в, г), очевидно, находясь в поверхностном слое моря. Кроме того, на ИК-

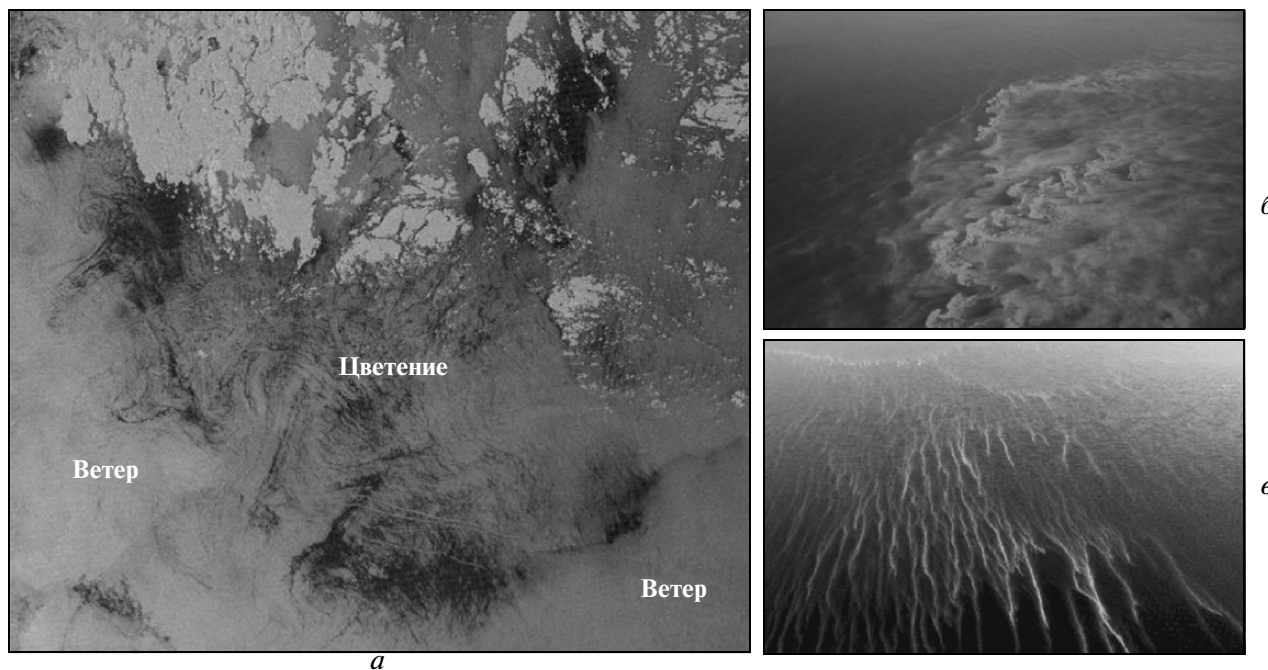


Рис. 6. Летнее цветение сине-зеленых водорослей в северной части Балтийского моря на РЛИ Radarsat-1 (а) от 17.07.2005 (© CSA/MDA) и на снимках с самолета Boarder Guard of Finland 11.07.2005 (б) и 21.07.2005 (в) (рисунок из (Tahvonnen, 2008)).

снимке детализация вихревых структур значительно ниже (иногда они вообще не проявляются), так как в Балтике зачастую вовлекаемая вода имеет незначительные температурные отличия, и, кроме того, нельзя отрицать влияние скоплений сине-зеленых водорослей, сглаживающих эти контрасты.

Интересно соответствие полей ТПМ и nLw_{551} в районе грибовидной структуры (2) на рис. 3. Ее циклонический вихрь более интенсивно выражен в видимом диапазоне, имея при этом более низкую температуру в центре, а антициклонический — более высокую температуру, при меньших значениях nLw_{551} . Это может указывать на вовлечение более теплых вод Гданьского залива, “подогреваемых” стоком р. Висла, который при определенных направлениях ветра достигает окончания косы Хель и далее вовлекается в общую циркуляцию вод Балтийского моря. Это хорошо видно на снимке, представленном на рис. 3г. Струя течения проходит вдоль края зоны Хельского апвеллинга и вовлекается в грибовидную структуру открытого моря.

