

Подспутниковые наблюдения мелкомасштабных гидродинамических процессов в северо-восточной части Черного моря

О.Ю. Лаврова¹, А.Н. Серебряный^{2,1}, М.И. Митягина¹, Т.Ю. Бочарова¹

¹ Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

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

E-mail: olavrova@iki.rssi.ru

Представлены результаты экспедиционных работ в шельфовой акватории северо-восточной части Черного моря в июне и сентябре 2012 г. Проводились разрезы от береговой черты до свала глубин с использованием акустического доплеровского профилографа течений (ADCP) в сочетании со съемкой района интереса радиолокаторами спутников Radarsat-2, TerraSAR-X и TanDEM-X и оптической аппаратурой Terra / Aqua MODIS. Обнаружено большое число мелкомасштабных антициклонических и циклонических вихрей, определены их параметры. Особое внимание уделено смене прибрежных течений под воздействием антициклонических вихрей. В результате совместного анализа полученных РЛИ и данных измерений ADCP удалось выявить шесть случаев прохождения в районе эксперимента пакетов внутренних волн. Их амплитуды колебались в пределах 8–12 м, а характерная длина волны составляла 90–100 м. Только благодаря использованию спутниковых данных с пространственным разрешением порядка 3 м удалось выявить поверхностные проявления внутренних волн таких масштабов на спутниковых радиолокационных изображениях.

Ключевые слова: вихревые структуры, внутренние волны, дистанционное зондирование из космоса, Черное море, подспутниковые измерения, радиолокационные изображения, Radarsat-2, TerraSAR-X, TanDEM-X.

Введение

В связи с бурным развитием спутниковых методов исследования морской поверхности и относительной доступностью спутниковых данных высокого пространственного разрешения открываются новые возможности более детального изучения мелкомасштабных гидродинамических процессов, в том числе вихревых процессов и внутренних волн.

Под вихрями мы понимаем видимые на радиолокационных изображениях (или на изображениях, полученных в видимом диапазоне в зоне солнечного блика) тонкие закручивающиеся спиральные темные или, наоборот, яркие светлые полосы на морской поверхности. Получен ряд свидетельств о присутствии вращения в этих структурах, одним из которых является искривление при пересечении такой спиральной структуры первоначально прямолинейного корабельного следа (Munk et al., 2000; Lavrova et al., 2012). На радиолокационных изображениях (РЛИ) вихри и вихревые структуры визуализируются либо посредством пассивных трассеров, либо за счет изменения контрастов в конвергентно-дивергентных зонах. В качестве пассивных трассеров выступают в первую очередь пленки поверхностно-активных веществ, которые выглаживают морскую поверхность за счет подавления мелкомасштабной составляющей волнения и образуют так называемые слики. Толщина сликовых полос примерно всегда одинакова и составляет 100–300 м, а расстояние между ними варьируется в зависимости от диаметра вихря (рис. 1).

Возникает вопрос: что «прорисовывают» слики? Означает ли это, что за счет сликов мы видим тонкую пространственную структуру вихрей, которые состоят из множества

струй? Открытыми также остаются вопросы, касающиеся механизмов возникновения мелкомасштабных вихревых структур, глубины проникновения и изменчивости с глубиной, продолжительности существования.

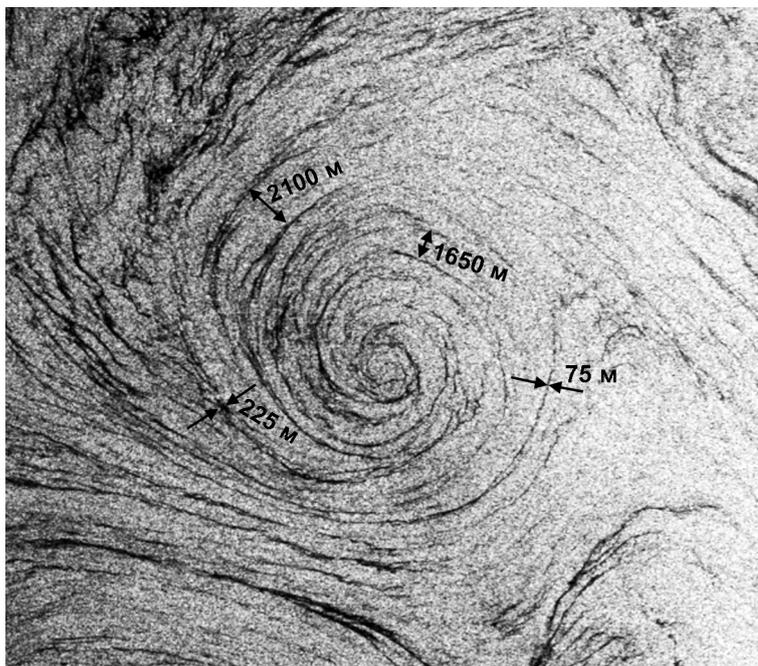


Рис. 1. Пространственные характеристики сликов, «прорисовывающих» циклонический вихрь. Фрагмент РЛИ ASAR Envisat, полученного 10.05.2007 (Лаврова и др., 2011)

Накопление регулярной спутниковой информации, получаемой с высоким разрешением, в разные периоды года, и проведение квазисинхронных со спутниковой съемкой натурных измерений параметров течений могут помочь найти ответы хотя бы на часть этих вопросов.

