

Влияние ветрового воздействия и гидродинамических процессов на распространение вод Калининградского залива в акватории Балтийского моря

О.Ю. Лаврова¹, Е.В. Краюшкин^{1,2}, Д.М. Соловьев³, М.Н. Голенко⁴, Н.Н. Голенко⁴,
Н.А. Калашникова¹, А.Н. Демидов²

¹Институт космических исследований РАН, Москва

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва

³Морской гидрофизический институт, Севастополь

⁴Атлантическое отделение Института океанологии им. П.П. Шириова РАН,
Калининград

E-mail: olavrova@iki.rssi.ru

На основе данных дистанционного зондирования из космоса, синхронных подспутниковых измерений и численного моделирования проведено исследование влияния ветрового воздействия и гидродинамических процессов на характер распространения мутных распресненных вод Калининградского (Вислинского) залива в прибрежной зоне Балтийского моря. Сильное различие в оптических свойствах Балтийского моря и вод залива, в котором в летний период происходит интенсивное цветение цианобактерий, позволили на основе спутниковых данных видимого диапазона изучить развитие и трансформацию выноса в июле – начале августа 2014 г. Факел выноса под действием прибрежных струйных течений распространялся по всему Гданьскому заливу, испытывая существенное влияние циркуляционных процессов, которые наблюдались в заливе. Была исследована трехмерная структура выноса, влияние которого, как показали натурные измерения, существенно только в верхнем слое моря. Численное моделирование дрейфа взвешенного вещества при помощи модифицированной модели POM, учитывающей только ветровое воздействие на перенос примеси, показало, что для адекватного описания процесса необходим также учет влияния всех гидродинамических процессов, и, в первую очередь, вихревых образований.

Ключевые слова: дистанционное зондирование из космоса, морская поверхность, Балтийское море, цветение водорослей, циркуляционные процессы, дрейф взвешенного вещества, подспутниковые измерения, численное моделирование, OLI/TIRS Landsat-8, MODIS Aqua/Terra.

Введение

Экологическое состояние морей, омывающих Россию, вызывает обоснованную озабоченность специалистов. Это обусловлено многими причинами: увеличением нефтяного загрязнения вследствие расширения деятельности нефтегазовой отрасли и интенсивности судоходства; повышением концентрации взвешенного вещества в воде, что приводит к увеличению мутности вод и снижению биопродуктивности; аномальным цветением вод, которое с каждым годом охватывает все большие площади, становится более продолжительным и возникает в тех районах, где ранее не наблюдалось. Одной из важнейших задач экологического мониторинга морей является не только выявление антропогенных и биогенных загрязнений морской среды, но и прогноз их распространения. Прогноз распространения загрязнений возможен только на основе детального знания всей совокупности гидродинамических процессов, характерных для района мониторинга. Как показывает наш многолетний опыт спутниковых наблюдений различных районов Мирового океана, задачи выявления загрязнения морской среды и исследования динамических процессов,

происходящих в этой среде, необходимо решать в тесной взаимосвязи, поскольку, попадая в морскую среду, загрязнения становятся частью этой среды и развиваются по тем же законам, по которым развивается и сама морская среда (Bedritskii et al., 2007; Shcherbak et al., 2008; Лаврова и др., 2011; Калашникова и др., 2013).

Актуальной экологической проблемой Балтийского моря является эвтрофикация (Larsson et al., 1985; Schiewer, 2008) – насыщение водоёмов биогенными элементами, сопровождающееся ростом биологической продуктивности водных бассейнов. Избыток питательных веществ приводит к резкому увеличению биомассы фитопланктона, отмечается массовое развитие цианобактерий (Finni et al., 2001; Савчук, 2005). Акватория Гданьского бассейна, включая Вислинский (Калининградский) залив, относится к числу наиболее эвтрофированных районов Балтийского моря (Kahru, Elmgren, 2014). Регулярное летнее «цветение» потенциально токсичных сине-зеленых водорослей вызывает неблагоприятные изменения водного режима, ухудшает кислородный режим водоема, вызывает замор рыбы и имеет многие другие неблагоприятные последствия. Например, в прибрежных районах Калининградского залива в период интенсивного цветения вся поверхность воды покрыта плотной зеленоватой или зеленовато-бурой пленкой и имеет неприятный запах.

На спутниковых изображениях видимого диапазона такие зоны повышенного цветения отчетливо проявляются в виде ярко-зеленых или зеленовато-бурых областей. Сигнал, регистрируемый датчиками в видимом диапазоне, определяется рассеянием на гидрозоле: фитопланктоне и взвешенных минеральных частицах. Гидрозоли можно также рассматривать как пассивные трассеры поверхностных течений. Формируемые ими фронтальные зоны, как правило, соответствуют линиям тока. Использование последовательных изображений для одной и той же акватории позволяет получить уникальную информацию о поле поверхностных течений, выделить основные гидродинамические структуры, определяющие мезомасштабную изменчивость поля течений в изучаемом районе (Lavrova et al., 2008, 2010; Лаврова и др., 2011). В частности на спутниковых изображениях видимого диапазона юго-восточной Балтики в период интенсивного цветения цианобактерий особенно хорошо проявляются характерные для этого района вихри и вихревые диполи (рис. 1). Большой научный и практический интерес представляет исследование влияния этих вихревых структур на перенос различного рода загрязнений морской поверхности, в частности нефтяных загрязнений (Kostianoy et al., 2014).

В конце июля – начале августа 2014 г. в рамках комплексных исследований прибрежных вод Калининградской области состоялась научная экспедиция, в которой приняли участие сотрудники, аспиранты и студенты кафедры океанологии географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, Института космических исследований РАН, Ат-

лантического отделения Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Балтийского федерального университета имени И. Канта (кафедра географии океана) и Московского физико-технического института (кафедра термогидромеханики океана). Одна из многочисленных задач экспедиционных работ заключалась в исследовании влияния различных гидродинамических и метеорологических процессов на распространение мутных вод, которые выносятся из Калининградского залива через Балтийский пролив в Балтийское море, и гидрологической структуры этого выноса. Задача решалась на основе совместного анализа спутниковых изображений и данных синхронных подспутниковых измерений. Потенциальное влияние ветровых условий на распространение выноса оценивалось с помощью результатов численного моделирования, учитывающего реальное поле ветра. Результаты проведенных исследований и посвящена данная статья.

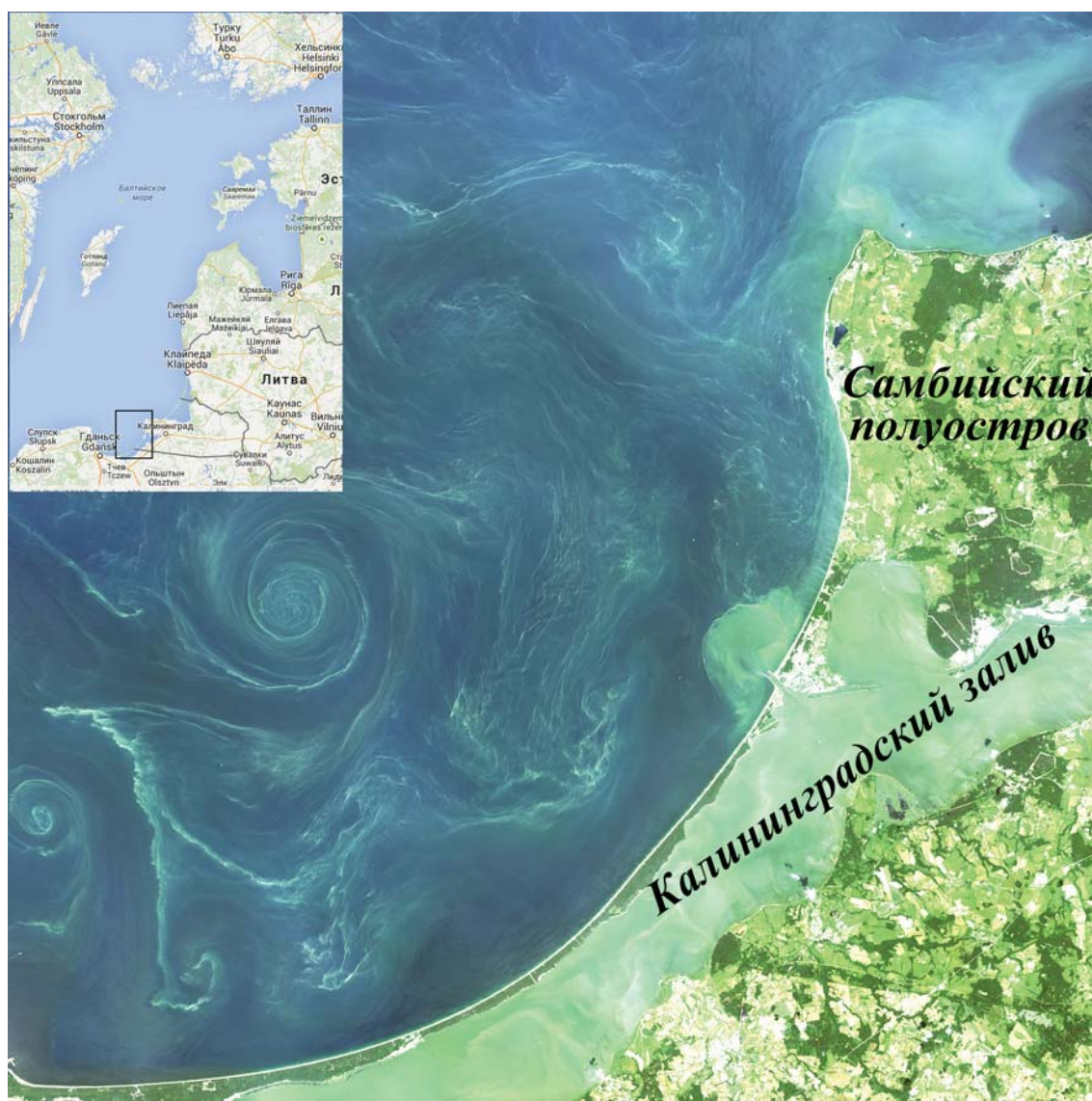


Рис. 1. Район проведения экспедиционных работ. Проявление на цветосинтезированном изображении OLI Landsat-8 от 07.07.2014 факела выноса вод из Калининградского залива и многочисленных вихревых структур в Гданьском заливе

Район исследования

Экспедиционные работы проводились в 20-мильной зоне юго-восточной части Балтийского моря на траверзе Балтийского пролива и в районе Самбийского полуострова (рис. 1). Отличительной особенностью Самбийского полуострова является наличие Балтийской (Вислинской) косы, отделяющей Калининградский (Вислинский) мелководный залив от собственно моря. Обмен воды происходит через узкий Балтийский пролив, ширина которого составляет 400 м, длина 2 км, средняя глубина 8,8 м (вдоль фарватера 10–12 м). Калининградский залив является лагуной — почти закрытым водоёмом, в который впадают реки Ногат (правый рукав Вислы), Преголя, Прохладная и другие. На формирование гидрологического режима Вислинского залива оказывают влияние следующие факторы: колебания уровня Балтийского моря и речной сток. Основной приток пресных вод дают реки Преголя и два рукава реки Вислы. Соленость составляет у входа в Балтийский пролив 2-6 епс (единиц практической солености), тогда как прибрежные поверхностные воды моря имеют соленость около 7,3 епс (Chubarenko, Margonski, 2008). Средняя глубина залива составляет 2,7 м, максимальная – 5,2 м (за исключением искусственного фарватера — Калининградского морского канала, где она составляет 9-10 м).