На рис. 4 в вершине Гданьской бухты на РЛИ и Kd_{488_Lee} изображениях отмечен вихрь (2), расположенный близко к берегу между местами стока рек Висла и Преголя. Из рис. 4б видно, что воды стока р. Висла направлены на север в сторону косы Хель, и не образуют выраженных температурных контрастов, тогда как сильно нагретые воды, вытекающие из Вислинского залива, четко видно в море. Однако совместный анализ всех изображений и графика на рис. 4 показывает согласованность светлых полос вихря с повышенными значениями по-

казателя мутности Kd_{488_Lee} , тогда как яркой зависимости сигнатур РЛИ и ТПМ в данном случае не наблюдается. Поскольку снимок сделан в период массового цветения сине-зеленых водорослей, можно предположить, что и здесь их скопления обусловили визуализацию на РЛИ вихря, который в поле ТПМ не выражен совсем. В данном случае снимки видимого, ИК- и РЛИ-диапазонов существенно расширили спектр полученной информации.

На оптических и ИК-снимках, а также на РЛИ отчетливо видны филаменты (полосы), связанные с цветением сине-зеленых, скопления которых плавают на поверхности моря (рис. 3). Однако хорошая согласованность сигнатур всех трех диапазонов наблюдается только в зонах апвеллинга (рис. 3д) и грибовидной структуры (рис. 3а–г), где РЛИ показывает высокую детальность отображения явления, и при этом оптические и температурные данные предоставляют дополнительную информацию для анализа этого явления. На РЛИ в общих чертах также отображается структура течения вдоль Хельской косы из Гданьского залива, однако в данном случае без подробных деталей.

Апвеллинг

Считается, что в создании сигнатур апвеллинга на РЛИ одновременно участвуют два эффекта — трансформация атмосферного погранслоя, в частности, приводящая к ослаблению ветра над зоной холодной воды, и пленочное гашение ряби в резуль-