Внутренние волны (ВВ) являются неотъемлемой частью динамики всех стратифицированных по плотности водоемов – океанов, морей, озер и водохранилищ. Они играют важную роль в перемешивании вод и формировании термохалинной циркуляции. Амплитуда внутренних волн может достигать в океане сотен метров, длины волн – многих километров, но колебания водной поверхности при этом обычно ничтожны. Тем не менее, внутренние волны проявляются на поверхности океана, модулируя ветровую рябь своими орбитальными течениями (Басович и др., 1982; Горшков и др., 2003; Кравцов и др., 1997). Формирующиеся в зонах расхождения орбитальных течений (зоны дивергенции) полосы выглаженной ряби (слики), как и полосы повышенной интенсивности ряби (сулои), возникающие в местах схождения (зоны конвергенции) течений, очерчивают пространственную структуру внутренних волн и движутся вместе с ними. Поверхностные проявления внутренних волн в океане визуализируются на РЛИ морской поверхности в виде чередующихся полос усиления (светлые полосы) и ослабления обратно-рассеянного сигнала (темные полосы). Основным механизмом генерации внутренних волн является взаимодействие приливных течений с неровностями дна, в частности с краем шельфа. Несмотря на то, что

Черное море является бесприливным, генерация внутренних волн в нем происходит довольно часто, о чем свидетельствуют контактные измерения (Иванов, Серебряный, 1982; 1983; 1985). В то же время, поверхностные проявления внутренних волн в северо-восточной части Черного моря регистрируются на спутниковых изображениях достаточно редко. За все время регулярного спутникового мониторинга этой акватории, проводившегося нами в 2005–2012 гг., на РЛИ Envisat ASAR было зафиксировано только 11 случаев поверхностных проявлений внутренних волн (Лаврова и др., 2009; Митягина, Лаврова, 2010). Наблюдаемые внутренние волны в Черном море существенно менее интенсивны, чем их аналоги в океане или в морях с приливами, однако более разнообразны с точки зрения механизмов своего происхождения. Подспутниковые наблюдения внутренних волн позволяют определить их параметры, а главное – прояснить вопрос, при каких условиях возможно их проявление на спутниковых изображениях.

Задачи и методика проведения подспутниковых измерений

Ниже будут представлены некоторые результаты экспериментальных работ, проведенных в июне и сентябре 2012 г. в северо-восточной части Черного моря в районе города Геленджик. Подспутниковые измерения проводились в два этапа: с 4 по 15 июня 2012 г. и с 10 по 29 сентября 2012 г. и включали в себя следующие виды работ.

1. Съёмки на разрезах поперек шельфа от берега до начала свала глубин акустическим доплеровским профилографом течений ADCP «Rio Grande 600 kHz» Регистировались направление и сила течения, обратное рассеяние звука с глубиной (осреднение по глубине с дискретностью ячеек 0,5 м). Съёмки проводились с яхты, двигавшейся равномерно со скоростью 2–2,5 м/с.
2. Съёмки 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.

На период проведения натурных измерений заказывалась радиолокационная съёмка района эксперимента при помощи радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА), установленных на искусственных спутниках Земли (ИСЗ) TerraSAR-X, TanDEM-X и RADARSAT-2. Всего был получен 31 снимок высокого пространственного разрешения (порядка 3 м).

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 съёмки. 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 зондирования (рис. 2). Более подробное описание использованных спутниковых данных и методики проведения эксперимента дано в работе (Калашникова и др., 2013).

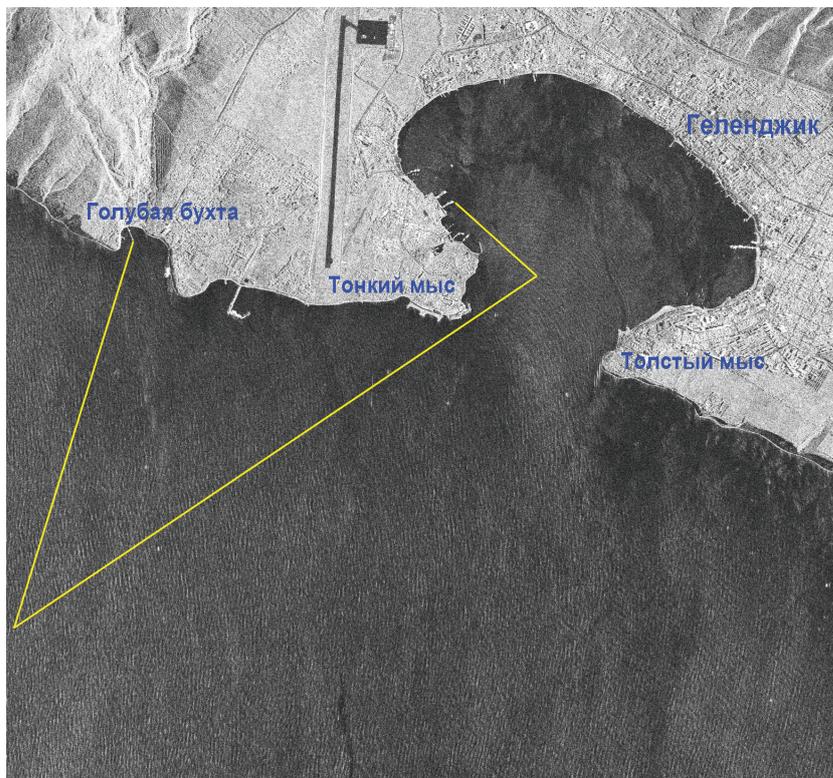


Рис. 2. Район проведения подспутниковых измерений. Фрагмент РЛИ TerraSAR-X от 30.09.2011; пространственное разрешение 3 м. Желтой линией обозначена стандартная траектория, вдоль которой проводились измерения с яхты (Калашникова и др., 2013)

Задачами экспериментальных работ являлись:

- изучение гидродинамических процессов в районе эксперимента;
- отработка оперативного получения спутниковых данных высокого разрешения;
- оценка информационной ценности и границ применимости различных радиолокационных продуктов;
- изучение тонкой пространственной структуры течений на основе данных радиолокационного и акустического зондирования;
- идентификация поверхностных проявлений процессов, выявленных с помощью ADCP.

Подспутниковые измерения параметров вихревых структур

Анализ результатов проводимого нами в 2005–2012 гг. регулярного спутникового мониторинга северо-восточной акватории Черного моря показал, что на спутниковых изображениях детектируется большое количество вихрей относительно малых размеров, с диаметрами от нескольких километров до десятков километров (причем на их периферии

могут развиваться вихри меньших размеров). Вихри этого типа имеют, как правило, спиралеобразный вид. Вихревые структуры могут проявляться в виде одиночных вихрей, вихревых диполей, вихревых цепочек и вихревых кластеров (Митягина, Лаврова, 2009; Mityagina et al., 2010). Данные вихри достаточно сложны для исследования в силу их малых размеров, нестационарности, спонтанности появления и малого времени жизни.

