

Влияние вихревых структур на распространение загрязнений в прибрежной зоне

Н.А. Калашникова¹, О.Ю. Лаврова¹, М.И. Митягина¹, А.Н. Серебряный^{1,2}

¹ Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

² Акустический институт им. Н.Н. Андреева, Москва, Россия

E-mail: olavrova@iki.rssi.ru

В статье представлены результаты экспериментальных работ, которые проводились на базе Южного отделения Института океанологии имени П.П. Шишова в сентябре – октябре 2011 г. синхронно с радиолокационной съемкой района эксперимента со спутников Envisat, RADARSAT-2 и TerraSAR-X и съемкой в видимом диапазоне с помощью MERIS Envisat и MODIS Terra/Aqua. Были выполнены разрезы на яхте, оснащенной ADCP «Rio Grande 600 kHz», от берега до начала свала глубин. Ливневые дожди, которые прошли в период проведения экспериментальных работ, спровоцировали попадание в море большого количества загрязненных вод. Данные дистанционного зондирования из космоса в микроволновом и видимом диапазонах электромагнитного спектра позволили не только выявить акватории, загрязненные мутными речными водами и аварийными сбросами коммунальных очистных сооружений, оценить количественно концентрацию взвешенных веществ, но и проследить влияние субмезомасштабных вихрей на распространение загрязнений в прибрежной зоне.

Ключевые слова: вихревые структуры, загрязнения морской среды, дистанционное зондирование из космоса, Черное море, подспутниковые измерения.

Введение

Исследование вихревых структур и особенностей мезомасштабной и мелкомасштабной циркуляции является чрезвычайно актуальным, так как эти процессы в значительной степени определяют экологическое и гидродинамическое состояние прибрежных зон. В связи с интенсивным развитием спутниковых методов и относительной доступностью данных высокого пространственного разрешения открываются новые возможности для более детального изучения динамических процессов и, в первую очередь, вихревых структур, масштаб которых составляет от нескольких сот метров до нескольких километров. Знание динамики вод в прибрежной акватории российского сектора Черного моря необходимо для прогнозирования экологического состояния одной из крупнейших в России рекреационной зоны на Черном море, которая испытывает огромные антропогенные нагрузки, увеличивающиеся год от года. В непосредственной близости от курорта Геленджик расположены крупнейшие российские порты на Черном море – Новороссийск и Туапсе, неподалеку проходят оживленные судоходные трассы. Немалый вклад в загрязнение прибрежной зоны вносят и устаревшие коммунальные очистные сооружения.

Понимание вихревой активности в конкретном регионе может иметь решающее значение при прогнозировании распространения загрязнений различной природы, в том числе и нефтесодержащих пленок. На сегодняшний день численные гидродинамические модели оказывают значительную помощь в изучении гидрофизических процессов в прибрежных водах, однако такие модели требуют тщательной калибровки и верификации. Использование спутниковых данных может быть полезно и для восполнения пробелов в наших знаниях, касающихся поверхностной динамики и циркуляции вод.

Как показывает опыт спутникового мониторинга нефтяных разливов (Лаврова, Костяной, 2010; Лаврова и др., 2011), при составлении прогноза распространения нефтяного пятна очень важно учитывать не только ветер, волнение и постоянные течения (как это делается в современных численных моделях), но и фактическую мезомасштабную циркуляцию вод.

В частности, сценарий развития событий во время катастрофического разлива нефти в Мексиканском заливе, показал, сколь огромное влияние оказывают элементы мезомасштабной циркуляции на перенос загрязнений. Практически все прогнозы распространения нефтяного пятна, ежедневно составлявшиеся на основе численного моделирования, не подтверждались, потому что они не учитывали сложную вихревую динамику вод в данном районе. Оперативные знания о реально происходящих циркуляционных процессах, базирующиеся на спутниковых данных, полученных в различных диапазонах электромагнитного спектра, и анализ фактической эволюции пятен имеют большое значение с точки зрения совершенствования моделей, используемых для расчета дрейфа и трансформации как нефтяных пятен, так и любого другого вида загрязнений.

Необходимым элементом исследования динамики вод в шельфовой зоне остается проведение квазисинхронных со спутниковой съемкой натурных измерений параметров течений. Прибрежная акватория Черного моря в районе Южного отделения Института океанологии (г. Геленджик) стала своеобразным подспутниковым полигоном, где проводятся испытания новых приборов, выполняются регулярные натурные наблюдения и измерения различных параметров морской среды. Исследованием гидродинамических процессов в северо-восточной части Черного моря уже достаточно давно и успешно занимаются специалисты различных научных учреждений, таких как Институт океанологии РАН им. П.П. Ширшова и его Южное и Атлантическое отделения, Институт космических исследований РАН, Институт прикладной физики РАН, Акустический институт имени Н.Н. Андреева, МГУ им. М.В. Ломоносова и др. (Булатов и др., 2003; Зацепин и др., 2008, 2011; Кривошея и др., 2001; Серебряный, Лаврова, 2008; Ginzburg et al., 2002; Lavrova et al., 2006, 2008).

Ученые лаборатории аэрокосмической радиолокации Института космических исследований РАН более 20 лет занимаются изучением процессов на поверхности океана и в придном слое атмосферы на основе данных дистанционного зондирования. Начиная с 2004 г. ими проводится многосенсорный спутниковый мониторинг состояния и загрязнения Черного, Балтийского и Каспийского морей (Лаврова и др., 2010, 2011; Mityagina et al., 2012). Регулярные спутниковые наблюдения, проводимые в микроволновом и видимом диапазонах электромагнитного спектра, позволяют не только выявлять загрязнения морской поверхности, но и отслеживать их распространение (Литовченко и др., 2007; Бедрицкий и др., 2007). Составление прогноза распространения загрязнения, естественно, невозможно без понимания тонкой структуры течения в прибрежной зоне, что требует проведения регулярных подспутниковых измерений.