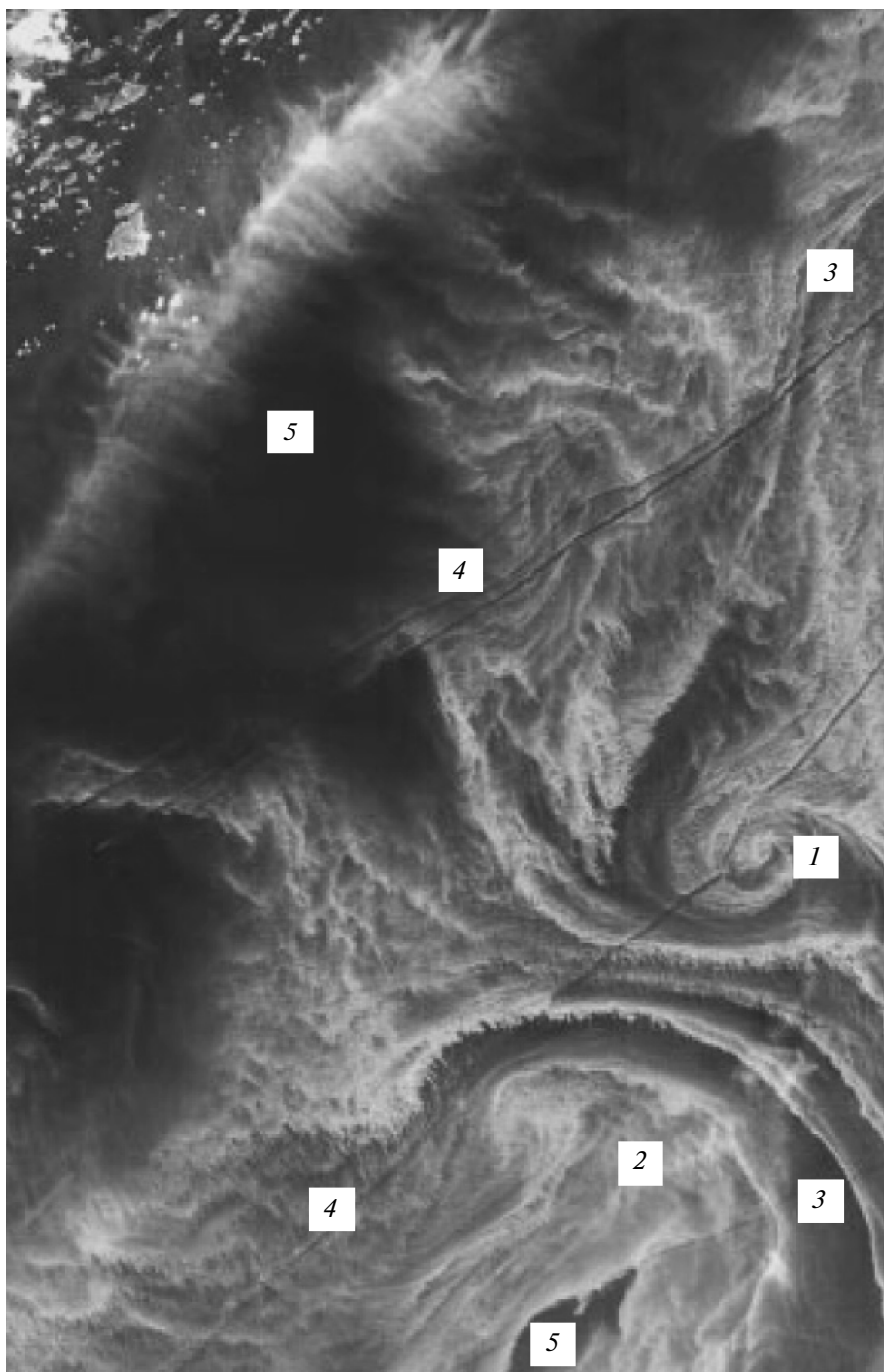


Рис. 7. Летнее цветение сине-зеленых водорослей в северо-западной части Финского залива на оптическом снимке ALI на ИСЗ EO-1 от 14.07.2002; 1 – циклонический вихрь, 2 – грибовидная структура, 3 – струи течений, 4 – следы кораблей, 5 – чистая вода (рисунок из (Kutser, 2004)).

тате появления пленок ПАВ при повышенной биологической активности в таких зонах (Hsu et al., 1995; Lin et al., 2002; Krężel et al., 2005). Первое экспериментально было исследовано в районе фронтальных зон Гольфстрима (см. (Beal et al., 1997)), а

второе – большей частью результат теоретизирования. Тем не менее, анализ мультиспектральных снимков позволяет различать эти процессы, так как перепад температур в несколько градусов практически сразу создает эффект ослабления ветра над

обширными областями относительно холодной воды, в том числе из-за затрудненной генерации ряби на ее поверхности при одном и том же ветре при увеличении вязкости и поверхностного натяжения. А вот процесс образования пленок ПАВ растянут во времени в связи с тем, что от поступления биогенов в верхний слой моря до массового развития фитопланктона, его отмирания и разложения с выделением веществ, образующих ПАВ, необходимо некоторое время (Гусева и др., 2000). Поэтому пленки ПАВ начинают играть определенную роль на заключительных фазах развития апвеллинга. Апвеллинг однозначно проявляется в поле ТПМ. На оптических снимках в период цветения сине-зеленых водорослей их концентрация в зоне апвеллинга в Балтике минимальна, и ему соответствуют пониженные значения яркости, и, в свою очередь, повышенная прозрачность.

По данным контактных и спутниковых наблюдений, в начале июля 2006 г. у косы Хель (побережье Польши) образовался апвеллинг. На ранней стадии он отображен на рис. 3 (03.07.2006), в более поздних стадиях – последовательно на рис. 4 (06.07.2006) и рис. 5 (11.07.2006). Сигнатуры этого апвеллинга на РЛИ от 06.07.2006 (рис. 4в) имеют пятнистый характер, и, скорее всего, имеют непленочное происхождение. Подобная пятнистость морской поверхности в зоне апвеллинга может сформироваться или в результате его ослабления, или при резком и внезапном усилении берегового ветра, покрывающего ветровой рябью до этого слабозволнованную поверхность. Однако в создании его сигнатур на РЛИ от 11.07.2006 (рис. 5в) решающий вклад явно вносят температурные аномалии (градиент 2–4°C, согласно рис. 5г, и существенно выше для ядра зоны апвеллинга). В последнем случае (11.08.2006) он отображается за счет значительного расширения зоны холодной воды. На снимках видимого и ИК-диапазонов данный апвеллинг также характеризуется пониженной ТПМ и повышенной прозрачностью вод. Распределения температурных и оптических характеристик вдоль прибрежных разрезов показаны на рис. 4г и 5г.