Уровень водной поверхности всего на 5-8 см выше среднего уровня воды в Балтийском море. Относительный уровень залива по оценочным значениям (относительно условного минимального уровня воды) $1,0 \pm 0,3$ м, размах колебаний 0,7-1,3 м (Есюкова, 2013). По этой причине морские воды легко проникают в залив. Форма залива способствует развитию значительных ветровых сгонно-нагонных колебаний уровня. Сила и направление господствующих ветров определяют и течения в заливе. При нагонных ветрах северного и северо-западного направлений морская вода проникает в залив и движется вдоль берегов против часовой стрелки. Юго-восточные и южные ветра вызывают течение в противоположном направлении – водные массы движутся по часовой стрелке и вытекают из залива через Балтийский пролив. Среднестатистические данные о режиме входных течений (заток морских вод) и выходных течений (вынос вод из залива) представлены в работе (Лазаренко, Маевский, 1971). Однонаправленные входные или выходных течения составляют 74,9%; 13,4% - двухслойные течения (заток в придонном слое и вынос в приповерхностном) и 13,4% - двунаправленные (Chubarenko, Margonski, 2008).

В целом, западное побережье Самбийского полуострова имеет достаточно ровный уклон дна, относительно крутой в районе Вислинской косы, где изобата 25 м обрывается на 2 км от уреза. Особенности гидрологических условий Балтийского моря обусловлены совокупностью режимообразующих факторов, к которым, в первую очередь, относятся: обмен теплом и пресной водой на поверхности моря, речной сток и водообмен с Север-

ным морем. Данная акватория характеризуется сложным и крайне изменчивым гидродинамическим режимом (Добровольский, Залогин, 1982), который обусловлен сложной конфигурацией береговой линии, донным рельефом, ветровым режимом и особенностями циркуляции Балтики в целом (Демидов и др., 2011; Гурова, Иванов, 2011).

В период, предшествующий проведению экспедиционных работ, под действием ветров восточных румбов сформировался факел выноса вод из Калининградского залива, который отчетливо проявился на спутниковых изображениях MODIS Terra/Aqua и OLI Landsat - 8 (рис. 1) и ETM+ Landsat - 7.

Спутниковые наблюдения

Сильное различие в оптических свойствах Балтийского моря и вод Калининградского залива в период интенсивного цветения фитопланктона позволяет проследить развитие и трансформацию факела выноса из залива на основе спутниковых данных видимого диапазона. В июле – начале августа 2014 г. в условиях безоблачной и малооблачной погоды были получены спутниковые изображения следующих сенсоров: MODIS Terra/Aqua, OLI/TIRS Landsat-8, ETM+ Landsat-7. Радиолокационная съемка района исследования с помощью TerraSAR-X по нашему заказу была проведена 4 августа 2014 г. Всего было обработано и проанализировано 29 спутниковых изображений. Параметры спутниковых данных и информация о сроках проведения подспутниковых измерений приведены *табл. 1*.

Таблица 1. Сводная таблица полученных спутниковых изображений и подспутниковых измерений

<i>Дата</i>	<i>Время (UTC)</i>	<i>Спутниковая информация</i>	<i>Подспутниковые натурные измерения*</i>
07.07.14	09:43	OLI/TIRS Landsat-8	—
	11:00	MODIS Aqua	
21.07.14	09:20	MODIS Terra	—
	11:10	MODIS Aqua	
22.07.14	10:05	MODIS Terra	—
	11:55	MODIS Aqua	
23.07.14	09:43	OLI/TIRS Landsat-8	—
	10 :45	MODIS Terra	
	11:00	MODIS Aqua	
24.07.14	09:35	ETM+ Landsat-7	—
	09 :50	MODIS Terra	
	11:40	MODIS Aqua	
25.07.14	10:35	MODIS Terra	—
	11:55	MODIS Aqua	
28.07.14	11:15	MODIS Aqua	—
29.07.14	10:10	MODIS Terra	Измерения в открытой акватории Балтийского моря и вдольбереговые
	11:55	MODIS Aqua	
30.07.14	10:55	MODIS Terra	Измерения в открытой акватории Балтийского моря и вдольбереговые
	11:05	MODIS Aqua	
31.07.14		100%-я облачность	Измерения в заливе
01.08.14	09:37	OLI/TIRS Landsat-8	Измерения в заливе
02.08.14	09:45	MODIS Terra	Измерения в открытой акватории Балтий-

<i>Дата</i>	<i>Время (UTC)</i>	<i>Спутниковая информация</i>	<i>Подспутниковые натурные измерения*</i>
	11:35	MODIS Aqua	ского моря и вдольбереговые
03.08.14	10:30	MODIS Terra	Измерения в открытой акватории Балтийского моря и вдольбереговые
	10:40	MODIS Aqua	
04.08.14	16:10	TerraSAR-X	Вдольбереговые измерения
05.08.14		100%-я облачность	Вдольбереговые измерения
06.08.14		100%-я облачность	Измерения в заливе
07.08.14	10:05	MODIS Terra	Измерения в открытой акватории Балтийского моря и в заливе
	11:55	MODIS Aqua	
08.08.14		100%-я облачность	Измерения в открытой акватории Балтийского моря
09.08.14	09:35	ETM+ Landsat-7	—
	11:40	MODIS Aqua	

* Измерения в открытой акватории Балтийского моря проводились с катамарана «ИКАР-2», вдольбереговые измерения и измерения в заливе проводились с моторной лодки

На основе данных сенсора MODIS строились: цветосинтезированные композиты «True Color», карты восходящего излучения воды (Water Leaving Radiance) на волне 0,551 мкм, карты концентрации хлорофилла-а (Chlorophyll-a Concentration) и карты температуры поверхности моря (Sea Surface Temperature). Пример проявления выноса на данных картах представлен на *рис. 2*.

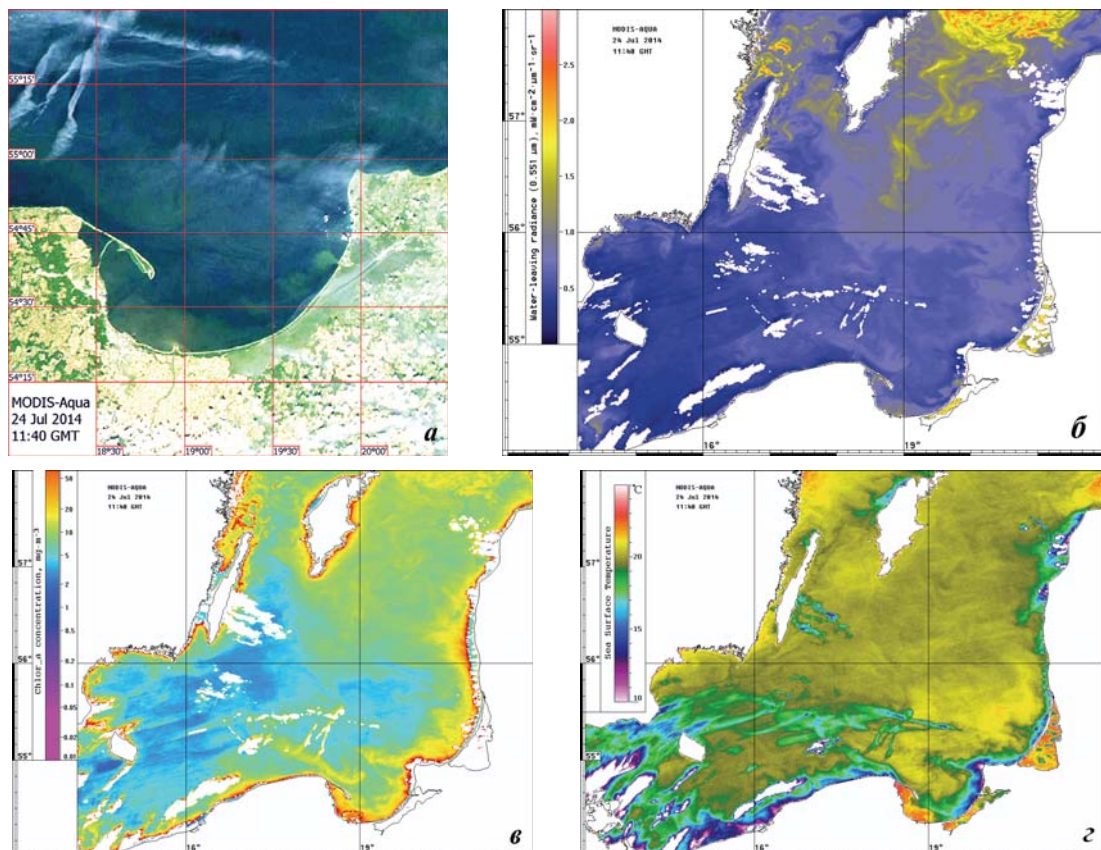


Рис. 2. Пример проявления выноса на различных изображениях MODIS Aqua от 24 июля 2014 г.: а) цветосинтезированное изображение (True color); б) карта восходящего излучения воды (Water Leaving Radiance) на волне 0,551 мкм; в) карта концентрации хлорофилла-а (Chlorophyll-a Concentration); г) карта температуры поверхности моря (Sea Surface Temperature)

Наиболее отчетливо вынос можно выделить на «True color» изображениях в виде светло-зеленой струи (рис. 2а) и на картах Water Leaving Radiance (рис. 2б). Поскольку повышенная концентрация хлорофилла-а наблюдается практически вдоль всей береговой черты (рис. 2в), однозначно идентифицировать факел выноса не представляется возможным. На картах температуры поверхности моря, построенных по данным MODIS (рис. 2г), струя выноса практически не проявлялась, поскольку в период наблюдений, в третьей декаде июля – начале августа 2014 г. в прибрежной зоне на юг от пролива вдоль Балтийской косы и на север вдоль Самбийского полуострова существовал сильный апвеллинг, температура воды опустилась до 14-16 градусов, при температуре воздуха близкой к 30°C. Теплые воды залива, попадая в открытое море, быстро перемешивались с холодными прибрежными водами, и на ИК-изображениях, имеющих пространственное разрешение 500м, температурные контрасты, связанные с выносом более теплых вод, не выявляются. На изображениях, полученных с помощью приборов, установленных на спутниках Landsat-7 и Landsat-8, имеющих существенно более высокое пространственное разрешение, структура выноса хорошо различается не только в данных видимого диапазона (разрешение 30 м), но и в данных ИК-диапазона (рис. 3). На карте температуры поверхности моря, построенной по данным TIRS Landsat-8 от 23.07.14, имеющим пространственное разрешение 100 м, хорошо видны температурные контрасты: температура поверхности воды в заливе составляла 22°C, вдольбереговой апвеллинг охладил воду Балтийского моря до 14°C, а вынесенная из залива вода, смешиваясь с прибрежными водами моря, изменялась от 20°C на выходе из пролива до 18°C на расстоянии 2 км. Однако, для ежедневного мониторинга распространения выноса одних изображений Landsat не достаточно, несмотря на всю их информативность, так как съемка производится над конкретным районом только один раз в 8 дней. Основное преимущество данных MODIS заключалось в регулярном, практически каждодневном их получении, дважды в сутки (со спутников Terra и Aqua). Если за период времени между пролетами этих двух спутников (максимум 2 часа) серьезных изменений формы выноса не наблюдалось, то за сутки картина иногда менялась кардинально.