Сотрудники Института космических исследований РАН и Акустического института им. Н.Н. Андреева в течение 10 лет совместно проводят регулярные подспутниковые

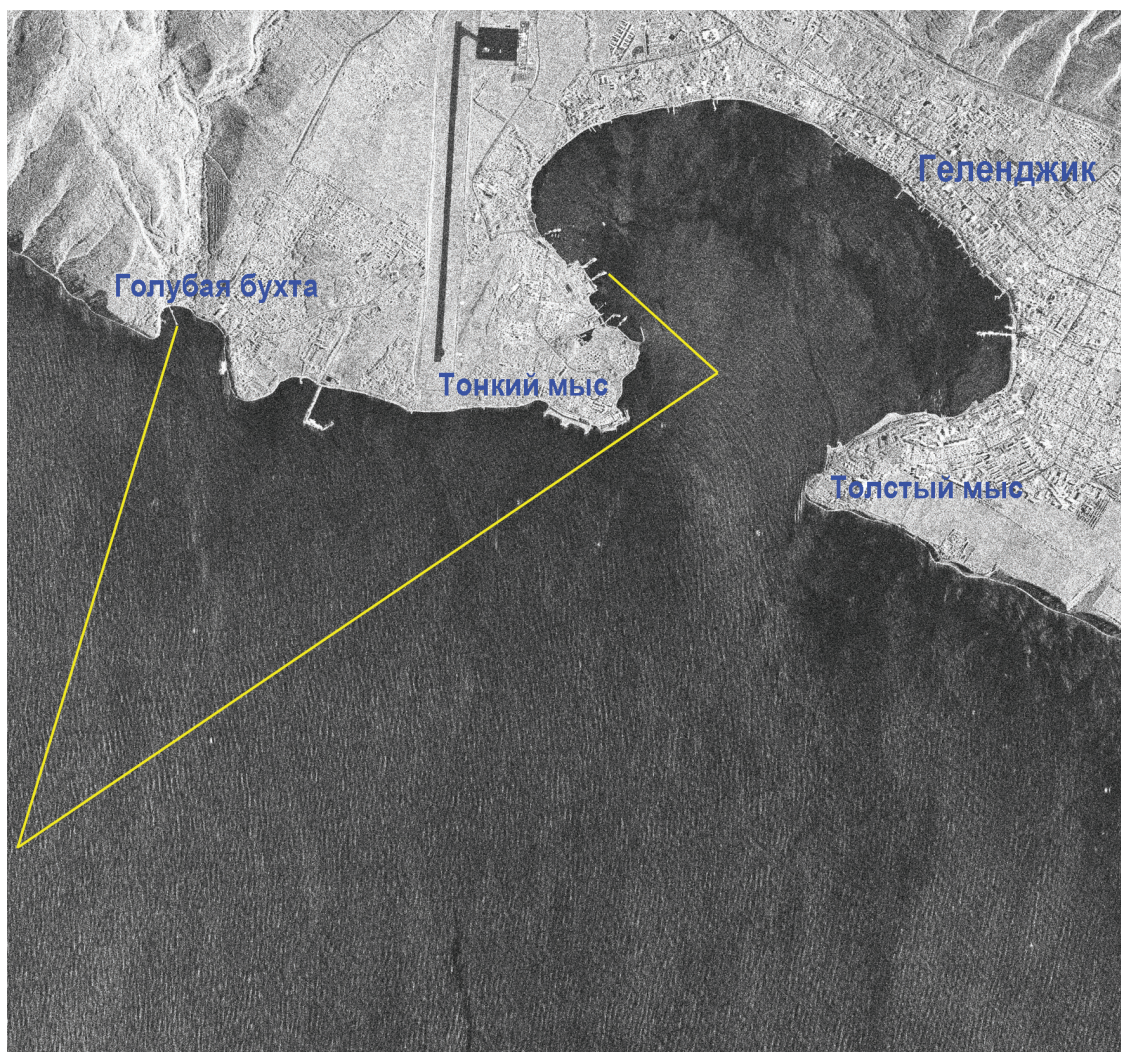
измерения с маломерных судов и с пирса на базе Южного отделения Института океанологии РАН им. П.П. Ширшова (Булатов и др., 2003; Серебряный, Лаврова, 2008; Lavrova et al., 2012). Очередной этап этой работы состоялся в сентябре – октябре 2011 г. Отличительной особенностью проведенных исследований являлось то, что радиолокационная съемка осуществлялась не только с помощью ASAR Envisat, как это было в предыдущие годы, но и с помощью новейших радиолокаторов RADARSAT-2, TerraSAR-X и TanDEM-X, позволяющих получать изображения с существенно более высоким пространственным разрешением. Для адекватной интерпретации радиолокационных данных необходимо было проводить синхронные подспутниковые океанологические измерения всех возможных гидродинамических и метеорологических параметров как дистанционными акустическими методами, так и *in-situ*.

Методика проведения подспутниковых измерений и используемые данные

Подспутниковые измерения проводились с 28 сентября по 14 октября 2011 г. на акватории шельфа Черного моря вблизи г. Геленджик в пределах границ от траверза Голубой бухты до мыса Толстого (*рис. 1*). Подспутниковые измерения включали в себя:

1. Съемки на разрезах поперек шельфа от берега до начала свала глубин акустическим доплеровским профилографом течений ADCP «Rio Grande 600 kHz». Этот тип ADCP хорошо зарекомендовал себя для изучения не только течений, но и внутренних волн, вихрей и других динамических процессов в шельфовой зоне (Сабинин, Серебряный, 2012). Регистрировались направление и сила течения, обратное рассеяние звука с глубиной (осреднение по глубине с дискретностью ячеек 0,5 м). Съемки проводились с яхты, двигавшейся равномерно со скоростью 2–2,5 м/с.
2. Съемки на разрезах поперек шельфа от берега до начала свала глубин минизондом SVP фирмы «Valeport» (зонд измеряет температуру, скорость звука и давление, пересчитываемое затем в глубину). Зондирования выполнялись от поверхности до дна в семи – восьми точках разреза.
3. Долговременные (двухнедельные) измерения на автономной буйковой станции гирляндой термисторов, расположенной на траверзе разреза в точке с глубиной 35 м. Термокоса состояла из 10 измерителей температуры Centi фирмы «Star Oddi», дискретность измерений 30 с.