Цветение моря и пленочные загрязнения

Анализ многочисленных фотографий патрульных самолетов (рис. 6б, в) показал, что водоросли, плавающие на поверхности, формируют характерный вид морской поверхности и характерные поверхностные проявления. Общепринятым считается взгляд, что, как только начинается массовое развитие водорослей, на поверхности моря появляются биогенные пленки или пленки ПАВ (Lin et al., 2002). Однако, как отмечалось выше, пленки появляются на поверхности моря уже на последних стадиях, когда водоросли в массовом порядке отмирают, скапливаются в верхнем слое моря и начинает происходить их биохимическое разложение (Мо-

нин, Красицкий, 1985; Гусева и др., 2000). Эти вещества затем поступают на поверхность и формируют пленочные биогенные слики (Монин, Красицкий, 1985; Иванов, 2007).

Термин “цветение моря” означает массовое развитие микроскопических водорослей в течение короткого промежутка времени, а вовсе не повышенное их содержание (Chorus, Bartram, 1999). Как правило, только некоторые виды фитопланктона “цветут” наиболее интенсивно. Так, при цветении сине-зеленых микроводорослей концентрация в 1 л составляет до 1–100 млн. клеток, Chl-*a* – от 3–5 мг/м³ в толще у поверхности и до 350–900 мг/м³ в поверхностной пленке (Chorus, Bartram, 1999; Kutser, 2004). Известно, что в Балтийском море цветение водорослей случается в строго определенное время года, главным образом, весной и летом, а также осенью – в Южной Балтике (Aneer, Löfgren, 2007). В это время в толще воды и/или у поверхности скапливается огромное количество свободно плавающих микроводорослей. Морская поверхность визуально выглядит зеленоватой, желтоватой или даже коричневатой – окраску воде придает высокая концентрация пигментированных клеток (Chorus, Bartram, 1999). В том случае, когда на поверхности моря появляются видимые признаки – главным образом скопления плавающих водорослей – цветение моря достигает максимальной фазы. Очевидно, на первых стадиях цветения, во время активного размножения, водоросли покрывают морскую поверхность не маслянистой, а растительной “пленкой” толщиной до нескольких сантиметров (Chorus, Bartram, 1999). Очевидно также, что эта “пленка”, с одной стороны, выглаживает коротковолновые компоненты волнения, а с другой – создает дополнительную неветровую шероховатость за счет появления микроскопических частей организмов выше поверхности. В связи с этим на РЛИ области моря, покрытые плавающими водорослями, и зоны усиления ветровой ряби часто выглядят практически неразличимо. На рис. 6а приведено РЛИ спутника Radarsat-1, на котором отобразилась такая ситуация. Далее неоднородное поле течений, осложненное струями, меандрами и вихрями, может создавать разрывы сплошности, перераспределяя концентрацию водорослей в зонах конвергенций и дивергенций. Наконец, изменчивый ветер и судходство, механически воздействуя на сплошность, также могут влиять на этот процесс. Заметим, что подобные явления были отмечены при анализе результатов радиолокационного мониторинга Онежского и Ладожского озер (Naumenko et al. 1994; Ivanov et al., 1997; Иванов и др., 1999).

В результате это может привести к появлению поверхностных проявлений и сигнатур на РЛИ, имеющих непленочный характер, но визуально не отличимых от пленочных сликов. В первом случае разводы и полосы в скоплениях плавающих водорослей на снимках видимого диапазона будут поло-

сами спокойной, практически невзволнованной ветром воды. На РЛИ эта ситуация будет двусмысленной: на фоне неветровой шероховатости, создаваемой плавающими водорослями, темные полосы могут быть образованы как полосами спокойной воды, так и пленками ПАВ, выглаживающими рябь, но уже на фоне ветровой шероховатости.