Цветосинтезированные «True Color» изображения, полученные с 22.07.14 по 09.08.14 с помощью MODIS Aqua, OLI Landsat-8 представлены на рис. 4, 6 и 8. Подспутниковые измерения начали проводиться только 29 июля (см. таблицу 1). Но, для исследования влияния различных факторов на распространение выноса, целесообразно проанализировать всю серию из 12 изображений, которые позволяют проследить все стадии «развития» выноса от его формирования 22 июля, максимального распространения по всему Гданьскому заливу к 30 июля и смещения на северо-восток вдоль Самбийского полуострова с образованием вихревых структур в районе м. Таран 9 августа.

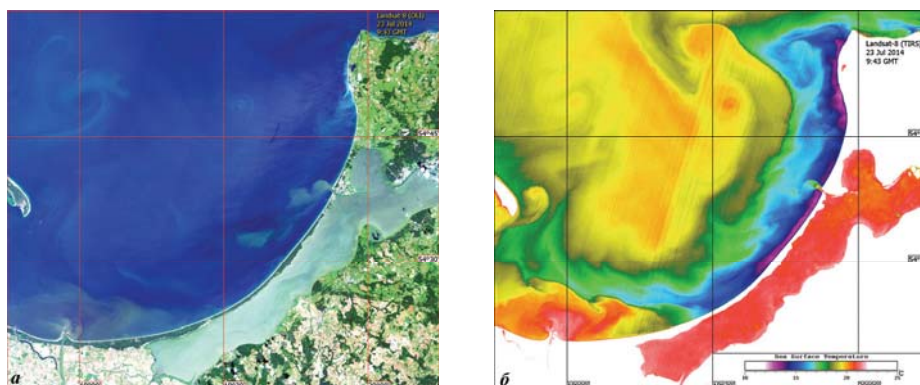


Рис. 3. Проявление выноса вод из Калининградского залива на изображениях Landsat-8 за 23 июля 2014 г.: а) цветосинтезированное изображение, полученное сенсором OLI Landsat-8; б) ИК-изображение, полученное сенсором TIRS Landsat-8

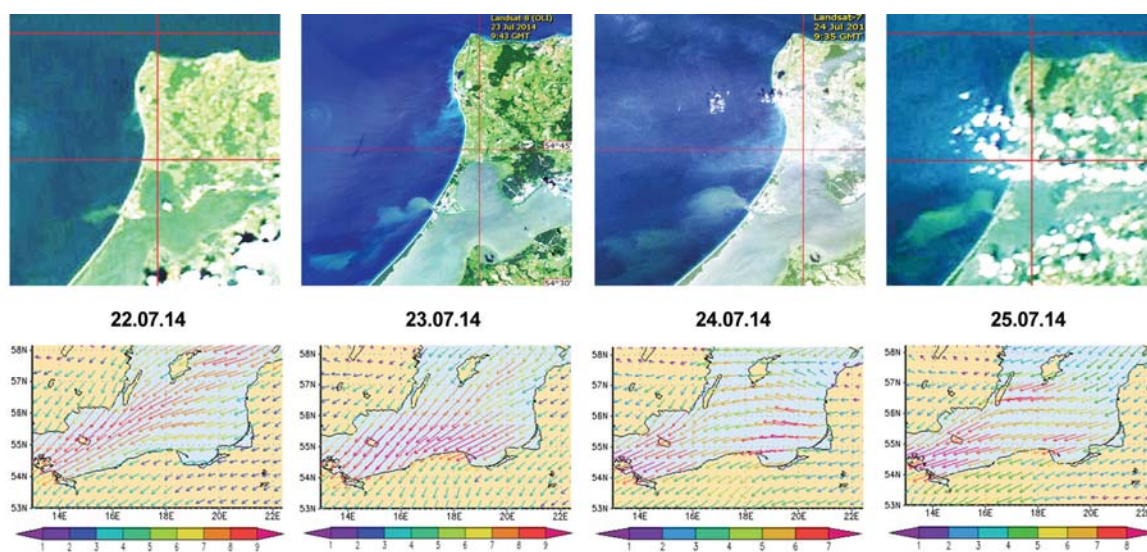


Рис. 4. Фрагменты спутниковых изображений за период 22.07 – 25.07 2014 г., содержащих проявления выноса (верхний ряд). Векторы скорости ветра (м/с) на высоте 10 м за тот же период (нижний ряд). Величина скорости характеризуется цветом и длиной стрелок. Карта построена в Гидрометцентре России по данным прогноза, выпускаемого метеоцентром NCEP/NOAA. © ГУ "Гидрометцентр России" Росгидромета, © NCEP/NOAA

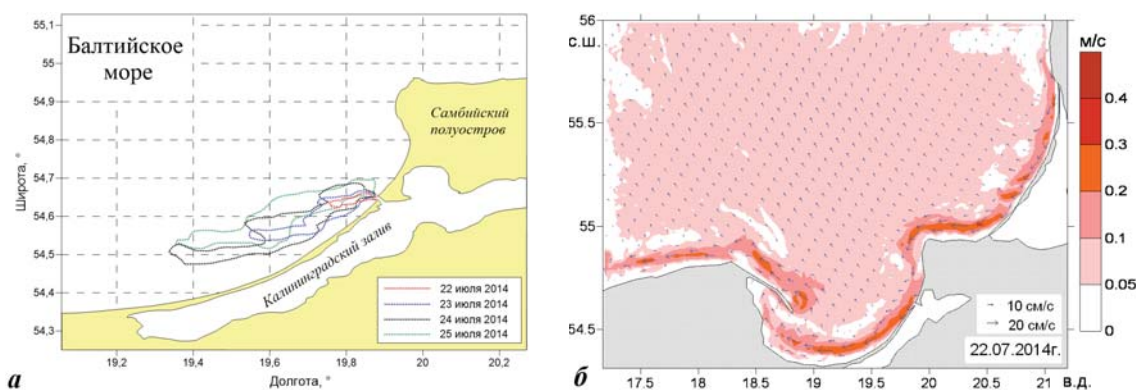


Рис. 5. а) контуры выноса, восстановленные по спутниковым данным, полученным в период 22.07–25.07 2014 г.; б) результат моделирования течений в условиях апвеллинга. Векторы (синие отрезки) и структура модуля течений (красная палитра), рассчитаны по близким к реальности ветровым полям, и относятся к 22.07.2014

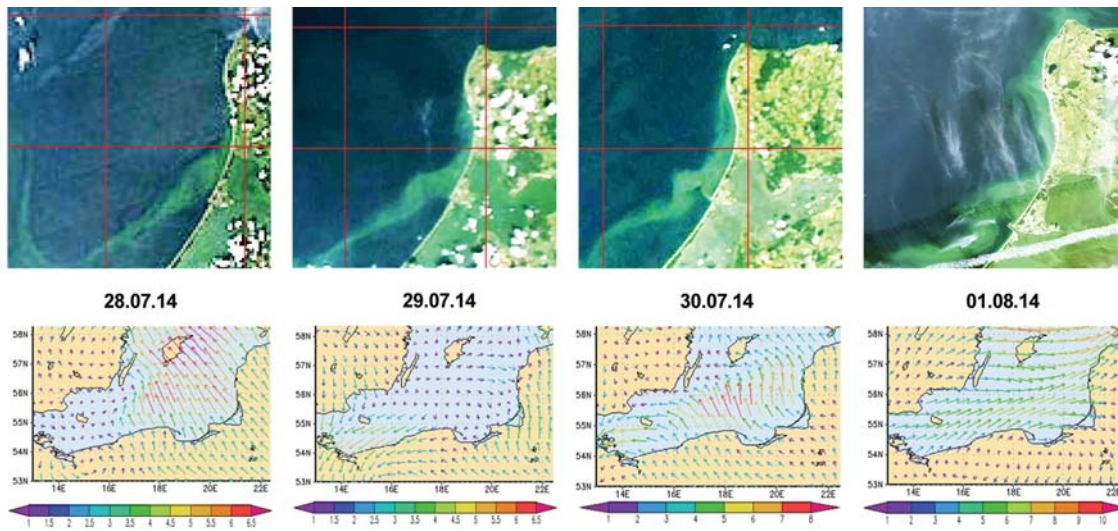


Рис. 6. Фрагменты спутниковых изображений, полученных 28.07 – 01.08 2014 г., содержащих проявления выноса (верхний ряд). Поле ветра на высоте 10 м за тот же период (нижний ряд). © ГУ "Гидрометцентр России" Росгидромета, © NCEP/NOAA

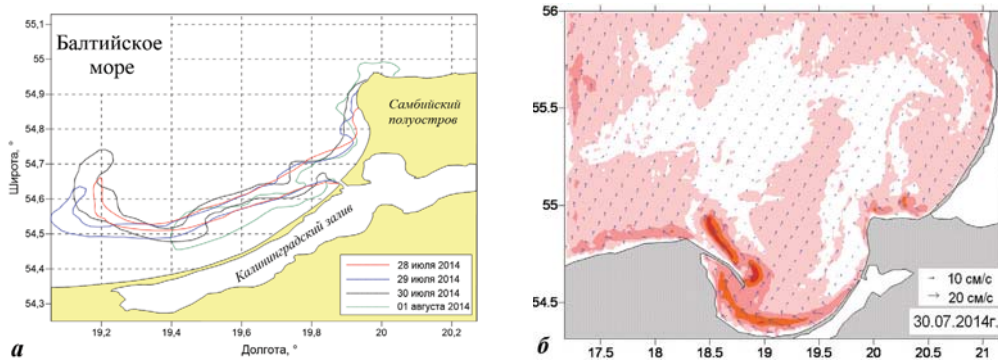


Рис. 7. а) контуры выноса, восстановленные по спутниковым данным, полученным в период 28.07–01.08 2014 г.; б) результат моделирования течений в условиях сложного, «умирающего» авеллинга, предшествующего даунвеллинговому режиму. Векторы (синие отрезки) и структура модуля течений (красная палитра) рассчитаны по близким к реальности ветровым полям и относятся к 30.07.2014