Эксперименты предыдущих лет показали, что для изучения динамических процессов в данном районе, в частности для определения пространственной структуры прибрежных антициклонических вихрей, наиболее целесообразно осуществлять измерения вдоль разрезов в виде «расходящихся ножниц», т.е. вдоль разреза от пирса Голубой бухты до свала глубин и вдоль разреза от свала глубин до Тонкого мыса. Спутниковое радиолокационное изображение района экспериментальных работ представлено на *рис. 1*. Желтой линией на фрагменте снимка схематично изображена стандартная траектория, вдоль которой делались измерения с яхты.



*Рис. 1. Район проведения подспутниковых измерений.
Фрагмент радиолокационного изображения TerraSAR-X от 30.09.2011;
пространственное разрешение 3 м. Желтой линией обозначена
стандартная траектория, вдоль которой проводились измерения с яхты*

Проведение всех подспутниковых измерений планировалось таким образом, чтобы в момент пролета спутника яхта находилась на максимальном удалении от берега, т.е. у кромки шельфа. В связи с этим выход на разрез начинался за 1,5–2 часа до момента спутниковой съемки. На максимальном удалении от берега в момент пролета спутника проводилось гидрологическое зондирование, после которого яхта шла прямолинейно на пирс в Голубую или в Геленджикскую бухту, делая попутные короткие остановки для зондирований.

Помимо морских работ, производились визуальные наблюдения и оптическая съемка с высокого берега. Во время пролета спутников фиксировались и описывались все доступные параметры морской поверхности: волнение, наличие сликов, расположение судов; а также измерялись скорость и направление ветра. Наблюдения производились синхронно с выходами в море, что способствовало улучшению качества работ в море и анализа снимков в дальнейшем.

Данные дистанционного зондирования из космоса

На период проведения экспериментальных работ заказывалась съемка района эксперимента радиолокаторами с синтезированной аппаратурой (РСА) со следующих искусственных спутников Земли (ИСЗ): Envisat, TerraSAR-X, TanDEM-X и RADARSAT-2. Снимки с трех последних спутников предоставлялись нам в рамках совместного российско-германского проекта SOAR RADARSAT-2/TerraSAR-X Project #5074 «Detecting and Tracking Small-Scale Eddies in the Black Sea and the Baltic Sea Using High-Resolution RADARSAT-2 and TerraSAR-X Imagery» (DTEddie). Основные характеристики радиолокационных изображений (РЛИ), используемых во время проведения экспериментальных работ, представлены в *табл. 1*.

Анализ полученных радиолокационных изображений высокого пространственного разрешения (Лаврова и др., 2012) показал, что для исследования динамических процессов в шельфовой зоне оптимальными являются съемка в маршрутном (Stripmap) режиме на вертикальной поляризации РСА ИСЗ TerraSAR-X, которая обеспечивает возможность получения РЛИ с пространственным разрешением 3,3 м при ширине полосы обзора 30 км; и съемка в детальном (Multi-Look Fine) режиме съемки РСА RADARSAT-2, которая обеспечивает возможность получения РЛИ с пространственным разрешением 8 м при ширине полосы обзора 50 км. Изображения более высокого пространственного разрешения, которые были получены под описываемые экспериментальные работы, имеют более узкую полосу обзора, что затрудняет проведение совместного анализа данных дистанционного зондирования и подспутниковых измерений, поскольку не весь район проведения экспериментальных работ попадает в узкий кадр. Для подспутниковых измерений в 2012 и 2013 гг. были привлечены уже данные с более подходящими параметрами.

Таблица 1. Характеристика радиолокационных изображений

<i>Спутник</i>	<i>Дата и время</i>	<i>Режим съемки</i>	<i>Поляризация</i>	<i>Пространственное разрешение</i>
TerraSAR-X	30.09.11 03:44 UTC	Stripmap	HH	3 м
Envisat	30.09.11 07:43 UTC	WSM	HH	150 м
RADARSAT-2	30.09.11 15:17 UTC	Ultra-Fine SLC	VV	3 м
Envisat	02.10.11 19:28 UTC	WSM	HH	150 м
RADARSAT-2	04.10.11 03:41 UTC	Ultra-Fine SLC	VV	3 м
Envisat	05.10.11 19:17 UTC	WSM	VV	150 м
Envisat	08.10.11 07:51 UTC	WSM	VV	150 м
TanDEM-X	08.10.11 15:15 UTC	Stripmap	HH	3 м
RADARSAT-2	11.10.11 03:36 UTC	Ultra-Fine SLC	VV	3 м
TerraSAR-X	11.10.11 03:44 UTC	Stripmap	HH	3 м

Данные спектрорадиометра MERIS Envisat использовались для построения карт концентраций взвешенного вещества. Их построение осуществлял Д.М. Соловьев (МГИ НАНУ, г. Севастополь).

Анализ метеорологической обстановки

Анализ метеорологической обстановки в районе подспутниковых наблюдений проводился по данным метеостанции г. Новороссийска (№ 37006) с координатами 44°43' с. ш. 37°50' в. д. (интернет-ресурс www.rp5.ru) и автоматической метеостанции ИКИ РАН, установленной на конце пирса. Скорость и направление ветра измерялись с дискретностью 4 секунды. Далее проводилось векторное осреднение направления и скорости ветра на временных промежутках в 3 часа.

В районе исследований наблюдались ветра северных румбов с повторяемостью около 70%, которые способствуют выносу взвешенного вещества и загрязнений из закрытых Геленджикской и Голубой бухт в открытую акваторию моря, однако скорость ветров северных румбов была незначительной и в основном не превышала 6 м/с.

2 и 5 октября 2011 г. в районе эксперимента наблюдалась смена ветров на противоположные по направлению и резкое увеличение скорости ветра до 16 м/с, повлекшее за собой штормовую погоду (рис. 2).