В качестве дополнительного аргумента приведем оптический снимок гиперспектрального датчика ALI (Advanced Land Imager) на ИСЗ EO-1 (рис. 7). На нем в поле плавающих сине-зеленых водорослей отобразились: вихри (1), грибовидные структуры (2), их струи и филаменты (3) и следы кораблей (4). Очевидно, плавающие на поверхности (скопившиеся в зонах конвергенций) водоросли на РЛИ будут создавать светлые полосы (светлее фона), в то время как свободная от них и спокойная вода (5) отобразится черным тоном и будет создавать темные полосы и пятна. В связи с этим вне рамок мультиспектрального подхода эти темные полосы могут быть проинтерпретированы как структуры, визуализируемые пленками ПАВ, а темные пятна — как нефтяные загрязнения в следах за судами. Очевидно также, что в таких ситуациях очень часто возникают интерпретационные трудности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ниже сформулируем основные выводы, получившие подтверждение в ходе исследования.

Структура и элементы поля течений. При ветре, не превышающем 5 м/с, наблюдается достаточно хорошая корреляция структур, видимых как на снимках видимого и ИК-диапазона, так и на РЛИ. В период цветения моря на оптических снимках элементы поля течения отображаются с большей детальностью, чем на ИК-снимках. Границы зон с разной скоростью течения и их филаменты при слабом ветре также хорошо видны на РЛИ благодаря наличию пленок ПАВ и/или плавающих водорослей.

Прибрежный апвеллинг создает на поверхности моря обширные зоны холодной воды, а на РЛИ — обширные темные пятна, главным образом, из-за перепада температур апвеллинг—окружающая вода. Хорошая корреляция температурных, оптических характеристик и интенсивности РЛИ в зонах апвеллинга (рис. 2г, 3д, 4г и 5г) объясняется наличием в них холодной и более прозрачной воды на начальных стадиях развития. Вклад пленок ПАВ в процесс визуализации апвеллинга остался под вопросом, однако их эффект видится на поздних стадиях его развития.

Цветение моря и пленочные загрязнения. РЛИ, отображающие зоны цветения, в зависимости от того, где скапливаются растительные организмы — в верхнем слое моря или на его поверхности, — имеют различную текстуру. В последнем случае эти зоны могут выглядеть как зоны усиления ветра. Водорос-

ли, плавающие на поверхности, гасят рябь, однако их выступающие части создают на морской поверхности новый тип шероховатости. Эта шероховатость и приводит к характерной текстуре РЛИ (рис. 6а). В связи с этим массовое цветение сине-зеленых водорослей может привести к формированию обширных областей неволновой шероховатости, что, в свою очередь, может создавать дополнительные трудности при анализе РЛИ. Причем разводы в них или следы кораблей (т.е. области чистой воды) могут создавать сигнатуры, неотличимые от сигнатур судовых разливов, характеризующихся наличием в следе нефтепродуктов. Подобные явления характерны также для крупных озер (Naumenko et al., 1994; Ivanov et al., 1997; Иванов и др., 1999).

Таким образом, в результате исследования показано, что соответствие границ течений на снимках MODIS и РЛИ достаточно хорошее, но наблюдается не всегда. Это связано с тем, что оптически значимые примеси (ОРОВ, взвесь, пигменты фитопланктона) находятся, главным образом, в верхнем слое водной толщи, а факторы, влияющие на формирование РЛИ (пленки ПАВ, гравитационно-капиллярные волны, а также и водоросли), — только на поверхности. Стики, плавающие водоросли, взвешенные и растворенные вещества, с разной степенью детализации визуализирующие структуру поля течений, могут активно использоваться для исследования прибрежной динамики. Ветер до 5–6 м/с благоприятен для их отображения на РЛИ.

В связи с рядом очевидных интерпретационных проблем необходимо дальнейшее исследование механизмов отображения интенсивных цветений на РЛИ моря путем анализа мультиспектральных съемок. Более того, необходимо чрезвычайно профессионально подходить к интерпретации поверхностных проявлений на РЛИ, особенно при слабых ветрах и при цветениях сине-зеленых водорослей.

Наконец, совместное использование данных видимого, ИК- и СВЧ-диапазонов и их различных сочетаний, несомненно, позволяет повысить информативность ДЗ для задач исследования процессов и явлений верхнего слоя моря. Вполне очевидно, что мультиспектральный подход является мощным средством для исследования процессов различного масштаба, в том числе при отсутствии контактных измерений, и позволяет разработать методы их мониторинга в прибрежной зоне и даже избежать интерпретационных ошибок.