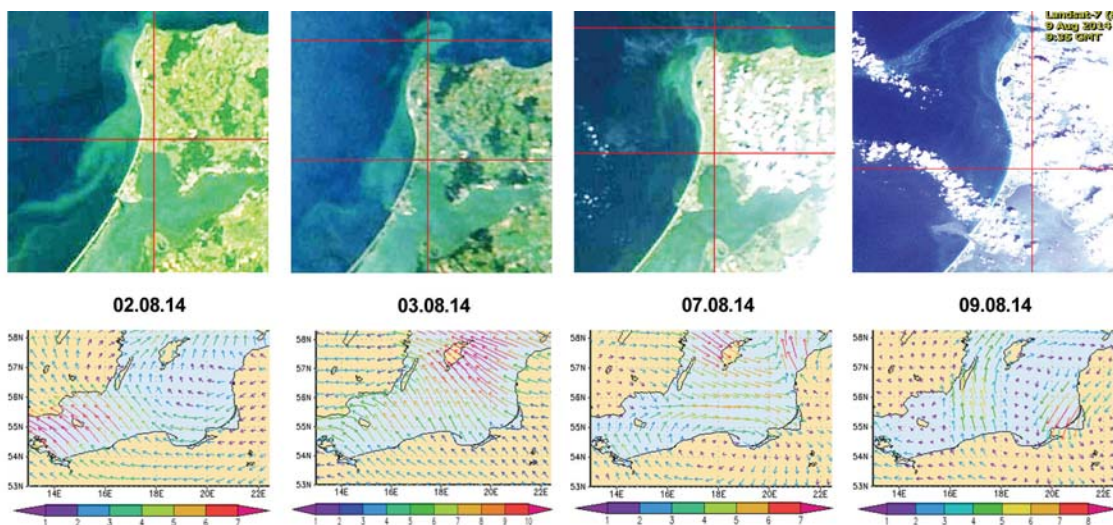


Рис. 8. Фрагменты спутниковых изображений, полученных 02.08 – 09.08 2014 г., содержащих проявления выноса (верхний ряд). Поле ветра на высоте 10 м за тот же период (нижний ряд). © ГУ "Гидрометцентр России" Росгидромета, © NCEP/NOAA

Влияние ветровых условий на распространение выноса

Рассмотрим совместно спутниковые изображения и карты поля ветра, которые предоставляет Гидрометцентр России (<http://hmc.meteorf.ru/sea/balt/gfs/menu.php>). Карты строятся по данным прогноза, выпускаемого метеоцентром NCEP/NOAA. Как известно, течения в данном районе Балтики целиком формируются полем ветра, в отличие, например, от Черного моря, где есть постоянное Основное черноморское течение (ОЧТ). Течение откликается на изменение ветра за инерционный период $T_{iner} = 1/f = 14$ ч (для данного района), где f – инерционная частота. За время 2-3 T_{iner} практически полностью формируются квазигеострофические течения, которые при достаточно сильном ветре (~ 8 м/с) приобретают вид струй. При этом, поскольку западные ветра преобладают, даунвеллинговые струи также формируются чаще. В этом смысле даунвеллинговая струя есть приближенный аналог ОЧТ.

В период с 22 по 29 июля преобладали ветра восточного (северо-восточного, юго-восточного) направления (*рис. 4*, и, частично, *б*), что не только способствовало усилению выноса из пролива, но и образованию течений в условиях апвеллинга. Вдольбереговая струя течений была направлена в антициклоническом направлении. В том же направлении, на юго-запад, распространялся и вынос. На *рис. 5а* схематично представлены контуры выноса за период 22 – 25 июля, диагностированные по проявлениям на спутниковых изображениях. Результаты численного моделирования течений представлены на *рис. 5б*. Моделирование течений выполнялось по методике, описанной в работах (Голенко, Голенко, Щука, 2009; Голенко, Голенко, 2012). Течения рассчитывались по близким к реальным ветровым полям. Начиная с 28 июля, ветер ослабевает, направление его меняется сначала на южное, потом на западное (01.08.14). Струя выноса в этот период распространяется по всему Гданьскому заливу и достигает наибольшей протяженности к 30 июля (*рис. 6, 7а*). 29 - 30 июля дальний конец струи начинает разворачиваться на север. Изменение направления течения на север в южной части Гданьского залива дают и результаты численного моделирования, которые представлены на *рис. 7б*. Моделирование течений выполнялось для условий сложного, затухающего апвеллинга, предшествующего даунвеллинговому режиму. В дальнейшем, до конца наблюдений, ветер оставался слабым, постоянно меняющим свое направление. Наличие южной и западной компоненты направления ветра приводит к тому, что вынос из залива ослабевает, и он начинает распространяться вдоль Самбийского полуострова на север, с образованием циклонического вихря у мыса Таран (*рис. 8, 9а*). Смена направления струи вдольберегового течения проявилась и в результатах численного моделирования, проведенного в условиях даунвеллингового режима (*рис. 9б*).

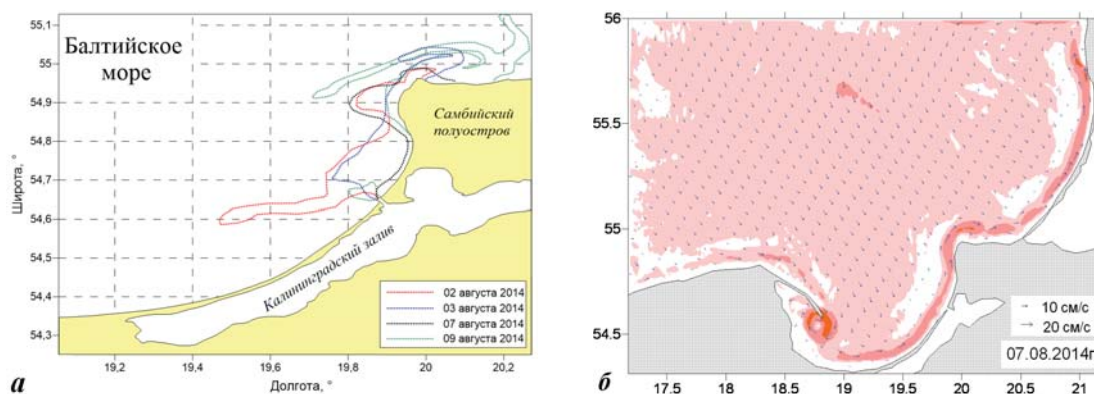


Рис. 9. а) контуры выноса, восстановленные по спутниковым данным, полученным в период 02.08–09.08 2014; б) результат моделирования течений в условиях даунвеллинга. Векторы (синие отрезки) и структура модуля течений (красная палитра) рассчитаны по близким к реальности ветровым полям и относятся к 07.08.2014

Таким образом, совместный анализ спутниковых данных, ветровых условий в районе спутниковых наблюдений и результатов численного моделирования течений, основанного на учете реальных ветровых полей, показал, что основное направление распространения струи выноса мутных вод из Калининградского залива, выявленное по спутниковым данным, совпадает с направлением течений, сформировавшихся под действием ветра. Возникает вопрос, насколько адекватно восстанавливаются параметры выноса по спутниковым данным и какова его трехмерная структура. Для нахождения ответа на этот вопрос были проведены подспутниковые измерения параметров течений и гидрологической структуры вод в районе выноса.

Данные и методы подспутникового эксперимента

Исследование динамических условий в районе подспутникового эксперимента проводилось при помощи акустического профилографа течений TRDI Workhorse Sentinel 300 кГц (ADCP), жестко установленного на исследовательском катамаране "ИКАР 2". Географическая привязка данных измерений осуществлялась в автономном режиме с помощью 10 Гц GPS-навигатора G-Star IV, интегрируемого в программное обеспечение профилографа течений. Одновременно с работой акустического профилографа, автоматической метеостанцией Airmar 150 WX со встроенным GPS-навигатором и магнитным компасом выполнялись измерения истинного направления и скорости ветра. По ходу буксировки ADCP проводилось зондирование толщи вод при помощи CTD-профилографа YSI CastAway и многопараметрического зонда YSI 6600V2 с дополнительными датчиками мутности и растворенного кислорода.

В дополнение к измерениям с исследовательского катамарана выполнялись исследования гидрологической структуры вод с маломерного моторного судна в прибрежной

зоне г. Балтийска и в Балтийском проливе. Зондирования осуществлялись CTD-зондом YSI Cast Away.

Акустический доплеровский профилограф течений, работающий на основе эффекта Доплера, определяет компоненты скорости движения среды относительно излучателей акустического сигнала, которые в дальнейшем пересчитываются в истинные компоненты скорости течения при помощи встроенного магнитного компаса и инклинометра. Помимо определения скоростей течений в толще вод ADCP имеет функцию определения скорости движения плавсредства относительно неподвижного дна, что позволяет использовать данный прибор для непрерывного мониторинга динамических условий среды в движении. Профилограф течений измеряет компоненты скорости в определенном объеме вод - ячейках, равномерно распределенных по глубине. В ходе подспутникового эксперимента величина ячейки составляла 2 метра. Центр первой ячейки располагался на глубине 4 метра. Профилограф течений ADCP производил измерения (ансамбли) с частотой 0,5 Гц, позволяя получить при средней скорости движения катамарана ~ 2 м/с пространственное разрешение измерений 3-4 м. Стандартное отклонение измеренного вектора течения в одной ячейке составило 6,94 см/с. Подобная величина отклонения недопустима при проведении исследований в прибрежной зоне, поэтому при дальнейшей обработке данных производилось осреднение компонент течений с окном в 80 ансамблей в пределах одной ячейки. На выходе стандартное отклонение составляло 0,78 см/с, а пространственное разрешение ~ 300 метров по направлению движения катамарана. Вес каждого измерения принимался одинаковым в пределах окна осреднения ввиду квазистационарного движения катамарана в районе подспутникового эксперимента.

В ходе буксировки ADCP выполнялись CTD-зондирования и отбор проб воды на анализ гидрохимических показателей. При дальнейшей обработке данных ADCP интервалы стоянки катамарана исключались из общей записи. Для проведения совместного анализа результатов натурных измерений и спутниковых изображений зондирования использовались данные рассеивания акустического сигнала ADCP по всему профилю. Акустическое рассеивание сигнала дает возможность качественно определять концентрацию взвешенного вещества и присутствие в воде звукорассеивающих слоев.

CTD-зонд YSI Cast Away определяет в автономном режиме температуру, электропроводность и давление воды с частотой 5 Гц. При обработке данных измерений CTD-зонда использовался профиль при опускании прибора и проводилось осреднение данных в пределах интервала 1 м. Соленость рассчитывалась из данных по температуре, электропроводности и давлению воды согласно Шкале Практической Солености 1978 года (PSS-78). Температура вод рассчитывалась по Международной Температурной Шкале

1990 года (ITS-90). Глубина погружения зонда определялась с учетом введения поправки на среднее атмосферное давления данного района.

Результаты подспутниковых измерений

В ходе экспедиционных работ было проведено шесть буксировок ADCP на расстояние до 20 миль от берега с выполнением станций CTD-зондирования, отбором проб воды на гидрохимический анализ и непрерывным мониторингом метеорологических параметров. В ходе прибрежных работ на маломерном судне был осуществлен ряд исследований гидрологической структуры вод Калининградского залива, Балтийского пролива и прибрежной акватории Балтийского моря (см. *табл. 1*). Подробно остановимся на результатах эксперимента по верификации спутниковой информации в прибрежной зоне Балтийского моря, проведенного 30 июля 2014 г.

Ветровой режим над исследуемой акваторией имел нестационарный характер с незначительными величинами скорости ветра. В предыдущие два дня направление ветра существенно менялось, не имея определенного выраженного характера. Скорость ветра не превышала 3 м/с, за исключением 03:00 28 августа. Здесь и далее указано местное время, которое отличается на 3 часа в большую сторону от Всемирного координированного времени (UTC). В день проведения эксперимента, начиная с 09:00, наблюдался устойчивый сгонный ветер с усилением до 5 м/с, с последующим ослаблением к вечеру. Осредненные за 3 часа данные по скорости и направлению ветра на высоте 10 метров в районе эксперимента были получены с метеостанции г. Балтийска через Интернет-ресурс (<http://rp5.ru>).