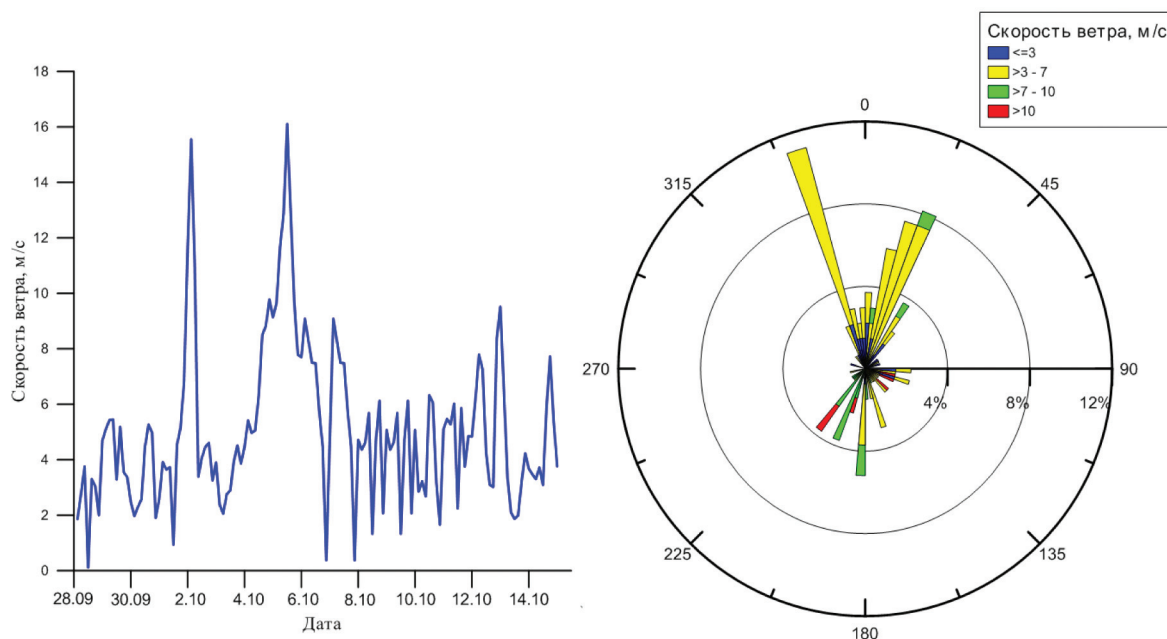


Рис. 2. Роза ветров с 28 сентября по 14 октября 2011 г. в Голубой бухте (г. Геленджик)

В начале октября наблюдались ливневые дожди, местами сильные, за счет влияния серии холодных атмосферных фронтов приволжского циклона. Ливневые осадки сформировали дождевой паводок, вынесший в море большое количество взмученной речной воды. Сильные ливневые дожди имели место 2 и 5 октября. 2 октября за сутки выпало 36 мм осадков, что составляет треть месячной нормы для данного региона. 5 октября также шли сильные дожди – 33 мм (рис. 3). Сильные ливневые осадки привели не только к усилению стока мутных речных вод, но и, по всей видимости, к переполнению резервуаров очистных сооружений в г. Геленджике и сбросу сточных вод в море. Следует заметить, что аварийные сбросы сточных вод на устаревших очистных сооружениях г. Геленджика – явление нередкое (Лаврова и др., 2011; Лаврова, Митягина, 2012).

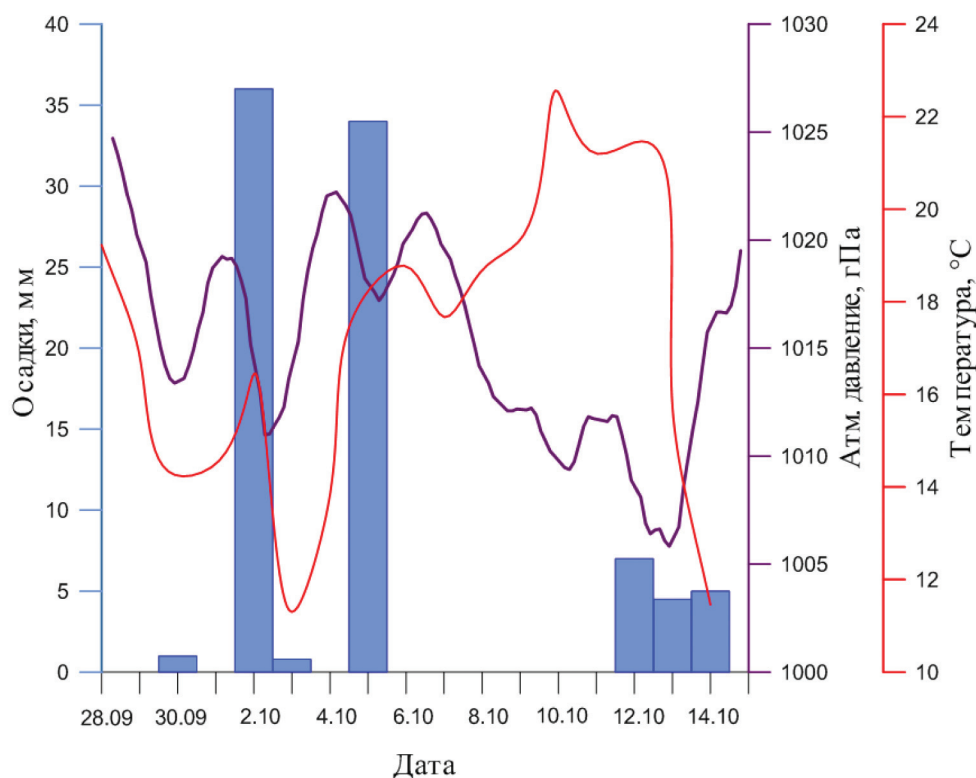


Рис. 3. Временной ход среднесуточной температуры воздуха, атмосферного давления, приведенного к уровню моря, и среднесуточного выпадения атмосферных осадков по данным метеостанции г. Новороссийск на период экспедиционных работ

Даты получения спутниковых изображений позволили провести спутниковые наблюдения при разных метеорологических условиях: изучаемый район был исследован 30 сентября перед мощными ливневыми потоками и усилением ветра, а также 7, 8 и 11 октября после прохождения атмосферного фронта в отсутствие влияния вынужденных атмосферных факторов на распространение взвешенного вещества в открытой акватории моря, что дало возможность выявить влияние морских динамических факторов. Наличие сухой погоды 7, 8 и 11 октября также благоприятствовало изучению влияния вихревых процессов на распространение взвешенного вещества, так как в это время не было дополнительного притока взмученных речных и сточных антропогенных вод в открытую акваторию моря.