Механизмами образования мелкомасштабных вихрей в северо-восточной прибрежной зоне Черного моря предположительно являются: ветровой импульс; сдвиговая неустойчивость течений; речной сток; взаимодействие вихрей и их диссипация; взаимодействие течений с мелкомасштабными особенностями береговой линии (обтекание мысов и бухт) (Зацепин и др., 2011; Костяной и др., 2010; Лаврова и др., 2011). Другими гипотетическими механизмами образования подобных спиралевидных вихрей могут быть неоднородности атмосферного потока и конвекция в приповерхностном слое моря (Гинзбург, 1992; Голицын, 2012).

Основными задачами экспериментальных работ в части изучения вихрей являлись:

- определение скорости и направления течений с помощью ADCP;
- выявление наличия противотечений, т.е. течений, направление которых противоположно Основному черноморскому течению (ОЧТ), которое является основным элементом крупномасштабной циркуляции вод Черного моря и распространяется по периферии моря в циклоническом направлении со стрежнем, расположенным в среднем над континентальным склоном;
- установление связи между положением сликовых полос, детектируемых на РЛИ с выявленными на записях ADCP проявлениями противотечений, которые могут быть связаны с прохождением вихрей;
- определение характера изменения течений по глубине;
- изменение положения термоклина при прохождении вихря.

Наибольший интерес с точки зрения изучения мелкомасштабных вихрей представляет серия подспутниковых измерений, которая проводилась в сентябре 2012 г. На *рис. 3* представлены течения на разрезах по данным ADCP с 10 по 28 сентября (север и берег наверху).

Всего было проведено 11 выходов на яхте, практически под все сеансы радиолокационной съемки. Как видно из *рис. 3*, юго-восточное направление течения (противотечение) было зафиксировано на семи разрезах. Трижды – 17, 18 и 28 сентября – вдоль разреза наблюдается смена течения с юго-восточного у берега на северо-западное на некотором удалении от берега. Есть все основания считать, что здесь мы наблюдаем прохождение мелкомасштабных антициклонических вихрей (направление вращения по часовой стрелке). Причем для этих случаев можно достаточно точно оценить диаметр вихря (если условно считать его круглым). Так, например, диаметр вихря, измеренного 17 сентября, составил примерно 8 км. Данная оценка основана на предположении, что за радиус можно взять расстояние от точки, ближайшей к береговой черте, где наблюдается юго-восточное течение, до точки, где происходит смена его направления.

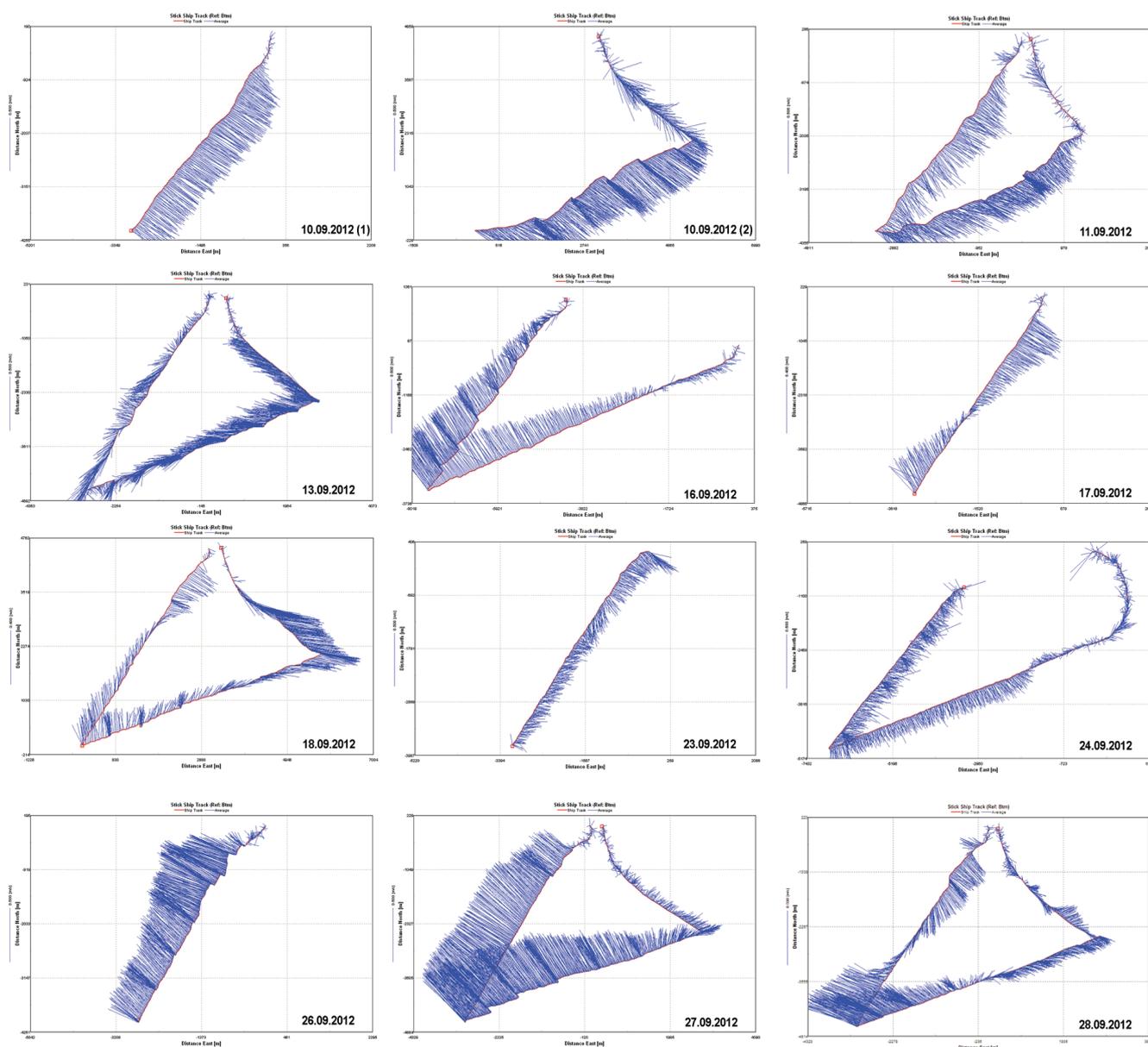


Рис. 3. Результаты измерения течений на разрезах с помощью ADCP в период с 10 по 28 сентября 2012 г.