На *рис. 10* представлена общая схема проведения подспутникового эксперимента 30 июля 2014 г.; результаты измерений поверхностных течений при помощи ADCP и ветровые условия в прибрежной акватории г. Балтийска. Стрелками обозначены векторы течений по ходу буксировки ADCP. Точками показаны станции CTD-измерений в прибрежной зоне. Каждая точка соответствует трём станциям. Синими стрелками показаны основные направления поверхностных течений, полученных по данным ADCP.

Буксировка акустического профилографа стартовала в 09:00 с выходом из Балтийского пролива в акваторию Балтийского моря. Течение на глубине 4 метров на выходе из пролива имело слабую магнитуду, в среднем составляя 5-7 см/с с генеральным направлением на северо-восток. Контур выноса, определенный по данным MODIS Aqua, распространялся также на северо-восток вдоль побережья. При удалении от берега на 4,5 км поле поверхностных течений поменяло направление на юго-западное, при этом наблюдалось постепенное увеличение скорости течения до 10-15 см/с. Область, занятая выносом вод из

Калининградского залива, также смещалась на юго-запад. На расстоянии 7-8 км от берега скорость течения усилилась до 20 - 30 см/с, а основное направление течения сменилось на юго-юго-западное, что вызвало прижимание области выноса к побережью.

Структура течений в районе подспутникового эксперимента была неоднородна как по горизонтали, так и по вертикали (рис. 11).

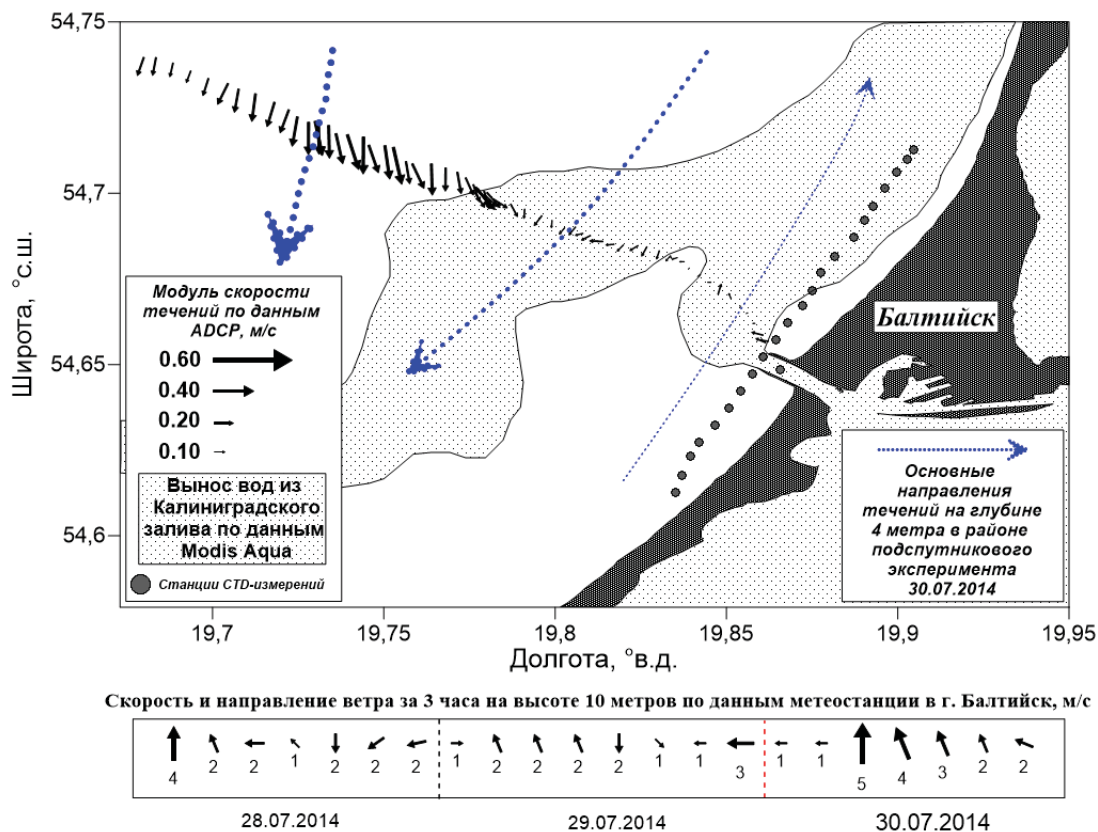


Рис. 10. Схема проведения подспутникового эксперимента, результаты буксировки ADCP и ветровая ситуация в регионе

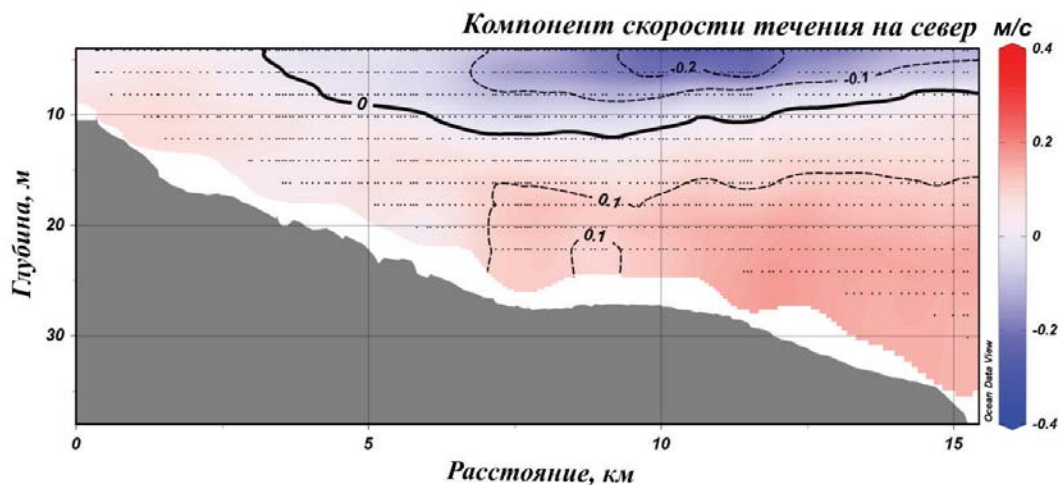


Рис. 11. Северная компонента течений на разрезе буксировки ADCP 30.07.2014

Поверхностные течения, как было показано выше, поменяли свое генеральное направление на расстоянии 4,5 км от берега. По глубине область смены направлений течений простиралась до 10 метров. Глубже 10 метров подобной смены направления течений не наблюдалось, вся толща вод двигалась со скоростями до 10 см/с в северо-восточном направлении.

Одной из важнейших задач исследования была верификация данных спутникового зондирования, по которым определялась область выноса вод. Как было отмечено выше, зона выноса на спутниковых изображениях видимого диапазона идентифицировалась как область с более мутными водами. Акустический профилограф течений по данным рассеяния акустического сигнала позволяет качественно определять области повышенной концентрации взвешенных частиц в воде, в нашем случае - идентифицировать наличие выноса мутных вод из Калининградского залива. На *рис. 12* представлено распределение величины рассеяния акустического сигнала на разрезе буксировки ADCP.

Характерно, что нулевая точка смены поля течений попала в область пониженного рассеяния, где отсутствовала вода из залива. Спутниковые изображения в момент эксперимента подтверждают отсутствие воды из залива в данной области. На расстоянии 4-6 км от берега область повышенного рассеяния вновь проявляется, что согласуется с данными спутниковых изображений. На расстоянии 8 км значения акустического рассеяния понижаются до соответствующих для "чистой" воды акватории Балтийского моря.

Для определения характера распространения вод из Калининградского залива был выполнен STD-разрез вдоль берега (42 станции), пересекающий область выноса вод. Для определения термохалинных параметров вод пролива через него был выполнен разрез из 8 станций. Распределения поля температуры и солёности морских вод вдоль побережья представлены на *рис. 13, 14*. На *рисунках* разрезы ориентированы в направлении юго-запад - северо-восток. Область выноса на поверхности на расстоянии ~ 300 метров от берега характеризуется водой с солёностью 6,25 епс и температурой 20,5°C. При движении на юго-запад термохалинная структура приобретает ярко выраженный морской характер с величинами температуры не более 18°C на поверхности и солёности - 7,2 епс, что соответствует температуре и солёности вод открытой акватории Балтийского моря в исследуемом регионе. Примечательно, что поле солёности практически однородно по вертикали и горизонтали юго-западнее Балтийского пролива. Однако при рассмотрении северо-восточной области разреза наблюдается область пониженной солёности и повышенной температуры до глубины ~5 метров. Данная область находится под влиянием выноса вод из Калининградского залива согласно *рис. 10*. Горизонтальный градиент солёности на расстоянии 6 км от области выноса на восток составляет 0,1 епс/км.

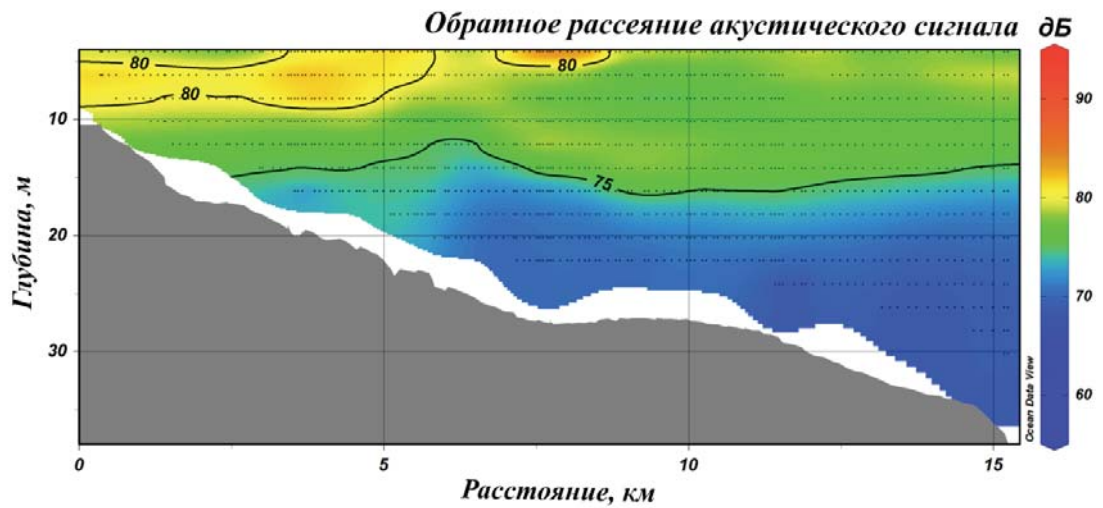


Рис. 12. Распределение обратного акустического рассеяния на разрезе буксировки ADCP 30.07.2014