Основные результаты

В период проведения натурных измерений в 2011 г. (с 28 сентября по 14 октября) из-за неблагоприятных метеорологических условий несколько дней море было закрыто для выходов. Из-за этого синхронные подспутниковые измерения были проведены только 30 сентября, 7, 8 и 11 октября. Наряду с сильным ветром южного и юго-западного направлений часто шел дождь, временами сильный и продолжительный. О резком повышении концентрации взвешенных веществ в районе Толстого мыса (где находятся очистные сооружения г. Геленджика) после ливней 5 октября свидетельствуют и данные, полученные из космоса. Так, на карте концентрации взвешенного вещества, построенной по данным

сенсора MERIS Envisat от 7 октября 2011 г. видно, что значения концентрации превышают 6 г/м^3 (рис. 4а). Загрязнения разносятся на большие расстояния от места сброса, будучи захваченными антициклоническим вихрем, размеры которого составили: диаметр большой оси – 35 км; малой – 16 км. Прибрежную часть этого вихря удалось зафиксировать с помощью ADCP, во время проведения 3,3-километрового разреза по акватории шельфа до глубины 35 м (рис. 4б), на котором измерено довольно сильное, до 0,3–0,4 м/с юго-восточное течение в прибрежной километровой зоне, что свидетельствует о прохождении антициклонического вихря достаточно больших размеров.

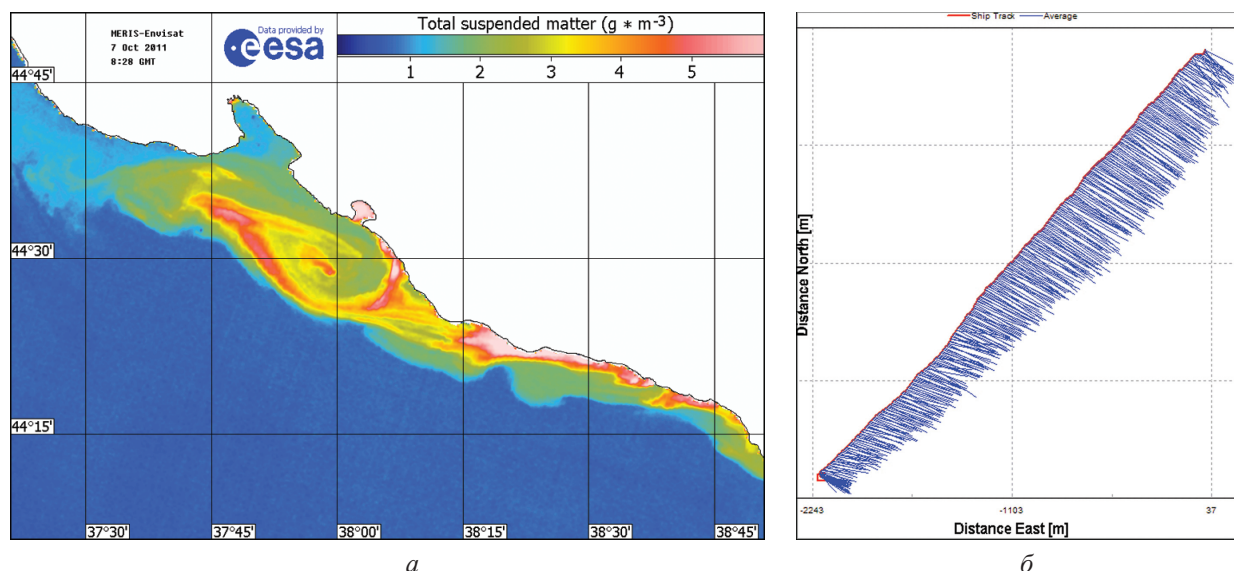


Рис. 4. Распространение загрязненных вод под действием антициклонического вихря 7 октября 2011 г.: а) карта концентрации взвешенного вещества, построенная по данным сенсора MERIS Envisat; б) течения на разрезе по данным ADCP, юго-восточное направление свидетельствует о наличии антициклонического вихря

Данные ADCP позволили сравнить картины объемного обратного рассеяния на разрезах до начала периода штормовой погоды (съемка от 28 сентября) и после штормового периода (съемка от 8 октября). На рис. 5 приведены соответствующие разрезы. На разрезе до штормовой погоды хорошо различимо положение термоклина, находящегося на глубине 20–21 м, который разделяет толщу на две контрастные области – верхнюю, с относительно слабым рассеянием (значения коэффициента обратного рассеяния в пределах 46–50 дБ) и нижнюю со значительным рассеянием (56–59 дБ). После шторма картина обратного рассеяния акустического сигнала кардинальным образом изменилась. Положение заглубившегося термоклина до 22–27 м видно нечетко, в то время как зона максимума обратного рассеяния (со значениями коэффициента рассеяния 61–67 дБ) переместилась в приповерхностные слои моря, заняв горизонты от поверхности до глубин 8–10 м и простираясь непосредственно от береговой зоны на расстояние около 3 км в море. На большем удалении от берега зона повышенного обратного рассеяния заглубилась до 18–20 м, приняв пятнистый характер распределения коэффициента обратного рассеяния по разрезу. Ниже этой зоны располагалась вода со значениями коэффициента рассеяния в пределах 55–57 дБ. На РЛИ, полученном радиолокатором ASAR Envisat 8 октября, район загрязненных вод проявляется

в виде области пониженного рассеяния (темного цвета) вдоль береговой черты в районе Геленджикской и Голубой бухт и занимает площадь около 60 км² (рис. 6а). В то же время, основываясь на карте концентрации взвешенного вещества, построенной по данным MERIS Envisat также от 8 октября, можно сделать вывод о том, что загрязненные воды распространились на гораздо большее расстояние под действием Основного черноморского течения (рис. 6б).