Проведенные в течение трех дней измерения позволили проследить формирование и распространение данного антициклонического вихря. Как показывают измерения с помощью ADCP в предыдущий день, 16 сентября, характер течения в общей массе соответствовал ОЧТ, т.е. имел северо-западное направление, за исключением небольшой области, прилегающей к Тонкому мысу, где появляется слабое противотечение, скорость которого не превышала 0,1 м/с. Интересно отметить, что совместный анализ радиолокационных данных и данных ADCP (рис. 4) показал, что в области смены направления течения находилась сликовая полоса.

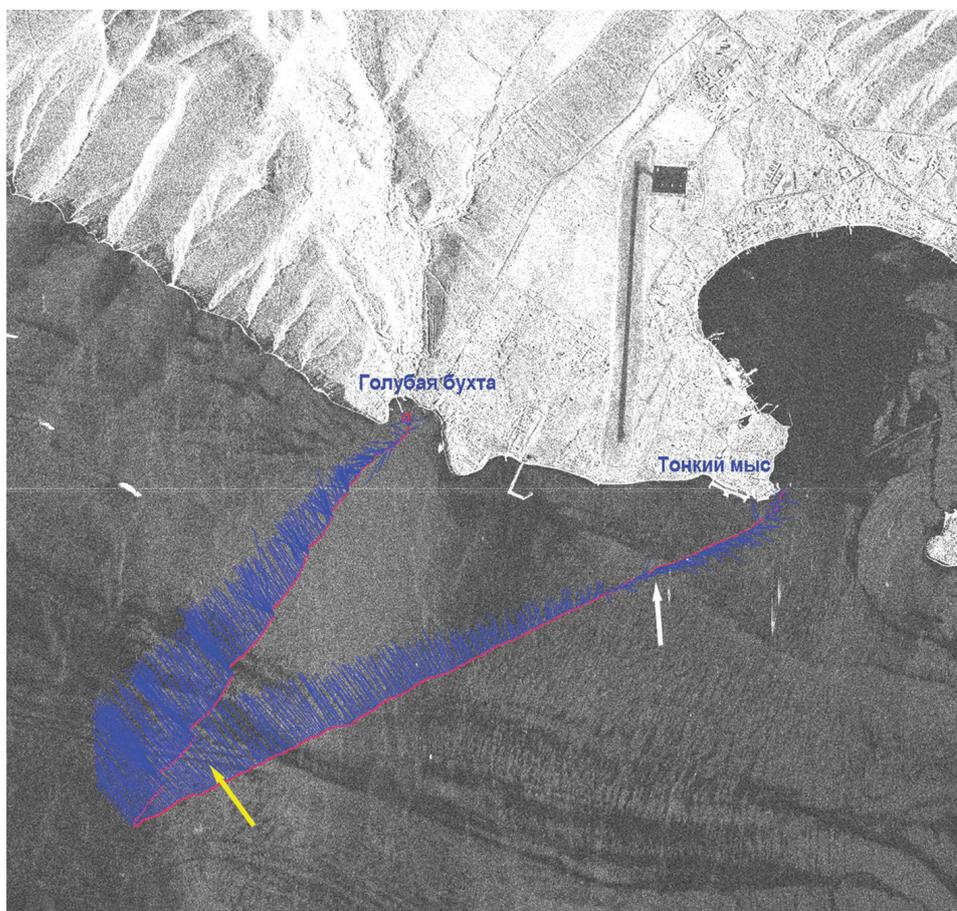


Рис. 4. Фрагмент РЛИ TerraSAR-X от 16.09.2012. Синим цветом отмечены скорость и направление течения по данным ADCP в период спутниковой съемки. Белая стрелка указывает на слик, расположенный в области смены направления течения. Желтая стрелка указывает на положение поверхностных проявлений внутренних волн

Через 18 часов противотечение у берега нарастает до 0,4 м/с, далее на расстоянии примерно 3 км уменьшается до нуля, а потом меняет свое направление на противоположное, постепенно увеличивая скорость до 0,3 м/с. Следует отметить, что, как на *рис. 3*, так и на *рис. 5а* представлены средние по глубине (до сезонного термоклина) течения. Характер изменения скорости и направления течения с глубиной можно прояснить при анализе данных «Интенсивность скорости» (Velocity Magnitude) (*рис. 5б*) и «Направление скорости» (Velocity Direction) (*рис. 5в*). Если интенсивность течения практически не меняется с глубиной (по крайней мере, до глубины 20 м), то направление течения является постоянным с глубиной только на внешней стороне вихря. В приповерхностном слое течение по мере удаления от берега плавно меняется с юго-восточного на южное, а потом на западное и северо-западное. На расстоянии 1,5 км от берега, где глубина места составляет 37 м, течение меняет свое направление с глубиной и имеет положительную циклоническую направленность: с юго-восточного через восточное, северное и далее к внешнему краю вихря оно по всей глубине становится северо-западным. Таким образом, на расстоянии примерно 3 км на разрезе среднего течения появляется точка с нулевой направленностью течения, так как слабое южное течение в верхнем слое (выше 10 м) уравнивается слабым северным течением (от 10 до 20 м).