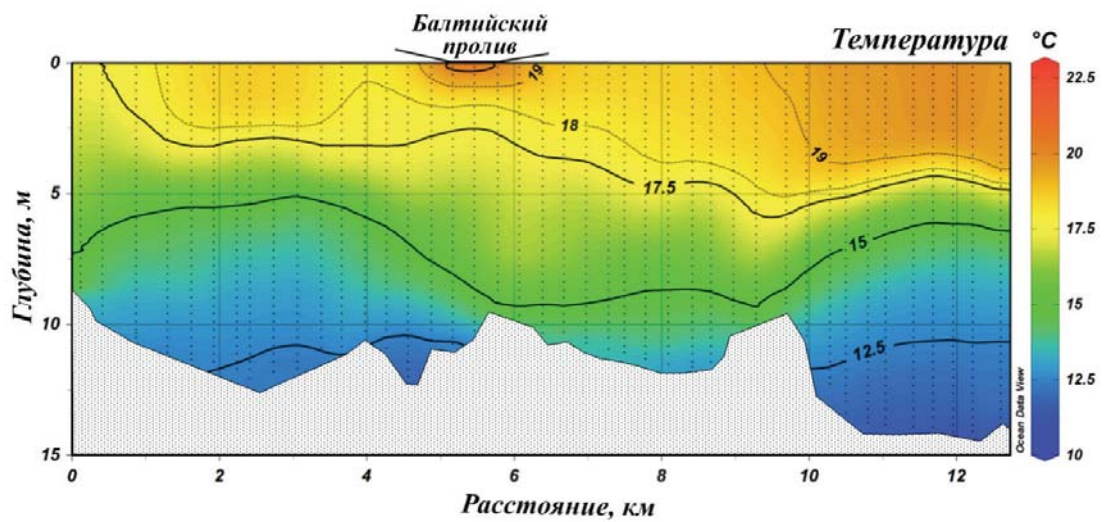


Рис. 13. Распределение температуры вод по CTD-разрезу вдоль берега 30.07.2014

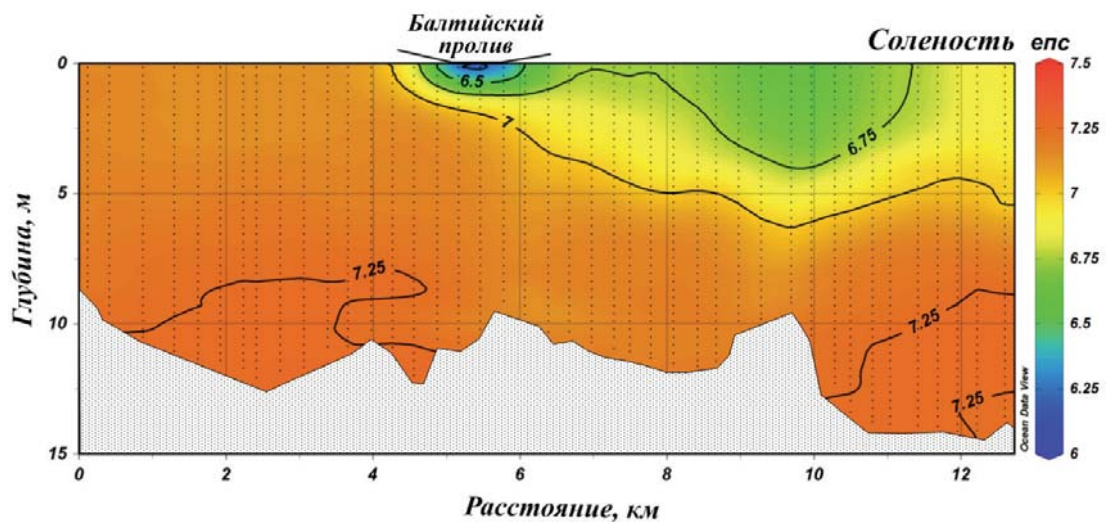


Рис. 14. Распределение солености вод по CTD-разрезу вдоль берега 30.07.2014

Характерно, что область выноса вод отсутствует на расстоянии 7-9 км вдоль STD-разреза, согласно *рис. 10*, что нашло свое отражение и в термохалинной структуре. Здесь область пониженной солености проявляется всего до глубины 1-2 метра. В то же время на удалении 10-12 км вдоль разреза проявляется область вод с температурой $>19^{\circ}\text{C}$ и соленостью $<6,75$ епс, которая распространяется до глубины 4-5 метров.

В самом Балтийском проливе были получены вертикальные распределения температуры и солености вод, которые представлены на *рис. 15, 16*. Разрезы ориентированы с запада на восток.

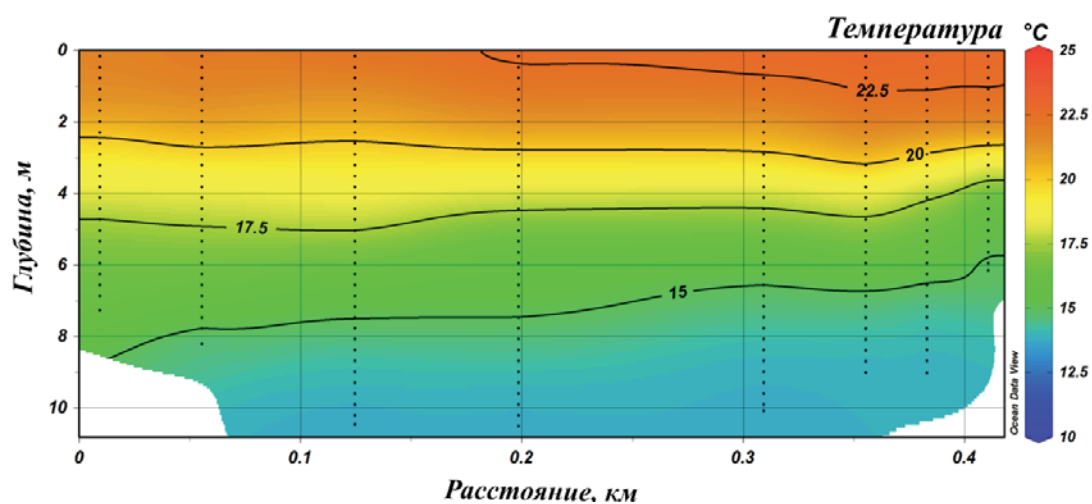


Рис. 15. Распределение температуры вод по STD-разрезу в Балтийском канале 30.07.2014

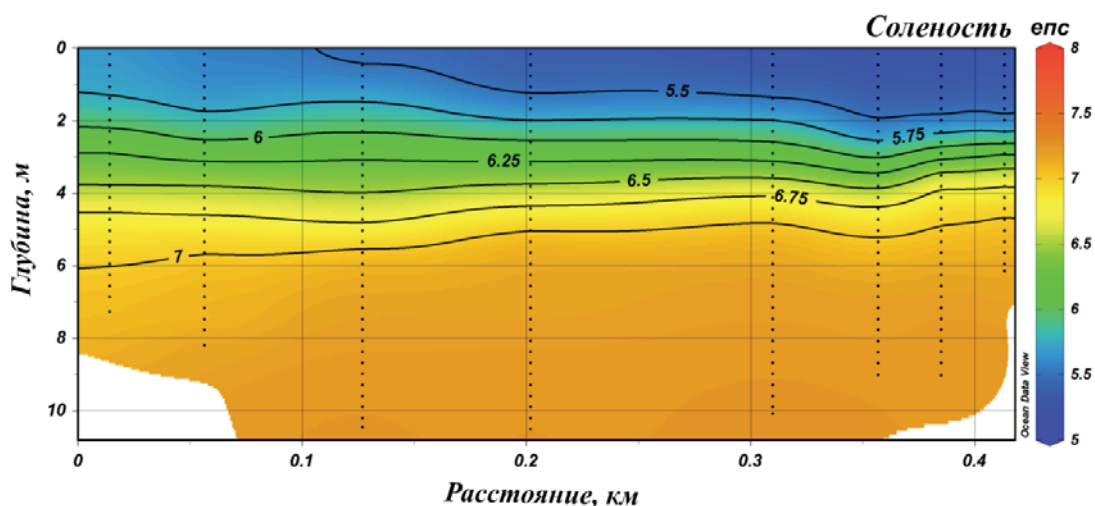


Рис. 16. Распределение солености вод по STD-разрезу в Балтийском канале 30.07.2014

Измеренная температура вод в проливе была существенно выше температуры вод морской акватории на $2,5^{\circ}\text{C}$. Вертикальное распределение температуры имело квазилинейный характер на протяжении всего разреза, уменьшаясь с глубиной от 23°C до 13°C . Единственной отличительной чертой являлось наличие горизонтального гради-

ента в поле температуры от западного берега к восточному. Это позволяет сделать вывод, что вынос вод из залива осуществляется неравномерно с усилением в восточной части.

Поле солёности также имеет достаточно однородный характер по вертикали, однако примечательно, что на дне пролива наблюдается вода со значениями солёности, характерными для морских вод. Данный факт может свидетельствовать о двухслойном характере течений в проливе: не только о выносе вод из залива, но, либо о переменном движении воды в проливе, либо о придонном затоке вод из моря в Калининградский залив. Поле солёности также имело горизонтальный градиент на поверхности. Уменьшение солёности на протяжении всего пролива составляло 0,3 епс.

По результатам подспутникового эксперимента было установлено следующее.

- Направление распространения вод из Калининградского залива полностью согласуется с преобладающими направлениями течений в исследуемом регионе, определенными в результате численного моделирования и на основе спутниковых данных.
- Гидрологическая структура вод прибрежной зоны Балтийского моря, определенная в ходе натурных измерений, подтверждает, что влияние вод Калининградского залива распространяется на глубину в среднем до 5 метров в районе эксперимента.
- Поле течений в районе эксперимента неоднородно как по вертикали, так и по горизонтали, что не может в полной мере определяться только ветровой ситуацией в регионе.
- Совместный анализ данных спутникового дистанционного зондирования и подспутниковых измерений показал, что спутниковые изображения, полученные в видимом диапазоне, предоставляют возможность достаточно точно определить область распространения выноса вод из залива, что подтверждается данными ADCP об акустическом рассеянии вод.
- Гидрологическая структура вод Балтийского пролива неоднородна. На дне пролива присутствует вода морского происхождения, а вынос вод неоднороден на всем протяжении пролива.