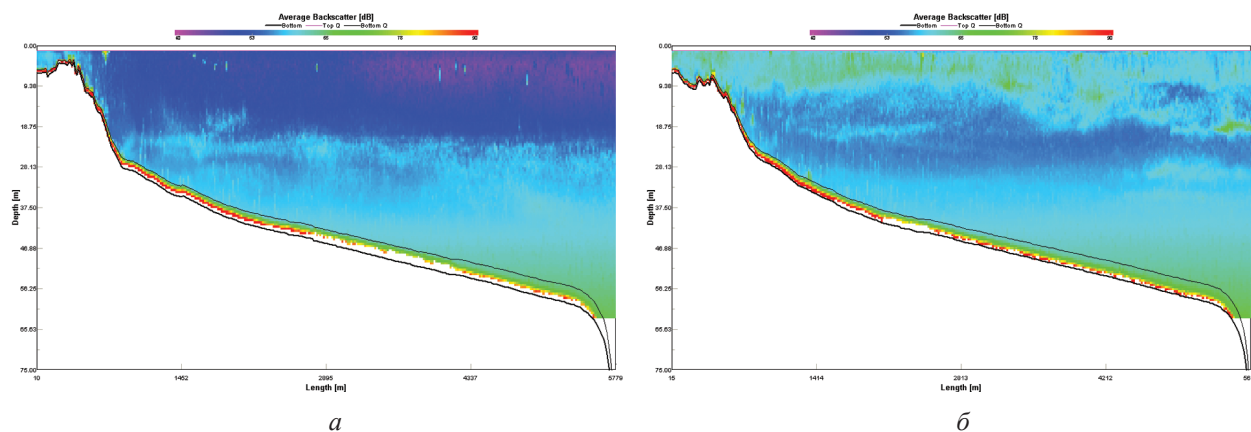


Рис. 5. Картины обратного рассеяния на сечениях поперек шельфа:
а) до шторма (28 сентября 2011 г.); б) после шторма (8 октября 2011 г.)

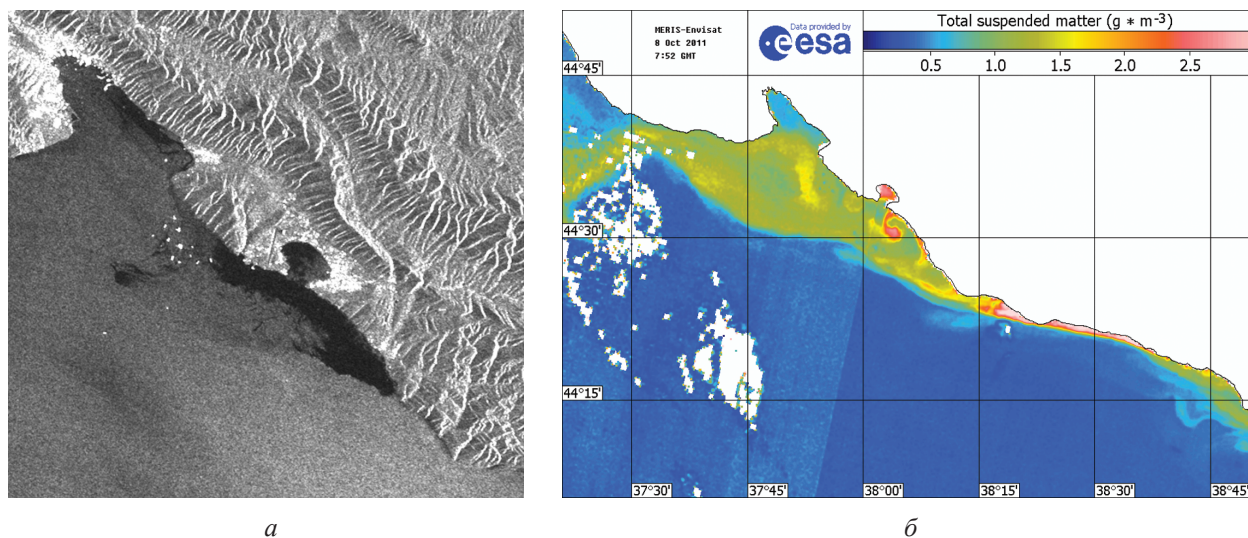


Рис. 6. Распространение загрязненных вод 8 октября:
а) фрагмент радиолокационного изображения ASAR Envisat;
пространственное разрешение 150 м. Темная область соответствует
району повышенного загрязнения морской поверхности;
б) карта концентрации взвешенного вещества,
построенная по данным сенсора MERIS Envisat

Особый интерес представляют результаты, полученные 11 октября 2011 г. При проведении подспутниковых измерений с яхты с помощью ADCP были сделаны два разреза в виде расходящихся ножниц из точки у свала глубин. Характер течений на обоих сечениях в целом совпадает (рис. 7а). При движении от берега на разрезе встречается юго-восточное

течение со средней скоростью около 0,2 м/с. На расстоянии около 2,4 км по галсу течение уменьшается и заворачивает по часовой стрелке, затем, снова набирая силу, увеличивается, достигая 0,15 м/с в дальней точке разреза, уже сменив направленность на северо-западную. Характер течения, измеренного 11 октября, свидетельствует о прохождении антициклонического вихря, диаметр которого приблизительно равен 10 км.

Измерения с помощью ADCP показали, что данный мелкомасштабный вихрь существенно трехмерный – юго-восточное прибрежное противотечение сохраняет свое направление до глубины 20 м (рис. 7б). При этом вся водная толща достаточно сильно рассеивает акустический сигнал, что говорит об оставшейся после штормовой погоды и ливней загрязненности воды. Наибольшее рассеяние продолжает оставаться в приповерхностных водах, где коэффициент рассеяния составляет 60 дБ и больше.