Права интеллектуальной собственности на оригинальные данные спутников Envisat и Radarsat-1 принадлежат Европейскому космическому агентству, Канадскому космическому агентству/MDA Corporation и Kongsberg Satellite Services; на данные MODIS — Американскому аэрокосмическому агентству NASA.

Авторы благодарят директора АО ИОРАН В.В. Сивкова за данные радиолокационных съемок.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 09-05-90744-моб_ст.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бабаков А.Н.* Пространственно-временная структура течений и миграций наносов в береговой зоне юго-восточной Балтики (Самбийский полуостров и Куршская коса). Дисс. ... канд. геогр. наук. Калининград, 2003. С. 272.
- Гурова Е.С.* Методологические особенности использования спутниковых снимков MODIS для оценки распределения взвеси в прибрежных водах юго-восточной Балтики // Тр. межд. конф. Создание искусственных пляжей, островов и других сооружений в береговой зоне морей, озер, водохранилищ. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. С. 130–140.
- Гусева Т.В., Молчанова Я.П., Заика Е.А. и др.* Гидрохимические показатели состояния окружающей среды. Справочные материалы. М., 2000.
- Добровольский А.Д., Залогин Б.С.* Моря СССР. М.: Изд-во МГУ, 1982.
- Иванов А.Ю.* Стики и пленочные образования на космических радиолокационных изображениях // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 3. С. 73–96.
- Иванов А.Ю.* О восстановлении параметров морской среды по данным космических РСА // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 3. С. 77–92.
- Иванов А.Ю., Литовченко К.Ц., Альперс В. и др.* Проявления гидрофизических процессов на поверхности Ладожского озера на радиолокационных изображениях ERS-1 // Исслед. Земли из космоса. 1999. № 5. С. 63–75.
- Карабашев Г.С., Евдошенко М.А., Шеберстов С.В.* Анализ проявлений мезомасштабного водообмена на спутниковых снимках морской поверхности // Океанология. 2005. Т. 45. № 2. С. 195–205.
- Монин А.С., Красицкий В.П.* Явления на поверхности океана. Л.: Гидрометеиздат, 1985.
- Aneer G., Löfgren S.* Algal bloom – some questions and answers. County Administrative Board of Stockholm, 2007.
- Beal R.C., Kudryavtsev V.N., Thompson D.R. et al.* The influence of the marine atmospheric boundary layer on ERS-1 synthetic aperture radar imagery of the Gulf Stream // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. P. 5799–5814.
- Brown O.B., Minnett P.J.* MODIS infrared sea surface temperature algorithm theoretical basis document, Ver 2.0. 1999. (http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod25.pdf).
- Chen Z., Muller-Karger F.E., Hu C.* Remote sensing of water clarity in Tampa Bay // Rem. Sens. Environ. 2007. № 109. С. 249–259.
- Chorus I., Bartram J. (Eds.).* Toxic Cyanobacteria in water: A guide to their public health consequences, monitoring and management. London: E & FN Spon, 1999.
- Darecki M., Stramski D.* An evaluation of MODIS and SeaWiFS bio-optical algorithms in the Baltic Sea // Rem. Sens. Environ. 2004. V. 89. P. 326–350.
- Fingas M.F., Brown C.E.* Review of oil spill remote sensing // Spill Science & Technol. Bull. 1997. V. 4. № 4. P. 199–208.
- Gordon H.R., Wang M.* Retrieval of water-leaving radiance and aerosol optical thickness over the oceans with SeaWiFS: A preliminary algorithm // Appl. Opt. 1994. V. 33. P. 443–452.
- Hsu M.K., Mitnik L.M., Liu C.T.* Upwelling area northeast of Taiwan on ERS-1 SAR images // Acta Oceanogr. Taiwanica. 1995. V. 34. № 3. P. 27–38.
- Ivanov A.Yu., Alpers W., Naumenko M.A., Karetnikov S.G.* Lake Ladoga surface features on the ERS-1 SAR imagery / Proc. the 3rd ERS Symposium (ESA SP-414). V. 2. 14–21 March 1997, Florence, Italy. P. 1035–1040.
- Ivanov A.Yu., Ginzburg A.I.* Oceanic eddies in synthetic aperture radar images // Proc. Indian Acad. Sci. (Earth Planet. Sci.). 2002. V. 111. № 3. P. 281–295.