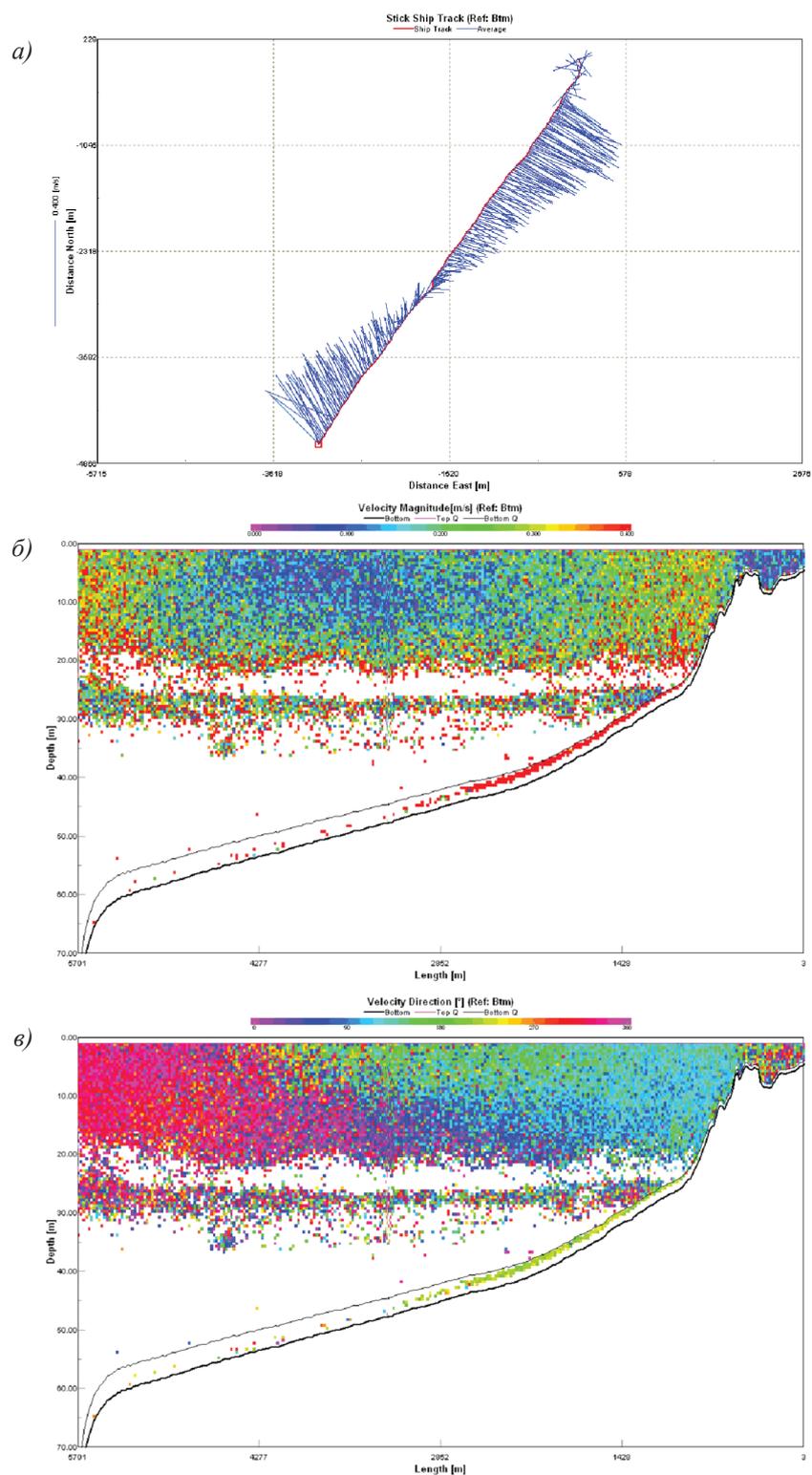


Рис. 5. Результаты измерения параметров антициклонического вихря с помощью ADCP 17.09.2012: а) средняя скорость и направление течения на разрезе; б) распределение интенсивности течения с глубиной на первом галсе разреза (сечение от берега до дальней точки); в) распределение направления течения с глубиной на первом галсе разреза

Судя по характеру течения, измеренного еще через 12 часов, утром 18 сентября, мелкомасштабный антициклонический вихрь смещался в юго-восточном направлении, и в районе экспериментальных работ 18.09 находилась его тыльная часть, так как за исключением

полуторакилометровой прибрежной зоны, где течение оставалось юго-восточным, направление течения было на север. Причем направление оставалось постоянным по глубине до 20 м.

Отдельно хотелось бы остановиться на вопросе, почему на спутниковых изображениях в подавляющем большинстве случаев детектируются циклонические вихри (Munk et al., 2000; Лаврова и др., 2011), проявляющиеся в виде закрученных сликовых спиралей, в частности и в северо-восточной акватории Черного моря (Митягина, Лаврова, 2009), в то время как при подспутниковых измерениях мы в большинстве случаев фиксируем противотечения, связанные с прохождением антициклонических вихрей?

Не вдаваясь в тонкости особенностей проявления вихревых структур на спутниковых изображениях, отметим, что одно из объяснений может быть следующим. Поскольку наши измерения проводятся с маломерного судна, которое не может удалиться от берега более чем на 7–8 км, то циклонические вихри практически не могут быть нами идентифицированы, так как направление течения в них у берега совпадает с ОЧТ, за исключением случаев вихрей с радиусом менее 5–6 км. Один из удачных примеров меандрирования течения циклонической направленности, а возможно и циклонического вихря представлен на *рис. 6*.