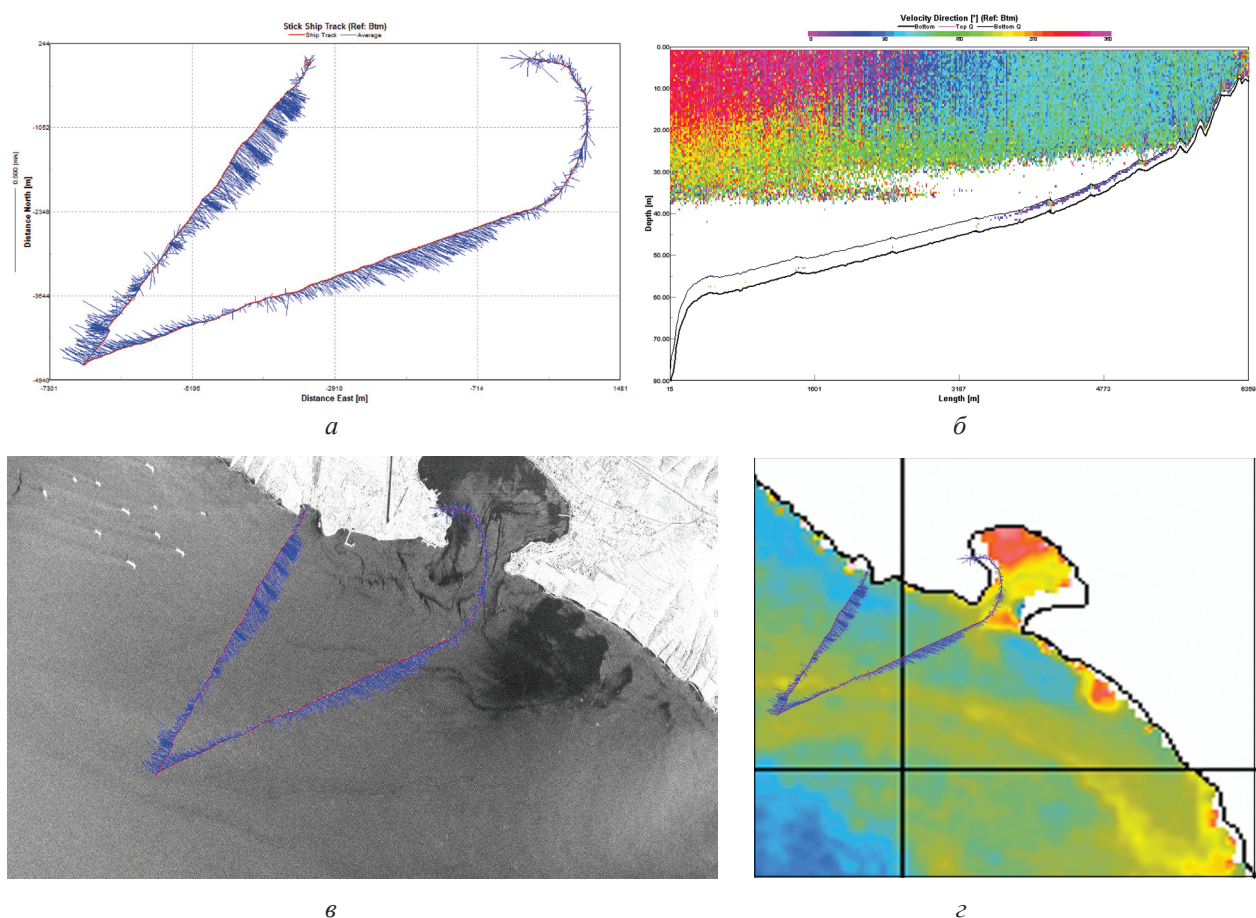


Рис. 7. Прохождение антициклонического вихря 11 октября 2011 г.:

- а) течения на разрезе по данным ADCP; б) направление течения на втором разрезе;
- в) фрагмент RADARSAT-2 изображения, полученный 11.10.11 с разрешением в точке 2 м;
- г) карта концентрации взвешенного вещества, построенная по данным MERIS Envisat.

Синим цветом отмечены скорость и направление течения по данным ADCP в период спутниковой съемки

Натурные измерения проводились одновременно с радиолокационной съемкой высокого пространственного разрешения сенсорами RADARSAT-2 и TerraSAR-X. Разница во времени между пролетами составляла 7 минут. Спустя 4 часа была проведена съемка сенсором MERIS Envisat, на основе данных которого была построена карта концентрации взвешенного

вещества. Совместный анализ спутниковых данных и данных натурных измерений показал, что мелкомасштабный антициклонический вихрь, выявленный с помощью ADCP, являлся частью более крупной вихревой структуры, распространяющейся в юго-восточном направлении. Максимальные значения измеренной скорости прибрежного противотечения совпадают с положением сликовой полосы, наблюдаемой на обоих радиолокационных снимках (рис. 7в). Темная область в районе Толстого мыса свидетельствует о том, что загрязненные воды продолжают оставаться в районе сброса из коммунальных очистных сооружений.

Совместный анализ данных ADCP с данными спутникового зондирования выявил, что область, охваченная юго-восточным течением, является зоной пониженной концентрации взвешенного вещества и, наоборот, северо-западное течение приходится на область повышенной концентрации взвешенного вещества, распространяющегося от Толстого мыса (рис. 7г).

Заключение

Подспутниковые измерения с яхты с помощью ADCP, проведенные в сентябре – октябре 2011 г. в северо-восточной части Черного моря в районе г. Геленджика в период до, во время и после сильных ливневых дождей, позволили оценить влияние динамических процессов, в первую очередь субмезомасштабных вихрей, на распространение загрязнений в прибрежной зоне. Данные дистанционного зондирования из космоса в микроволновом и видимом диапазонах электромагнитного спектра позволили не только выявить акватории, загрязненные мутными речными водами и аварийными сбросами коммунальных очистных сооружений по радиолокационным данным ASAR Envisat, TerraSAR-X RADARSAT-2, но и оценить количественно концентрацию взвешенных веществ по данным сенсора MERIS Envisat.

Во время проведения экспериментальных работ удалось пронаблюдать формирование и перемещение прибрежного антициклонического вихря, измерить инициированные им течения в шельфовой зоне. Загрязненные воды под действием этого вихря распространялись более чем на 30 км.

Данные ADCP позволили сравнить картины объемного обратного рассеяния на разрезах при разной степени загрязненности вод прибрежной зоны и оценить распространение загрязнений по глубине.

Работа выполнена в рамках проектов РФФИ 10-05-00428-а и ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг., госконтракт № 14.740.12.1342. Экспедиционные работы проводились при финансовой поддержке проекта РФФИ 11-05-10020-к. Авторы выражают глубокую благодарность Д.М. Соловьеву (Морской гидрофизический институт НАН Украины, г. Севастополь) за обработку данных MERIS Envisat.