Численное моделирование дрейфа взвешенного вещества

С целью оценки влияния гидродинамических процессов и ветровых условий на распространение струи выноса более взмученных вод залива было проведено численное моделирование дрейфа взвешенного вещества. Моделирование проводилось на основе известной гидродинамической модели Принстонского университета POM

(Princeton Ocean Model) (Blumberg, Mellor, 1983). Эта модель является трёхмерной, нестационарной, в её основе лежат примитивные уравнения гидродинамики в приближениях гидростатики и свободной поверхности. В качестве вертикальной координаты в ней используется σ -координата. Для расчетов коэффициентов вертикального обмена в РОМ встроена модель турбулентности с замыканием Колмогоровского типа на уровне вторых моментов (Mellor, Yamada, 1982). РОМ неоднократно применялась для описания апвеллинга и сезонных фронтальных зон в Балтике (Zhurbas, Laanemets, Vahtera, 2008; Голенко, Голенко, Щука, 2009; Голенко, Голенко, 2012). Областью моделирования является юго-восточная часть Балтийского моря. В основе цифровой модели рельефа дна юго-восточной Балтики лежат данные, предоставленные лабораторией геоэкологии Атлантического отделения Института океанологии РАН. Пространственное разрешение в плоскости XY, заданное в модели, составляло около 1 км по долготе и широте. По вертикали было задано 36 слоёв. С боков были заданы граничные условия открытого типа (условия излучения). Моделирование начиналось из состояния покоя при невозмущенной свободной поверхности. В качестве возмущающей силы задавался ветер, величина и направление которого были взяты с карт, построенных в Гидрометцентре России по данным прогноза, выпускаемого метеоцентром NCEP/NOAA. Период модельных расчетов – с 24.07.2014 по 30.07.2014. Начальные стратификации полей температуры и солёности были взяты однородными по горизонтали, при их задании использовались натурные данные по термохалинной структуре, характерные для юго-восточной Балтики в летний период. Начальное распределение пассивного трассера приблизительно соответствует его распределению 24.07.2014, идентифицированному на спутниковых изображениях. Характеристика трассера как пассивного означает, что его распределение не влияет на поле плотности. На *рис. 17* представлены результаты модельных расчетов и фрагменты спутниковых изображений, полученных на ту же дату. Хотя в модель не заложен ряд разных важных параметров, например, таких как: постоянный приток взвешенного вещества и влияние циркуляционных процессов, существующих в Гданьском заливе на момент начала расчетов, общая картина переноса достаточно хорошо отражает наблюдаемую на спутниковых изображениях струю выноса мутных вод из Калининградского залива. Однако, как показывает сравнение результатов моделирования и спутникового зондирования за 30 июля 2014 г. (*рис. 18*), когда протяженность струи выноса была максимальной за все время наблюдений, различия в деталях могут быть существенными. Это объясняется, по нашему мнению, именно влиянием вихревых процессов, господствующих в Гданьском заливе (*рис. 1*).

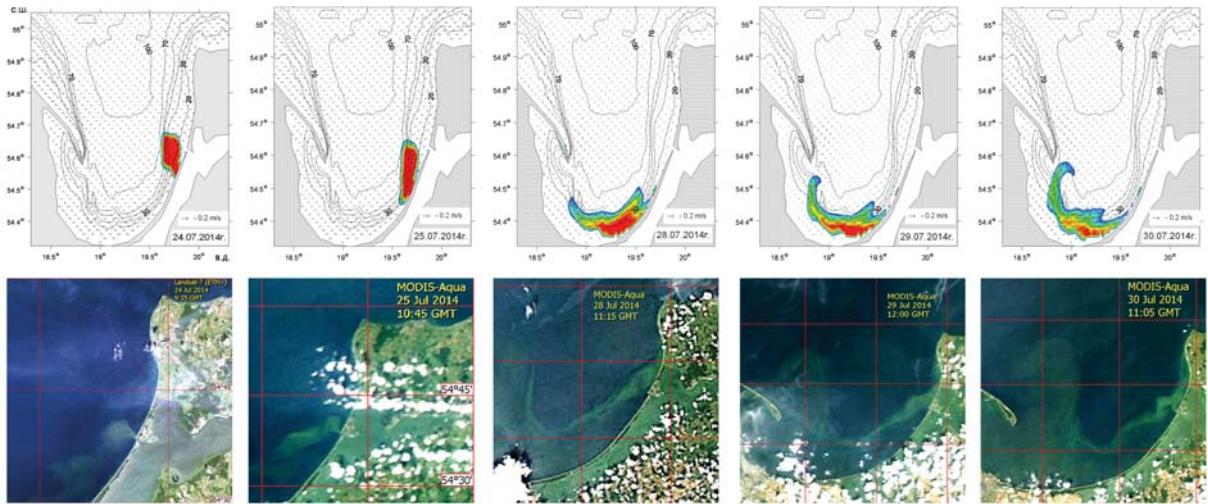


Рис. 17. Результаты численного моделирования дрейфа взвешенного вещества (верхний ряд) и, для сравнения, фрагменты спутниковых изображений на ту же дату, содержащих проявления выноса (нижний ряд)

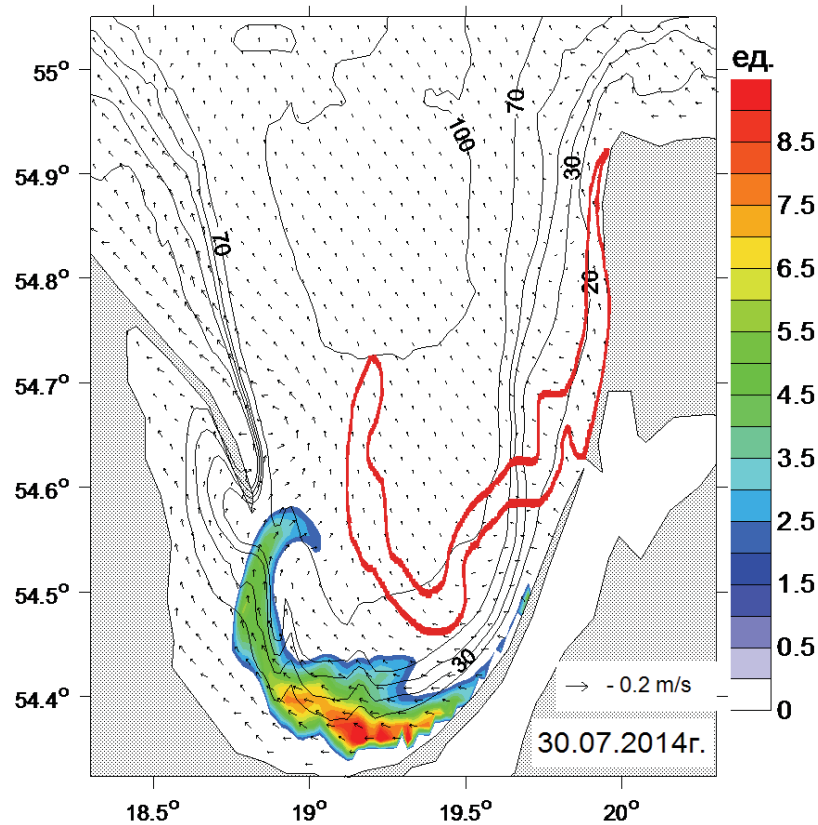


Рис. 18. Результат численного моделирования дрейфа взвешенного вещества. Красная линия соответствует положению контура выноса, определенного по спутниковому изображению MODIS Aqua за 30.07.2014

Заключение

Более чем двухнедельная практически безоблачная погода в конце июля – начале августа 2014 г. позволила проследить на ежедневных изображениях видимого диапазона MODIS Terra/Aqua и данных сенсоров Landsat-7/8 распространение выноса мутных рас-

пресненных вод Калининградского залива по акватории юго-восточной Балтики. Синхронные со съемкой из космоса измерения гидрологической структуры вод Калининградского залива, Балтийского пролива и прибрежной акватории Балтийского моря показали, что влияние выноса, область которого определялась по спутниковым изображениям, проявляется как в полях температуры и солености, так и в рассеянии акустического сигнала, которое можно связать с мутностью вод. Проникновение вод выноса из пролива практически не распространялось глубже 5 м. В данной статье представлены результаты только одного натурного измерения из одиннадцати. Дальнейшая обработка и совместный анализ всех результатов экспедиционных работ позволят, на наш взгляд, более детально изучить этот процесс.

Совместный анализ спутниковых данных и результатов численного моделирования позволил оценить вклад ветрового воздействия на распространение струи выноса. Как показано выше, этот вклад имеет определяющее значение, поскольку формирует поле основных течений в данном районе. Однако без учета циркуляционных процессов результаты моделирования могут серьезно отличаться от спутниковых наблюдений. Это необходимо иметь в виду при составлении прогнозов распространения загрязнений, в первую очередь нефтяных загрязнений в прибрежной зоне, когда появляется угроза выноса загрязнения на берег.

Исследование влияния гидрометеорологических параметров на распространение в прибрежной зоне Балтийского моря мутных распресненных вод залива проводилось в рамках гранта РФФИ № 14-17-00555. Организация экспедиционных работ и проведение исследований по гидрологической и гидрохимической структуре вод проводились при поддержке гранта Всероссийской общественной организации «Русское географическое общество» (проект № 13-05-41374 РГО_а). Моделирование течений и распространения пассивной примеси на основе РОМ выполнено при финансовой поддержке РФФИ, грант № 14-05-50015. Авторы выражают глубокую благодарность Сивкову В.В. за помощь в организации работ, Мысленкову С.А., Чугаевичу В.Я., капитану катамарана Правдину Ю.Ф. и всем участникам экспедиции за помощь в проведении подспутниковых измерений.