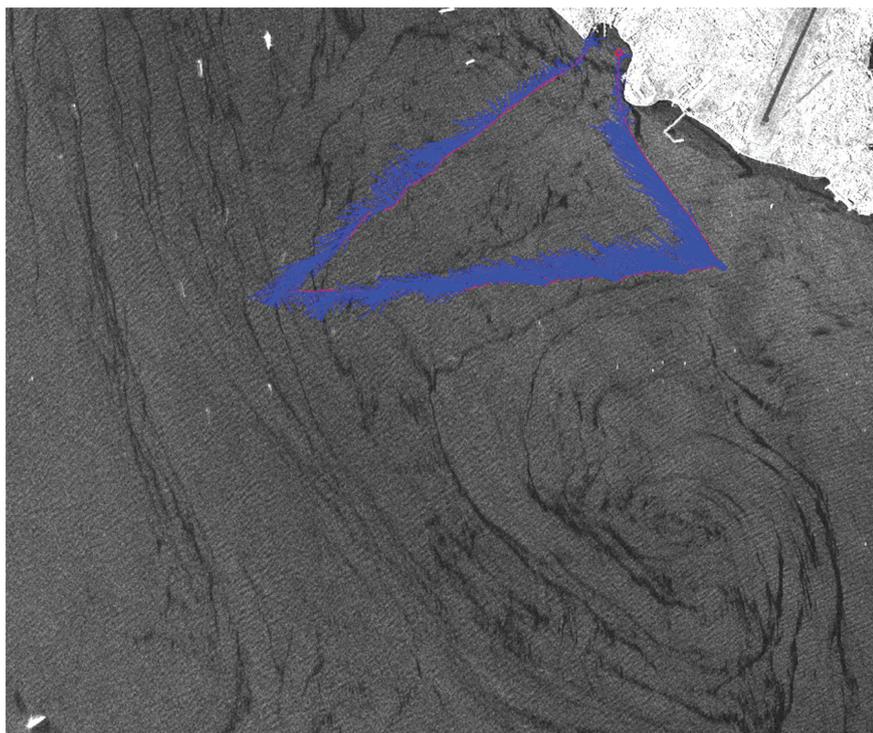


Рис. 6. Проявление циклонического вихря на РЛИ TanDEM-X от 13.09.2012. Синим цветом отмечены скорость и направление течения по данным ADCP в период спутниковой съемки

Как показывает совместный анализ РЛИ и ADCP измерений 13 сентября в районе эксперимента находился циклонический вихрь, диаметр которого составлял 8 км. На РЛИ он проявляется в виде закручивающихся сликовых полос. Разрезы, выполненные с помощью ADCP, не прошли через его центр, поэтому область изменения течения расположена не посередине, а на расстоянии 5 км (при разрезе в 7 км).

В период проведения подспутниковых наблюдений с 4 по 15 июня 2012 г. структура поля течений в северо-восточной части Черного моря определялась двумя крупными вихревыми структурами: вихревым диполем с антициклоническим центром западнее района эксперимента и антициклоническим вихрем восточнее его. Антициклонические структуры достигали в диаметре 50–60 км и располагались на минимальном расстоянии 10 км друг от друга и в 8–10 км от береговой черты (*рис. 7*).



Рис. 7. Проявление вихревой активности в районе экспериментальных работ 06.06.2012. Фрагмент цветосинтезированного изображения MODIS Terra. 1 – антициклоническая компонента вихревого диполя; 2 – антициклонический вихрь; 3 – «циклоническая» струя

Район эксперимента находился севернее акватории, расположенной между этими двумя антициклоническими вихрями, и не был захвачен течениями в них. Такая гидродинамическая обстановка способствовала тому, что прибрежное течение было прижато к берегу, сохраняя северо-западное направление в районе эксперимента. Северо-западнее района эксперимента струя циклонической завихренности отходит от берега и распространяется в область между мезомасштабными антициклонами (*рис. 7*).

На РЛИ TerraSAR-X и Radarsat-2 от 6 июня (не приводятся из-за большого размера), полученных с разницей в 9 минут, хорошо видна волнистая сликовая полоса, отмечающая границу прибрежного течения, а в нижней части изображений сликовые полосы очерчивают внешнюю границу мезомасштабного антициклонического вихря.

Мезомасштабные вихри являлись практически квазистационарными вплоть до 9 июня, когда вихревой диполь сместился на запад, а антициклонический вихрь почти диссипировал. Это привело к отходу от берега ОЧТ, его ослаблению и меандрированию, что проявилось в образовании прибрежного противотечения, зафиксированного 9 июня с помощью ADCP. В дальнейшем вновь сформировавшиеся вихревые диполи не способствовали меандрированию прибрежного течения, которое сохраняло северо-западное направление

до конца экспериментальных работ. Таким образом, во время проведения подспутниковых экспериментов в июне 2012 г. прохождение мелкомасштабных вихрей не регистрировалось, за исключением случая 9 июня.

Подспутниковые наблюдения внутренних волн

Черное море относится к классу бесприливных морей, следовательно, механизм генерации ВВ приливными течениями здесь исключен. Наши исследования показали, что практически все зарегистрированные на РЛИ поверхностные проявления ВВ в северо-восточной части Черного моря были локализованы вблизи границы вихря или гидрологического фронта. Причем необходимым условием их проявления на РЛИ являлось наличие резкого и неглубокого пикноклина (Лаврова и др., 2009; Mityagina, Lavrova, 2010).

Во время проведения подспутниковых измерений с помощью ADCP в 2012 г. неоднократно были зафиксированы проявления ВВ. В данных ADCP ВВ проявляются в виде колебаний повышенного звукорассеивающего слоя на картине эхо-сигнала. Подобного рода измерения позволяют достаточно точно определить основные параметры ВВ, в частности их амплитуду и длину волны, а также пространственное распределение вдоль разреза. Так, например, в ходе измерений, проведенных 16 сентября, были зафиксированы ВВ, длина которых составляла в среднем 100 м, а амплитуда колебалась в пределах 8–12 м. ВВ распространялись в сторону берега (рис. 8).

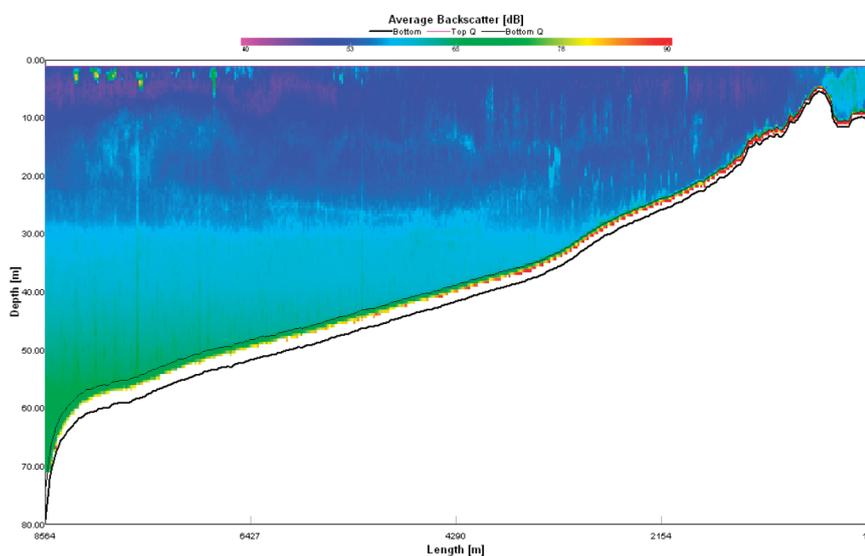


Рис. 8. Проявление внутренних волн на записи эхо-сигнала ADCP 16.09.2012

При совместном анализе данных радиолокационной съемки TerraSAR-X и измерений с помощью ADCP (рис. 4) были детектированы поверхностные проявления этих ВВ в виде трех параллельных сликовых полос. Длина волны, восстановленная на основе радиолокационной съемки, составляла 90 м, что находится в хорошем соответствии с данными ADCP.