Радиолокационные данные RADARSAT-2 и TerraSAR-X получены в рамках международного проекта «SOAR RADARSAT-2/TerraSAR-X Project #5074». Спутниковые радиолокационные изображения ASAR Envisat предоставлены Европейским космическим агентством в рамках проекта C1P.6342.

Литература

1. *Бедрицкий А.И., Асмус В.В., Кровотынцев В.А., Лаврова О.Ю., Островский А.Г.* Спутниковый мониторинг загрязнения российского сектора Черного и Азовского морей в 2003–2007 гг. // Метеорология и гидрология. 2007. № 11. С. 5–13.
2. *Булатов М.Г., Кравцов Ю.А., Кузьмин А.В., Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Раев М.Д., Скворцов Е.И.* Микроволновые исследования морской поверхности в прибрежной зоне (Геленджик, 1999–2002). М.: КДУ, 2003. 143 с.
3. *Зацепин А.Г., Баранов В.И., Кондрашов А.А., Корж А.О., Кременецкий В.В., Островский А.Г., Соловьев Д.М.* Субмезомасштабные вихри на кавказском шельфе Черного моря и порождающие их механизмы // Океанология. 2011. Т. 51. № 4. С. 592–605.
4. *Зацепин А.Г., Корж А.О., Кременецкий В.В., Островский А.Г., Поярков С.Г., Соловьев Д.М.* Изучение гидрофизических процессов на шельфе и верхней части континентального склона Черного моря с использованием традиционных и новых методов измерений // Океанология. 2008. Т. 48. № 4. С. 510–519.
5. *Кривошея В.Г., Титов В.Б., Овчинников И.М.* Новые данные о режиме течений на шельфе в северо-восточной части Черного моря 2001 // Океанология. 2001. Т. 41. № 3. С. 325–334.
6. *Лаврова О.Ю., Каримова С.С., Митягина М.И., Бочарова Т.Ю.* Оперативный спутниковый мониторинг акваторий Черного, Балтийского и Каспийского морей в 2009–2010 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. 2010. Т. 7. № 3. С. 168–185.
7. *Лаврова О.Ю., Костяной А.Г., Лебедев С. А., Митягина М. И., Гинзбург А.И., Шеремет Н.А.* Комплексный спутниковый мониторинг морей России. М.: ИКИ РАН, 2011. 472 с.
8. *Лаврова О.Ю., Митягина М.И.* Спутниковый мониторинг пленочных загрязнений поверхности Черного моря // Исследование Земли из космоса. 2012. № 3 С. 48–65.
9. *Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Каримова С.С., Бочарова Т.Ю.* Применение радиолокаторов RADARSAT-2 и TerraSAR-X для исследования гидродинамических процессов в океане // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 312–323.
10. *Литовченко К.Ц., Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Иванов А.Ю., Юренко Ю.И.* Нефтяные загрязнения восточной части Черного моря: космический мониторинг и подспутниковая верификация // Исследование Земли из космоса, 2007. № 1. С. 81–94.
11. *Сабинин К.Д., Серебряный А.Н.* Применение акустических доплеровских профилометров течений для изучения пространственной структуры морской среды // Акустический журнал. 2012. Т. 58. № 5. С. 639–648.
12. *Серебряный А.Н., Лаврова О.Ю.* Антициклонический вихрь на шельфе северо-восточной части Черного моря: совместный анализ космических снимков и данных акустического зондирования толщи моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т. 5. № 2. С. 206–215.
13. *Титов В.Б.* О роли вихрей в формировании режима течений на шельфе Черного моря и в экологии прибрежной зоны // Океанология. 1992. Т. 32. № 1. С. 39–48.

14. Ginzburg A.I., Kostianoy A.G., Nezlin N.P., Krivosheya V.G., Yakubenko V.G., Soloviev D.M., Stanichny S.V. Mesoscale eddies and related processes in the northeastern Black Sea // *Journal of Marine Systems*. 2002. V. 32. No. 1–3. P. 91–106.
15. Lavrova O., Serebryany A., Bocharova T., Mityagina M. Investigation of fine spatial structure of currents and submesoscale eddies based on satellite radar data and concurrent acoustic measurements // *Proc. SPIE 8532, Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions 2012*, 85320L (October 19, 2012); doi:10.1117/12.970482.
16. Lavrova O., Bocharova T. Satellite SAR observations of atmospheric and oceanic vortex structures in the Black Sea coastal zone // *Advance in Space Research*, 2006. 38 (10), P. 2162–2168.
17. Lavrova, O., Mityagina, M., Bocharova, T., Gade M. Multisensor observation of eddies and mesoscale features in coastal zones // *Remote Sensing of the European Seas*, Barale, Vittorio; Gade, Martin (Eds.) Springer, 463–474 (2008).
18. Mityagina M., Lavrova O. Satellite survey in the Black Sea coastal zone // *International Water Technology Journal*. 2012. Vol. 2. Issue 1. P. 67–79.

Influence of vortex structures on the spread of pollution in the coastal zone

N.A. Kalashnikova¹, O.Yu. Lavrova¹, M.I. Mityagina¹, A.N. Serebryany^{1,2}

¹ *Space Research Institute RAS, Moscow, Russia*

² *N.N. Andreev Acoustics Institute, Moscow, Russia*

E-mail: olavrova@iki.rssi.ru

The article presents the results of the experimental works that were conducted on the basis of the Southern branch of P.P. Shirshov Institute of Oceanology in September-October 2011. The experimental works were made synchronously with the radar observation from Envisat, RADARSAT-2 and TerraSAR-X satellites as well as observation in the visible range using Envisat MERIS and MODIS Terra/Aqua satellites. The sections were made from the yacht, equipped with ADCP «Rio Grande 600 kHz» starting from the shore to the depth slope. Torrential rains that took place in the period of carrying out of the experimental works provoked an intense outflow of polluted waters in the sea. Remote sensing data from the space in microwave and visible ranges of the electromagnetic spectrum have allowed not only to identify the waters polluted by the muddy river runoff and emergency discharges of municipal treatment facilities and to quantify the concentration of suspended substances, but also to trace the influence of submesoscale eddies on the spread of pollution in the coastal zone.

Keywords: eddy structures, marine pollution, remote sensing, the Black Sea, subsatellite- measurements.