Литература

1. *Голенко Н.Н., Голенко М.Н., Шука С.А.* Наблюдение и моделирование апвеллинга в юго-восточной Балтике // *Океанология*. 2009. Т. 49. № 1. С. 20-27.
2. *Голенко М.Н., Голенко Н.Н.* О структуре динамических полей в юго-восточной Балтике при ветровых воздействиях, приводящих к апвеллингу и даунвеллингу // *Океанология*. 2012. Т. 52. № 5. С. 654–667.
3. *Гурова Е.С., Иванов А.Ю.* Особенности проявления гидродинамических структур в юго-восточной части Балтийского моря по данным спектрорадиометров MODIS и космической радиолокации // *Исследование Земли из космоса*. 2011. №4. С. 41-54.
4. *Демидов А.Н., Мысленков С.А., Гриценко В.А., Чугаевич В.Я., Султанов П.А., Писарева М.Н., Сильвестрова К.П., Полухин А.А.* Особенности структуры и динамики вод прибрежной части Балтийского моря вблизи Самбийского полуострова // *Вестник МГУ. Сер. 5. География*. 2011. № 1. С. 41-47.
5. *Добровольский А.Д., Залогин Б.С.* Моря СССР. М.: Изд-во МГУ. 1982. 192 с.
6. *Есюкова Е.Е.* Результаты еженедельного мониторинга побережья Вислинского залива в районе пос. Прибрежный в 2011-2012 годах // *Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта*. 2013. № 1. С. 82-91.
7. *Лазаренко Н. Н., Маевский А. (ред).* Гидрометеорологический режим Вислинского залива. Ленинград: Гидрометеоздат. 1971. 279 с.
8. *Калашиникова Н.А., Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Серебряный А.Н.* Влияние вихревых структур на распространение загрязнений в прибрежной зоне // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2013. Т.10. № 3. С. 228-240.
9. *Лаврова О. Ю., Костяной А. Г., Лебедев С. А., Митягина М. И., Гинзбург А. И., Шеремет Н. А.* Комплексный спутниковый мониторинг морей России. М.: ИКИ РАН. 2011. 470 с.
10. *Савчук О.П.* Исследование эвтрофикации Балтийского моря // *Исследование океанов и морей: Труды ГОИН*. 2005. Вып. 209. С. 272-285.
11. *Bedritskii, A.I., Asmus, V.V., Krovotyntsev, V.A., Lavrova, O.Yu., Ostrovskii, A.G.* Satellite monitoring of pollution in the Russian sector of the Azov and Black Seas in 2003-2007 // *Russian Meteorology and Hydrology*. 2007. Vol. 32. Issue 11. P. 669-674.
12. *Blumberg A.F., Mellor G.L.* A Description of a Three-Dimensional Coastal Ocean Circulation Model // *Three-dimensional coastal ocean circulation model*. Washington, DC: American Geophysical Union. 1987. P. 1-16.
13. *Chubarenko, B., Margonski, P.* The Vistula Lagoon. / In: U. Schiewer (ed.) *Ecology of Baltic Coastal Waters*. Ecological Studies. 197. Springer-Verlag. 2008. P. 167-195.
14. *Finni, T., Kononen, K., Olsonen, R., and Wallström, K.* The history of cyanobacterial blooms in the Baltic Sea // *Ambio*. 2001. 30. P. 172–178.
15. *Kahru, M. and Elmgren, R.* Multidecadal time series of satellite-detected accumulations of cyanobacteria in the Baltic Sea // *Biogeosciences*. 2014. 11. P. 3619-3633.
16. *Kostianoy A.G., Lavrova O.Yu., Mityagina M.I., Solovyov D.M., Lebedev S.A.* Satellite monitoring of oil pollution in the Southeastern Baltic Sea / In: *Oil Pollution in the Baltic Sea*, (Eds.) A.G. Kostianoy and O.Yu. Lavrova, Springer-Verlag. 2013. Vol. 27. P. 125-154.
17. *Larsson U., Elmgren R., Wulff F.* Eutrophication and the Baltic Sea: causes and consequences // *Ambio*. 1985. Vol. 14 (1). P. 9-14.
18. *Lavrova O., Karimova S., Mityagina M.* Eddy activity in the Baltic Sea retrieved from satellite SAR and optical data // *Proc. 3rd Intern. Workshop SeaSAR 2010*. Ed.: ESA. 2010. Special Publication ESA-SP-679. 5 p.
19. *Lavrova O., Mityagina M., Bocharova T., Gade M.* Multichannel observation of eddies and mesoscale features in coastal zones / In: "Remote sensing of the European Seas". V.Barale&M.Gade (Eds.). Springer Verlag. 2008. P. 463-474.
20. *Mellor G.L., Yamada T.* Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems // *Rev. Geophys. Space Phys*. 1982. Vol. 20. P. 851-875.
21. *Schiewer U.* (Ed.) *Ecology of Baltic Coastal Waters*. Ecological Studies, Vol. 197. Springer-Verlag, 2008. 430 p.
22. *Shcherbak S. S.; Lavrova O. Y.; Mityagina M. I.; Bocharova T. Y; Krovotyntsev V. A; Ostrovskii A. G.* Multi-sensor satellite monitoring of seawater state and oil pollution in the northeastern coastal zone of the Black Sea // *International Journal of Remote Sensing*, 2008. Vol. 29. Issue 21. P. 6331 – 6345.
23. *Zhubas V., Laanemets J., Vahtera E.* Modeling of the mesoscale structure of coupled upwelling/downwelling events and the related input of nutrients to the upper mixed layer in the Gulf of Finland, Baltic Sea // *J. Geophys. Res*. 2008. Vol. 113. No. C5. Doi:10.1029/2007JC004280.

Influence of wind and hydrodynamic processes on propagation of the Vistula Lagoon waters into the Baltic Sea

O.Yu. Lavrova¹, E.V. Krayushkin^{1,2}, D.M. Soloviev³, M.N. Golenko, N.N. Golenko⁴,
N.A. Kalashnikova¹, A.N. Demidov²

¹Space Research Institute RAS, Moscow

²Lomonosov Moscow State University, Moscow

³Marine Hydrophysical Institute, Sevastopol

⁴The Atlantic branch of P.P. Shirshov Institute of Oceanology RAS, Kaliningrad

E-mail: olavrova@iki.rssi.ru

The influence of wind and hydrodynamic processes on propagation of coastal turbid waters from the Vistula Lagoon into the Baltic Sea was studied. The research was based on joint analysis of remote sensing data, simultaneous subsatellite measurements and numerical modeling. The sharp difference in water optical properties of the Baltic Sea and the Vistula Lagoon, affected by intense summer bloom of cyanobacteria, make it possible to study the evolution and transformation of the outflow in July - early August 2014 using visible satellite data. Forced by coastal jet streams, the outflow spread throughout the Bay of Gdansk, dramatically affected by the circulation processes in the bay. A three-dimensional structure of the outflow was analyzed. In-situ measurements revealed the presence of the Vistula waters exclusively at the upper water layer. A numerical simulation of suspended matter spreading over the Bay of Gdansk was performed using a modified Princeton Ocean model (POM) considering nothing but the wind force influence on the matter transfer. The simulation results showed that taking into account the whole range of hydrodynamic features, first of all local vortical structures, is essential for appropriate description of the Vistula outflow process.

Keywords: remote sensing, sea surface, the Baltic Sea, algal bloom, near-shore circulation, suspended matter drift, subsatellite measurements, numerical modeling, OLI/TIRS Landsat-8, MODIS Aqua/Terra.

References

1. Golenko N.N., Golenko M.N., Shchuka S.A., Nablyudeniye I modelirovaniye apvellinga v Yugo-Vostochnoy Baltike (Observation and modeling of upwelling in the Southeastern Baltic), *Okeanologiya*, 2009, Vol. 49, No. 1, pp. 15-21.
2. Golenko M.N., Golenko N.N., O structure dinamicheskikh poley v yugo-vostochnoy Baltike pri vetrovykh vozdeystviyah, privodyashchih k apvellingu i daunvellingu (Structure of dynamic fields in the Southeastern Baltic during wind forcings that cause upwelling and downwelling), *Okeanologiya*, 2012, Vol. 52, No. 5, pp. 604-616.
3. Gurova E. S., Ivanov A.Yu., Osobennosti proyavleniya gidrodinamicheskikh struktur v jugo-vostochnoj chasti Baltijskogo morja po dannym spektroradiometrov MODIS i kosmicheskoy radiolokacii (Appearance of Sea Surface Signatures and Current Features in the South-East Baltic Sea on the MODIS and SAR images), *Isledovanie Zemli iz kosmosa*, 2011, No. 4, pp. 41-54.
4. Demidov A.N., Myslenkov S.A., Gricenko V.A., Chugaevich V.Ja., Sultanov P.A., Pisareva M.N., Sil'vestrova K.P., Poluhin A.A., Osobennosti struktury i dinamiki vod pribrezhnoj chasti Baltijskogo morja vblizi Sambijskogo poluostrova (Specific features of water structure and dynamics within the coastal part of the Baltic Sea near the Sambian Peninsula), *Vestnik MGU*, 2011, Seriya 5. Geografija, No. 1, pp. 41-47.
5. Dobrovolskij A.D., Zalogin B.S., *Morja SSSR (Seas of USSR)*, Moscow: MGU, 1982, 192 p.
6. Esiukova, E.E. Rezul'taty ezhenedel'nogo monitoringa poberezh'ja Vislinskogo zaliva v rajone pos. Pribrezhnyj v 2011-2012 godah (Results of weekly monitoring of the coast of Vistula Lagoon near the Pribrezhnyj settlement in 2011-2012), *Vestnik Baltijskogo Federal'nogo Universiteta im. I. Kanta*, 2013, No. 1, pp. 82-91.
7. Lazarenko N. N., Maevskij A. (Eds.), *Gidrometeorologicheskij rezhim Vislinskogo zaliva* (Hydrometeorological mode of Vistula Lagoon), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1971, 279 p.
8. Kalashnikova N.A., Lavrova O.Yu., Mityagina M.I., Serebryany A.N. Vlijanie vihrevykh struktur na rasprostranenie zagriznenij v pribrezhnoj zone (Influence of the vortex structures on the spread of pollution in the coastal zone), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 3, pp. 228-240.

9. Lavrova O.Yu., Kostyanoi A.G., Lebedev S.A., Mityagina M.I., Ginzburg A.I., Sheremet N.A., *Kompleksnyi sputnikovyi monitoring morei Rossii* (Complex satellite monitoring of the Russian Seas), Moscow: IKI RAN, 2011, 470 p.
10. Savchuk O.P., Issledovanie jevtrofikatsii Baltijskogo morja, *Issledovanie okeanov i morej: Trudy GOIN*, 2005, Issue 209, pp. 272-285.
11. Bedritskii, A.I., Asmus, V.V., Krovotyntsev, V.A., Lavrova, O.Yu., Ostrovskii, A.G., Satellite monitoring of pollution in the Russian sector of the Azov and Black Seas in 2003-2007, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2007, Vol. 32, Issue 11, pp. 669-674.
12. Blumberg A.F., Mellor G.L. *A Description of a Three-Dimensional Coastal Ocean Circulation Model*, Washington, DC: American Geophysical Union, 1987, pp. 1-16.
13. Chubarenko, B., Margonski, P., The Vistula Lagoon. In: U. Schiewer (ed.) *Ecology of Baltic Coastal Waters. Ecological Studies*, 197, Springer-Verlag, 2008. pp. 167-195.
14. Finni, T., Kononen, K., Olsonen, R., and Wallström, K., The history of cyanobacterial blooms in the Baltic Sea, *Ambio*, 2001, Vol. 30, pp. 172-178.
15. Kahru, M. and Elmgren, R. Multidecadal time series of satellite-detected accumulations of cyanobacteria in the Baltic Sea, *Biogeosciences*, 2014, No. 11, pp. 3619-3633.
16. Kostianoy A.G., Lavrova O.Yu., Mityagina M.I., Solovyov D.M., Lebedev S.A. Satellite monitoring of oil pollution in the Southeastern Baltic Sea, *Oil Pollution in the Baltic Sea*, A.G. Kostianoy and O.Yu. Lavrova (Eds.), Springer-Verlag, 2013, Vol. 27. pp. 125-154.
17. Larsson U., Elmgren R., Wulff F., Eutrophication and the Baltic Sea: causes and consequences, *Ambio*, 1985, Vol. 14 (1), pp. 9-14.
18. Lavrova O., Karimova S., Mityagina M. Eddy activity in the Baltic Sea retrieved from satellite SAR and optical data, *Proc. 3rd Intern. Workshop SeaSAR 2010*, Ed.: ESA, 2010, Special Publication ESA-SP-679, 5 p.
19. Lavrova O., Mityagina M., Bocharova T., Gade M. Multichannel observation of eddies and mesoscale features in coastal zones, *Remote sensing of the European Seas*, V. Barale & M. Gade (Eds.), Springer Verlag, 2008, pp. 463-474.
20. Mellor G.L., Yamada T., Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems, *Rev. Geophys. Space Phys.* 1982, Vol. 20, pp. 851-875.
21. Schiewer U. (Ed.) *Ecology of Baltic Coastal Waters. Ecological Studies*, Vol. 197, Springer-Verlag, 2008, 430 p.
22. Shcherbak S.S., Lavrova O.Yu., Mityagina M.I., Bocharova T.Yu., Krovotyntsev V.A, Ostrovskii A.G., Multisensor satellite monitoring of seawater state and oil pollution in the northeastern coastal zone of the Black Sea, *International Journal of Remote Sensing*, 2008, Vol. 29, Issue 21, pp. 6331 – 6345.
23. Zhurbas V., Laanemets J., Vahtera E. Modeling of the mesoscale structure of coupled upwelling/downwelling events and the related input of nutrients to the upper mixed layer in the Gulf of Finland, Baltic Sea, *J. Geophys. Res.*, 2008, Vol. 113, No. C5, doi:10.1029/2007JC004280.