- Jerlov N.G.* Marine Optics. Amsterdam: Elsevier, 1976.
- Johannesen J.A., Digranes G., Espedal H. et al.* SAR Ocean Feature Catalogue (ESA SP-1174). Noordwijk: ESA Publ. Division, 1994.
- Krężel A., Szymanek L., Kozowski L., Szymelfenig M.* Influence of coastal upwelling on chlorophyll-a concentration in the surface water along the Polish coast of the Baltic Sea // Oceanologia. 2005. V. 47. № 4. P. 433–452.
- Kratzer S., Hakansson B., Sahlin C.* Assessing Secchi and photic zone depth in the Baltic Sea from satellite data // Ambio. 2003. № 32. P. 577–585.
- Kutser T.* Quantitative detection of chlorophyll in Cyanobacterial blooms by satellite remote sensing // Limnol. Oceanogr. 2004. V. 49. № 6. P. 2179–2189.
- Lee Z.P., Darecki M., Carder K.L. et al.* Diffuse attenuation coefficient of downwelling irradiance: an evaluation of remote sensing methods // J. Geophys. Res. 2005. C02017. P. 148–227.
- Lin I., Wen L., Liu K. et al.* Evidence and quantification of the correlation between radar backscatter and ocean colour supported by simultaneously acquired in situ sea truth // Geophys. Res. Lett. 2002. V. 29. № 10. 10.1029/2001GL014039.
- Mazur-Marzec H., Krężel A., Kobos J., Plin'ski M.* Toxic *Nodularia spumigena* blooms in the coastal waters of the Gulf of Gdansk: A ten-year survey // Oceanologia. 2006. V. 48. № 2. P. 255–273.
- Naumenko M.A., Beletsky D.V., Rumyantsev V.B. et al.* Investigations of the hydrobiological situation in Lake Onega using joint spaceborne radar, airborne and in situ measurements // Int. J. Rem. Sens. 1994. V. 15. № 10. P. 2039–2049.
- Rud O., Gade M.* Monitoring algae blooms in the Baltic Sea: A multi-sensor approach / Proc. IGARSS'99. 28 June–2 July 1999, Hamburg, Germany. V. 2. P. 1211–1213.
- Ruddick K.G., Ovidio F., Rijkeboer M.* Atmospheric correction of SeaWiFS imagery for turbid coastal and inland waters // Appl. Opt. 2000. V. 39. № 6. P. 897–912.
- Stapleton N., Aicken W., Dovey P., Small J.* A multi-sensor approach to monitor oceanography in the Gulf of Oman and Northern Arabian Sea / Proc. Envisat & ERS Symp. (ESA SP-461). 16–20 October 2000, Gothenburg, Sweden.
- Tahvonon K.* The use of remote sensing, drifting forecasts and GIS data in oil response and pollution monitoring. METIER Course N 6. Helsinki: Finnish Environment Institute, 2008.
- Zalewski M., Ameryk A., Szymelfenig M.* Primary production and chlorophyll *a* concentration during upwelling events along the Hel peninsula (The Baltic Sea) // Oceanol. and Hydrobiol. Studies. 2003. V. 34. № 2. P. 97–113

Appearance of Sea Surface Signatures and Current Features in the South-East Baltic Sea on the MODIS and SAR images

E. S. Gurova¹, A. Yu. Ivanov²

¹*Atlantic Branch of P.P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Kaliningrad*

²*P.P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow*

Efficiency of multi-sensor approach in the analysis of hydrodynamical processes in South-Eastern Baltic Sea, particularly during the summer peak blue-green algae blooms, is demonstrated by combining of quasi-simultaneous satellite images taken by MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS, on Terra and Aqua satellites) and synthetic aperture radar (SAR) instruments (on Envisat and Radarsat-1 satellites). High correlation of SAR, sea surface temperature and optical signatures in the areas featured by offshore eddies, mushroom-like structures, coastal upwelling and river outflows were identified and discussed. It is demonstrated, that temperature anomalies often are one of the important mechanisms of formation of the dark/bright signatures on SAR images, while intensive algae blooms forming non-wind sea surface roughness create additional interpretation changes and difficulties.

Keywords: sea current features, meso-scale sea surface signatures, remote sensing, MODIS, synthetic aperture radar, SAR images, multi-sensor approach, Baltic Sea