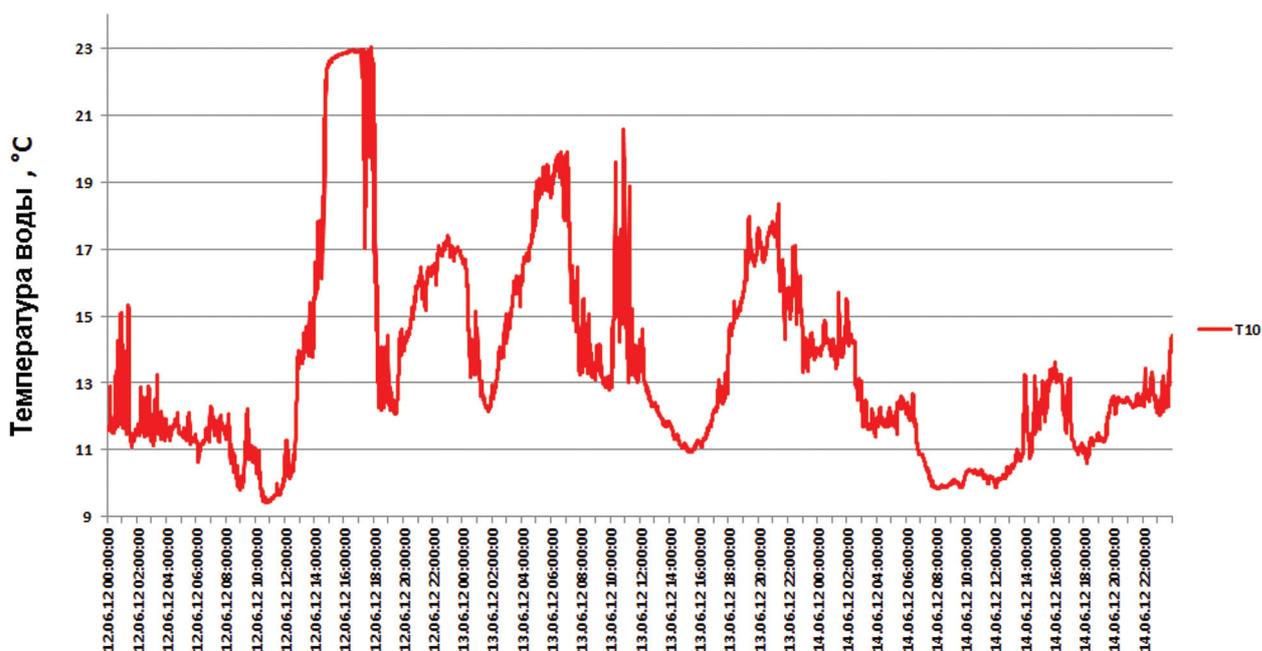


Рис. 9. Временной график изменения температуры воды за 12,13 и 14 июня 2012 г. на горизонте 10 м

Всего за две серии измерений (июнь и сентябрь 2012 г.) было зафиксировано шесть случаев проявления ВВ по данным акустической съемки, три из них были также идентифицированы и на РЛИ. Следует отметить, что их выявление на РЛИ стало возможным только благодаря высокому пространственному разрешению данных TerraSAR-X и Radarsat-2.

Записи датчиков в цепочке термисторов показали, что при прохождении цугов ВВ амплитуда колебаний температуры на горизонтах 10 и 15 м в некоторых случаях достигала 10°C (рис. 9). Практически все случаи обнаружения ВВ совпадали с моментами прохождения вихрей. Можно сделать вывод о вихревом механизме генерации ВВ.

Заключение

Проведенные в шельфовой зоне северо-восточной части Черного моря в июне и сентябре 2012 г. измерения с помощью ADCP, минизонда SVP и гирлянды термисторов в сочетании с радиолокационной съемкой с высоким пространственным разрешением позволили серьезно продвинуться в вопросе изучения мелкомасштабных гидродинамических процессов в этом районе.

В ходе проведения подспутниковых измерений были зафиксированы многочисленные случаи наличия противотечения, связанные, на наш взгляд, с прохождением мелкомасштабных антициклонических вихрей, и один случай циклонической вихревой структуры. На основании данных ADCP была изучена их трехмерная структура в верхнем квазиоднородном слое. К сожалению, ни один из данных вихрей, за исключением циклонического вихря 13 сентября 2012 г., не имел поверхностных проявлений в виде

закручивающихся сликовых полос на радиолокационных изображениях. Для объяснения этого феномена можно высказать две гипотезы. Первая состоит в том, что во время проведения экспериментов гидрометеорологические условия не способствовали проявлению вихрей за счет сликового механизма на радиолокационных снимках. Однако это не подтверждается, поскольку эксперименты проводились при самых разных условиях, наличие сликов на морской поверхности имелось на большинстве снимков, полученных в момент обнаружения антициклонических вихрей с помощью ADCP. Вторая гипотеза предполагает, что за счет сликового механизма на радиолокационных изображениях проявляются только циклонические вихри (или вихревые диполи), но она требует серьезного теоретического изучения. Антициклонические вихри проявляются либо в виде контрастов в зонах ковергенции–дивергенции течений на РЛИ либо за счет температурных контрастов на ИК-изображениях. Между тем, совместный анализ РЛИ и данных ADCP показал, что практически всегда на границе двух противоположенных течений, т.е. в области смены направления прибрежного течения, вызванной прохождением антициклонического вихря, образуется сликовая полоса.

В результате совместного анализа полученных РЛИ и данных измерений ADCP удалось выявить шесть случаев прохождения в районе эксперимента пакетов внутренних волн. Их амплитуды достигали 8–10 м, а характерная длина волны составляла 90–100 м. Только благодаря использованию спутниковых данных с пространственным разрешением порядка 3 м удалось выявить поверхностные проявления внутренних волн таких масштабов на радиолокационных изображениях.

Работа выполнена в рамках проекта 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 12-05-10045-к.

Радиолокационные данные RADARSAT-2, TerraSAR-X и TanDEM-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. *Басович А.Я., Баханов В.В., Таланов В.И.* Влияние интенсивных внутренних волн на ветровое волнение (кинематическая модель) // Воздействие крупномасштабных внутренних волн на морскую поверхность / Ред. Е.Н. Пелиновский. Горький: ИПФ, 1982. С. 8–30.
2. *Гинзбург А.И.* Нестационарные вихревые движения в океане // Океанология. 1992. Т. 32. № 6. С. 997–1004.
3. *Голицын Г.С.* О природе спиральных вихрей на поверхности морей и океанов // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48. № 3. С. 391–395.

4. Горшков К.А., Долина И.С., Соустова И.А. Троицкая Ю.И. Модуляция коротких ветровых волн в присутствии интенсивных внутренних волн. Эффект модуляции инкремента // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2003. Т. 39. № 5. С. 661–672.
5. 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.
6. Иванов В.А., Серебряный А.Н. Частотные спектры короткопериодных внутренних волн в бесприливном море // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1982. Т. 18. № 6. С. 683–685.
7. Иванов В.А., Серебряный А.Н. Внутренние волны на мелководном шельфе бесприливногo моря // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1983. Т. 19. № 6. С. 661–665.
8. Иванов В.А., Серебряный А.Н. Короткопериодные внутренние волны в прибрежной зоне бесприливногo моря // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1985. Т. 21. № 6. С. 648–656.
9. Калашникова 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.
10. Костяной А.Г., Гинзбург А.И., Шеремет Н.А., Лаврова О.Ю., Митягина М.И. Мелкомасштабные вихри Черного моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 1. С. 248–259.
11. Кравцов Ю.А., Кузьмин А.В., Лаврова О.Ю., Митник Л.М., Митягина М.И., Сабинин К.Д., Трохимовский Ю.Г. Поляризационные особенности радиолокационных изображений следов внутренних волн на поверхности океана // Исследование Земли из космоса. 1997. № 6. С. 43–55.
12. Кривошея В.Г., Мокаленко Л.В., Титов В.Б. К вопросу о режиме течений на шельфе у северо-кавказского побережья Черного моря // Океанология. 2004. Т. 44. № 3. С. 358–363.
13. Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Сабинин К.Д. Проявление внутренних волн на морской поверхности в северо-восточной части Черного моря // Исследование Земли из космоса. 2009. № 6. С. 49–55.
14. 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.
15. Митягина М.И., Лаврова О.Ю. Спутниковые наблюдения вихревых и волновых процессов в прибрежной зоне северо-восточной части Черного моря // Исследование Земли из космоса. 2009. № 5. С. 72–79.
16. Митягина М.И., Лаврова О.Ю. Спутниковые наблюдения поверхностных проявлений внутренних волн в морях без приливов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 1. С. 260–272.
17. Ginzburg A.I., Kostyanou A.G., Solov'yev D.M., Stanichny S.V. Satellite monitoring of eddies and jets in the northeastern Black Sea // Mapping sciences and remote sensing. 2001. 38(1). P. 21–35.

18. *Lavrova O.Yu., Sabinin K.D.* Ship wake distortion as indicator of spatial current fine structure // Proc. of SeaSAR 2012 / Ed.: ESA. 2012. V. ESA-SP-709 (CD-ROM), 6 p.
19. *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.
20. *Mityagina M., Lavrova O.* Comparative analysis of internal waves surface manifestations observed by Envisat ASAR in different non-tidal seas // ESA Living Planet Symp. ESA Special Publication SP-686. 2010. 6 p.
21. *Mityagina M.I., Lavrova O.Y., Karimova S.S.* Multi-sensor survey of seasonal variability in coastal eddy and internal wave signatures in the north-eastern Black Sea // International Journal of Remote Sensing. 2010. V. 17. P. 4779–4790.
22. *Munk W., Armi L., Fisher K., Zachariassen F.* Spirals on the sea. Proc. Roy. Soc. 2000. 456A, P. 1217–1280.

Subsatellite observations of small-scale hydrodynamic processes in the northeastern Black Sea

O.Yu. Lavrova¹, A.N. Serebryany^{2,1}, M.I. Mityagina¹, T.Yu. Bocharova¹

¹ *Space Research Institute of RAS, Moscow, Russia*

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

E-mail: olavrova@iki.rssi.ru

Results of experimental work obtained in June and September 2012 on the northeastern Black Sea shelf are presented. Transects from the coast to the shelf edge were conducted using acoustic Doppler current profiler (ADCP) in conjunction with radar imaging of the region of experiment from satellites, Radarsat-2, TerraSAR-X and TanDEM-X and optical imaging by Envisat MERIS and Terra / Aqua MODIS. A large number of anticyclonic and cyclonic small-scale eddies are detected and their characteristics assessed. Special focus is on coastal current reversal events in association with anticyclonic eddies. Joint analysis of radar and ADCP data allowed to detect six internal wave packets occurred in the study region during the measurements. Their amplitudes ranged 8–12 m and the characteristic wavelength was 90–100 m. It is the use of satellite radar data of spatial resolution as high as 3 m that made it possible to reveal surface manifestations of internal waves of such a scale.

Keywords: eddy structures, internal waves, remote sensing, the Black Sea, subsatellite measurements, radar images, Radarsat-2, TerraSAR-X, TanDEM-X.